

RLNC*2021

28 сентября - 30 сентября 2021 г.

Сборник трудов

XXVII Международной научно-технической конференции
«Радиолокация, навигация, связь»,
посвященной
60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова.

Том 1

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Физический факультет

АО «КОНЦЕРН “СОЗВЕЗДИЕ”»

РАДИОЛОКАЦИЯ, НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ

*Сборник трудов
XXVII Международной научно-технической конференции,
посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова
(г. Воронеж, 28 сентября – 30 сентября 2021 г.)*

Т о м 1

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2021

УДК 621.37

ББК 32

P15

Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова (г. Воронеж, 29 сентября – 30 сентября 2021 г.) : в 4 т. / Воронежский государственный университет ; АО «Концерн “Созвездие”». – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2021.

ISBN 978-5-9273-3285-4

Т. 1. – 2021. – 440 с.

ISBN 978-5-9273-3286-1

В сборник вошли материалы XXVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2021). Основной целью конференции является организация взаимодействия научных и научно-технических коллективов для обмена опытом и новыми творческими успехами в области передачи и обработки информации, радиолокации, навигации, современных электронных систем и др. Достижение этой цели способствует внедрению перспективных разработок, имеющих практическое значение для дальнейшего развития промышленности, экономики и научно-технического потенциала России, а также развитию творческого потенциала талантливой молодежи, привлечению ее к решению наиболее актуальных производственных, технических и научных задач.

УДК 621.37

ББК 32

ISBN 978-5-9273-3286-1 (т. 1)
ISBN 978-5-9273-3285-4

© Воронежский государственный университет, 2021
© АО «Концерн “Созвездие”», 2021
© Оформление. Издательский дом ВГУ, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Том 1

Пленарные доклады

ЕДИНСТВО НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ ОСНОВА ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ

В. И. Борисов 1

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОСВЯЗИ

М. Л. Артемов 7

ФРАКТАЛЬНО-СКЕЙЛИНГОВЫЙ МЕТОД, ДРОБНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ И РАЗМЕРНОСТИ КАК ОСНОВА НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

А. А. Потапов 25

Секция 1. Общие проблемы передачи и обработки информации. Цифровая обработка сигналов.

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО КВАЗИРАДИОСИГНАЛА С НЕИЗВЕСТНЫМ ВРЕМЕНЕМ ПРИХОДА

О. Н. Завалишина, Ю. Э. Корчагин, К. В. Смусева, К. Д. Титов, Г. К. Усков 39

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И. Я. Львович, Я. Е. Львович, Ю. П. Преображенский, А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров .. 49

АНАЛИЗ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

В. В. Кулаков, О. М. Лепешкин, О. А. Остроумов, А. Д. Синюк 55

АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА В УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМОЙ СВЯЗИ

М. В. Митрофанов, М. А. Остроумов, О. А. Остроумов, С. Н. Ракицкий, Н. В. Савищенко 62

АНАЛИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. Ю. Живодерников, М. И. Рафальская, А. Ю. Трофимов, Н. В. Трофимова..... 73

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ УЯЗВИМОСТЕЙ

А. В. Веденеев, С. К. Виктор, И. Н. Малышева..... 80

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ НЕИДЕАЛЬНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Д. В. Ле, В. И. Парфенов 85

| | |
|---|-----|
| АСПЕКТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В КОГЕРЕНТНОЙ СИСТЕМЕ РАДИОСВЯЗИ А. Н. Асосков, И. Н. Малышева, Ю. А. Плахотнюк | 94 |
| ВЕРБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАЩИТЫ FTP-СЕРВЕРА ОТ СЕТЕВОЙ РАЗВЕДКИ Т. В. Лебедкина | 98 |
| ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ С НЕОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ ДЛЯ ВОЕННЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ А. В. Леньшин, А. Д. Музыченко..... | 103 |
| ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ О. А. Кудрявцев | 114 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ICMP-ТУННЕЛЯ, СРАВНЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ И СТРУКТУРЫ ТРАФИКА К. А. Батенков, В. Ю. Головачёв, О. В. Казаков, К. А. Климантов..... | 125 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВЛЕНИЯ КАДРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МЕЖДУ АБОНЕНТСКИМИ СТАНЦИЯМИ В СИСТЕМЕ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ А. А. Парфентьев, В. А. Цимбал | 131 |
| МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВОЙСТВ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ И МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ВИТЕРБИ А. Б. Сизоненко, Ю. Ю. Синицын | 138 |
| МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ OFDM СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ РАДИОМОНИТОРИНГА А. Н. Абакумов, И. В. Житков, Р. Р. Саниев..... | 144 |
| МЕТОДИКА КОНФИГУРИРОВАНИЯ ПОРТА I/O СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПРИМЕРЕ GDM-78341 М. В. Хорошайлова, А. В. Чернышов..... | 152 |
| МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИКС КРИТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ О. А. Кудрявцев | 158 |
| МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ О. А. Кудрявцев | 168 |

III

| | |
|---|-----|
| МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ МЯГКИХ РЕШЕНИЙ СИМВОЛОВ В ГАУССОВСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ С. В. Шахтанов..... | 178 |
| НОВЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ Ю. С. Ионенков..... | 186 |
| ОДНОКАНАЛЬНЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА И. И. Малышев, А. И. Мордовин, В. И. Шестопалов | 195 |
| ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ВИДЕОИМПУЛЬСА А. В. Зюльков | 205 |
| ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕРМИНАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ А. З. Пономарев, В. В. Самойлов | 210 |
| ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ УПРЕЖДАЮЩЕГО ВЫПОЛНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАДАЧ СИСТЕМОЙ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МЕР ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СРЕДСТВАМ РАЗВЕДКИ Е. В. Кравцов, А. Ю. Кузьмин, А. В. Леньшин, И. А. Сидоренко..... | 225 |
| ОЦЕНКА РЕАЛИЗАЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ О. А. Кудрявцев | 235 |
| ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ КАК ПРЕДМЕТ РАССМОТРЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА ЭЛЕКТРОСВЯЗИ В РАЗРЕЗЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ И. А. Байгутлина, А. Ю. Замятин, П. А. Замятин | 248 |
| РАЗРАБОТКА SC И SCL ДЕКОДЕРОВ НА БАЗЕ FPGA ARTIX-7 А. О. Горюнов, Е. К. Карпухина, Н. Ю. Чилихин..... | 258 |
| СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ Д. А. Кравчук, А. А. Панченко | 266 |
| ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ К СОСТОЯНИЮ СРЕДЫ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТОВ НА ИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ Н. С. Береснев, В. Н. Поветко, К. В. Пядухова, П. С. Сенин..... | 272 |
| ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАГОРИЗОНТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ СВЧ ДИАПАЗОНА О. К. Каменцев, А. В. Киселев, Е. И. Рубцов..... | 279 |

Секция 2. Распознавание и обработка изображений.

| | |
|---|-----|
| ВЫДЕЛЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ НА СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЯХ В. Ю. Волков | 289 |
| ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АППЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННО-СТАТИСТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА Д. Ю. Дронов, Е. А. Самойлин, К. Е. Скугров, С. В. Татаринцев | 298 |
| ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ М. С. Германчук, М. Г. Козлова, Л. И. Руденко..... | 308 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ А. А. Васильченко, И. В. Керимов, М. Э. Магарамов | 320 |
| МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ БАНКА ДАННЫХ ДАЛЬНОСТНО-ДОПЛЕРОВСКИХ ПОРТРЕТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ЦЕЛЬЮ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ В. А. Кузнецов, Н. А. Меньших, С. О. Митичкин..... | 327 |
| ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАБОРА ДАННЫХ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В. М. Брюханов, А. В. Бугурусланов, Е. С. Дмитриев, А. А. Жидков | 336 |
| ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ Н. А. Андриянов..... | 344 |
| ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО МЕТОДА ПРОНИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ УРЫСОНА В. А. Белозуб, В. А. Лукьяненко | 351 |
| РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ СВЕРТОЧНЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ А. А. Васильченко, И. В. Керимов, А. С. Мельников..... | 357 |

**Секция 3. Системы связи и передачи дискретных сообщений. Мобильная связь.
Спутниковые системы связи и передачи информации.**

| | |
|--|-----|
| АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ПОБОЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИНТЕЗАТОРОВ С ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ А. В. Леньшин, В. Н. Тихомиров, Е. В. Шаталов..... | 362 |
| АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КОДИРОВАНИЯ СИГНАЛА И ОРТОГОНАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ Э. В. Аведян, И. А. Галкин, Д. А. Иванов | 370 |

| | |
|--|-----|
| АНАЛИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ А. Ю. Живодерников, М. И. Рафальская, А. Ю. Трофимов, Н. В. Трофимова..... | 375 |
| БИОМЕТРИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАНИЕ С ДВОЙНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ Э. В. Аведян, Д. А. Иванов, В. Б. Сычужников..... | 382 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПАРНЫХ СЕТЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТАНДАРТАХ IEEE 802.15.3D-2017 И IEEE 802.15.3E-2017 О. В. Бажанова, Е. Э. Головацкая, Ю. Г. Петров, В. А. Степкин, К. Д. Титов..... | 387 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ОСНОД В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ А. А. Мухопадов, А. М. Танвель..... | 400 |
| К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЁННОЙ МОДЕЛИ СЕТИ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА С. П. Гагарин | 410 |

Том 2

Секция 3. Системы связи и передачи дискретных сообщений. Мобильная связь. Спутниковые системы связи и передачи информации.

| | |
|--|----|
| МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК, ТИПА SQL-INJECTION НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА Э. В. Аведян, С. А. Багрецов, А. С. Фроленков..... | 1 |
| МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТИВНИКА Н. Б. Ачкасов, А. С. Фроленков, К. В. Яцук | 7 |
| МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В СЕТЯХ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В. Е.トイскин..... | 21 |
| ОБ АКТУАЛЬНОСТИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СРЕДСТВ И СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗИ М. А. Белицкий, В. Н. Поветко | 27 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОТОКОЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТАНДАРТА MIL-STD-188-141B В ДВУХТОЧЕЧНОМ ПАКЕТНОМ КОРОТКОВОЛНОВОМ СОЕДИНЕНИИ В. Б. Девяткиров, П. К. Калач, Д. А. Киреев, М. Ю. Попов, Р. В. Попов..... | 32 |

| | |
|--|-----|
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТОДОМ РЕКУРСИВНОГО ПОДБОРА | |
| М. А. Буранова, В. Г. Карташевский | 43 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ДОВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПО ВЫСОКОСКОРОСТНОМУ КОРОТКОВОЛНОВОМУ ПРОТОКОЛУ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТАНДАРТА MIL-STD-188-141В | |
| П. К. Калач, Д. А. Киреев, М. Ю. Попов, Р. В. Попов, О. Е. Слободсков | 53 |
| ОПТИМАЛЬНЫЙ НЕКОГЕРЕНТНЫЙ ПРИЕМНИК ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА | |
| М. О. Лихоманов, А. Р. Рюмшин, Г. А. Сенюков, И. А. Сидоренко | 68 |
| ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ И РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ МАНЕВРЕННОГО БАЗИРОВАНИЯ | |
| Е. П. Кайдаш, И. С. Назмутдинов | 76 |
| ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ | |
| Д. В. Пужкин, А. С. Щеголеватых | 81 |
| ПЕРСПЕКТИВНАЯ БАЗОВАЯ СТАНЦИЯ СОТОВОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛИНЗЫ РОТМАНА | |
| А. А. Болкунов, Л. А. Овчаренко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, И. В. Попов, Ф. С. Сафонов, С. М. Федоров | 90 |
| ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МАРШРУТИЗАЦИИ В ПАКЕТНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ | |
| А. В. Писной | 98 |
| ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ СИСТЕМОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ | |
| Д. А. Иванов, В. Б. Сычужников, А. С. Фроленков | 106 |
| СОЗДАНИЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ТЕРМИНАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ ПО ПРОГРАММЕ «СФЕРА» | |
| И. А. Байгутлина, А. Ю. Дыбля, П. А. Замятин, Е. Ф. Лядова | 116 |
| СОЗДАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ | |
| А. Б. Давыдов, А. Ю. Дыбля, Е. Ф. Лядова | 130 |
| СПОСОБ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ ОТ ТЕХНИЧЕСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ РАЗВЕДКИ | |
| О. М. Лепешкин, А. С. Пермяков | 143 |

СПОСОБ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ СВЯЗИ МЕЖДУ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ И РАДИОЦЕНТРАМИ

А. В. Кейстович, М. А. Кириллов 148

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С НАПРАВЛЕННЫМИ АНТЕННАМИ

Л. И. Аверина, А. Е. Лимарев, Д. Ю. Чаркин 158

Секция 4. Тепловые, лазерно-оптические системы наблюдения и связи.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КРОВИ

Д. А. Кравчук..... 171

Секция 5. Радиолокация. Радиолокационные системы с синтезированной апертурой (РСА). Авиационно-космические радиоэлектронные системы.

АДАПТИВНЫЙ СПОСОБ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОГО НАКОПЛЕНИЯ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ПРОТЯЖЕННОЙ ПО ДАЛЬНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ

К. В. Ле 176

АЛГОРИТМ РАБОТЫ УГЛОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА РАДИОЛОКАТОРА СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ИМИТИРУЮЩЕЙ И МАСКИРУЮЩЕЙ ПОМЕХИ

И. В. Чигирь..... 196

АНАЛИЗ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ROOT-MUSIC

Д. Ю. Мохорт, Д. А. Музаров, Т. И. Тагаев..... 201

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ESPRIT ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗРАШЕНИЯ ДВУХ САМОЛЕТОВ, РАЗНЕСЕННЫХ НА МАЛОЕ УГЛОВОЕ РАССТОЯНИЕ, В АЭРОПОРТУ

Д. Ю. Мохорт, Д. А. Музаров, Т. И. Тагаев..... 206

ВЫБОР ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ ЗОНДИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ БОРТОВОГО РАДИОЛОКАТОРА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РАСКРЫТИЕ «СЛЕПЫХ» ЗОН ПО ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ

М. В. Свинарский, А. С. Храменков, С. Н. Ярмолик..... 213

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СТАНЦИИ

М. С. Таратынко, И. А. Титов, В. О. Шатилов, А. В. Шляхов..... 220

ДАЛЬНОМЕР С НЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ СИГНАЛОМ И КОНТУРОМ ФАПЧ В КАЧЕСТВЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ

А. А. Монаков, А. А. Тарасенков..... 226

| | |
|---|-----|
| ДВУХДИАПАЗОННАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА АФАР РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ РАБОТЫ В Х- И Л-ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ В. В. Задорожный, Н. И. Чиков | 236 |
| ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ И НАКАПЛИВАЮЩАЯСЯ ВЕРОЯТНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ В. М. Артюшенко, В. И. Воловач..... | 241 |
| ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОДИАПАЗОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ Е. А. Аликулов, В. А. Кузнецов, А. А. Потапов..... | 251 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕЛЕНГАЦИИ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ЦЕЛЕЙ АЛГОРИТМОМ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ MUSIC Н. А. Венедиктов, А. К. Ермаков, Н. В. Поваренкин..... | 258 |
| К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ПРИЕМНОМ УСТРОЙСТВЕ РЛС ЗГО И. А. Глинкин, А. А. Кашеваров, С. В. Литвинов..... | 268 |
| МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ УРОВНЯ АВТОНОМНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОРАБЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ С. А. Мочалов, А. В. Тихонов | 276 |
| МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ФИЛЬР ГАРМОНИК Д. А. Будаев, С. Н. Власенко, В. В. Задорожный, М. М. Мусаев | 285 |
| МОДЕЛЬ СЛЕДЯЩЕГО КОЛЬЦА РАДИОВЫСОТОМЕРА С НЕПРЕРЫВНЫМ СИГНАЛОМ М. Ю. Нестеров | 290 |
| МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБЗОРА ЭХОЛОКАТОРА В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ Ю. В. Бакшева | 297 |
| ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОТРАЖЕНИИ РАДИОВОЛНЫ ОТ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ В РАМКАХ МОДЕЛИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ Н. Е. Гутерман, А. В. Данилова, М. Л. Минина | 304 |
| ОБОСНОВАНИЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ЦЕЛЕЙ Д. Ю. Мохорт, Д. А. Музафаров, Т. И. Тагаев..... | 312 |

| | |
|--|-----|
| ОТЛИЧИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА В БИСТАТИЧЕСКОЙ И ОДНОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ | |
| А. В. Толмачёв..... | 317 |
| | |
| ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО КОГЕРЕНТНЫМ СЛОЖЕНИЕМ | |
| А. А. Березин, А. В. Морозов, Д. А. Мусин, Д. В. Мутрисков | 329 |
| | |
| ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДСТРОЙКИ К ГЕОФИЗИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ЗАГОРИЗОНТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ | |
| С. В. Литвинов..... | 333 |
| | |
| РАЗНОСТНО-РАДИАЛЬНО-СКОРОСТНОЙ СПОСОБ КООРДИНАТОМЕТРИИ АБОНЕНТСКОГО ТЕРМИНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕФЕРЕНЦ-ЭЛЛИПСОИДА | |
| А. А. Ануфриев, В. В. Севидов, П. М. Чиркин, В. А. Шипунов..... | 342 |
| | |
| СИНТЕЗ АЛГОРИТМА МЕЖОБЗОРНОГО НАКОПЛЕНИЯ НА ФОНЕ НЕГАУССОВСКИХ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ | |
| В. А. Белокуров | 351 |
| | |
| СПОСОБ СОПОСТАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПАССИВНЫХ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РЛС РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ | |
| А. Г. Охрименко | 357 |
| | |
| СПОСОБЫ КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ | |
| А. А. Березин, А. В. Морозов, Д. А. Мусин, Д. В. Мутрисков | 364 |
| | |
| УЧЕБНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ИССЛЕДОВАНИЯ АНТЕНН БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ | |
| А. В. Володько, Д. А. Рыбников, А. И. Сукачев, Е. А. Сукачева | 369 |
| | |
| Секция 6. Навигация. Позиционирование. Морская локация и навигация. Гидроакустика. Системы наведения. | |
| | |
| ПОДХОДЫ К ЛОКАЦИИ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ | |
| В. К. Ключко..... | 376 |
| | |
| ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ПОИСК ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ МЕШАЮЩЕГО СУДОХОДСТВА | |
| В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов..... | 386 |

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СТАЦИОНАРНОГО ИСТОЧНИКА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО АКУСТИЧЕСКОЙ ТРАССЕ

Е. С. Казначеева, В. М. Кузькин, С. А. Переселков, Д. Ю. Просовецкий, П. В. Рыбянец 402

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДАЛЬНЕЙ НАВИГАЦИИ
А. В. Коровин 410

Том 3

Секция 6. Навигация. Позиционирование. Морская локация и навигация.

Гидроакустика. Системы наведения.

МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА ПО СИГНАЛАМ ГНСС, ПРИНИМАЕМЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫМ РАДИОПРИЕМНИКОМ С АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

А. Ю. Востров 1

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИМИТИРУЮЩИЕ ПОМЕХИ В НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

С. А. Истомин, П. Д. Коратаев, Ю. В. Кузменко, В. В. Неровный, П. С. Облов 18

О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕРЕ ИНФОРМАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А. А. Васильченко, В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад, В. М. Орловский 24

ОДНОПОЗИЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСТАНЦИИ ДО ОБЪЕКТА В ПАССИВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ЛОКАТОРА

Ю. В. Петров 34

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНИКОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС, РАБОТАЮЩЕЙ С СИГНАЛАМИ ПОДСИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДОПОЛНЕНИЯ

М. В. Авдеев, Н. В. Дубинин, Д. В. Шатов 39

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ РАДИОМАЯКОВ НАВИГАЦИОННО-ПОСАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА

П. И. Костенко, И. А. Пилипенко, О. А. Сафарьян 46

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИООПТИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ-ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В СУДОХОДСТВЕ
Е. Л. Шошин 53

| | |
|--|-----|
| ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ НАВИГАЦИИ VOR/DME ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ НОВОСИБИРСКОГО ЦЕНТРА ОВД К. Г. Мордвинова, Е. А. Рубцов | 63 |
| РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ П. Д. Коратаев, Н. А. Неровная, В. В. Неровный, В. В. Цитиридис, С. А. Черкасов..... | 74 |
| СПОСОБ НАВИГАЦИИ ПО ВЕКТОРНУМУ ПОЛЮ СИЛ КОРИОЛИСА ЗЕМЛИ В. А. Шульгин | 81 |
| СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ М. В. Авдеев, Д. А. Беляев, Е. С. Глухов | 88 |
| СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА ОЦЕНКИ ДИСПЕРСИИ ПОМЕХИ ОБНАРУЖИТЕЛЯ МЕАНДРОВЫХ СИГНАЛОВ ГНСС П. Д. Коратаев, В. В. Неровный, В. В. Филоненко | 95 |
| ФОРМИРОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА В ОКЕАНИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ Е. С. Казначеева, В. М. Кузькин, Ю. В. Матвиенко, С. А. Переселков, Д. Ю. Просовецкий..... | 103 |
| Секция 7. Сверхширокополосные радиоэлектронные системы. Теория фракталов. | |
| АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РЛС ПРИ НАЛИЧИИ ШУМОВЫХ ПОМЕХ Н. Н. Ахмад, П. А. Трифонов | 113 |
| АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ А. М. Бобрешов, А. А. Кононов, Ю. Э. Корчагин, К. В. Смусева, Г. К. Усков | 125 |
| ВЛИЯНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ Н. Н. Ахмад, П. А. Трифонов | 132 |
| К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А. А. ПОТАПОВА Оргкомитет конференции «Радиолокация, навигация, связь» | 141 |
| ПРИНЦИПЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ ДОМ» А. М. Бобрешов, А. С. Величкина..... | 148 |

Секция 8. Электродинамика, распространение радиоволн, антенны. Цифровые антенные решетки и технология ММО.

| | |
|--|-----|
| АЛГОРИТМ РАБОТЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО АНТЕННОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕННОГО ТИПА | |
| И. Ю. Хлопушин, А. А. Цветнов..... | 155 |
| | |
| АНТЕННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АППАРАТУРЫ НАВЕДЕНИЯ РАКЕТ И ПОДКАЛИБЕРНЫХ СНАРЯДОВ НА ОСНОВЕ АНТЕНН ВИВАЛЬДИ | |
| А. В. Негробов, В. В. Негробов, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин..... | 161 |
| | |
| ВЛИЯНИЕ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО ПЕРЕХОДА НА ОТРАЖАЮЩИЕ И ПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ | |
| С. П. Арсеничев, А. С. Мазинов, В. Б. Орленсон, И. Ш. Фитаев | 171 |
| | |
| ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ЗАЗОРА НА ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОНКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВИБРАТОРА | |
| Д. С. Клюев, А. М. Нещерет, Ю. В. Соколова..... | 178 |
| | |
| ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КЛЮЧЕЙ В ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ АНТЕННАХ | |
| С. В. Малюкова | 181 |
| | |
| ВЫЧИСЛЕНИЕ КРАЕВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ИДЕАЛЬНО-ПРОВОДЯЩЕГО КЛИНА НИТЬЮ ТОКА | |
| В. В. Ахияров | 186 |
| | |
| ВЫЧИСЛЕНИЕ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ВБЛИЗИ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ ТРОПОСФЕРНОГО РАССЕЯНИЯ | |
| В. В. Ахияров | 193 |
| | |
| ИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ С ПОДЛОЖКАМИ ИЗ ПЛАНАРНОГО КИРАЛЬНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ S-ЭЛЕМЕНТОВ И ГАММАДИОНОВ | |
| А. М. Нещерет | 200 |
| | |
| ИЗЛУЧЕНИЕ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА ЧЕРЕЗ НЕОДНОРОДНУЮ ТЕПЛОЗАЩИТУ | |
| И. В. Мажник, В. Ф. Михайлов | 205 |
| | |
| ИЗМЕРЕНИЕ АПЕРТУРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АНТЕНН В ЗОНЕ БЛИЖНЕГО ИЗЛУЧЕННОГО ПОЛЯ | |
| Ю. Е. Седельников, Т. Р. Шагвалиев..... | 213 |
| | |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА В РОЛИ ВОЛНОВОДНОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ | |
| Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Федоров..... | 219 |

| | |
|---|-----|
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ С ЕМКОСТНОЙ ВСТАВКОЙ А. М. Бобрешов, Д. П. Кондратьев, С. Е. Нескородов, Г. К. Усков | 228 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С НАПРАВЛЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПО АЗИМУТУ И УГЛУ МЕСТА В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОВЧ-СИГНАЛОВ Ю. Б. Нечаев, И. В. Пешков..... | 233 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА П-ВОЛНОВОДАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ Г. Ф. Заргано, А. О. Пелевин | 241 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕМ-РУПОРНЫХ АНТЕНН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРАХ АПЕРТУРЫ А. М. Бобрешов, А. И. Пикус, Н. С. Сбитнев, К. В. Смусева, Г. К. Усков..... | 249 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛОЙ АНТЕННЫ УКВ ДИАПАЗОНА, В СОСТАВЕ КОТОРОЙ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ФЕРРИТ В. В. Блинов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин | 254 |
| ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ЭКРАНОВ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА В ЦЕЛЯХ УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗВЯЗКИ МЕЖДУ ВИБРАТОРАМИ М. А. Бузова, А. Д. Красильников, Н. А. Носов, А. В. Шляхов | 261 |
| КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ РАДИОСВЯЗИ А. Ю. Лафицкий, А. И. Поздняков..... | 264 |
| МЕТОД МАТРИЧНОГО СИНТЕЗА ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С КОМПЕНСАЦИОННЫМ КАНАЛОМ А. В. Литвинов, С. Е. Мищенко, А. С. Помысов, А. К. Цымбалистова, В. Н. Шацкий..... | 276 |
| МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА ПЛОСКОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПО АМПЛИТУДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ В ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННАХ В. Н. Атрохов, А. В. Литвинов, С. Е. Мищенко, В. В. Шацкий | 287 |
| МЕТОД МУЛЬТИФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ Д. А. Веденькин, А. Р. Сагдиева | 299 |
| МЕТОДИКА РАСЧЁТА КАЛИБРОВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОЛЬЦЕВОЙ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ И АДАПТАЦИЯ ИЗДЕЛИЯ К ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ Е. В. Аверина, Н. О. Левенков, Ж. В. Шапошникова | 304 |

| | |
|--|-----|
| МЕТОДИКА РАСЧЁТА ОСЛАБЛЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОТЯЖЁННОМ ЭКРАНИРОВАННОМ ТОННЕЛЕ | |
| А. Л. Бузов, Ю. И. Кольчугин, А. Д. Красильников, А. И. Моторко | 312 |
| МИНИМИЗАЦИЯ ЭПР САМОЛЕТА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ | |
| Е. А. Ищенко, С. М. Фёдоров | 317 |
| О ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СВЕРХКОРОТКОГО РАДИОИМПУЛЬСА, ДЕФОРМИРОВАННОГО ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ ТРАССЫ | |
| Г. М. Стрелков, Ю. С. Худышев | 327 |
| О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАИЯ ПРОГРАММЫ HFSS ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫПУСКНОЙ САМОЛЕТНОЙ АНТЕННЫ | |
| Т. В. Митрофанова, В. А. Фролова | 335 |
| ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В АНТЕННЕ МОЩНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ ИМПУЛЬСОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАКОНАМИ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ | |
| А. А. Волков | 339 |
| ОЦЕНКА ЧИСЛА ФРАГМЕНТОВ УПРАВЛЯЕМОГО ПАССИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ | |
| А. С. Ряховский, Н. А. Синицын | 347 |
| ПОВЫШЕНИЕ СКРЫТНОСТИ РАДИОСВЯЗИ В VHF ДИАПАЗОНЕ ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ АНТЕНН | |
| И. А. Баранников, Е. А. Ищенко, С. М. Федоров | 352 |
| ПОДЗЕМНАЯ РЕЗОНАТОРНО-ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА УЛЬТРАКОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН | |
| А. В. Иванов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин | 359 |
| ПОЛНОАЗИМУТАЛЬНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ | |
| Д. С. Алиев, А. В. Иванов, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Е. С. Чесноков | 367 |
| ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ КВ РАДИОЛИНИЙ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ | |
| Ф. Х. Киеу, В. Д. Нгуен, Ж. М. Нгуен | 373 |
| ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ В РАДИОСВЯЗИ | |
| Б. М. Попов | 380 |

| | |
|---|-----|
| РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РАДИОИМПУЛЬСА С НЕСУЩЕЙ, ОПИСЫВАЕМОЙ ТЕНТ-ОТОБРАЖЕНИЕМ, В РЕЗОНАНСНО-ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ | |
| В. В. Лепехин, Г. М. Стрелков | 388 |
| РАСЧЕТ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ АПЕРТУРНОЙ АНТЕННЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ | |
| В. Е. Копытин, Н. А. Лысенко, С. П. Скулкин, Г. К. Усков..... | 398 |
| РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ РЕФЛЕКТОР НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА | |
| Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Федоров..... | 406 |
| РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА РАМОЧНОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ | |
| С. А. Коршунов | 412 |

| | |
|--|-----|
| СКАНИРУЮЩИЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ РЕТРАНСЛЯТОРОВ СВЯЗИ НА ВЫСОКОПОДНЯТЫХ АЭРОСТАТНЫХ ПЛАТФОРМАХ | |
| Д. Ю. Крюков, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, И. В. Попов, В. И. Штефан | 416 |

Том 4

Секция 8. Электродинамика, распространение радиоволн, антенны. Цифровые антенные решетки и технология МИМО.

| | |
|---|----|
| СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПАКЕТОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ | |
| А. В. Богословский, Д. Н. Борисов, С. Н. Разиньков, О. Э. Разинькова | 1 |
| СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЁТА РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ВОДЯНЫХ СФЕРОИДАХ | |
| А. А. Афонин, В. А. Тимофеев..... | 13 |
| ТОЧНОСТЬ ОДНОПОЗИЦИОННОГО МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ НА КВ ТРАССАХ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ | |
| Р. К. Борлаков, Г. Г. Вертоградов | 20 |
| УМЕНЬШЕНИЕ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ПОДЗЕМНОЙ АНТЕННЫ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ | |
| А. В. Иванов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин..... | 34 |
| ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОРАЗВЕРТЫВАЕМЫХ АНТЕНН ДКМВ ДИАПАЗОНА С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ | |
| П. И. Бондарь, А. В. Карлов, М. А. Минкин, К. И. Пестовский | 45 |

| | |
|---|-----|
| ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ А. Д. Кононов, А. А. Кононов, В. К. Маршаков..... | 51 |
| ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕШЕТОК ВИБРАТОРОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ А. В. Богословский, С. Н. Разиньков, Ю. В. Сторожук, А. В. Тимошенко..... | 61 |
| ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ПОДВЕСНОЙ СИСТЕМЫ ПАРАШЮТА ПРИ ЕЕ ВОЗБУЖДЕНИИ ВИДЕОИМПУЛЬСАМИ А. А. Волков, П. А. Трифонов | 68 |
| Секция 9. Помехи. Электромагнитная совместимость. Радио - и оптоэлектронная разведка и подавление. | |
| ВЛИЯНИЕ КОРРЕЛИРОВАННЫХ АДДИТИВНЫХ НЕГАУССОВСКИХ ПОМЕХ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА В. М. Артюшенко, В. И. Воловач..... | 76 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАЗИПРАВДОПОДОБНОГО АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО КВАЗИРАДИОСИГНАЛА Е. Э. Головацкая, Ю. Э. Корчагин, К. Д. Титов..... | 86 |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СИМВОЛЬНЫХ ОШИБОК ПРИЕМА 8-PSK СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ С ФАЗОВОЙ И КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ А. В. Крисилов, В. В. Машин | 102 |
| ПАССИВНЫЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ УТЕЧКИ ПО КАНАЛУ ПОБОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С. А. Вызуллин, Д. А. Каликинцева | 107 |
| ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВАМ СИСТЕМ ОПОЗНАВАНИЯ В. В. Лебедев, А. В. Леньшин..... | 115 |
| ПОСТРОЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ В УСЛОВИЯХ РАЗВЁРТЫВАНИЯ НОВЫХ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК А. Б. Давыдов, А. Ю. Дыбля, П. А. Замятин, Е. Ф. Лядова..... | 124 |
| СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ ПОДХОДОВ К ФИЛЬТРАЦИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА Э. А. Кирсанов..... | 134 |

| | |
|---|-----|
| ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ. ИХ РАЗВИТИЕ В БУДУЩЕМ Ю. Е. Седельников, Д. Е. Шаронов | 140 |
| Секция 10. Радиотехнические устройства. Автоматизированные измерительные комплексы. Электроника. Техника СВЧ. | |
| | |
| ВАКУУМ-ПЛОТНОЕ ОКНО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ СВЧ НА ОСНОВЕ СТУПЕНЧАТОГО КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА Б. М. Кац, К. А. Саяпин..... | 145 |
| | |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ СЖАТИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев, В. А. Степкин, К. Д. Титов, Г. К. Усков..... | 150 |
| | |
| К ОБЕСПЕЧЕНИЮ НЕПРЕРЫВНОСТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ Э. С. Назарова, М. В. Родин..... | 158 |
| | |
| КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА АВИАЦИОННОГО ВИРТУАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОЛИГОНА А. Р. Бестугин, И. А. Киршина, В. П. Рачков, А. Д. Филин..... | 164 |
| | |
| МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА А. М. Бобрешов, А. Г. Кошелев, Е. В. Лаптиёв, А. Ю. Харина..... | 178 |
| | |
| МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОТЕРЬ В МАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТАХ Н. Ю. Веретенников, А. А. Моисеенко | 185 |
| | |
| НЕПЛАНАРНЫЕ СВЧ БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЖИДКИХ СРЕД Т. М. Ишкаев, А. Р. Насыбуллин, Р. В. Фархутдинов | 194 |
| | |
| ОБНАРУЖЕНИЕ И АНАЛИЗ СЕТЕЙ BLUETOOTH А. Б. Токарев, И. С. Фаустов | 199 |
| | |
| ОПТИМИЗАЦИЯ ИТЕРАЦИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЦИКЛА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА МАТЕРИАЛА К. М. Зейде..... | 207 |
| | |
| ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОГЕНЕРАТОРОВ-ДАТЧИКОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И ВКЛЮЧЁННЫМИ ПОСЛЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСНЫМИ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКАМИ В. А. Головков | 214 |

| | |
|---|-----|
| ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ С. В. Рудый, А. Д. Старченко, В. В. Харченко, Д. В. Харченко | 225 |
| ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВКЛЮЧЁННЫХ ПЕРЕД НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТЬЮ КОМПЛЕКСНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ С ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ | |
| В. А. Головков | 232 |
| ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВКЛЮЧЁННЫХ ПЕРЕД НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТЬЮ РЕАКТИВНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПО КРИТЕРИЮ ОБЕСПЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ С ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ | |
| А. А. Головков, В. А. Головков | 244 |
| ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВКЛЮЧЁННЫХ ПЕРЕД НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТЬЮ РЕЗИСТИВНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПО КРИТЕРИЮ ОБЕСПЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ С ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ | |
| А. А. Головков, В. А. Головков | 252 |
| ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВКЛЮЧЁННЫХ ПОСЛЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ С ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ | |
| В. А. Головков | 265 |
| ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВКЛЮЧЁННЫХ ПОСЛЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ РЕАКТИВНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПО КРИТЕРИЮ ОБЕСПЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ С ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ | |
| А. А. Головков, В. А. Головков | 277 |
| ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВКЛЮЧЁННЫХ ПОСЛЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ РЕЗИСТИВНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПО КРИТЕРИЮ ОБЕСПЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ С ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ | |
| А. А. Головков, В. А. Головков | 288 |
| ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В КАНАЛАХ РАДИОТЕЛЕМЕТРИИ А. А. Васильченко, И. В. Керимов, Д. А. Ковальков | |
| | 301 |
| ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫСОТОМЕРА МАЛЫХ ВЫСОТ С ДВОЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ | |
| А. Ф. Васильев, В. Д. Захарченко | 307 |

РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ КАЛИБРОВКИ КОМПЛЕКСА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭМП НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов, М. А. Ромашенко, И. В. Свиридова, А. В. Суворин 314

СПОСОБЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

С. В. Власенков, И. С. Коренев 320

СТРОБОСКОПИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ОПОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

О. В. Пак 327

ТИПЫ КОННЕКТОРОВ И МЕТОД СОГЛАСОВАНИЯ КОАКСИАЛЬНО-ПОЛОСКОВОГО ПЕРЕХОДА

О. Т. Драк 336

Секция 11. Радиотехнический мониторинг Земли.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОБРАБОТКЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

А. А. Петроченко, К. Н. Чугай 344

Секция 12. Интеллектуальные системы управления и связи.

Когнитивное радио.

КЛАССИФИКАЦИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. Н. Голубинский, М. Н. Данильченко, А. Б. Муравник, Н. М. Рябков 349

МЕТОДИКА СИНТЕЗА КОМПЛЕКСА СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ТЕНЗОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ К ВИДУ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СХЕМ

К. В. Никульшин, М. В. Павловский, А. С. Рыжков 357

МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ГОДОВОГО ПЛАНА ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА ОБРАЗЦОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

М. Д. Михайлов, К. В. Никульшин, М. В. Павловский 375

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА ИНФОРМАЦИОННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

В. О. Ключников, П. В. Лебедев, С. М. Одоевский 389

О ТЕХНОЛОГИЯХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КОГНИТИВНОМ РАДИО

М. А. Белицкий, А. Б. Муравник, В. Н. Поветко, К. В. Пядухова, П. С. Сенин 394

ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ
МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
В. С. Артамонов, А. Н. Буренин..... 400

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В ЗАДАЧАХ ЧАСТОТНО-
ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ
Е. Н. Зуев..... 407

ЕДИНСТВО НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ – ОСНОВА ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ

В. И. Борисов

АО «Концерн «Созвездие» Воронеж, Россия

Аннотация. Проведен анализ основных направлений развития науки и инновационных технологий, которые могут оказать существенное влияние на развитие техники или содействовать появлению новых технических возможностей в конфликтных ситуациях. Проведена оценка развития автоматизированных систем управления при переходе от платформоцентрического управления к сетевоцентрическому. Показана целесообразность перехода от линейной экономики к циклической (программно-определенное радио, аддитивные технологии и т.д.) в целях экономии материалов при производстве.

Ключевые слова: сетевоцентризм, синергетический эффект, когнитивное радио, программно-определенное радио (ПОР), искусственный интеллект.

THE UNITY OF SCIENCE, EDUCATION AND INDUSTRY IS THE BASIS FOR THE INNOVATIVE DEVELOPMENT OF THE ECONOMY

V. I. Borisov

JSC Concern «Sozvezdie» Voronezh, Russian Federation

Abstract. Analysis of scientific and innovation technologies, which may have a significant impact on development or facilitate the emergence of new opportunities in conflict situations, was conducted. Assessment of the automated control systems development in the transition from platform-centric to network-centric control was led. Advisability of the transition from linear to cyclical economy (software-defined radio, additive technologies, etc.) to save materials in productions is presented.

Keywords: network centric, synergetic effect, cognitive radio, software-defined radio (SDR), artificial intelligence.

1. ВВЕДЕНИЕ

Инновационное развитие России – это почти двухсотлетняя история становления и развития русской инженерной школы и системы инженерного образования России. Инженерная школа России в течение двух веков была государственным институтом, обеспечивающим решение насущной государственной проблемы – достижение технического лидерства или как минимум паритета с промышленно-развитыми странами в ключевых военных и гражданских областях. Постановка и решение этой государственной проблемы были возможны только в условиях единого государственного целеполагания для триады: наука-образование-промышленность.

Основы русской инженерной школы были заложены в стенах Корпуса инженеров путей сообщения, созданного Указом Императора Александра I в 1809 году. К 30-м годам XIX века этот институт стал сильнейшим научно-техническим высшим учебным заведением.

В XIX веке в России были открыты: Технологический институт в Санкт-Петербурге, техническое училище в Москве (им. Баумана), технологический институты в Харькове и Томске.

Основным достижением русской инженерной школы, в том числе ключевая идея единства промышленности, науки и образования были положены в основу промышленного развития России (точнее СССР) и после 1917 года. Было характерно сочетание научно-технического и организационного единонаучения генерального конструктора с персональной ответственностью за конечный результат. Объективным критерием успеха деятельности генерального конструктора была работоспособность созданных образцов гражданской и военной техники, а также заводов по ее техническому производству. Генеральный конструктор мог достичь успеха, только при возможности и умении привлекать достижения функциональной и прикладной науки к решению сложных технических проблем.

В развитии человеческого общества выделяются три фазы (цикла) – *аграрная, промышленная и информационная* эпохи, каждая из которых соответствует особым моделям стратегии. Этим эпохам строго соответствуют социологические понятия *премодерн, модерн и постмодерн*. Информационная эпоха – это период постмодерна, который приходится на настоящее время.

Начало информационной эпохи совпало с глобальным кризисом в экономике: потребление превысило ресурсные возможности планеты примерно на 20%.

Группа стран – технологических лидеров, обладающих динамично развивающимся научно-технологическим сектором, а также образованием и промышленностью (рис.1), видят выход из кризиса в переводе своих экономик в 6-й технологический уклад, основу которого составляют информационно-коммуникационные (ИНФО) технологии, биотехнологии (БИО), нанотехнологии (НАНО), когнитивные технологии (КОГНО) и информационные технологии 4-й промышленной революции (Индустря 4.0) [1]. Это умная автоматизация, промышленный интернет вещей, интеллектуализация пространства конфликтных ситуаций, технологии искусственного интеллекта. Таким образом, информация признается наиболее значимым ресурсом, и потребление информации является важнейшим видом человеческой деятельности, а информационная среда, наряду с социальной и экономической, становится новой средой обитания человека.



Рис. 1. Полный инновационный цикл развития

Для развития экономики в рамках 6-го технологического уклада нами разработана технологическая платформа, включающая в себя девять наиболее перспективных технологий (рис.2).



Рис. 2. Технологии 6-го технологического уклада

Принципиально новой парадигмой при построении сложных автоматизированных систем управления и связи, эксплуатируемых на больших площадях, является переход от платформоцентрической системы управления к *сетецентрическому управлению*, к технологии построения самоорганизующихся сетей (Mesh-сетей).

Концепция «сетецентрическое управление – сетецентрические войны» появилась в конце 90-х годов и получила название C5I – Command, Control, Communications, Computers, Intelligence and Combat Systems. Здесь к стандартной концепции C4I добавляется еще один элемент «С» — боевые системы [2]. Таким образом, концепция C5I рассматривает боевые системы как своеобразные устройства, подключенные к единой сети. В зависимости от выбора сетевой архитектуры и её типа, такими устройствами могут быть корабли, самолеты, различные средства поражения, средства управления, связи, разведки и наблюдения, группа военнослужащих или отдельные солдаты, а также комбинации и тех и других. В этом случае возможности боевых формирований определяются не столько индивидуальными тактико-техническими характеристиками, сколько возможностями всей группы подключенных к сети средств как единого целого. В этом, собственно, и проявляется синергический эффект. Военный синергизм – это эффект от совместного действия объединенных в сеть средств военной борьбы, который по совокупному результату превышает сумму тех же средств по отдельности. Именно в сетецентризме военные зарубежных стран видят инновационный инструмент повышения боевых возможностей сокращаемых вооруженных сил и вполне объективно рассчитывают на получение экономических выгод.

Достаточно значимой технологией проектирования сложных автоматизированных систем управления и связи является технология когнитивного радио и технологии искусственного интеллекта. Само понятие «когнитивный» означает свойство сети связи, выражющееся в способности автономно и динамически изменять свою топологию, корректировать эксплуатируемые параметры, перераспределять сетевые ресурсы в соответствии с ранее накопленными знаниями о состоянии сети и политиках обслуживания пользователей.

Когнитивные технологии по реализуемым функциям можно отнести к элементам искусственного интеллекта. В кратком толковании под искусственным интеллектом понимают способность вычислительной машины за счет роста вычислительных возможностей и большей доступности Больших Данных обладать способностями человека к обучению, рассуждениям, планированию и действиям в сложном киберфизическом пространстве. Суть термина «искусственный интеллект» более полно раскрывает термин «интеллектуальные компьютерные технологии», т.е. технологии, которые усиливают и расширяют интеллектуальные и функциональные возможности человека.

Технология программно-определеняемых радиосредств (ПОР) предусматривает возможность изменения рабочего диапазона, типа модуляции, обеспечивает совместимость различных стандартов и технологий программным путем. Для операторов и провайдеров ПОР дает возможность быстрого и относительно экономичного запуска новых сервисов (для этого нет необходимости приобретать новое оборудование – меняется только программное обеспечение).

К технологиям, способствующим достижению электромагнитного превосходства при ведении боевых действий и в других конфликтных ситуациях, относятся:

- Создание широкодиапазонных радиосредств с расчетом на то, что у противника не найдется радиосредств подобного типа; создание в рабочем диапазоне частот ложных целей (ловушек) для дезинформации разведки противника.

- Освоение новых диапазонов частот: 71-76 ГГц; 81-86 ГГц; 900–3000 ГГц. Наличие двух диапазонов 71-76 ГГц, 81-86 ГГц с неделимой шириной полосы частот в 5 ГГц позволит реализовать предельную скорость передачи информации по эфиру примерно 20 Гбит/сек.

- Использование шумоподобных широкополосных сигналов, позволяющих осуществлять прием сигналов при воздействии сосредоточенных помех, превышающих полезный сигнал на 70–80 дБ, и при воздействии флюктуационных помех (шумов), превышающих полезный сигнал на 20–25 дБ.

- Реализация предельного быстродействия режима ППРЧ, исключающего возможность разведки средствами противника.

- Создание средств радиоэлектронной борьбы с системами управления войсками и оружием.

Ранее утверждалось, что современный кризис обусловлен линейной экономикой, в основе которой лежит планирование постоянного роста производства и потребления. В настоящее время планета не выдерживает рост потребления. Начиная с 1980 года, потребление человечества превысило возможности планеты; на рубеже XXI века этот разрыв составил уже более 20%.

В сложившихся условиях необходим переход к циклической экономике, при которой планируется экономия расхода материалов. Экспертами доказано, что на изготовленную продукцию и детали расходуется всего 2% материалов, сырья, добытых из-под земли, остальные 98% идут в отвал.

Основные направления развития циклической экономики:

- Разработка и производство аппаратуры на основе программно-определенного радио (ПОР). Цифровизация на основе СБИС высокой степени интеграции. Рост степени интеграции ЭКБ наряду с повышением быстродействия приводит к снижению потребляемой мощности, уменьшению габаритов радиооборудования и снижению его стоимости. Это позволяет реализовать негласный телекоммуникационный закон: рост функциональных свойств радиооборудования не должен приводить к росту цен.

- Внедрение аддитивных технологий: внедрение 3D-печати для изготовления опытных образцов и выпуска готовой продукции; изготовление заказных деталей и деталей сложных конструкций непосредственно на объектах потребителя (непосредственно на поле боя, на кораблях, подводных лодках и в космосе).

- Роботизация производства радиооборудования. Примеры: сложное производство мобильных телефонов на одном из китайских заводов роботизировано на 90%. Это будущее, и в этой части мы пока не в лидерах, имея в среднем 2 робота на 10 тысяч исполнителей (в среднем для всей промышленности); в Южной Корее этот показатель составляет 500, в Китае – 50.

- Внедрение ряда других технологий: «не надо ремонтировать то, что не сломалось; не изготавливать то, что можно починить; не отправлять на переработку то, что можно восстановить; шире использовать логистические и транспортные императивы: делать все что можно на месте во избежание длительной перевозки составных частей».

В более полном объеме технологическая платформа рассматривается в монографии «Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения» под редакцией М.Л. Артемова [3] (г. Москва, издательство «Радиотехника», 2021 г.).

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенный анализ основных направлений развития науки с учетом доминирующего направления ИНФО-БИО-НАНО-КОГНО показывает превалирующий характер развития автоматизированных и автоматических систем управления и переход от платформоцентрического к сетевоцентрическому управлению, что, безусловно, окажет положительное влияние на развитие техники, в том числе и специального назначения, в ближайшие десятилетия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов В. И., Бочаров А. Ю. Направления развития автоматизированных систем управления и связи // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 1. – С. 6–12.
2. Ивлев А. А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации. М., 2008. – 64 с.
3. Артемов М.Л., Борисов В.И., Маковий В.А., Сличенко М.П. Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения. Радиотехника., 2021.

REFERENCES

1. Borisov, V. I., Bocharov A. Yu. Development directions of automated communication control systems // Theory and technique of radio communication. 2019. № 1. – C. 6–12.
2. Ievlev, A. A. Fundamentals of Boyd's Theory. Directions of development, application and implementation. M., 2008. – 64 p.
3. 3. Artemov M.L., Borisov V.I., Makovy V.A., Slichenko M.P. Automated control systems, radio communication and electronic warfare. Fundamentals of theory and principles of construction. Radiotekhnika., 2021.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОСВЯЗИ

М. Л. Артемов

Акционерное общество «Концерн «Созвездие» (АО «Концерн «Созвездие»), Воронеж, Россия

Аннотация. Сформулированы основные направления применения технологий искусственного интеллекта в перспективных автоматизированных системах управления и радиосвязи. Рассмотрены вопросы применения технологий искусственного интеллекта в подсистемах радиомониторинга перспективных автоматизированных систем управления и радиосвязи.

Ключевые слова: автоматизация, искусственный интеллект, искусственные нейронные сети, радиомониторинг, радиосвязь.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN AUTOMATED CONTROL AND RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

M. L. Artemov

Joint-stock company «Concern «Sozvezdie» (JSC «Concern «Sozvezdie»), Voronezh, Russia

Abstract. The main directions of application of artificial intelligence technologies in promising automated control and radio communication systems are formulated. The issues of application of artificial intelligence technologies in subsystems of radio monitoring of promising automated control and radio communication systems are considered.

Keywords: automation, artificial intelligence, artificial neural networks, radio monitoring, radio communications.

1. ВВЕДЕНИЕ

В рамках отечественной «Национальной стратегии развития искусственного интеллекта» на период до 2030 года разработан национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 59277-2020 «Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта» [1]. В нем дано следующее определение искусственного интеллекта: искусственный интеллект (ИИ) – это комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека. Технологии ИИ включают в себя обработку естественного языка, распознавание и синтез речи, интеллектуальную поддержку принятия решений и перспективные методы ИИ – методы, направленные на создание принципиально новой научно-технической продукции, в том числе автономное решение различных задач, автоматический дизайн физических объектов, автоматическое машинное обучение, алгоритмы решения задач на основе данных с частичной разметкой и (или) незначительных объектов данных, обработки информации на основе новых типов вычислительных систем.

Основными директивными документами, определяющими порядок и сроки освоения ИИ являются:

- Указ Президента РФ № 490 от 10 октября 2019 года, согласно которому предлагается: «Утвердить принятую Национальную стратегию развития искусственного интеллекта на период до 2030 года» «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». Правительству РФ в рамках «Цифровой экономики Российской Федерации» поручено разработать и утвердить федеральный проект «Искусственный интеллект»;
- Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 г. (*утверждена Указом Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации»*);
- Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Нейротехнологии и искусственный интеллект» (*утверждена решением Правительственной комиссии по цифровому развитию 14 октября 2019 г.*);
- Концепция развития регулирования отношений в сфере технологий искусственного интеллекта и робототехники до 2024 года (*утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 августа 2020 г. № 2129-р*);
- Федеральный проект «Искусственный интеллект» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (*утвержден решением Правительственной комиссии по цифровому развитию 27 августа 2020 г.*);
- Перспективная программа стандартизации по приоритетному направлению «Искусственный интеллект» на период 2021-2024 годы (*планируется разработка 217 стандартов в областях госуправления, здравоохранения, транспорта, окружающей среды, промышленности, образования, строительства, связи, сельского хозяйства, топливно-энергетического комплекса*).

Можно с высокой долей уверенности утверждать, что в настоящее время борьба за технологическое лидерство – прежде всего в сфере ИИ – стала полем глобальной конкуренции. Так, в ходе выступления в мае 2019 года на совещании по развитию технологий в области ИИ, Президент России подчеркнул geopolитическое значение этого направления: «...кто сможет обеспечить монополию в сфере ИИ, тот станет властелином мира».

Действительно, эффект от внедрения технологий ИИ в различные сферы жизни человека носит революционный характер. В настоящее время экспоненциально развиваются технологии машинного обучения, предиктивной аналитики, интернета вещей, робототехники, высокопроизводительных вычислительных систем, цифровых двойников и обработки больших объемов данных и др (см. рис. 1). Методы предиктивной аналитики широко применяются в системах прогнозирования спроса и пиков покупательной активности людей в магазинах; алгоритмы компьютерного зрения лежат в основе методов распознавания лиц в системах контроля и безопасности; методы анализа скрытых закономерностей широко востребованы в маркетинговых исследованиях, менеджменте и бизнес-анализе; методы нечеткой логики применяются в сфере

управления техническими системами (автоматические регуляторы движения поездов метрополитена, совместного функционирования различной бытовой техники).



Рис. 1. Возможные сферы применения технологий ИИ

Безусловно, большие надежды на технологии ИИ [2] возлагаются в военной сфере; системы ИИ рассматриваются в контексте перспективных высокоэффективных инструментов для области военной деятельности. Развитие и применение технологий ИИ требуют значительного финансирования, о чем свидетельствуют данные об объемах отечественного и мирового рынка решений в области ИИ (рис. 2).

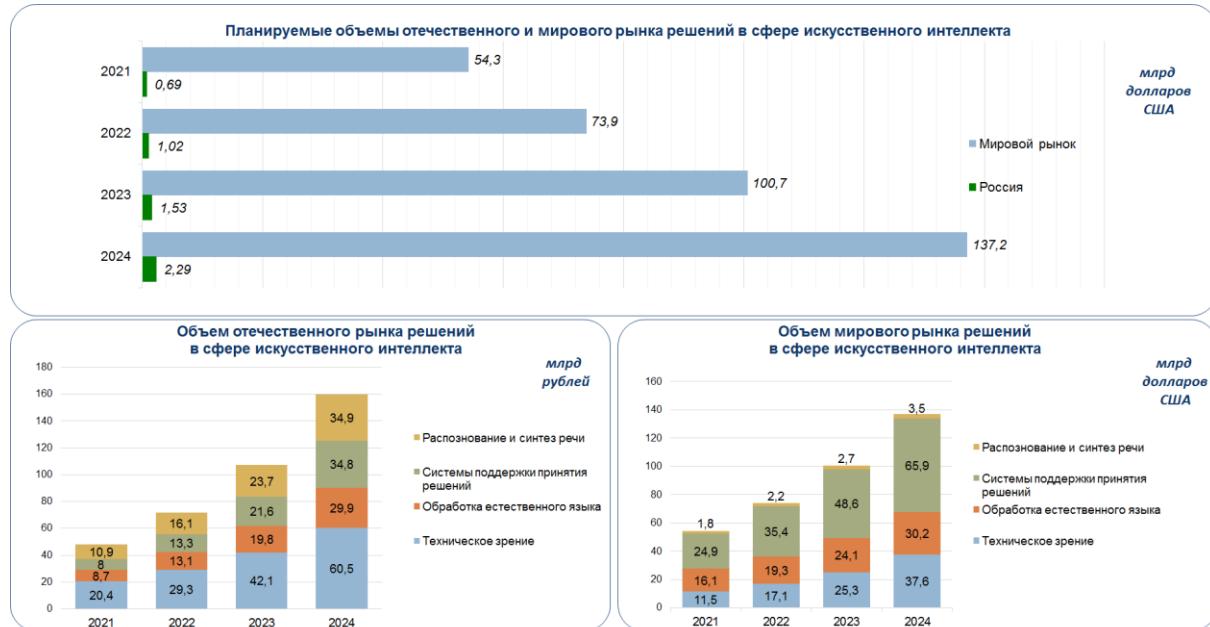


Рис. 2. Объемы отечественного и мирового рынка решений в сфере ИИ

В нашей стране одной из ключевых задач Вооруженных Сил является активное освоение вооружения и техники с элементами ИИ, в том числе:

- автоматизированных систем управления (АСУ);
- систем и средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ);
- различных роботизированных комплексов;
- систем управления БЛА.

В настоящее время при выполнении практически всех научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в интересах ВС РФ в обязательном порядке предусмотрено применение технологий ИИ.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ в АСУ

Особое внимание ученых в различных областях науки и техники уделяется вопросам создания интеллектуализированных систем приема и обработки информации, построенных на различных физических принципах. Анализ многочисленных научных публикаций в области технологий ИИ позволяет констатировать весьма очевидное обстоятельство, суть которого состоит в интенсивном «проникновении» указанных технологий во все основные этапы создания технических систем, не исключением из которых являются и радиотехнические системы.

Перспективные АСУ и радиосвязи [3] являются важнейшей областью применения технологий ИИ, позволяющих обеспечить повышение степени автоматизации, интеллектуализации и эффективности функционирования таких систем. Автоматизация (как важнейшее направление научно-технического прогресса) призвана снизить степень участия человека в процессах получения, преобразования, передачи и использования ресурсов (в том числе информации) в результате обеспечения саморегуляции технических средств и математических методов. В настоящее время автоматизация внедрена во многие сферы человеческой деятельности и позволяет оптимизировать процессы управления, повысить качество производства продукции и, в целом, производительность труда человека.

Система управления считается автоматизированной, если необходимым условием ее функционирования с требуемым качеством является наличие человека-оператора – специально подготовленного специалиста, за которым сохраняется выполнение отдельных и, как правило, не поддающихся эффективной автоматизации функций системы. Функционирующая без участия человека-оператора система управления является автоматической.

В состав АСУ входят базы и банки данных [3], обеспечивающие хранение данных в виде организованных структур, а также различные виды обеспечения (техническое, программное, математическое, информационное, нормативно-правовое и др.) и специально подготовленные люди. Для обеспечения автоматизации управления в таких системах нашли широкое применение компьютерные и информационные технологии, ориентированные на многоуровневую обработку информации.

В общем случае АСУ функционирует в различных конкурентных средах, характерных, например, для вооруженных конфликтов, бизнеса, торговли и спорта. В

условиях конфликта систем под управлением будем понимать процесс сбора информации из внешней среды о предстоящем действии конфликтующих сторон, оценки обстановки (ориентирование), выработки решения, подготовки операции и ее практического осуществления.

Применительно к военной сфере автоматизация призвана повлиять на процесс и исход военных действий, на успех в реализации боевых возможностей сил и средств воинских формирований, на эффективность управления ими. Наращивание степени автоматизации процессов управления войсками и оружием преследует как цели повышения эффективности использования существующих возможностей сил и средств, так и создание условий максимальной реализации компетенций человека за счет своевременной и оперативной информационной поддержки в принятии решений.

Разносторонним информационным обеспечением, возможностью совместного использования информации, снижением времени реакции и повышением устойчивости управления войсками достигается повышение их боевой мощи.

Необходимым условием разработки АСУ в условиях конфликта являются описательные модели конфликтных действий. В настоящее время одной из наиболее распространенных концепций (моделью) описания конфликтного взаимодействия, обладающей достаточно высокой степенью универсальности, является предложенная в 1995 г. петля Дж. Бойда [4]. Петля представляет собой четырехэтапный замкнутый цикл НОРД (см. рис. 3): наблюдение (Н) → ориентирование (О) → решение (Р) → действие (Д). Цикл Дж. Бойда может служить методологической основой при разработке систем управления, которые строятся на использовании физических моделей конфликтных действий.



Рис. 3. Иллюстрация цикла НОРД.

Процесс управления осуществляется по замкнутому контуру, в котором циркулирует информация в виде сигналов – управляющих команд в каналах прямой связи и ответных сигналов с информацией о состоянии элементов системы и результатах выполнения команд в каналах обратной связи. Поступающая в систему информация посредством элемента (органа) управления осуществляет регулирование процессов, протекающих в системе, и обеспечивает повышение степени ее организации с целью достижения решения поставленных задач, в результате чего происходит снижение энтропии системы.

Автоматизация систем управления повышает качество управления, эффективность решения поставленных задач за счет оперативности и многокритериальной оптимизации выполняемых процессов преобразования циркулирующей информации.

Применение технологий ИИ открывает новые возможности по повышению степени автоматизации и качества функционирования систем управления за счет перехода от автоматизированных к более широкому классу систем - интеллектуальным системам управления (рис. 4).



Рис. 4. Иллюстрация соотношения между автоматизированными и интеллектуальными системами управления

На каждом этапе цикла НОРД применение технологий ИИ позволит:

- на этапе наблюдения – повысить эффективность извлечения информации из наблюдаемых данных (процессов) и выявления закономерностей между результатами различных наблюдений на основе применения методов интеллектуального анализа данных, искусственных нейронных сетей (ИНС);
- на этапе ориентирования – повысить эффективность распознавания объектов, их идентификации, отождествления и комплексирования разнородной информации в том числе на основе применения методов классификации и распознавания речевой информации, методов обработки и распознавания изображений;
- на этапе решения – повысить достоверность и оперативность принятия решений, степень их адекватности наблюдаемым процессам с учетом возможных потерь за счет принятия ошибочных решений, и в целом повысить качество выявления приоритетных объектов управления (воздействия);
- на этапе действия – повысить качество формирования управляющих сигналов (команд) и степень оптимальности их структуры по критерию эффективности воздействия на объекты управления, оперативность смены управляющих сигналов (команд) и их адаптацию в соответствии с изменениями обстановки (условий функционирования, характеристик окружающей среды).

3. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ В АСУ И РАДИОСВЯЗИ.

Благодаря современной технологии когнитивной радиосвязи [5-8] обеспечивается возможность самостоятельного анализа радиосредствами окружающей электромагнитной обстановки (ЭМО) с динамическим доступом к спектру, адаптивной настройкой (подстройкой) своих функциональных параметров и протоколов на основе ранее приобретенных знаний. Рациональное использование частотного и энергетического

ресурсов достигается за счет определения свободных для использования частотно-временных областей.

Можно отметить следующие основные направления применения технологий ИИ в автоматизированных системах управления и радиосвязи:

- Построение интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР) по планированию и поддержанию связи, базирующихся на применении таких методов ИИ, как: нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы, экспертные системы и др.

- Применение подсистемы интеллектуального радиомониторинга (рис. 5) с реализацией непрерывного цикла наблюдения и анализа окружающей электромагнитной обстановки (ЭМО) и состояния спектра частот когнитивный цикл Митоллы) с применением интеллектуальных алгоритмов оценки и прогнозирования в рамках концепции когнитивного радио.

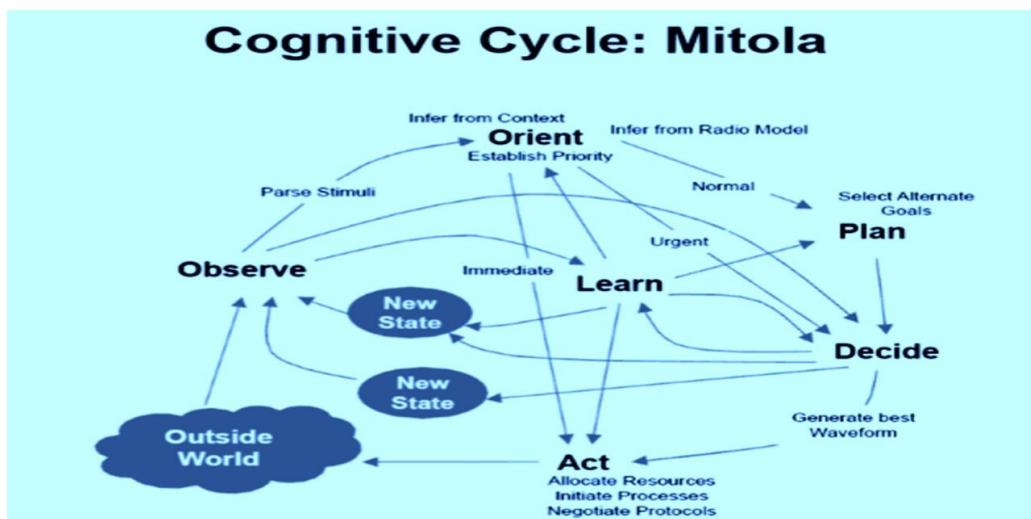


Рис. 5. Когнитивный цикл Митоллы лежит в основе реализации подсистемы интеллектуального радиомониторинга

- Разработка и создание интеллектуальных средств радиосвязи широкополосного доступа с повышенным энергопотенциалом, обладающих повышенной надёжностью при работе в сложной ЭМО, обеспечивающих высокую спектральную эффективность и способных функционировать в условиях нестационарности частотно-селективных каналов передачи данных.

- Совершенствование технологий цифровой коррекции для уменьшения искажений, обусловленных несовершенством доступной аналоговой аппаратуры при создании когнитивных пакетных радиолиний и радиосетей.

- Создание перспективных интеллектуальных средств управления и радиосвязи, обеспечивающих оперативное достоверное адресное доведение информации до пользователей в насыщенной ЭМО, способных анализировать окружающую обстановку с целью выработки оптимальных параметров и протоколов управления и связи, способных своевременно адаптироваться к динамическим изменениям внешней среды.

- Переход от синтеза адаптивных алгоритмов к адаптивному синтезу алгоритмов управления и радиосвязи, включая совместное использование методов статистической радиотехники и технологий ИИ, в том числе распознавания структуры принимаемых радиосигналов в насыщенной ЭМО.

- Применение методов распознавания сложной помеховой обстановки и состояний канала связи и управления, в том числе видов помех и типов замираний сигнала с выявлением последовательности изменений внешней среды.

- Развитие MESH сетей в направлении перехода к самообучающимся системам, реализующим оптимальное сочетание методов статистической радиотехники с элементами искусственного интеллекта (рис. 6).

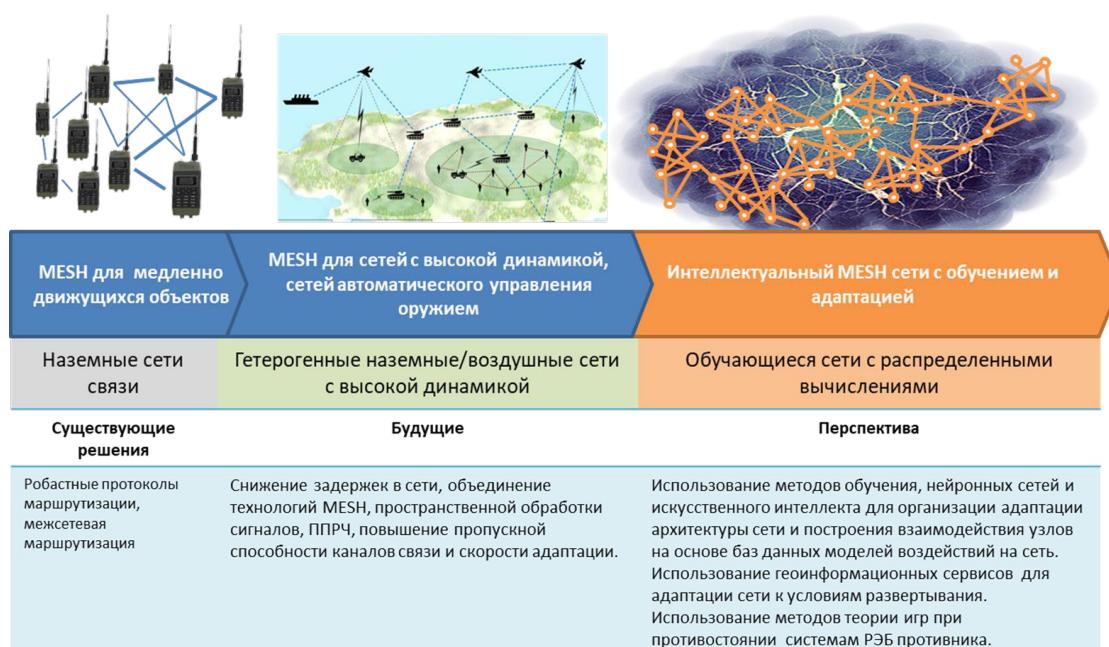


Рис. 6. Основные тенденции развития MESH сетей

4. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ В ПОДСИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОСВЯЗИ

Используемая в системах когнитивного радио вычислительная система («когнитивный блок» в модели когнитивной системы [9]) должна извлекать информацию о параметрах ЭМО, характеризуемой сложной динамичной многокомпонентной пространственно-временной и частотно-энергетической структурой электромагнитного поля, образованного излучениями множества источников радиоизлучения (ИРИ). Это требует соответствующего развития способов обнаружения [3] и определения частотно-временных параметров радиосигналов, распознавания различных видов модуляции в условиях априорной неопределенности относительно параметров принимаемых сигналов и помех. Программная конфигурируемость и когнитивность перспективных систем радиосвязи определяет новый уровень их разведдающейности, что стимулирует развитие средств радиомониторинга (РМ), обладающих свойствами когнитивности.

Как и в [3], для таких средств РМ будем использовать термин «когнитивный радиомониторинг» (КРМ), под которым будем понимать РМ, характеризуемый возможностью динамической и автономной настройки своих функциональных параметров на основе приобретенных знаний (оцененных параметров ЭМО) для достижения заранее определенных целей, а также обучаемости на основе результатов своих действий (с реализацией адаптивной к априорно неизвестным параметрам ЭМО обработки радиосигналов) с целью повышения показателей эффективности функционирования. В качестве важнейшей особенности средств КРМ отметим способность своевременно анализировать полученную из окружающей ЭМО информацию, предсказывать и контролировать изменения параметров ЭМО, оптимальным (в смысле заданного критерия) образом подстраивать свои параметры, адаптируясь к изменениям ЭМО.

Сложившаяся доминирующая тенденция в развитии средств радиомониторинга путем количественного повышения технических характеристик радиоэлектронной аппаратуры (таких, как расширение рабочего диапазона частот, повышения чувствительности и точности пеленгования, точности определения координат радиосредств, энергопотенциала и пропускной способности подсистемы радиоподавления), уже в настоящее время в большинстве случаев приближается к имеющемуся технологическому пределу. Дальнейшее совершенствование становится практически невозможным без применения современных технологий ИИ.

В качестве основных характеристик подсистемы радиомониторинга АСУ и радиосвязи с применением технологий ИИ можно отметить:

- интеллектуальное динамическое изменение параметров приема и обработки радиосигналов с обеспечением адаптации и стабилизации требуемых показателей эффективности радиомониторинга в условиях меняющейся ЭМО;
- пространственно многоканальный прием радиосигналов с определением априорно неизвестных параметров ЭМО с интеллектуальным контролем изменения обстановки;
- адаптивное изменение (подстройка) характеристик и типов алгоритмов обработки данных в условиях динамически меняющейся ЭМО;
- поиск оптимальных рабочих частотных поддиапазонов, режимов работы и характеристик излучаемых сигналов в зависимости от параметров ЭМО, в том числе с использованием генетических алгоритмов поиска, методов нечеткой логики и др.
- обнаружение, пеленгование (в том числе многосигнальное) и определение координат ИРИ с динамической адаптацией к параметрам текущей окружающей ЭМО и стабилизацией требуемых показателей эффективности во времени;
- определение рационального размещения радиосредств с учетом природно-географических свойств местности с использованием технологий ИИ;
- комплексирование результатов радиомониторинга по времени, частоте и пространству с учетом взаимного расположения средств радиомониторинга и с использованием результатов интеллектуального анализа рельефа местности;

На рис. 7 в качестве примера приведена иллюстрация предлагаемого к применению в подсистеме радиомониторинга принципа ретроспективного анализа результатов радиоразведки с динамической адаптацией к изменившимся параметрам обстановки, основанной на реализации интеллектуальной системы динамической памяти, хранящей результаты разведки за период «актуального прошлого».

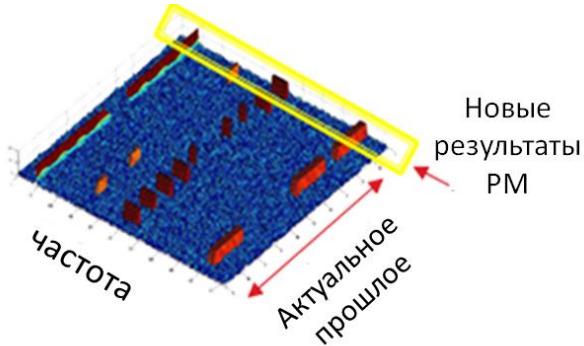


Рис. 7. Интеллектуальный ретроспективный анализ данных с динамической адаптацией к изменившимся параметрам обстановки

Как показал анализ имеющегося в настоящее время научно-технического задела в части создания средств радиомониторинга, на всех уровнях обработки информации требуется внедрение технологий ИИ:

- на сигнальном уровне при непосредственной первичной обработке сигналов в многоканальной радиоэлектронной аппаратуре радиомониторинга;
- на уровне обработки многократных результатов радиомониторинга – формуляров ИРИ – на этапе вторичной обработки с отождествлением и накоплением результатов во времени, определением пространственных координат источников;
- на уровне совместной обработки разнородной информации (результатов радиомониторинга, информации о свойствах местности) на этапе третичной обработки с выявлением радиолиний, структуры и параметров радиосетей, и последующим определением наиболее рациональных режимов работы.

Применение ИНС в подсистемах радиомониторинга АСУ и радиосвязи.

Актуальность применения искусственных нейронных сетей (ИНС) [10] в подсистемах радиомониторинга перспективных интеллектуальных систем управления и радиосвязи обусловлена следующими основными характеристиками:

- Обработка разнородных данных (включая фото и видеоданные), в том числе полученных от разнотипных средств радиомониторинга.
- Решение задач в условиях неопределенности: при отсутствии информации о статистических свойствах входных данных и при неизвестных закономерностях между входными и выходными данными.
- Устойчивость к искажениям данных и неполным данным.
- Эффективное построение нелинейных зависимостей: отображений, разделяющих поверхности для решения задач распознавания (классификации) ИРИ и характеристик ЭМО.

- Способность распознавания структуры входных данных, адаптироваться под нее и разделять данные на классы, в том числе объединять индивидуальные объекты в групповые.
- Обучение и обобщение в результате самообучения накопленных знаний, в общем случае имеющих различную физическую природу и формат представления.
- Потенциальное сверхвысокое быстродействие нейронных сетей, в том числе при их реализации с использованием нейрокомпьютеров, с возможностью распараллеливания вычислений и осуществления обработки данных в масштабе времени, близком к реальному.

Можно обозначить следующие основные факторы, определяющие эффективность применения ИНС в перспективных АСУ и радиосвязи:

➤ *Тип нейронной сети.* Определяется классом решаемых задач (классификация (распознавания) входных векторов; обобщенная регрессия и аппроксимация функций; классификация без учителя, т.е. кластеризация; ассоциация образов (ассоциативная память); управление движущимися объектами; построение систем технического зрения и др.).

➤ *Вид обучения нейронной сети.* Обучение с учителем и без учителя. Обучение с учителем: для каждого вектора значений входных переменных примера обучающего множества известен требуемый вектор значений выходных переменных. Обучение без учителя: механизм настройки весов сети в случае, когда известны только значения входных переменных.

➤ *Объем и качество обучающего множества.* Объем множества определяется перечнем и семантикой входных переменных, доступностью (возможностью) генерации примеров для обучения (обычно, чем больше, тем лучше), распределением обучающего множества по категориям: «обучение» → «тестирование» → «настройка». Качество обучения нейронной сети определяется используемым алгоритмом обучения, обучающим множеством, критерием остановки процесса обучения.

➤ *Число слоев нейронов в сети.* Определяется конкретным типом применяемой нейронной сети. Как правило, для решения практических задач комплексной обработки разведанных достаточным будет один или два слоя нейронов.

➤ *Количество нейронов в каждом слое.* Может определяться детерминировано или эмпирически. Детерминировано: в зависимости от типа нейронной сети как следствие структуры входных данных и размера обучающей выборки. Эмпирически: на основе экспертных знаний и опыта разработчиков НС, с последующим уточнением в процессе моделирования и обучения сети.

➤ *Структура и веса межнейронных связей.* Определяется типом НС, количеством слоев НС, количеством нейронов в каждом слое, используемыми функциями активации нейронов.

➤ *Вид функций активации каждого слоя.* Определяется, в основном, типом применяемой ИНС и решаемыми ею задачами.

➤ *Перечень и семантика входных переменных.* Определяется типом применяемой ИНС и решаемыми ею задачами.

➤ *Диапазоны значений входных и выходных данных нейронной сети.* Входные данные могут иметь (довольно часто) разную семантику и разную шкалу измерений, поэтому в этом случае перед подачей сети входных сигналов их необходимо

нормировать; необходимость нормирования выходных данных определяется типом нейронной сети.

Существует множество частных задач радиомониторинга, решение которых с требуемыми в настоящее время и в перспективе показателями эффективности и достоверности практически не достижимо без применения технологий ИИ (в том числе с применением ИНС). Применение классических подходов к решению таких задач требует создания многопараметрической трудно формализуемой и содержащей большой объем данных математической модели, в большинстве своем не целесообразной к реализации в специальном программном и математическом обеспечении АСУ и радиосвязи. Технологии ИИ открывают новые возможности в части полноты и достоверности учета специфики функционирования таких систем в условиях сложной насыщенной ЭМО.

Повышение качества исходных данных для обучения ИНС. Наряду с обозначенными преимуществами в применении ИНС при решении задач радиомониторинга следует учитывать, что важнейшим этапом создания таких ИНС, оказывающим доминирующее влияние на эффективность их применения, является генерация исходных данных для обучения сетей.

Набор данных должен отвечать множеству требований, среди которых важнейшими являются репрезентативность и непротиворечивость данных о радиоэлектронной и электромагнитной обстановке, характеристиках местности и условиях распространения радиоволн, обеспечивающие высокое соответствие (адекватность) обучающих данных реальным условиях функционирования АСУ и радиосвязи.

Принципиальная важность этапа обучения ИНС для создания на их основе высококачественной подсистемы радиомониторинга наряду с высокими темпами развития технологий ИИ и открывающимися перспективами повышения эффективности функционирования АСУ и радиосвязи определяют актуальность исследования путей повышения эффективности радиомониторинга на основе применения технологий ИНС.

Параметры генерируемых для обучения ИНС исходных данных должны соответствовать выбранным условиям функционирования АСУ и радиосвязи, режимам работы, типовым условиям размещения средств на местности, структурам радиосетей и системы управления в целом, характеристикам трасс распространения радиоволн, а также соответствовать характеристикам аппаратуры средств радиомониторинга и особенностям режимов их работы. В результате обучения ИНС по таким данным обеспечится оптимизация подсистемы радиомониторинга под решение конкретной задачи в заданных условиях.

В частности, реализация высокоэффективных методов самообучения ИНС по актуальным данным окружающей ЭМО позволит повысить качество функционирования подсистемы радиомониторинга в условиях меняющейся внешней среды (рис. 8).

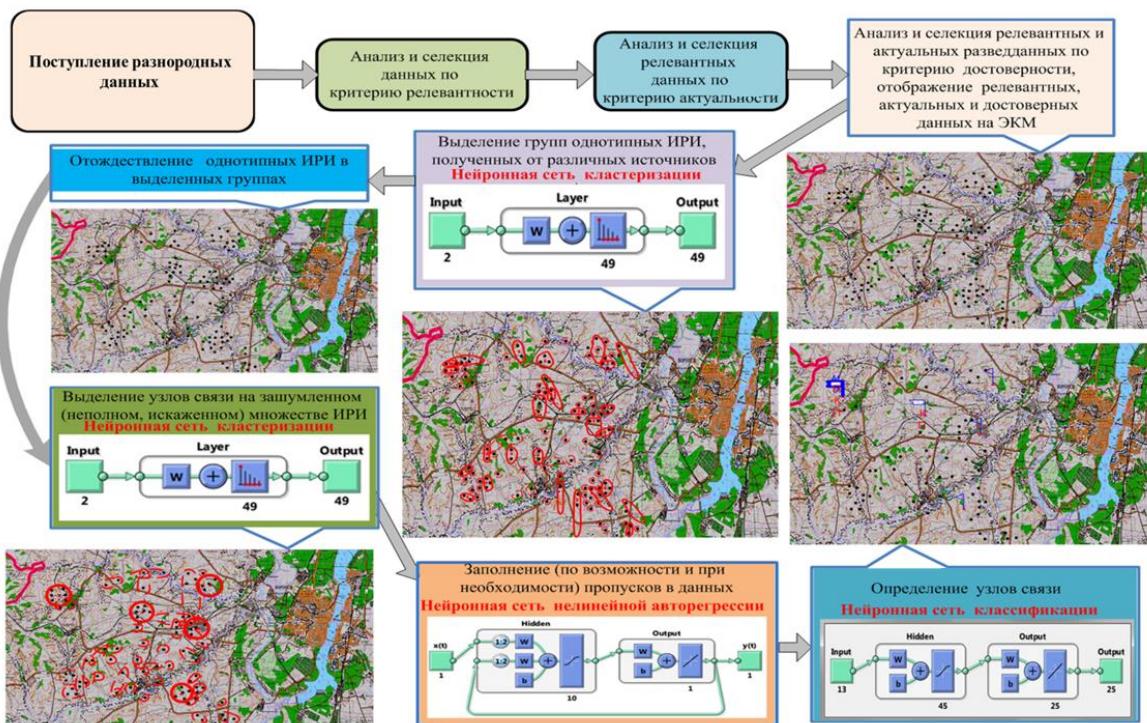


Рис.8. Пример повышения качества функционирования подсистемы радиомониторинга за счет реализации высокоеффективных методов самообучения ИНС по актуальным данным окружающей ЭМО

Пример применения принципа интеллектуальной идентификации амплитудно-фазового портрета радиосигналов в задачах обнаружения и пеленгования источников радиоизлучений. Рассмотрим возможности применения методологических основ проблемы «узнавания» (рассмотренной в широко известной монографии [11] М.И. Бонгарта применительно к задачам распознавания образов) при решении важнейшей задачи статистической радиотехники – совместного обнаружения и пеленгования источников радиоизлучений (ИРИ).

Одним из возможных способов повышения быстродействия обнаружения-пеленгования является реализация процедуры идентификации амплитудно-фазовых портретов (АФП) сигналов. Под термином идентификация понимается процедура установления сходства наблюдаемых данных с данными, хранящимися в памяти системы и содержащими информацию об определенном известном объекте (сигнале). В количественном отношении сходство можно определить в виде неравенства

$$F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq h$$

для результатов функциональных преобразований наблюдаемых (\mathbf{X}) и хранящихся (\mathbf{Y}) данных (h – порог близости); при этом тип (функциональный вид) преобразования $F(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ и его характеристики определяются исходя из решаемой задачи и выбранного критерия ее решения.

Основанная на указанном сходстве процедура идентификации АФП сигналов представляет собой отдаленный аналог из области когнитивных способностей человека: узнавания данных и процессов мозгом человека в процессе его жизнедеятельности. Так,

согласно современным данным мозг человека определенным (и, в некоторой степени, различным) образом реагирует на статическую и меняющуюся во времени информацию. Так, при наблюдении за летящей по небу птицей, человек сопровождает движущийся объект и одновременно с этим контролирует отсутствие изменений вокруг объекта (например, появление других птиц, самолета и т.п.) на общем фоне в пределах поля зрения. При этом более медленное движение иных объектов, например, облаков, воспринимается скорее, как часть общего фона; по крайней мере до тех пор, пока скорость движения облаков не увеличится настолько, что само движение станет нести полезную (важную) информацию, например, об опасности шторма.

Можно предположить, что мозг человека реализует процедуру сравнения информации, извлекаемой из наблюдаемых данных (процессов, событий), и хранящейся в памяти информации, образующей знания человека об окружающем мире. В случае узнавания вновь принимаемых данных запускается механизм действий по заранее известному сценарию с некоторой коррекцией параметров действий исходя из новых выявленных изменений. В противном случае, когда узнавание не произошло реализуется более интенсивная и ресурсоемкая обработка данных. Процедура узнавания позволяет оптимизировать задействованные ресурсы мозга на обработку данных и хранение извлекаемой информации; так, менее информативные данные, содержащие узнаваемую и не представляющую в данный момент времени особую ценность информацию, исключаются из «фокуса восприятия» человека.

Несмотря на примитивность описанной процедуры и не претендуя на высокую степень ее соответствия познавательным процессам мозга человека (таким, как ощущение, восприятие и мышление), представляется целесообразном предпринять попытку применения описанного принципа узнавания для повышения показателей эффективности решения частной радиотехнической задачи совместного обнаружения и пеленгования ИРИ.

В качестве объекта наблюдения будем рассматривать радиосигналы, а в качестве их образов (как это будет обосновано далее) будем использовать АФП радиосигналов, принятых многоканальным ОП.

В современных системах радиомониторинга с помощью многоканальных ОП выполняется сканирование рабочего диапазона частот с перестройкой полосы частот мгновенного анализа (ПМА) [12]. В пределах одной и той же настройки по частоте ПМА число радиосигналов меняется со временем; одни источники перестают излучать, другие выходят в эфир. При этом местоположение большинства ИРИ (стационарных, передвижных) в течение достаточно продолжительного времени не меняется, что позволяет считать пеленг на ИРИ достаточно устойчивым информативным признаком данного источника. В таких случаях пеленгование ИРИ каждый раз после его обнаружения с безусловным выполнением вычислительно затратных расчетов можно считать избыточным.

Представляется целесообразным рассмотреть возможность сократить объем вычислений по новым принятым сигналам ИРИ, которые ранее уже были обнаружены и

запеленгованы, и информация о характеристиках которых содержится в базе обнаруженных источников.

Предлагаемый подход по сокращению вычислительных затрат при функционировании системы радиомониторинга с многоканальным ОП основывается на следующих основных положениях:

- вместо пеленгования сигнала каждый раз после его обнаружения предлагается выполнить процедуру идентификации АФП сигнала на основе учета предыдущих результатов радиомониторинга;
- процедура идентификации основана на сравнении портретов принимаемого сигнала и сигналов, которые были обнаружены и запеленгованы ранее, что по сравнению с пеленгованием представляет собой менее затратную вычислительную процедуру;
- в случае положительного исхода «идентификации» АФП и радиотехнические характеристики принятого и соответствующего ему ранее обнаруженного сигнала должны быть комплексированы, текущие оценки радиотехнических параметров сигнала и пеленга на ИРИ уточнены.

Информация о направлении прихода радиосигнала содержится в соотношениях амплитуд и фаз принятых сигналов в радиоприемных каналах ОП. Информативный с точки зрения пеленга на ИРИ АФП сигнала характеризует матрица взаимных энергий сигналов: ее диагональные элементы характеризуют энергии сигнала в каналах ОП, а наддиагональные – амплитудно-фазовые соотношения между сигналами в парах каналов ОП. Накопление матрицы взаимных энергий сигналов приводит к увеличению объема информации об обнаруживаемом сигнале и направлении на его источник, в результате чего достигается повышение точности пеленгования с ростом числа накоплений.

В соответствии с неравенством Буняковского-Шварца, обобщенном на случай двух эрмитовых матриц, в [3] показано, что меру близости матриц характеризует величина $\Xi \in [0, 1]$,

$$\Xi = \frac{\text{tr}(\dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{B}})}{\text{tr}(\dot{\mathbf{A}})\text{tr}(\dot{\mathbf{B}})}. \quad (1)$$

Применительно к двум матрицам взаимных энергий: текущей ($\dot{\mathbf{W}}^{(0)}$), полученной по результатам первого обнаружения-пеленгования ИРИ, и новой ($\dot{\mathbf{W}}_{new}$), полученной по результатам обработки новых принятых радиосигналов, перепишем (1) в виде

$$\Xi = \frac{\text{tr}(\dot{\mathbf{K}}^{-1}\dot{\mathbf{W}}^{(0)}\dot{\mathbf{K}}^{-1}\dot{\mathbf{W}}_{new})}{\text{tr}(\dot{\mathbf{K}}^{-1}\dot{\mathbf{W}}^{(0)})\text{tr}(\dot{\mathbf{K}}^{-1}\dot{\mathbf{W}}_{new})}, \quad (2)$$

где \mathbf{K} - матрица ковариации аддитивного гауссовского шума.

Входящая в числитель и знаменатель правой части (2) обратная матрица ковариации шума обеспечивает декорреляцию смеси сигнала и коррелированного шума и позволяет

сравнивать декоррелированные матрицы. Величина (2) характеризует близость ориентации векторов комплексных амплитуд принимаемого и ранее обнаруженного сигнала в радиоприемных каналах ОП, а, следовательно, близость АФП сигналов.

Предлагаемая процедура идентификации на первом этапе предполагает формирование величины (2) и сравнение ее с порогом

$$\Xi \geq h_0. \quad (3)$$

При выполнении данного неравенства принимается решение, что матрицы $\dot{\mathbf{W}}^{(0)}$ и $\dot{\mathbf{W}}_{new}$, а следовательно, и соответствующие им АФП сигналов ИРИ близки. Тогда, вместо расчета пеленгационного рельефа по матрице $\dot{\mathbf{W}}_{new}$ и последующего выполнения пеленгования сигнала ИРИ, выполняется накопление матрицы:

$$\dot{\mathbf{W}}^{(i+1)} = \dot{\mathbf{W}}^{(i)} + \dot{\mathbf{W}}_{new}, \quad (4)$$

(где $i > 1$ – порядковый номер накопления) и выполняется уточнение значения пеленга θ_i , рассчитанного на предыдущем шаге.

На рис. 9 приведена блок-схема обнаружения-пеленгования сигналов с процедурой идентификации АФП сигналов. На начальном этапе радиомониторинга в каждой ПМА реализуется многоканальная обработка принятых сигналов, выполняется обнаружение, формирование матрицы взаимных энергий сигналов, пеленгование и оценка параметров сигналов каждого обнаруженного ИРИ; результаты сохраняются в виде формуляров ИРИ в базу данных ИРИ.

В последующие моменты времени в каждой ПМА по результатам обнаружения сигналов, оценки их параметров и формировании матрицы взаимных энергий сигналов выполняется следующая обработка. В цикле по формулярам каждого i -го ИРИ, содержащемуся в текущей базе данных ИРИ, при условии отождествления ИРИ по параметрам формуляра с новым обнаруженным источником, выполняется процедура идентификации АФП. Вычисляется величина (2) и сравнивается с порогом.

В случае превышения порога принимается решение о том, что узнавание завершилось успешно. Тогда выполняется комплексирование параметров данного вновь обнаруженного ИРИ и параметров i -го, информация о котором содержится в формуляре. Вычисляется уточненное значение пеленга на i -й ИРИ и сохраняется в базе данных формуляров ИРИ. Если узнавание не произошло, то принимается решение об обнаружении сигнала нового ИРИ и выполняется его пеленгование, после чего формируется формуляр нового ИРИ и сохраняется в базе данных.

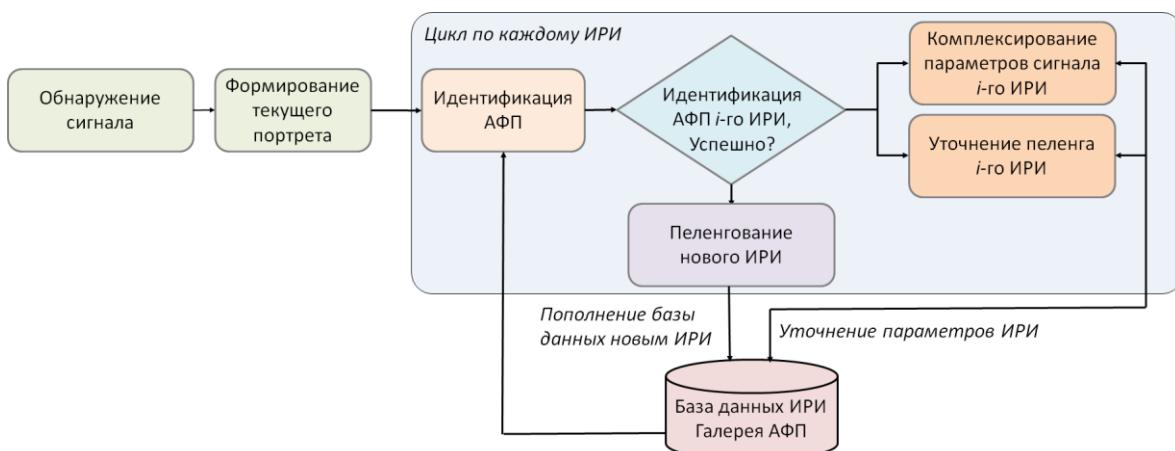


Рис. 9. Блок-схема обнаружения-пеленгования сигналов с процедурой интеллектуальной «идентификации» АФП сигналов

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный период развития науки и техники характеризуется интенсивным «проникновением» технологий искусственного интеллекта во все основные этапы создания технических систем, не исключением из которых являются радиотехнические системы. Перспективные АСУ и радиосвязи являются важнейшей областью применения технологий ИИ, позволяющих обеспечить повышение степени автоматизации, интеллектуализации и эффективности функционирования таких систем.

По результатам проведенного анализа возможных направлений применения технологий искусственного интеллекта в автоматизированных системах управления и радиосвязи можно сделать вывод, что одной из основных перспективных тенденций является совместное согласованное применение методов статистической радиотехники и искусственного интеллекта. Рациональное сочетание данных методов позволит перейти от автоматизированных к более широкому классу систем – интеллектуальным системам управления и радиосвязи, реализующим недоступный современным системам уровень качества функционирования в условиях реальной динамично меняющейся электромагнитной обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. – Москва: Изд-во стандартов, 2021. – 16 с.
- Люгер, Дж. О. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Дж.О. Люгер. - М.: Диалектика, 2016. - 864 с.
- Артемов М. Л., Борисов В.И., Маковий В.А., Сличенко М.П. Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения. Под. ред. М.Л. Артемова. - М.: Радиотехника, 2021. – 556 с.
- Ивлев А. А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации. М., 2008. – 64 с.
- Software defined radio: architectures, systems, and functions. Dillinger M., Madani K., Alonistioti N. Wiley, 2003. – 454 p.
- Mitola J. Cognitive radio: making software radios more personal / Mitola J., Maguire G.Q. // Personal Communications. IEEE, 1999, Vol. 6. – Pp. 13-18.
- Cognitive Radio Technology / Edited by: Bruce A. Fette. Elsevier Science & Technology Books, 2006. – 656 p.

8. Mitola J. Software Radio Architecture: Object-oriented Approaches to Wireless System. New York: John Wiley & Sons, 2000. – 568 p
9. Артемов, М. Л. Применение методов статистической радиотехники в перспективных системах когнитивной радиосвязи / М.Л. Артемов // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции: в 6 т. – Воронежский государственный университет; АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. Т.1, с. 10-26.
10. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. - М.: Диалектика, 2019. - 1104 с.
11. Бонгард М. М. Проблема узнавания. – М.: Наука, 1967. – 320 с.
12. Артемов М. Л. Методы статистической радиотехники в современном решении задач радиомониторинга / Артемов М. Л., Афанасьев О. В., Сличенко М. П. // Антенны, 2016, №6. – С. 55-62.

REFERENCES

1. GOST R 59277-2020. Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems. - Moscow: Publishing House of Standards, 2021. – 16 p.
2. Luger, J. O. Artificial Intelligence: Strategies and Methods for Solving Complex Problems/J. O. Luger. - M.: Dialectics, 2016. - 864 p.
3. Artemov M. L., Borisov V.I., Makoviy V.A., Slichenko M.P. Automated control systems, radio communications and electronic warfare. Fundamentals of theory and principles of construction. Under. ed. M.L. Artemov. - M.: Radio engineering, 2021. – 556 p.
4. Ivlev A. A. Fundamentals of Boyd's theory. Directions of development, application and implementation. M, 2008. – 64 p.
5. Software defined radio: architectures, systems, and functions. Dillinger M., Madani K., Alonistioti N. Wiley, 2003. – 454 p.
6. Mitola J. Cognitive radio: making software radios more personal / Mitola J., Maguire G.Q. // Personal Communications. IEEE, 1999, Vol. 6. – Pp. 13-18.
7. Cognitive Radio Technology / Edited by: Bruce A. Fette. Elsevier Science & Technology Books, 2006. – 656 p.
8. Mitola J. Software Radio Architecture: Object-oriented Approaches to Wireless System. New York: John Wiley & Sons, 2000. – 568 p
9. Artemov, M. L. Application of statistical radio engineering methods in promising cognitive radio communication systems/M.L. Artemov//Radar, navigation, communications: Collection of works of the XXVI International Scientific and Technical Conference: in 6 tons - Voronezh State University; JSC Concern Constellation. - Voronezh: Publishing house of VSU, 2020. T.1, p. 10-26.
10. Haikin, S. Neural networks: full course/S. Haikin. - M.: Dialectics, 2019. - 1104 c.
11. Bongard M. M. Recognition problem. - M.: Science, 1967. – 320 pages.
12. Artemov M. L. Methods of statistical radio engineering in the modern solution of radio monitoring problems/Artemov M. L., Afanasyev O. V., Slichenko M. P.//Antennas, 2016, No. 6. - S. 55-62.

ФРАКТАЛЬНО-СКЕЙЛИНГОВЫЙ МЕТОД, ДРОБНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ И РАЗМЕРНОСТИ КАК ОСНОВА НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

А. А. Потапов

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
Москва, Россия

Аннотация. В работе представлен обзор полученных автором основных научных результатов по созданию новых информационных технологий на основе текстур, фракталов, дробных операторов и методов нелинейной динамики. Исследования проводятся в рамках научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», разрабатываемого автором с 1979 года по настоящее время.

Ключевые слова: радиолокация; радиофизика; фракталы; текстура; нелинейная динамика; фрактально-скейлинговый метод; обработка многомерных сигналов, фрактальная электродинамика, фрактальные антенны, топологические обнаружители.

FRACTAL-SCALING METHOD, FRACTIONAL DERIVATIVES AND DIMENSIONS AS THE BASIS OF NEW INFORMATION TECHNOLOGIES IN RADIO ELECTRONICS

A. A. Potapov

V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (IREE RAS),
Moscow, Russia

Abstract. A review of the main scientific results on creation of new information technologies based on textures, fractals, fractional operators and non-linear dynamic methods which were obtained by the author has been presented in this work. The researchers are conducted in the framework of scientific direction "Fractal radio physics and fractal radio electronics: designing of fractal radio systems" which is being developed by the author starting from 1979 and up to the present.

Keywords: radar; radio physics; fractals; texture; nonlinear dynamics; fractal-scaling method; multidimensional signal processing, fractal electrodynamics, fractal antennas, topological detectors.

1. ВВЕДЕНИЕ

В данном пленарном докладе кратко рассматриваются основные направления внедрения текстур, фракталов, дробных операторов, динамического хаоса и методов нелинейной динамики в фундаментальные задачи науки и техники для создания новых информационных (или прорывных) технологий. Исследования проводятся в фундаментальном научном направлении «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого автором в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН с 1979 года по настоящее время.

Актуальность проведения данных исследований связана с необходимостью более точного описания реальных процессов, происходящих в радиофизических и

радиотехнических системах. Это, прежде всего, учет эредитарности (памяти), негассовости и скейлинга (самоподобия, автомодельности) физических сигналов и полей. Все эти понятия входят в определение фракталов, впервые предложенных Б.Б. Мандельбротом в 1975 году [1].

Замечу, что в докладе неизбежны повторы и корреляции с прежними выступлениями автора на различных конференциях и симпозиумах в разных странах и городах; это проявление того же самого скейлинга и фрактальности совместно с желанием донести свои оригинальные идеи и методы до все более расширяющейся думающей аудитории.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАННЫХ АВТОРОМ ФРАКТАЛЬНО-СКЕЙЛИНГОВЫХ МЕТОДОВ: Конспект

При фрактально-скейлинговом подходе, предложенном и развиваемом автором в течение более 40 лет, описание и обработка сигналов и полей проводится исключительно в пространстве дробной меры с применением гипотез скейлинга, негауссовских устойчивых распределений с тяжелыми хвостами и, по возможности, с применением аппарата дробных интегропроизводных. Наличие в уравнениях дробной производной по времени интерпретируется как наличие памяти или, в случае стохастического процесса - немарковости.

Основным свойством фракталов является нецелое значение их размерности D . Понятие меры и размерности Хаусдорфа [2] определяется p -мерной мерой с произвольным вещественным положительным числом p , которую ввел Хаусдорф в 1919 г. Понятия, введенные Хаусдорфом, основываются на конструкции Каратеодори (1914 г.). Размерность Хаусдорфа $\dim_H A$ определяется через хаусдорфову α -меру $mes_{H,\alpha}$ множества в виде

$$mes_{H,\alpha} = \liminf_{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_{U \in \Gamma(A)} [d(U)]^\alpha, \quad (1)$$

где нижняя грань \inf берется по конечным или счетным покрытиям Γ множества A шарами U , диаметр которых $d(U) < \varepsilon$. Размерность $\dim_H A$ определяется как такое число α_0 , что мера (1) при $\alpha > \alpha_0$ равна нулю, а при $\alpha < \alpha_0$ - бесконечности.

В основе современной теории вероятностей лежат предельные теоремы о сходимости распределений сумм независимых случайных величин к так называемым устойчивым распределениям: гауссовским или негауссовским. Первые опираются на центральную предельную теорему, а вторые (негауссовские) – на предельную теорему, доказанную Б.В. Гнеденко (1939 г.) и В. Дёблин (1940 г.) [3]. Для того чтобы закон распределения $F(x)$ принадлежал области притяжения устойчивого закона с характеристическим показателем α ($0 < \alpha < 2$), отличного от гауссовского, необходимо и достаточно, чтобы

$$1) \quad \frac{F(-x)}{1-F(x)} \rightarrow \frac{c_1}{c_2} \text{ при } x \rightarrow \infty, \quad (2)$$

$$2) \quad \frac{1-F(x)+F(-x)}{1-F(kx)+F(-kx)} \rightarrow k^\alpha \text{ при } x \rightarrow \infty, \quad (3)$$

где коэффициенты $c_1 \geq 0$, $c_2 \geq 0$, $c_1 + c_2 > 0$, $0 < \alpha < 2$, $k > 0$.

Для доказательства (2) и (3) необходимо и достаточно, чтобы при некотором подборе постоянных B_n , выполнялись условия [3, с. 189]:

$$\begin{aligned} nF(B_n x) &\rightarrow \frac{c_1}{|x|^\alpha} \quad (x < 0), \quad n[1 - F(B_n x)] \rightarrow \frac{c_2}{x^\alpha} \quad (x > 0), \\ \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \overline{\lim_{n \rightarrow \infty}} \quad n \left\{ \int_{|x|<\varepsilon} x^2 dF(B_n x) - \left[\int_{|x|<\varepsilon} x dF(B_n x) \right]^2 \right\} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Чем меньше величина α , тем длиннее хвост распределения и тем более оно отличается от гауссовского. При $1 < \alpha < 2$ устойчивые законы имеют математическое ожидание; при $0 < \alpha \leq 1$ устойчивые законы не имеют ни дисперсий, ни математических ожиданий. Условиями (2) – (4) определяется так называемая *негауссовская статистика*.

В обычной статистике флуктуации стремятся к нулю, когда размер выборки или число слагаемых N возрастает. Это гарантирует асимптотически точную повторяемость средних значений и является источником традиционных успехов классических статистических методов в радиолокации. Для статистики Леви ситуация может отличаться радикально. При увеличении размера выборки точность статистических оценок не улучшается! Стандартная форма центральной предельной теоремы предсказывает исчезновение флуктуаций при больших N , а из обобщенной центральной предельной теоремы (при $\alpha < 1$) следует, что флуктуации существенны при сколь угодно больших N . Одновременно при $\alpha < 1$ наблюдается случай глобальной неэргодичности процессов.

Нечелые значения показателя α в диапазоне $1 < \alpha \leq 2$ соответствуют обобщенному броуновскому движению с долговременными корреляциями и статистическим самоподобием, т.е. фрактальному процессу. Математическим выражением самоподобия являются степенные законы. Фрактальная размерность пространства вероятностей временного ряда равна показателю α :

$$\alpha = 1/H. \quad (5)$$

где H – показатель Херста. Необходимо различать “обычную” фрактальную размерность D исследуемого сигнала или изображения и фрактальную размерность, определяемую показателем α . Если D характеризует “изломанность” объектов, то α характеризует толщину хвостов распределений [1, 4, 5].

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН были разработаны различные оригинальные методы измерения фрактальной размерности D [4, 5]. Локально-дисперсионный метод измерений фрактальной размерности D основан на измерении дисперсии интенсивности/яркости σ_i^2 фрагментов оптического или радиолокационного изображения на двух пространственных масштабах δ_i^2 :

$$D \approx \frac{\ln \sigma_2^2 - \ln \sigma_1^2}{\ln \delta_2 - \ln \delta_1}, \quad i = 1 \text{ или } 2 \quad (6)$$

Фрактальная размерность D или ее сигнатура $D(t, f, \vec{r})$ в различных участках изображения поверхности является мерой текстуры. Фрактальные методы могут функционировать на всех уровнях сигнала: амплитудном, частотном, фазовом и поляризационном.

Дробный математический анализ имеет давнюю историю и чрезвычайно богатое содержание [4, 6-8]. В настоящее время наиболее часто используется выражение дробной производной D_{at}^α в форме, предложенной Риманом и Лиувиллем (${}_{RL}D_{at}^\alpha$). Оператор интегродифференцирования в смысле Римана-Лиувилля дробного порядка $\alpha \in R$ с началом в точке a определяется следующим образом:

$${}_{RL}D_{at}^\alpha f(t) = \frac{\text{sign}(t-a)}{\Gamma(-\alpha)} \int_a^t \frac{f(\tau)}{|t-\tau|^{\alpha+1}} d\tau, \quad \alpha < 0, \quad (7)$$

$${}_{RL}D_{at}^\alpha f(t) = f(t), \quad \alpha = 0, \quad (8)$$

$${}_{RL}D_{at}^\alpha = \text{sign}^n(t-a) \frac{d^n}{dt^n} D_{at}^{\alpha-n} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} f(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Здесь $n-1 < \alpha \leq n$, $n \in N$; $\text{sign}(z)$ определяется равенствами $\text{sign}0=0$, $\text{sign}z=z/|z|$, ($z \neq 0$); $\Gamma(\alpha)$ - гамма-функция. Для дифференцируемых на отрезке $[a, b]$ функций определения дробных производных по Риману-Лиувиллю и Летникову эквивалентны. В настоящее время достаточно широко используется формулировка Капуто:

$${}_C D_{at}^\alpha f(t) = \text{sign}^n(t-a) {}_{RL}D_{at}^{\alpha-n} f^{(n)}(t), \quad n-1 < \alpha \leq n, \quad n \in N. \quad (10)$$

Производные Римана-Лиувилля и Капуто связаны соотношением:

$${}_C D_{at}^\alpha f(t) = {}_{RL}D_{at}^\alpha f(t) - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{f^{(k)}(\tau)}{\Gamma(k-\alpha+1)} |\tau-t|^{k-\alpha}, \quad n-1 < \alpha \leq n, \quad n \in N. \quad (11)$$

В случае $\alpha = n$ получаем

$${}_{RL}D_{at}^n f(t) = {}_C D_{at}^n f(t) = \text{sign}^n(t-a) \frac{d^n}{dt^n} f(t), \quad n \in N. \quad (12)$$

Производная Капуто имеет ту же самую физическую интерпретацию, что и производная Римана-Лиувилля. В частности, при $f(0)=0$ и $0 < \alpha < 1$ имеем точное равенство

$${}_C D_{0t}^\alpha f(t) = {}_{RL}D_{0t}^\alpha f(t). \quad (13)$$

Для расчета производной Римана-Лиувилля необходимо знание значений функции, а для производной Капуто - ее производных, что намного сложнее. Некоторое достоинство производной Капуто состоит в том, что она равна нулю для постоянной функции, что более привычно для исследователя.

3. СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ АВТОРА НА БАЗЕ ФРАКТАЛОВ, СКЕЙЛИНГА И ДРОБНЫХ ИНТЕГРОПРОИЗВОДНЫХ: РОЖДЕНИЕ ФРАКТАЛЬНО-СКЕЙЛИНГОВОГО МЕТОДА

Эволюция взглядов автора и временное развитие на данный момент в ИРЭ им.

В.А. Котельникова РАН «фрактальной идеологии» исследований эскизно показана на рис. 1 и рис. 2; там же приведены сведения о моменте их развертывания [4, 5, 9-16]. На рис. 1 введены аббревиатуры: ФНОРС - фрактальный непараметрический обнаружитель радиолокационных сигналов, ФОС - фрактальный обнаружитель сигналов.

Необходимое примечание: В поле рис. 1 необходимо внести термин «Фрактальное комплексирование» (для многодиапазонных РСА) - в 2021 г. получен патент РФ совместно с коллегами из Военного учебно-научного центра ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» [17, 18].

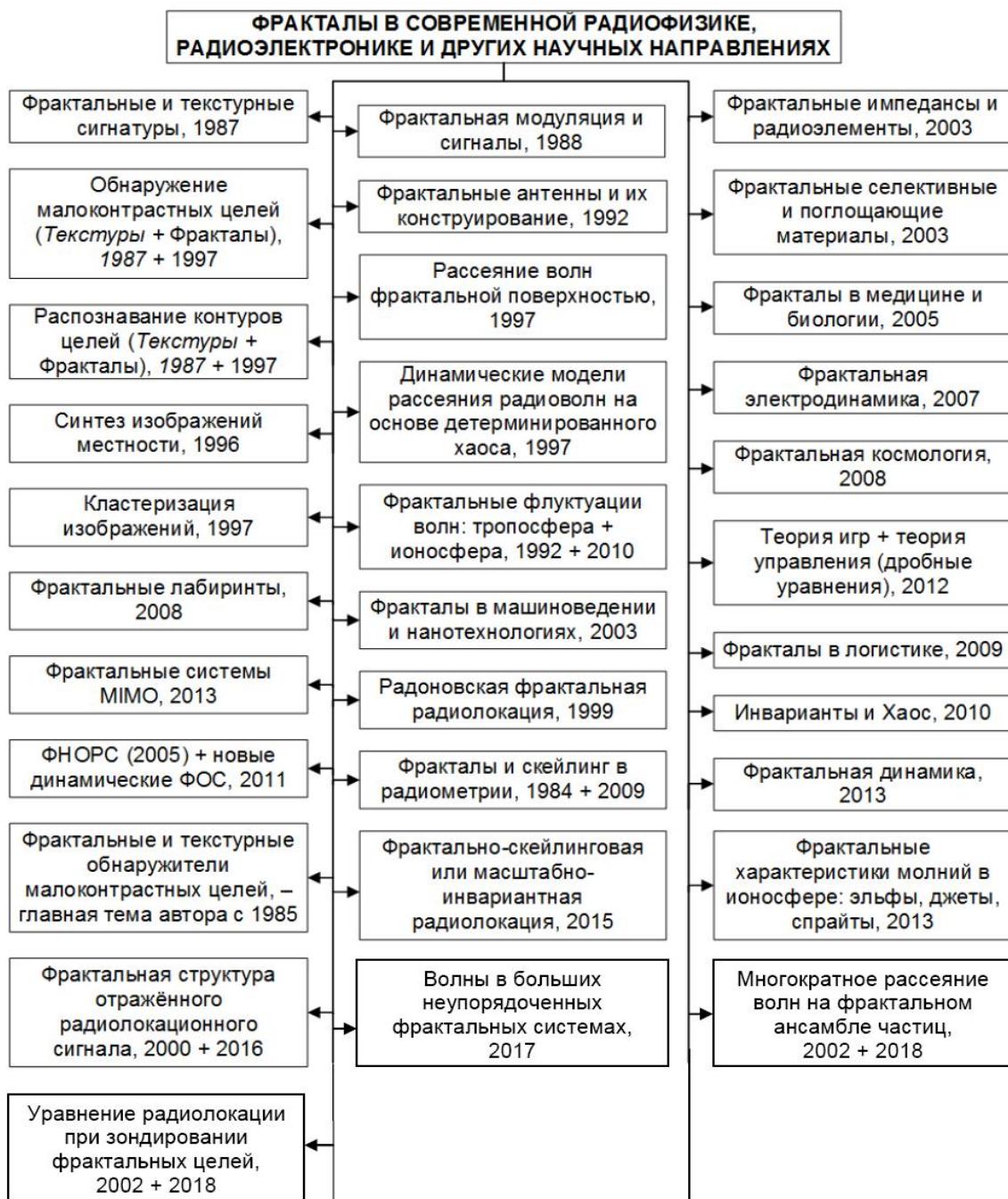


Рис. 1. Эскиз развития прорывных технологий на основе фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для нелинейной физики и радиоэлектроники



Рис. 2. Авторская концепция фрактальных радиосистем, датчиков, устройств и радиоэлементов

4. ТЕКСТУРНАЯ И ФРАКТАЛЬНАЯ (МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ) ОБРАБОТКА СЛАБЫХ СИГНАЛОВ И МАЛОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНТЕНСИВНЫХ НЕГАУССОВСКИХ ПОМЕХАХ И ШУМАХ

Разработанная автором классификация фракталов была в декабре 2005 г. в США одобрена и принята Б. Мандельбротом; она приведена на рис. 3, где D_0 - топологическая размерность пространства, в котором находится фрактал с дробной размерностью D .

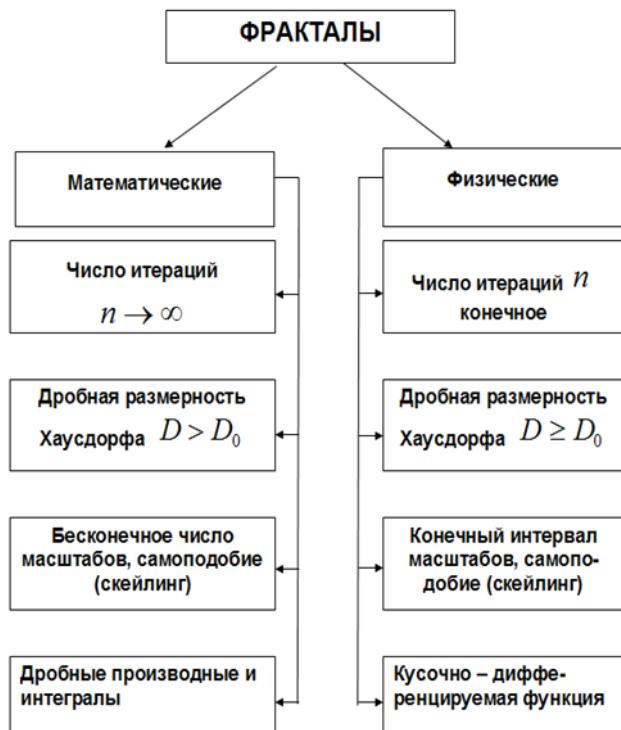


Рис. 3. Авторская классификация фрактальных множеств и сигнатур, одобренная и принятая Б.Б. Мандельбротом в 2005 г., США

Весьма плодотворным оказалось введение автором в практику измерений понятий *фрактальных сигнатур* и *фрактальных кепстров*. Фрактальные сигнтуры и фрактальные кепстры отражают свойство самоподобия и фрактальность реальных сигналов и электромагнитных полей. При этом большое значение приобретают топологические особенности выборки, а не усредненные реализации, имеющие зачастую другой характер.

Для того чтобы акцентировать внимание на учете этих особенностей, автор ввел термин *размерностный склероз* сигналов, полей и их фрактальных сигнатур.

При описании немарковских процессов для раскрытия физического смысла дробных производных часто в

литературе используется термин *асимптотический склероз*. Все сказанное выше учтено при синтезе множества новых алгоритмов обработки (рис. 4).

В [19] рассмотрены вопросы совместной оценки скейлинговых, сингулярных, мультифрактальных и анизотропных свойств текстуры изображений. Описана методика

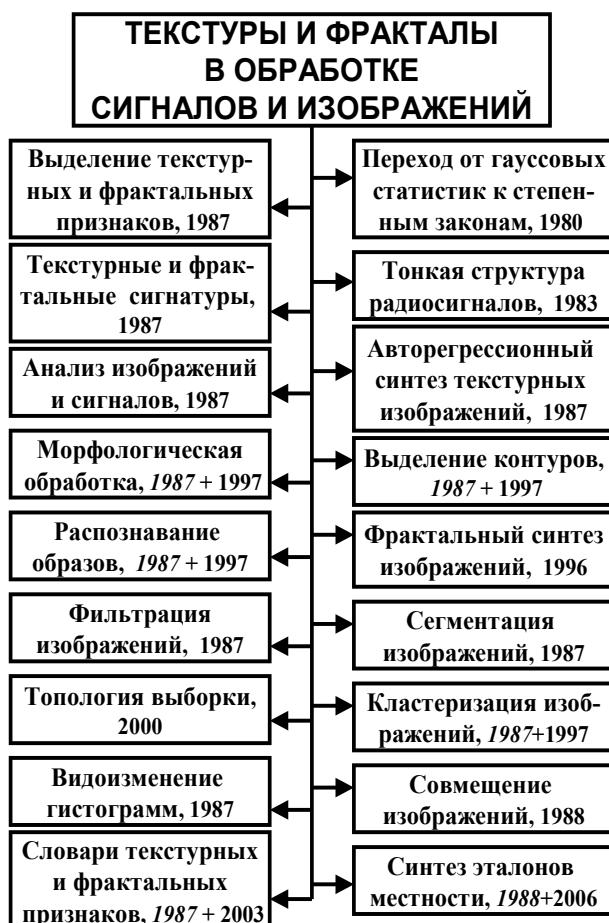


Рис. 4. Текстурные и фрактальные меры для малоконтрастных изображений и сверхслабых сигналов в интенсивных негауссовых помехах

формирования принципиально нового класса *топологических текстурно-мультифрактальных признаков*, позволяющих совместно оценивать различные фрактальные свойства текстуры. Проведена оценка эффективности сегментации реальных радиолокационных и оптических изображений алгоритмом FCM-кластеризации в пространстве предложенного класса признаков.

На основе полученных результатов и их сравнения с точностью сегментации по существующему признаку сделан вывод о большей информативности нового класса топологических фрактальных признаков. Показано, что свойства высокодетальных РЛИ и оптических изображений могут быть с достаточной для практики точностью описаны предложенной в [19] направленной *морфологической мультифрактальной сигнатурой*.

5. ФРАКТАЛЬНО-СКЕЙЛИНГОВАЯ ИЛИ МАСШТАБНО-ИНВАРИАНТНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ (МИР) И ЕЕ ПОСТУЛАТЫ: ТОПОЛОГИЯ ВЫБОРКИ В РАДИОЛОКАЦИИ

Создание первого эталонного словаря фрактальных признаков классов целей и постоянное усовершенствование алгоритмического обеспечения явились основными этапами при разработке и макетировании нами первого фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов (ФНОРС) в виде спецпроцессора [5, 6, 9].

Обнаружение малоконтрастных объектов на фоне интенсивных помех требует вычисления принципиально новой характеристики, которая отличается от функционалов, связанных с помехами и энергией сигнала, а определяется лишь топологией и размерностью принятого сигнала. Введение в научный обиход радиолокации понятий «детерминированный хаос», «текстура», «фрактал» и «фрактальная размерность D » позволило нам впервые в мире предложить для

обнаружение малоконтрастных объектов и применить новые размерностные и топологические (а не энергетические!) признаки или инварианты (рис. 4), которые объединены под обобщенным понятием «топология выборки» ~ «фрактальная сигнатура». Алгоритмы обнаружения протяженных объектов и целей на оптических и радиолокационных изображениях (РЛИ) с использованием лишь текстурной обработки были созданы нами с коллегами из ВГУ еще в 80-е годы XX века (рис. 5 и рис. 6).



Рис. 5. Новые топологические признаки и методы обнаружения малоконтрастных объектов на фоне помех (ТП - текстурные признаки, ЧФК - частотная функция когерентности)



Рис. 6. Основные виды предложенных автором топологических фрактально-скейлинговых обнаружителей сигналов

Предложенная автором *фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация (МИР)* базируется на *трех постулатах* [10, 12, 16, 20-21]: 1 - интеллектуальная обработка сигнала / изображения, основанная на теории дробной меры и скейлинговых эффектов, для расчета поля фрактальных размерностей D ; 2 - выборка принимаемого сигнала в шумах относится к классу устойчивых негауссовых распределений вероятностей D сигнала; 3 - максимум топологии при минимуме энергии входного случайного сигнала. Данные постулаты открывают в радиолокации принципиально новые возможности для обеспечения устойчивой работы при малых отношениях сигнал / шум или увеличения дальности действия радаров.

6. ПОДБОРКА ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведем по [15, 22, 23] часть основных результатов, полученных автором исключительно в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН за период с 1979 года по настоящее время. Итак:

Впервые исследованы *полные* ансамбли текстурных и пространственных корреляционно-спектральных признаков оптических и радиолокационных изображений реальных земных покровов с последующим выделением кластеров и определением наиболее информативных признаков для определенных классов текстур. Проведенные эксперименты продемонстрировали эффективность и общность предложенного подхода в задачах классификации земных покровов при комплексировании изображений на оптических и миллиметровых волнах. Установлена связь размеров объекта и анализируемого фрагмента оптических и радиолокационных изображений широкого класса земных покровов в случае оптимального обнаружения текстурными методами.

Предсказано наличие странного аттрактора, контролирующего радиолокационное рассеяние от растительных покровов. Впоследствии эффект был обнаружен экспериментально на длине волны 2,2 мм (2002). Показано, что интервал (время) предсказания интенсивности отраженного радиолокационного сигнала примерно на порядок превышает классическое время корреляции. Это позволило ввести в теорию радиолокации совершенно новую характеристику, а именно, *интервал (время) предсказания*, что расширяет методы радиолокации. Дано физическое обоснование применения фрактальных методов в современных областях радиофизики, радиоэлектроники и информационно-управляющих систем. В 1997 г. разработаны методы фрактальной модуляции и фрактальные сигналы, включая введенные автором *H* – сигналы. Впервые обнаружена и доказана эффективность и перспективность применения теории дробной меры и скейлинговых соотношений (для текстуры и фракталов) в случае обнаружения и распознавания (обобщенной фильтрации) одномерных и многомерных радиолокационных сигналов от малоконтрастных целей на фоне интенсивных негауссовских помех разного рода. Таким образом, это *принципиально новая радиотехника*, да и *вся радиоэлектроника* в целом.

Результаты (БПЛА, РСА, медицина и т.д.) показывают, что фрактальные методы обработки дают повышение качества и детализации объектов и целей в пассивном и активном режиме в несколько раз. Эти методы могут быть успешно применены для обработки информации с космических, авиационных комплексов, малозаметных высотных псевдоспутников (HAPS) или обнаружения кластеров HAPS и БПЛА, синтезированных кластеров космических антенн и космического мусора. Исследованы фрактальные характеристики эльфов, джетов и спрайтов – наиболее интересных типов недавно открытых высотных разрядов в ионосфере. Синтезированы алгоритмы выделения движущегося удаленного объекта неизвестной формы (фрактального или не фрактального) на малоконтрастном изображении, формируемом в оптико-электронных системах.

Впервые доказана принципиальная возможность синтеза новых фрактальных функций и фрактальных функционалов на основе теории нечетких множеств. Впервые показано, что физическое содержание теории дифракции, содержащей многомасштабные поверхности, становится более четким при фрактальном подходе и выделении фрактальной размерности *D* или фрактальной сигнатуры как параметра. Учет фрактальности сближает теоретические и экспериментальные характеристики индикаторов рассеяния земных покровов, что важно для радиолокации и дистанционного зондирования.

Получены аналоги уравнений Максвелла с дробными производными Капuto. Рассмотрена калибровочная инвариантность и выведено диффузионно-волновое уравнение для скалярного и векторного потенциалов. Найдено и проанализировано частное решение диффузионно-волнового уравнения. Проведен строгий электродинамический расчет многочисленных типов фрактальных антенн, принципы конструирования которых лежат в основе фрактальных частотно-избирательных поверхностей и объемов (фрактальные “сэндвичи”). Синтезировано на основе топологии

фрактальных лабиринтов семейство широкополосных миниатюрных фрактальных антенн. Впервые предложена и реализована модель “фрактального” конденсатора как фрактального импеданса. Созданы, обоснованы и применены фрактально-скейлинговые методы для формирования основ фрактальной элементной базы, фрактальных датчиков и фрактальных радиосистем. Перспективными элементами фрактальной радиоэлектроники являются функциональные элементы, фрактальные импедансы которых реализуются на основе фрактальной геометрии проводников на поверхности (фрактальные наноструктуры) и в пространстве (фрактальные антенны), фрактальной геометрии поверхностного микрорельефа материалов и т.д. Развитые подходы могут быть распространены на класс электродинамических задач при исследовании фрактальных магнитных кристаллов, фрактальных резонаторов, фрактальных экранов и заграждений, а также других фрактальных частотно-избирательных поверхностей и объемов.

Открыт, предложен и обоснован новый вид и новый метод современной радиолокации, а именно, фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация. Доказана эффективность функционалов, которые определяются топологией, дробной размерностью и текстурой принятого многомерного сигнала, для синтеза принципиально новых *не энергетических обнаружителей* малоконтрастных объектов на фоне помех. Это влечет за собой коренные изменения в самой структуре теоретической радиолокации, а также в ее математическом аппарате. Проведенные исследования в области теоретической радиолокации позволяют создавать новые фрактальные многочастотные ММО-системы. Разработаны постулаты фрактально-скейлинговой радиолокации, открывающие новые возможности для обеспечения устойчивой работы при малых отношениях сигнал / (шум + помеха) или увеличения дальности действия радаров.

Существенно развиты теоретические вопросы фрактальной неинерциальной релятивистской радиолокации и квантовой космологии в искривленном пространстве - времени отрицательной фрактальной размерности. Пример: на основе уравнения Шредингера с оператором дробного исчисления по пространственным координатам вычислен Фейнмановский интеграл по траекториям для обобщенного лагранжиана с оператором дробного дифференцирования по времени.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования являются приоритетными в мире и служат базой для дальнейшего развития и обоснования практического применения фрактально-скейлинговых и текстурных методов в современной радиофизике, радиолокации и нанотехнологиях, а также в совершенствовании принципиально новых и более точных фрактально-текстурных (топологических) методов обнаружения и измерения параметров сигналов в пространственно-временном радиолокационном канале распространения волн с рассеянием [4, 5, 9-23].

Фрактальная геометрия – громадная и гениальная заслуга Б.Б. Мандельброта (1924–2010). Но ее радиофизическое (радиотехническое) и практическое воплощение,

это заслуга известной в мире Российской научной школы фрактальных методов под руководством проф. А.А. Потапова (*особенно после знаменательной нашей встречи с Б.Б. Мандельбротом в США в 2005 г.*). Результаты научной деятельности А.А. Потапова в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по фрактально-скейлинговой и текстурной обработке информации, а также по фрактальным радиосистемам и радиоэлементам были опубликованы в четырех отчетных докладах Президиума РАН и в Докладе Правительству РФ.

Применение фрактальных систем, датчиков и узлов является принципиально новым решением, существенно меняющим принципы построения интеллектуальных радиотехнических систем и устройств. Фрактальные методы обработки дают повышение качества и детализации объектов и целей в несколько раз.

По монографиям автора поставлены курсы лекций по фракталам в различных университетах России и стран ближнего зарубежья, а также, в Китае. На 2021 год результаты фундаментальных исследований автора отражены в более чем 1 150 работах и 45 книгах и главах в них на русском и английском языках [23]. Необходимо отметить, что *фрактальные радары* являются по сути необходимым промежуточным этапом на пути перехода к *когнитивному радару* и *квантовому радару*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. – N.Y.: Freeman and Company, 1982. – 468 p.
2. Rogers C. A. Hausdorff Measures. – London: Cambridge Univ. Press, 1970. – 179 p.
3. Гнеденко Б. В., Колмогоров А. Н. Предельные распределения для сумм независимых случайных величин. – М.;Л.: Гостехтеореиздат, 1949. – 264 с.
4. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. – М.: Логос, 2002. – 664 с.; Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп.– М.: Университетская книга, 2005. – 848 с.
5. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Пахомов А. А., Герман В. А. Новейшие методы обработки изображений / Под ред. А. А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с. (грант РФФИ № 07–07–07005).
6. Oldham K. B., Spanier J. The Fractional Calculus. – N.Y.: Acad. Press, 1974. – 234 p.
7. Потапов А. А., Черных В. А. Дробное исчисление А. В. Летникова в физике фракталов. – Saarbrücken: LAMBERT Academic Publ., 2012. – 688 с.
8. Самко С. Г., Килбас А. А., Маричев О. И. Интегралы и производные дробного порядка, и некоторые их приложения. – Минск: Наука и техника, 1987. – 688 с.
9. Потапов А. А. Фракталы и хаос как основа новых прорывных технологий в современных радиосистемах. – В кн.: Кроновер Р. Фракталы и хаос в динамических системах. – М.: Техносфера, 2006. – С. 374–479.
10. Potapov Alexander A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. – Глава 12 в книге: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. C. Skiadas. – Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. – P. 195–218.
11. Potapov Alexander A. On the Indicatrixes of Waves Scattering from the Random Fractal Anisotropic Surface. – Глава 9 в книге: Fractal Analysis - Applications in Physics, Engineering and Technology / Ed. Fernando Brambila. – Rijeka: InTech, 2017. – P. 187–248.
12. Potapov Alexander A. Postulate “The Topology Maximum at the Energy Minimum” for Textural and Fractal-and-Scaling Processing of Multidimensional Super Weak Signals against a Background of Noises. – Глава 3 в книге: Nonlinearity: Problems, Solutions and Applications. – V. 2 / Ed. Ludmila A. Uvarova. – New York: Nova Science Publ., 2017. – P. 35–94.

13. Потапов А. А. Многократное рассеяние волн на фрактальном ансамбле частиц и в больших неупорядоченных фрактальных системах // В кн.: Турбулентность, динамика атмосферы и климата / Под ред. Г. С. Голицына и др. – М.: Физматкнига, 2018. – С. 564–573.
14. Alisultanov Z. Z., Agalarov A. M., Potapov A. A., Ragimkhanov G. B. Some Applications of Fractional Derivatives in Many - Particle Disordered Large Systems. – Глава 7 в книге: Fractional Dynamics, Anomalous Transport and Plasma Science / Ed. C. Skiadas. – Switzerland: Springer Int. Publ., 2018. – P. 125–154.
15. Гуляев Ю. В., Потапов А. А. Применение теории фракталов, дробных операторов, текстур, эффектов скейлинга и методов нелинейной динамики в синтезе новых информационных технологий для задач радиоэлектроники (в частности, радиолокации) // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – № 9. – С. 839–854.
16. Potapov Alexander A., Wu Hao, Xiong Shan. Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control. – Guangzhou: South China University of Technology Press (First edition: November 2020), 2020. – 280 p.
17. Патент RU 2746038 C1 G06T 5/50 (2020.09). Способ фрактального комплексирования многочастотных радиолокационных изображений / Кузнецов В. А., Потапов А. А., Аликулов Е. А. - // (Приоритет изобретения 05.09.2020 г. Дата государственной регистрации 06.04.2021 г.). Бюл. № 10.
18. Потапов А. А., Кузнецов В. А., Аликулов Е. А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2021. – Т. 24. – № 3. – С. 6–21.
19. Потапов А. А., Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Новый класс топологических текстурно-мультифрактальных признаков и их применение для обработки радиолокационных и оптических малоконтрастных изображений // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66. – № 5. – С. 457–467.
20. Потапов А. А. Применение принципов фрактально-скейлинговой или масштабно-инвариантной радиолокации в РСА, БЛА и МИМО-системах. – В кн.: Радиолокация. Результаты теоретических и экспериментальных исследований. В 2-х книгах. Кн. 2 / Под ред. А. Б. Бляхмана. – М.: Радиотехника, 2019. – С. 15–39.
21. Акиншин Р. Н., Румянцев В. Л., Петешов А. В., Пафиков Е. А., Потапов А. А. Физические основы устройства ракетно-артиллерийского вооружения. Алгоритмы и устройства функционирования бортовых радиотехнических средств воздушной разведки артиллерии. – Пенза: Филиал ВА МТО, Пенз. арт. инж. ин-т, 2018. – 400 с.
22. Потапов А. А. Математические основы фрактально-скейлингового метода в статистической радиофизике и приложениях // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии – РЭНСИТ. – 2021. – Т. 13. – № 3. – С. 245–296.
23. Профессор Александр Алексеевич Потапов. Библиографический указатель / Под ред. академика Ю. В. Гуляева. – М.: ЦПУ “Радуга”, 2019. – 256 с. (Одобрено Ученым советом ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН 26.12.2018).

REFERENCES

1. Mandelbrot, B. B. The Fractal Geometry of Nature. N.Y.: Freeman and Company, 1982. – 468 p.
2. Rogers, C. A. Hausdorff Measures. London: Cambridge Univ. Press, 1970. – 179 p.
3. Gnedenko, B. V., Kolmogorov, A. N. Limit Distributions for Sums of Independent Random Variables, London: Addison-Wesley, 1954. – 264 p.
4. Potapov, A. A. Fractals in Radio Physics and Radar. M.: Logos, 2002. – 664 p.; Potapov, A. A. Fractals in Radio Physics and Radar: Sample Topology. Ed. 2nd, rev. and additional. M.: University book, 2005. – 848 p.
5. Potapov, A. A., Gulyaev, Yu. V., Nikitov, S. A., Pakhomov, A. A., German, V. A. The latest methods of image processing / Ed. A. A. Potapov. M.: FIZMATLIT, 2008. – 496 p. (RFBR grant No. 07-07-07005).
6. Oldham, K. B., Spanier, J. The Fractional Calculus. New York: Acad. Press, 1974. – 234 p.

7. Potapov, A. A., Chernykh, V. A. Fractional calculus A.V. Letnikov in the physics of fractals. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publ., 2012. – 688 p.
8. Samko, S. G., Kilbas, A. A., Marichev, O. I. Integrals and derivatives of fractional order, and some of their applications. Minsk: Science and technology, 1987. – 688 p.
9. Potapov, A. A. Fractals and chaos as the basis of new breakthrough technologies in modern radio systems. In the book: Kronover, R. Fractals and chaos in dynamical systems. M.: Technosphere, 2006. – P. 374–479.
10. Potapov, Alexander A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. Chapter 12 in the book: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. C. Skiadas. Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. – P. 195–218.
11. Potapov, Alexander A. On the Indicatrixes of Waves Scattering from the Random Fractal Anisotropic Surface. Chapter 9 in the book: Fractal Analysis - Applications in Physics, Engineering and Technology / Ed. Fernando Brambila. Rijeka: InTech, 2017. – P. 187–248.
12. Potapov, Alexander A. Postulate “The Topology Maximum at the Energy Minimum” for Textural and Fractal-and-Scaling Processing of Multidimensional Super Weak Signals against a Background of Noises. Chapter 3 in the book: Nonlinearity: Problems, Solutions and Applications. V. 2 / Ed. Ludmila A. Uvarova. New York: Nova Science Publ., 2017. – P. 35–94.
13. Potapov, A. A. Multiple scattering of waves on a fractal ensemble of particles and in large, disordered fractal systems // In the book: Turbulence, dynamics of the atmosphere and climate / Ed. G. S. Golitsyna et al. Moscow: Fizmatkniga, 2018. – Pp. 564–573.
14. Alisultanov, Z. Z., Agalarov, A. M., Potapov, A. A., Ragimkhanov, G. B. Some Applications of Fractional Derivatives in Many - Particle Disordered Large Systems. Chapter 7 in the book: Fractional Dynamics, Anomalous Transport and Plasma Science / Ed. C. Skiadas. Switzerland: Springer Int. Publ., 2018. – P. 125–154.
15. Gulyaev, Yu. V. and Potapov, A. A. Application of Fractal Theory, Fractional Operators, Textures, Scaling Effects, and Nonlinear Dynamics Methods in the Synthesis of New Information Technologies in Radio Electronics (Specifically, Radiolocation) // Journal of Communications Technology and Electronics, 2019, Vol. 64, No. 9. – Pp. 911–925.
16. Potapov, Alexander A., Wu, Hao, Xiong, Shan. Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control. Guangzhou: South China University of Technology Press (First edition: November 2020), 2020. – 280 p.
17. Patent RU 2746038 C1 G06T 5/50 (2020.09). Method of fractal complexing of multifrequency radar images / Kuznetsov, V. A., Potapov, A. A., Alikulov, E. A. - // (The priority of the invention is 09/05/2020, the date of state registration is 04/06/2021). Bul. No. 10.
18. Potapov, A. A., Kuznetsov, V. A., Alikulov, E. A. Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars // Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, Vol. 24, No. 3. Pp. 6–21.
19. Potapov, A. A., Kuznetsov, V. A., and Pototskii, A. N. New Class of Topological Textural Multifractal Descriptors and Their Application for Processing Low-Contrast Radar and Optical Images // Journal of Communications Technology and Electronics, 2021, Vol. 66, No. 5. Pp. 581–590.
20. Potapov, A. A. Application of the principles of fractal-scaling or scale-invariant radar in SAR, UAV and MIMO systems. In the book: Radar. Results of theoretical and experimental research. In 2 books. Book. 2 / Ed. A. B. Blyakhman. M.: Radiotekhnika, 2019. – S. 15–39.
21. Akinshin, R. N., Rumyantsev, V. L., Peteshov, A. V., Pafikov, E. A., Potapov, A. A. Physical foundations of the device of missile and artillery weapons. Algorithms and devices for the functioning of airborne radio-technical means of air reconnaissance of artillery. Penza: Branch of VA MTO, Penz. art. Ing. Institute, 2018. – 400 p.
22. Potapov, Alexander A. Mathematical Foundations of the Fractal Scaling Method in Statistical Radiophysics and Applications // RENSIT, 2021, Vol. 13, No. 3. – Pp. 245–296.
23. Professor Alexander Alekseevich Potapov. Biobibliographic Index / Ed. Academician Yu. V. Gulyaev. M.: CPU "Raduga", 2019. – 256 p. (Approved by the Academic Council of the V. A. Kotelnikov IRE RAS on December 26, 2018).

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО КВАЗИРАДИОСИГНАЛА С НЕИЗВЕСТНЫМ ВРЕМЕНЕМ ПРИХОДА

Ю. Э. Корчагин, К. Д. Титов, Г. К. Усков, О. Н. Завалишина, К. В. Смусева

Воронежский государственный университет (ВГУ), Воронеж, Россия

Аннотация. В работе синтезирован квазиправдоподобный алгоритм обнаружения сверхширокополосного квазирадиосигнала с неизвестными амплитудой, начальной фазой, временем прихода и формой модулирующей функции на фоне белого гауссовского шума. Получены асимптотически точные (с ростом отношения сигнал/шум) выражения для характеристик обнаружения. Выполнен анализ синтезированного алгоритма и сделаны выводы о практической применимости.

Ключевые слова: сверхширокополосный; квазирадиосигнал; амплитуда; начальная фаза; время прихода; вероятность ложной тревоги; вероятность пропуска сигнала.

ALGORITHM FOR DETECTING AN ULTRA-WIDEBAND QUASI-RADIO SIGNAL WITH UNKNOWN ARRIVAL TIME

Y. E. Korchagin, K. D. Titov, G. K. Uskov, O. N. Zavalishina, K. V. Smuseva

Voronezh State University (VSU), Voronezh, Russia

Abstract. The detection quasi-likelihood algorithm for an ultra-wideband quasi-radio signal with unknown amplitude, initial phase, arrival time and form of the modulating function observed with white Gaussian noise is synthesized. Asymptotically exact (with an increase in the signal-to-noise ratio) expressions for the detection properties are obtained. The analysis of the synthesized algorithm is carried out and conclusions of the feasibility are made.

Keywords: ultra-wideband; quasi-radio signal; amplitude; initial phase; arrival time; false alarm probability; missing probability.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем существующих систем связи является дефицит частотного ресурса, необходимого для обеспечения приемлемого качества услуг, связанных с мобильной передачей данных в условиях продолжающегося экспоненциального роста трафика и грядущей эры Интернета вещей. В настоящее время достаточно отчётливо прослеживается два пути развития радиоэлектронной техники. Первый связан с дальнейшим улучшением технических характеристик узкополосных и широкополосных систем связи и основан на эволюционном развитии уже традиционных принципов и подходов, второй – с внедрением новых способов обработки сверхширокополосных (СШП) сигналов и соответствующих им технических решений с учётом последних достижений во многих областях фундаментальной и прикладной науки [1-6]. Радиофизические системы, работающие в узкой полосе частот и использующие в качестве несущего колебания для передачи информации гармонические сигналы, к настоящему времени практически полностью исчерпали свои возможности повышения скорости. Использование широкополосных и СШП сигналов в

телекоммуникационных и радиолокационных системах позволяет повысить эффективность использования радиочастотного спектра и увеличить скорость передачи информации.

Сверхширокополосные сигналы, достаточно широко распространены в современной радиофизике и радиоэлектронике, а методы их обработки являются предметом исследований в последние десятилетия [1-6]. Хотя количество научных публикаций, посвящённых синтезу и анализу алгоритмов обработки СШП сигналов, достаточно велико, к настоящему времени наиболее широкое применение получили два класса СШП сигналов: импульсные СШП сигналы (IR-UWB, impulse radio ultra-wideband) и на основе несущей (MB-UWB, multi-band ultra-wideband) [1]. Помимо перечисленных классов перспективным является промежуточный класс сигналов – сверхширокополосные квазирадиосигналы (КРС) [4, 6]. Их структура подобна узкополосным радиосигналам, однако условие относительной узкополосности для них не выполняется. Также в СШП КРС отсутствуют недостатки присущие IR-UWB, и они технически более просто реализуемые, чем MB-UWB.

Радиофизические информационные системы вынуждены работать в условиях сложной помеховой обстановки, когда помимо шума в наблюдаемой реализации присутствуют помехи различных видов (шумовые, импульсные, структурные и др.). В силу особенностей процесса распространения сигнала в беспроводном канале, а также из-за возможной неточности модели на приёмной стороне могут оказаться неизвестными параметры сигнала, такие как амплитуда, начальная фаза, длительность, время прихода и форма модулирующей функции. Различные алгоритмы обнаружения СШП КРС с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью, например, рассмотрены в [4, 6]. Помимо этого, современные и перспективные телекоммуникационные системы беспроводных персональных сетей часто используют позиционно-импульсную модуляцию (PPM, pulse-position modulation) для передачи СШП сигналов. Например, в работах [1-3] исследуется оценка производительности различных схем демодуляции PPM, используемых в приемниках IR-UWB. Данный метод имеет преимущество над амплитудной (OOK, on-off keying), амплитудно-импульсной (PAM, pulse amplitude modulation) и MB-UWB модуляциями, но при этом приёмник должен обрабатывать сигнал с неизвестным временем прихода.

В результате интенсивных исследований в области статистической радиофизики и информатики количество научных публикаций, посвящённых обработке сигналов, довольно велико. Однако значительная их часть получена в основном для узкополосных сигналов [7], а также для СШП сигналов без учёта их структуры [5]. Заметная часть известных алгоритмов являются эвристическими или синтезированы без учёта априорной параметрической неопределённости [1-3, 6]. Полученные результаты неприменимы для реальных систем связи, использующих СШП КРС, ввиду отсутствия гармонической компоненты в сравнении со сверхкоротким импульсом (СКИ) и существенного использования условия относительной узкополосности в сравнении с узкополосным радиосигналом. При этом в работе [6] рассмотрена задача обнаружения СШП КРС с неизвестным временем прихода, амплитудой и начальной фазой, однако

полагается известной формой модулирующей функции. В практических приложениях данный алгоритм не может быть реализован ввиду существенного влияния процессов излучения и распространения на форму сигнала.

Таким образом, в данной работе выполнен синтез и анализ квазиправдоподобного алгоритма обнаружения СШП КРС с неизвестными амплитудой, начальной фазой, временем прихода и формой модулирующей функции. Предполагается, что сигнал нерегулярный, начинается и заканчивается скачком.

2. СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ

Запишем СШП КРС с неизвестным временем прихода в виде [5]

$$s(t-\lambda, a, \varphi) = af(t-\lambda) \cos(\omega_0(t-\lambda) - \varphi) I\left(\frac{t-\lambda}{\tau}\right), \quad (1)$$

где $f(x)$ – модулирующая функция, a , φ – априори неизвестные амплитуда и начальная фаза гармонического колебания, используемого для формирования СШП КРС, λ – неизвестное время прихода, ω_0 – априори известная частота сигнала,

$$I(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2, \\ 0, & |x| > 1/2 \end{cases}$$

– индикатор единичной длительности. Пусть на интервале времени $[0, T]$ доступна наблюдению (обработке) реализация гауссовского случайного процесса

$$\xi(t) = \gamma_0 s(t - \lambda_0, a_0, \varphi_0) + n(t), \quad (2)$$

где $n(t)$ – аддитивный гауссовский белый шум с нулевым математическим ожиданием и односторонней спектральной плотностью N_0 , γ_0 – параметр, который характеризует отсутствие или наличие сигнала (1) в наблюдаемой реализации (2), a_0 , φ_0 , λ_0 – неизвестные истинные значения параметров сигнала: амплитуды, начальной фазы и времени прихода соответственно. Будем считать, что априорный интервал возможных значений времени прихода $\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]$ выбран так, что принимаемый сигнал полностью располагается на интервале наблюдения.

Если модулирующая функция $f(t)$, а также значения параметров сигнала a_0 , φ_0 априори известны, то можно записать логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) и тем самым синтезировать максимально правдоподобный (МП) алгоритм обнаружения. В соответствии с методом МП необходимо сформировать логарифм ФОП

$$L(\lambda, a, \varphi) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t) u(t - \lambda, a, \varphi) dt - \frac{1}{N_0} \int_0^T u^2(t - \lambda, a, \varphi) dt. \quad (3)$$

Здесь $u(t - \lambda, a, \varphi)$ – опорный сигнал приёмника. В случае МП алгоритма обнаружения опорный сигнал совпадает с принимаемым $u(t - \lambda, a, \varphi) = s(t - \lambda, a, \varphi)$. Однако в общем случае эти сигналы могут отличаться $u(t, a, \varphi) \neq s(t, a, \varphi)$, например, в

силу незнания на приёмной стороне модулирующей функции $f(t)$ или амплитуды и начальной фазы задающего гармонического колебания. Обозначим $g(t)$ – модулирующая функция, используемая при формировании опорного сигнала, a^* , φ^* – ожидаемые значения амплитуды и начальной фазы соответственно.

Будем считать, что опорный сигнал всегда полностью размещается на интервале наблюдения $[0, T]$, следовательно, интеграл $\frac{1}{N_0} \int_0^T u^2(t - \lambda, a, \varphi) dt$ принимает одно и то же значение для всех λ , поэтому второе слагаемое решающей статистики (3) не зависит от временного положения сигнала на интервале наблюдения. Выделим из выходного сигнала оптимального приёмника (3) слагаемое, зависящее от неизвестного параметра

$$L_u(\lambda) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t) u(t - \lambda, a^*, \varphi^*) dt, \quad (4)$$

$$u(t - \lambda, a^*, \varphi^*) = a^* g(t - \lambda) \cos(\omega(t - \lambda) - \varphi^*) I\left(\frac{t - \lambda}{\tau}\right). \quad (5)$$

Для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала воспользуемся квазиправдоподобным (КП) алгоритмом обнаружения, основанным на сравнении наибольшего максимума решающей статистики (4) с некоторым порогом. Если $L = \sup_{\lambda} L_u(\lambda) > h$, то выносится решение о наличии сигнала ($\gamma = 1$), если $L < h$ – об отсутствии ($\gamma = 0$), то есть

$$L = \sup_{\lambda} L_u(\lambda) \stackrel{\gamma=0}{\leq} h, \quad \lambda \in [\Lambda_1; \Lambda_2]. \quad (6)$$

Заметим, что решающая статистика (4) не является логарифмом ФОП ввиду несовпадения предполагаемых формы модулирующей функции, амплитуды, начальной фазы с их истинными значениями, поэтому алгоритм обнаружения (6) является эвристическим.

3. АНАЛИЗ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ

Для определения характеристик КП алгоритма обнаружения (6) исследуем статистические характеристики решающей статистики (4). Подставляя наблюдаемую реализацию (2) в выражение (4), представим решающую статистику $L_u(\lambda)$ в виде суммы сигнальной и шумовой составляющих

$$L_u(\lambda) = \gamma_0 S(\lambda, \lambda_0) + N(\lambda), \quad (7)$$

где

$$S(\lambda, \lambda_0) = \frac{2}{N_0} \int_0^T s(t - \lambda_0, a_0, \varphi_0) u(t - \lambda, a^*, \varphi^*) dt, \quad (8)$$

$$N(\lambda) = \frac{2}{N_0} \int_0^T n(t) u(t - \lambda, a^*, \varphi^*) dt \quad (9)$$

– сигнальная и шумовая составляющие. Подставляя сигналы (1) и (5) в выражения (8) и (9), получаем для сигнальной составляющей

$$S(\lambda, \lambda_0) = \frac{2a^* a_0}{N_0} \int_{\max(\lambda, \lambda_0) - \frac{\tau}{2}}^{\min(\lambda, \lambda_0) + \frac{\tau}{2}} g(t - \lambda) f(t - \lambda_0) \cos(\omega(t - \lambda) - \varphi^*) \cos(\omega(t - \lambda_0) - \varphi_0) dt \quad (10)$$

и для шумовой составляющей

$$N(\lambda) = \frac{2a^*}{N_0} \int_{\lambda - \frac{\tau}{2}}^{\lambda + \frac{\tau}{2}} n(t) g(t - \lambda) \cos(\omega(t - \lambda) - \varphi^*) dt. \quad (11)$$

Будем аналогично [5] считать, что положение максимума сигнальной функции $S(\lambda, \lambda_0)$ совпадает с истинным значением времени прихода сигнала λ_0 . Для этого необходимо выполнение неравенств

$$S(\lambda, \lambda_0) > 0, \quad dS(\lambda, \lambda_0)/d\lambda \Big|_{\lambda=\lambda_0+0} < 0, \quad dS(\lambda, \lambda_0)/d\lambda \Big|_{\lambda=\lambda_0-0} > 0.$$

Обозначим

$$S_0 = \sup_{\lambda} S(\lambda, \lambda_0) = S(\lambda_0, \lambda_0) = \frac{2a^* a_0}{N_0} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} g(t) f(t) \cos(\omega t - \varphi^*) \cos(\omega t - \varphi_0) dt$$

– величина сигнальной функции (10) в точке истинного значения параметра λ_0 ,

$\sigma_N^2 = \langle N^2(\lambda) \rangle = \frac{2a^{*2}}{N_0} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} g^2(t) \cos^2(\omega t - \varphi^*) dt$ – дисперсия шумовой составляющей.

Перепишем выражение (7) в виде

$$L_u(\lambda) = \gamma_0 S_0 \hat{S}(\lambda, \lambda_0) + \sigma_N \hat{N}(\lambda) = \sigma_N \left[\tilde{z} \hat{S}(\lambda, \lambda_0) + \hat{N}(\lambda) \right],$$

где

$$\begin{aligned} \hat{S}(\lambda, \lambda_0) &= \frac{S(\lambda, \lambda_0)}{S_0} = \\ &= \frac{\int_{\max(\lambda, \lambda_0) - \frac{\tau}{2}}^{\min(\lambda, \lambda_0) + \frac{\tau}{2}} g(t - \lambda) f(t - \lambda_0) \cos(\omega(t - \lambda) - \varphi^*) \cos(\omega(t - \lambda_0) - \varphi_0) dt}{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g(t) f(t) \cos(\omega t - \varphi^*) \cos(\omega t - \varphi_0) dt}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\hat{N}(\lambda) = \frac{N(\lambda)}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{2}{N_0}} \frac{\int_{\lambda - \frac{\tau}{2}}^{\lambda + \frac{\tau}{2}} n(t) g(t - \lambda) \cos(\omega(t - \lambda) - \varphi^*) dt}{\sqrt{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g^2(t) \cos^2(\omega t - \varphi^*) dt}} \quad (13)$$

– нормированные сигнальная (12) и шумовая (13) составляющие,

$$\tilde{z}^2 = \frac{S_0^2}{\sigma_N^2} = z^2 \left(\frac{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g(t)f(t) \cos(\omega t - \varphi^*) \cos(\omega t - \varphi_0) dt}{\sqrt{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g^2(t) \cos^2(\omega t - \varphi^*) dt \int_{-\tau/2}^{\tau/2} f^2(t) \cos^2(\omega t - \varphi_0) dt}} \right)^2 = z^2 K_{fg}^2, \quad (14)$$

– отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе КП приёмника,

$$z^2 = \frac{2a_0^2}{N_0} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} f^2(t) \cos^2(\omega t - \varphi_0) dt$$

– ОСШ при оптимальном приёме (при совпадении модулирующих функций принятого и опорного сигналов $f(t) = g(t)$),

$$K_{fg} = \frac{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g(t)f(t) \cos(\omega t - \varphi^*) \cos(\omega t - \varphi_0) dt}{\sqrt{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g^2(t) \cos^2(\omega t - \varphi^*) dt \int_{-\tau/2}^{\tau/2} f^2(t) \cos^2(\omega t - \varphi_0) dt}}$$

– коэффициент корреляции между принимаемым и опорным сигналами.

Шумовая функция $\hat{N}(\lambda)$ (11) является реализацией центрированного гауссовского случайного процесса с корреляционной функцией

$$K(\lambda_1, \lambda_2) = \langle \hat{N}(\lambda_1) \hat{N}(\lambda_2) \rangle = \frac{\int_{\max(\lambda_1, \lambda_2) - \frac{\tau}{2}}^{\min(\lambda_1, \lambda_2) + \frac{\tau}{2}} g(t - \lambda_1) g(t - \lambda_2) \cos(\omega(t - \lambda_1) - \varphi^*) \cos(\omega(t - \lambda_2) - \varphi^*) dt}{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g^2(t) \cos^2(\omega t - \varphi^*) dt} \quad (15)$$

Будем далее считать, что ОСШ \tilde{z} на выходе КП обнаружителя достаточно велико и исследуем поведение сигнальной функции (12) в окрестности истинного значения λ_0 времени прихода. Разложим сигнальную функцию (13) в ряд Тейлора по параметру λ в окрестности точки λ_0 и ограничимся членом, содержащим первую производную. Согласно (12), сигнальная функция непрерывно дифференцируема в окрестности λ_0 справа и слева, исключая значение $\lambda = \lambda_0$, где производная терпит разрыв первого рода. Поэтому разложение функции (12) будет иметь вид

$$\hat{S}(\lambda, \lambda_0) = 1 + \begin{cases} \delta_1(\lambda - \lambda_0) + o(|\lambda - \lambda_0|), & \lambda < \lambda_0, \\ -\delta_2(\lambda - \lambda_0) + o(|\lambda - \lambda_0|), & \lambda > \lambda_0. \end{cases} \quad (16)$$

Здесь

$$\delta_1 = \left. \frac{d\hat{S}(\lambda_0, \lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0-0}, \quad \delta_2 = -\left. \frac{d\hat{S}(\lambda_0, \lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0+0}. \quad (17)$$

Находим производную функции (12) слева и справа от точки $\lambda = \lambda_0$, получим коэффициенты разложения (17) в виде

$$\delta_1 = \frac{g(\tau/2)f(\tau/2)\cos(\omega\tau/2 - \varphi^*)\cos(\omega\tau/2 - \varphi_0)}{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g(t)f(t)\cos(\omega t - \varphi^*)\cos(\omega t - \varphi_0)dt} -$$

$$-\frac{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} [g'(t)\cos(\omega t - \varphi^*) - g(t)\omega\sin(\omega t - \varphi^*)]f(t)\cos(\omega t - \varphi_0)dt}{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g(t)f(t)\cos(\omega t - \varphi^*)\cos(\omega t - \varphi_0)dt},$$

$$\delta_2 = \frac{g(-\tau/2)f(-\tau/2)\cos(-\omega\tau/2 - \varphi^*)\cos(-\omega\tau/2 - \varphi_0)}{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g(t)f(t)\cos(\omega t - \varphi^*)\cos(\omega t - \varphi_0)dt} -$$

$$-\frac{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} [g'(t)\cos(\omega t - \varphi^*) - g(t)\omega\sin(\omega t - \varphi^*)]f(t)\cos(\omega t - \varphi_0)dt}{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} g(t)f(t)\cos(\omega t - \varphi^*)\cos(\omega t - \varphi_0)dt}.$$

Рассмотрим теперь корреляционную функцию (15). Заметим, что она совпадает с сигнальной функцией (12) при равенстве $f(t) = g(t)$, $a_0 = a^*$, $\varphi_0 = \varphi^*$. Следовательно, для асимптотического разложения функции (15) при $|\lambda_1 - \lambda_2| \rightarrow 0$ можно использовать формулу (16), подставив в неё $g(t)$, a^* , φ^* вместо $f(t)$, a_0 , φ_0 соответственно

$$K(\lambda_1, \lambda_2) \approx 1 - \delta_0 |\lambda_1 - \lambda_2|, \quad (18)$$

$$\delta_0 = \frac{g^2(\tau/2)\cos^2(\omega\tau/2 - \varphi^*) + g^2(-\tau/2)\cos^2(-\omega\tau/2 - \varphi^*)}{2 \int_{-\tau/2}^{\tau/2} g^2(t)\cos^2(\omega t - \varphi^*)dt}.$$

Решающая статистика, обладающая асимптотическим разложением математического ожидания (16) и корреляционной функции (18) изучена в работе [5]. Используя результаты [5], можно найти вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала. Для ложной тревоги получаем выражение

$$\alpha = P[\sup L_u(\lambda) > h | \gamma_0 = 0] \approx 1 - \begin{cases} \exp\left[\frac{-\delta_0(\Lambda_2 - \Lambda_1)u \exp(-u^2/2)}{\sqrt{2\pi}}\right], & u \geq 1, \\ 0, & u < 1, \end{cases}$$

где $u = \frac{h}{\sigma_N}$ – нормированный порог, а величина $m = \delta_0(\Lambda_2 - \Lambda_1)$, которую принято

называть приведённой длиной априорного интервала значений времени прихода.

Вероятность пропуска сигнала определяется выражением

$$\beta = P[\sup L_u(\lambda) < h | \gamma_0 = 1].$$

Аналогично [5] представим в виде

$$\begin{aligned} \beta \approx & \left[B(1) - B(1+D_1) - B(1+D_2) + B(1+D_1+D_2) \right] \times \\ & \times \begin{cases} \exp\left[\frac{-\delta_0(\Lambda_2 - \Lambda_1)u \exp(-u^2/2)}{\sqrt{2\pi}} \right], & u \geq 1, \\ 0, & u < 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

где обозначено $B(x) = \exp\left[\frac{\tilde{z}^2(x^2-1)}{2} - u\tilde{z}(x-1) \right] \Phi[u - \tilde{z}x]$, $D_1 = \delta_1 / \delta_0$, $D_2 = \delta_2 / \delta_0$,

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt / \sqrt{2\pi} \text{ – интеграл вероятности.}$$

Рассмотрим случай, когда ожидаемый сигнал имеет прямоугольную модулирующую функцию $g(t) = 1$, а реализация наблюдаемых данных содержит СШП КРС с линейно меняющейся модулирующей функцией

$$f(t) = 2 \frac{q-1}{q+1} \frac{t}{\tau} + 1,$$

где величина $q = f(\tau/2)/f(-\tau/2)$ характеризует крутизну наклона функции $f(t)$.

На рис. 1 и 2 изображены зависимости вероятности пропуска сигнала β (19) от ОСШ \tilde{z} (14) при фиксированном значении вероятности ошибки первого рода $\alpha = 10^{-2}$, $\varphi_0 = 0$, $\varphi^* = 0$, $a_0 = a^*$, $(\Lambda_2 - \Lambda_1)/\tau = 10$. На рис. 1 кривые построены для $q = 2$ и различных значений параметра узкополосности $\kappa = \omega\tau/2\pi$. Величина κ характеризует степень узкополосности СШП КРС и равна количеству периодов гармонического колебания (1), укладывающихся на длительности сигнала τ_0 . Истинное значение длительности сигнала при расчёте кривых было выбрано посередине априорного интервала её возможных значений $\tau_0 = (T_2 + T_1)/2$. Сплошная кривая соответствует $\kappa \rightarrow 0$ (СКИ) [5], пунктирная – $\kappa \rightarrow \infty$ (узкополосный радиосигнал) [7], штриховая – $\kappa = 0.6$, штрих-пунктирная $\kappa = 1.6$ и штрих-пунктирная с двумя штрихами $\kappa = 0.5$. На рис. 2 изображены зависимости вероятности пропуска сигнала β (19) от ОСШ \tilde{z} (14) при $\kappa = 0.6$ и различных значениях параметра q : сплошная кривая соответствует $q = 2$, штриховая – $q = 1$, штрихпунктирная – $q = 0.5$ и штрихпунктирная с двумя штрихами – $q = 0.1$.

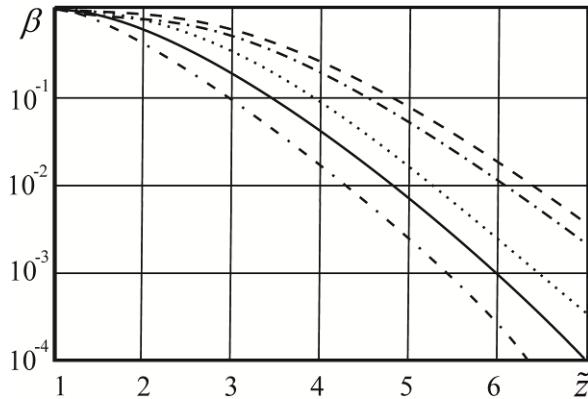


Рис. 1. Зависимость вероятности пропуска сигнала от ОСШ при различных значениях κ .

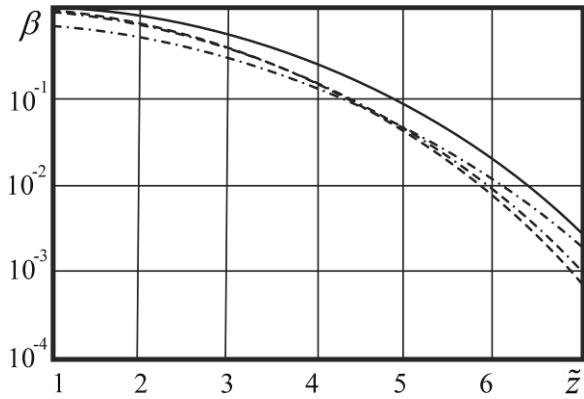


Рис. 2. Зависимость вероятности пропуска сигнала от ОСШ при различных значениях q .

Из рис. 1 видно, что параметр узкополосности κ оказывает существенное влияние на эффективность обнаружения сигнала. При обнаружении СШП видеосигнала, т.е. отсутствии гармонической составляющей в сигнале [5], или обнаружении узкополосного радиосигнала [7], вероятность пропуска сигнала при заданном ОСШ имеет фиксированное значение, т.е. отсутствует возможность повышения эффективности обработки сигнала путем изменения параметров излучаемого сигнала.

При всех прочих достоинствах СШП КРС, заключающихся в больших дальностях связи, простоте технической реализации и др., их использование позволяет осуществлять адаптивное управление эффективностью обнаружения сигнала в зависимости от его параметров, в частности параметра узкополосности. На примере кривой при $\kappa=0.5$ видно, что незначительное изменение параметра узкополосности в пределах 5-10% при абсолютном значении от 0,1 до 2 позволяет снизить вероятность пропуска сигнала до одного порядка и добиться лучшей эффективности, чем обнаружители узкополосных радиосигналов или СКИ. Изменением параметра узкополосности также можно компенсировать влияние расстроек по неизвестным параметрам, в частности времени прихода или виде модулирующей функции.

Из рис. 2 видно, что при $q \neq 1$ (отклонение формы входного сигнала от формы опорного) может приводить к снижению эффективности обнаружения СШП КРС с неизвестным временем прихода в несколько раз.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для практических приложений целесообразно на этапе выбора модели сигнала и анализа эффективности его обнаружения по рассмотренному в статье алгоритму осуществлять поиск локальных минимумов вероятностей ошибок для определения оптимальных значений параметра узкополосности и вида модулирующей функции. Также установлено, что выбор оптимального значения параметра $q=1$, т. е. при совпадении входного и опорного сигналов, соответствует наилучшей эффективности обнаружения с ростом ОСШ. Выполненный в работе синтез и анализ алгоритма обнаружения СШП КРС с неизвестным временем прихода позволит улучшить эффективность обнаружения устройств [1-3], использующих РРМ

модуляцию, но синтезированных для других форм сигналов, а также повысить эффективность устройств [4-6] при работе в условиях большей априорной неопределенности или в условиях сложной помеховой обстановки.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2020-2022 годы, проект №FZGU-2020-0036.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lin Z., Wei P. Pulse Position Modulation Time Hopping Ultra Wideband Sharing Signal for Radar and Communication System. 2006 CIE International Conference on Radar, 2006. – Pp. 1-4.
2. Jajodia B., Shaik R. A., Mahanta A. PPM demodulation schemes for IEEE 802.15.6 IR-UWB WBAN receivers. 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015. – Pp. 1-5.
3. Jayaprakash C. A. A New scheme for Ultra Wideband PPM communication. 2019 International Conference on Range Technology (ICORT), 2019, Pp. 1-5.
4. Трифонов А. П., Корчагин Ю. Э., Титов К. Д. Эффективность обнаружения одного класса сверхширокополосных сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности // Журнал технической физики, 2018, Т.88, № 8 , – С. 1235-1240.
5. Трифонов А. П., Сморгонский А. В. Характеристики квазиправдоподобного обнаружения финитного сигнала с неизвестным временем прихода. // Известия вузов. Радиоэлектроника, 2008, № 8. – С. 3-17.
6. Трифонов А. П., Руднев П. Е. Обнаружение сверхширокополосного квазирадиосигнала с неизвестным временем прихода на фоне белого шума. // Известия вузов. Радиоэлектроника, 2011, Т. 54, №6. – С. 458-473.
7. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Б., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981 – 640 с.

REFERENCES

1. Lin, Z., Wei, P., Pulse Position Modulation Time Hopping Ultra Wideband Sharing Signal for Radar and Communication System. 2006 CIE International Conference on Radar, 2006. – Pp. 1-4.
2. Jajodia, B., Shaik, R. A., Mahanta, A., PPM demodulation schemes for IEEE 802.15.6 IR-UWB WBAN receivers. 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015. – Pp. 1-5.
3. Jayaprakash, C. A., A New scheme for Ultra Wideband PPM communication. 2019 International Conference on Range Technology (ICORT), 2019, Pp. 1-5.
4. Trifonov, A. P., Korchagin, Y. E., Titov, K. D, Efficiency of the Detection of a Specific Wideband Signal under a Priori Parametric Uncertainty. // Tech. Phys., 2018, Vol. 63. – Pp. 1199–1204.
5. Trifonov, A. P., Smorgonsky, A. V., Characteristics of the quasi-probable detection of finite signal with the unknown time of arrival. // Radioelectronics and Communications Systems, 2008, Vol. 51. – Pp. 405-416.
6. Trifonov, A. P., Rudnev, P. E., Detection of an ultra-wideband quasi-radio signal with unknown arrival time against the background of white noise. // Radiophysics and Quantum Electronics, 2011, Vol. 54. – Pp. 415-429.
7. Akhmanov, S. A., Dyakov, Yu. B., Chirkin, A. S., Vvedenie v Statisticheskuyu Radiofiziku i Optiku [Introduction to Statistical Radiophysics and Optics]. M.: Nauka, 1981. – 640 p.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Я. Е. Львович¹, И. Я. Львович¹, А. П. Преображенский¹,
Ю. П. Преображенский¹, О. Н. Чопоров²

¹АНОО ВО ВИВТ, Воронеж, Россия

²ФГБОУ ВО ВГПУ, Воронеж, Россия

Аннотация. В данной работе рассматриваются проблемы распознавания элементов телекоммуникационных систем. Приведено описание ключевых характеристик алгоритмов. Обсуждаются полученные результаты.

Ключевые слова: распознавание сигнала, телекоммуникационная система, алгоритм.

ANALYSIS OF RECOGNITION OF ELEMENTS OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Ya. E. Lvovich¹, I. Ya. Lvovich¹, A. P. Preobrazhenskiy¹,
Yu. P. Preobrazhenskiy¹, O. N. Choporov²

¹ANOO VO VIVT, Voronezh, Russia

²FGBOU VO VGTU, Voronezh, Russia

Abstract. This paper deals with the problems of recognition of elements of telecommunication systems. The description of the key characteristics of the algorithms is given. The results obtained are discussed.

Keywords: signal recognition, telecommunication system, algorithm.

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе предлагается провести рассмотрение решения задачи, в которой осуществляется наблюдение за объектами телекоммуникационных сетей. При этом используются технологии компьютерного зрения.

В ходе анализа результатов наблюдений можно осуществить фиксацию преждевременной неисправности в телекоммуникационной сети и оборудовании. Цель работы состоит в достижении детектирования сетевых структур с высоким качеством, а также анализе аппаратного и программного обеспечения.

2. ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СТРУКТУР НА БАЗЕ АНАЛИЗА ПРИЗНАКОВ

Исследователями были разработаны алгоритмы дескриптора детектора SURF и USURF [1]. Они требуются для того, чтобы была ускорена локализация по ключевым точкам.

В данной работе, вместо процедуры вычисления инвариантности функции в целом изображении, будет уменьшение размера изображения. Отметим два шага в таком подходе.

1. Проведение извлечения определенной области.

При априорном знании объектов, подлежащих идентификации, рассматриваются данные по форме или информации о цветах.

Также могут быть привлечены массивы двоичных данных, которые являются, так называемыми, блобами. Они позволяют ограничить область с пикселями с похожими логическими структурами. Маркировка сегментации изображений связана с удалением блоба.

В ходе подобной процедуры сканируются и подвергаются нумерации любые новые области.

Есть индивидуальная маркировка при помощи идентификатора отсканированного изображения и каждого пикселя, который демонстрирует, внутри какой из областей он находится.

Распознавание блоба связано с использованием с применением алгоритма SUSAN [2].

2.Процесс выделения признаков.

Извлечение SIFT [3] функций осуществляется при прохождении нескольких шагов:

-Экстремальное значение по масштабному пространству определяется для разных масштабов и расположений изображений. Инвариантность связана с вычислением дифференциалов Гауссовых функций.

-Проводится локализация ключевых точек. Когда найдено локальное экстремальное значение, тогда ведется удаление точек, имеющих низкую контрастность.

-Происходит присвоение ориентации для кандидатов ключевых точек. При этом , исходят из локальных направлений по градиентам изображений.

Ключевые точки локализуются. По каждой из них происходит вычисление дескриптора.

Проводится расчет гистограмм градиентов в заданных областях.

Требуется два шага, чтобы провести вычисление SURF дескрипторов. Исходя из начальной информации осуществляется восстановление ориентация области. Затем применяется вейвлет-преобразование Хаара. Оно дает возможности для оценки доминирующего признака ориентации.

В алгоритме USURF проводится ускорение, за счет того, что в нем нет вычисления дескриптора. Такой подход может быть использован тогда, когда нет необходимости учета инвариантности вращения.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ

В ходе разработки аппаратной части устройства была спроектирована структурная схему. Она приведена на рис. 1.



Рис. 1. Иллюстрация структурной схемы

4. АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ

Была проведена разработка двухступенчатого алгоритма, в котором убираются лишние ключевые точки, которые получаются на основе методов SIFT и USURF.

На рис. 2 продемонстрирован этот алгоритм.

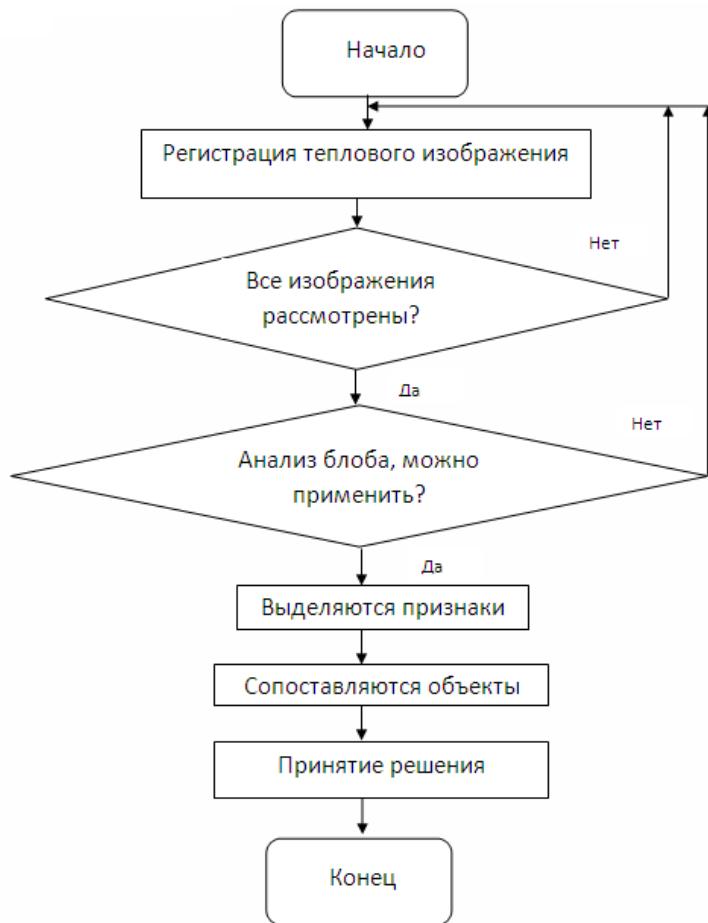


Рис. 2. Блок-схема алгоритма распознавания при обнаружении областей и выделении признаков

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс тестирования способа распознавания SURF осуществлялся на изображениях и видеоматериалах, имеющих множество последовательностей. В алгоритме в качестве ключевой задачи рассматривалось моделирование и проверка соответствия в ходе обнаружения контрольных точек на анализируемых объектах.

Требуется учитывать, что метод SURF характеризуется низкой вычислительной способностью с точки зрения распознавания объектов для режимов реального времени.

В этой связи в ходе решения задачи предварительно для предложенного подхода был применен способ, в котором происходит извлечение функций и определение соответствующих точек по коротким видеопоследовательностям.

В табл. 1 продемонстрированы результаты распознавания созданного алгоритма и существующих. В рамках предложенного подхода возникают возможности для того, чтобы уменьшить время обработки, связанного с соответствующей точкой. При этом используется информация об ориентации на основе расширенного окна и сокращения размера дескриптора функций.

Таблица 1 – Иллюстрация экспериментальных результатов

| Способ | Значение коэффициента распознавания | Значение времени распознавания, с |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Предлагаемый способ | 93% | 0.63 |
| Подход SURF | 83% | 0.69 |
| Подход SIFT | 94% | 3.23 |

Анализ таблицы 1 показывает, что каждый из дескрипторов ведет разным образом. Высокие значения коэффициента распознавания по особым точкам на изображении были получены для дескрипторы SIFT и предлагаемого подхода. Для метода SURF было получено самое меньшее из значений скоростей.

В ходе тестирования работоспособности способа распознавания, мы обучили собственный классификатор. В базе данных содержится 60 изображений элементов телекоммуникационных сетей (40 из которых были направлены обучение классификатора, а остальные 20 на тестирование классификатора).

Когда по значениям точности классификации осуществляются процессы расчета, мы исходим из того, что в изображении могут быть не более, чем один сигнал каждого из типов. То есть, происходит вычисление точности суммирования по истинным положительным и истинным отрицательным случаям. При этом точность значения рассматриваем в качестве весьма грубой оценки. На ее основе не имеем полную информации относительно того, какая в классификаторе производительность. Тогда применяем меру F1 как ключевой оценочный показатель в ходе объединения точности и возврата в общую метрику

$$F_1 = \frac{2 * PPP \cdot RRR}{PPP + RRR}. \quad (1)$$

В формуле PPP рассматривается в виде точности классификации, RRR демонстрирует возврат к единой метрике.

На рис. 3 продемонстрированы полученные результаты.

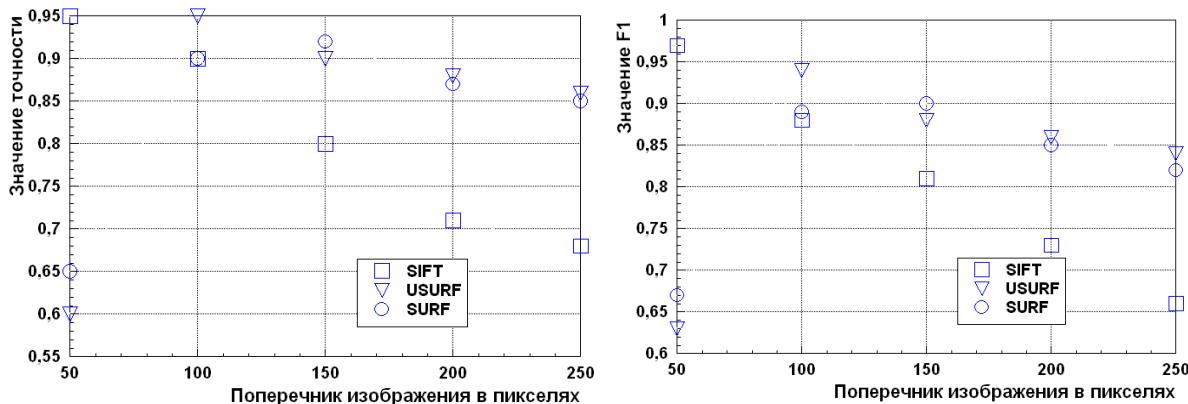


Рис. 3. Иллюстрация результата измерения размеров области

Элемент телекоммуникационной системы при распознавания рассматривался с прямоугольной формой. По дескрипторам размер был приблизительно 3200 - 3600 изображений. В базе данных содержалось 60 изображений. Они масштабируются к соответствующему размеру анализируемой области. В табл. 2 и табл. 3 приведены результаты эксперимента.

Таблица 2 Иллюстрация экспериментальных результатов без извлечения анализируемой области

| Способ | Характеристики метрики | |
|--------|------------------------|-------|
| | Значение точности | F1 |
| SIFT | 56.2 | 31.17 |
| SURF | 37.33 | 29.42 |
| USURF | 44.3 | 28.22 |

Таблица 3 Экспериментальные результаты по анализируемой области с учетом извлечения признаков

| Способ | Характеристики метрики | | |
|--------|------------------------|-------|------------------|
| | Значение точности | F1 | Значение размера |
| SIFT | 81.4 | 68.44 | 81 |
| SURF | 76.21 | 49.7 | 41 |
| USURF | 76.33 | 49.7 | 41 |

В табл. 2 продемонстрирована самая лучшую точность и соответствие F1, измеренные значения, которые получены по разным способам, вместе с соответствующим размером анализируемой области.

В табл. 3 продемонстрированы результаты, которые получены на основе способов извлечения исходных изображений (без анализируемой области). После рассмотрения полученных результатов было установлено, что способ SIFT является эффективным в

обоих случаях. На рис. 4 проведена иллюстрация изменения показателей прямоугольного объекта.

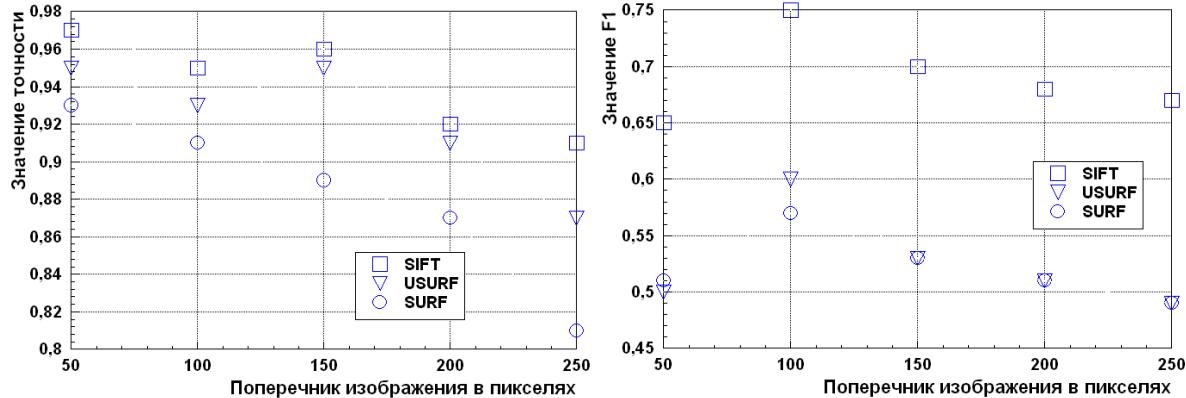


Рис. 4. Иллюстрация изменения показателей прямоугольного элемента телекоммуникационных структур

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были разработаны алгоритмы распознавания элементов телекоммуникационных систем. Первый базируется на способе SIFT. В качестве достоинства можно указать устойчивость к небольшим поворотам, а также инвариантность по определению объектов в движении. Второй базируется на способе SURF. В нем ищутся особые точки в изображениях, формируются их дескрипторы, которые будут инвариантны к размерам и поворотам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. SURF: Speeded up robust features // Conference: Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision - Volume Part I, July 2006.
2. S.-W. Ha and Y.-H. Moon. Multiple object tracking using sift features and location matching. / International Journal of Smart Home, / 5(4):17-26, 2011.
3. GaoHongjun C, Zhu H., Guo Y. Analysis and improvement of SUSAN algorithm / Signal Processing // October 2012, V.92(10), pp.2552-2559.

REFERENCES

1. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. SURF: Speeded up robust features // Conference: Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision - Volume Part I, July 2006.
2. S.-W. Ha and Y.-H. Moon. Multiple object tracking using sift features and location matching. / International Journal of Smart Home, / 5(4):17-26, 2011.
3. GaoHongjun C, Zhu H., Guo Y. Analysis and improvement of SUSAN algorithm / Signal Processing // October 2012, V.92(10), pp.2552-2559.

АНАЛИЗ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

О.М. Лепешкин¹, О.А. Остроумов², А.Д. Синюк², В.В. Кулаков²

¹Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), Россия, Санкт-Петербург

²Военная орденов Жукова и Ленина краснознаменная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (Военная академия связи), Россия, Санкт-Петербург

Аннотация. На функционирование системы связи оказывают влияние различные дестабилизирующие факторы. Для определения методов и способов защиты объектов и системы, а также обеспечения устойчивого функционирования необходим анализ таких факторов. В докладе представлена классификация и приведен краткий анализ таких факторов.

Ключевые слова: критические объекты, система связи, дестабилизирующие факторы, функционирование.

DESTABILIZING FACTORS AFFECTING THE COMMUNICATION SYSTEM FUNCTIONING ANALYSIS

O.M. Lepeshkin¹, O.A. Ostroumov², A.D.Sinyuk², V.V.Kulakov²

¹Civil engineering institute, Peter the great St. Petersburg polytechnic university (SPbPU), Russia, St. Petersburg

²Military orders of Zhukov and Lenin red banner academy of telecommunications. Marshal of the soviet union S.M. Budyonny (Military Academy of Communications), Russia, St. Petersburg

Abstract. The communication system functioning is influenced by various destabilizing factors. To determine the methods and ways of protecting objects and systems, as well as ensuring sustainable operation, an analysis of such factors is required. The report provides a classification and provides a brief analysis of such factors.

Keywords: critical objects, communication system, destabilizing factors, functioning.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая реально существующую систему связи (СС) необходимо уделять внимание влиянию на нее различных факторов, нарушающих ее функционирование. Для систем электросвязи дестабилизирующими факторами, влияющими на нарушение работоспособности элементов сети, являются внутренние, обусловленные надежностью, и внешние, обусловленные живучестью, воздействия. Воздействие на отдельные элементы системы, которые имеют важное (критическое) значения для нее, может привести к невыполнению системой своих функций [1, 2, 3, 4].

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Дестабилизирующие воздействия, нарушающие функционирование системы связи бывают естественными и искусственными (рис. 1), к ним относятся различные виды оружия, террористические акты и преднамеренные электромагнитные воздействия [5, 6].

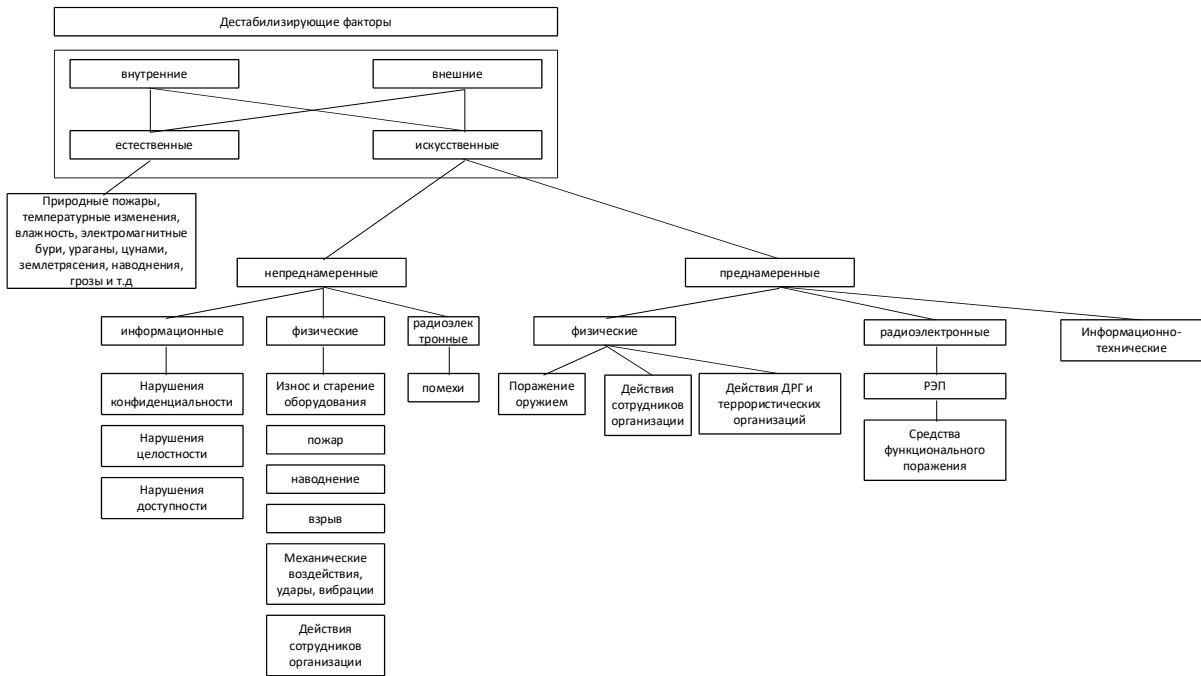


Рис. 1. Дестабилизирующие факторы, влияющие на функционирование системы связи

В доктрине информационной безопасности РФ вводится понятие информационно-технические воздействия направленные на информационную инфраструктуру, к которой относятся и элементы СС. Рассмотрим некоторые виды искусственных дестабилизирующих факторов и информационно-технических воздействий (ИТВ) влияющих на функционирование СС.

В соответствии с [7] оружие делится (рис. 2) на обычное, оружие на новых физических принципах (ОНФП) и оружие массового поражения (ОМП) (ядерное, химическое и биологическое (ЯО, ХО, БО)). Наиболее опасными являются ОМП и ОНФП, кроме этого высокоточное оружие (ВТО).

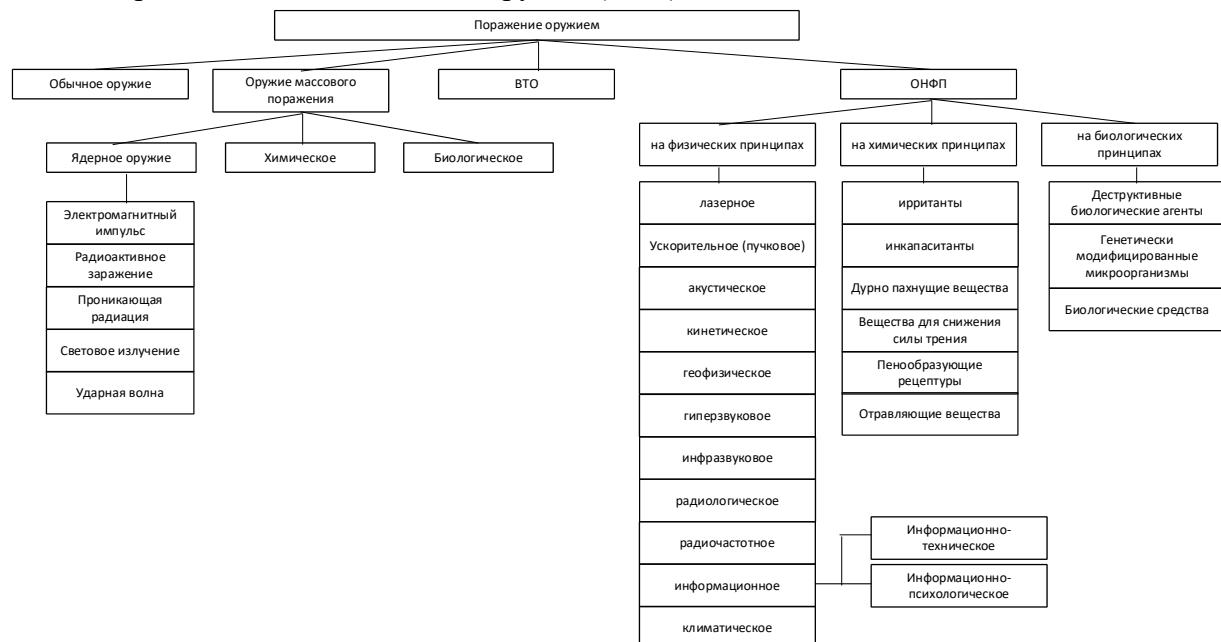


Рис. 2. Классификация оружия, влияющего на функционирование системы связи

Обычное оружие (обычные средства поражения) представляет собой оружие применение которого не приводит к большим разрушениям, массовым потерям людей. Это материальное холодное, стрелковое, реактивное и т. д.

Оружие массового поражения включает химическое, биологическое и ядерное оружие. Основные поражающие факторы ЯО представлены на рисунке 2. Наибольшее влияние на технику связи оказывают электромагнитный импульс и ударная волна.



Рис. 3. Классификация ВТО, влияющего на функционирование системы связи

Высокоточное оружие (ВТО) предназначено для поражения целей с высокой вероятностью. Как правило такое оружие в своем составе имеет систему управления и наведения, при этом в процессе доставки снаряда к цели траектория его движения может корректироваться. ВТО (рис. 3) делятся по масштабу применения (тактические, оперативно-стратегические), по типу поражаемых целей (радиоизлучающие, теплоизлучающие, контрастные, общего назначения), по базированию (наземные, воздушные, космические, морские), по методу управления (телеуправление, автономное, самонаведения, смешанное), по системе наведения (телевизионная, тепловизионная, лазерная, радиолокационная, корреляционная, разностнодальномерная), по типу боеприпаса (БР, КР, УР, УАБ, УАК, ПТУР, ЗУР), РУК (командира СВ на ТВД, командира BBC на ТВД, командира армейского корпуса (АК), командира дивизии), РОК (командиров АК, КД, Кбр).

ОНФП называется оружие, поражающее действие которых основывается на ранее не использовавшихся в военных целях процессах или явлениях. Массового применения данное оружие не получило, но разработки в этом направлении продолжаются уже давно. Классификация ОНФП представлена на рис. 2. Оно делится на оружие летального и не летального действия и его можно разделить [8] на оружие основанное на физических, химических и биологических принципах: механическое оружие (механические блокирующие системы и блокирующие по средствам химических составов), электрическое оружие (электронные импульсы), электромагнитное (когерентное (лазерное) излучение, радиочастотное, средства РЭБ), химическое (воздействие на вещества и материалы), биологическое/биотехнологическое (воздействие на технику и оборудование), информационное (компьютерные вирусы, заранее внедренные блоки программного обеспечения, ВВТ с дистанционным санкционированием применения) и т.д.

Информационно-технические воздействия (ИТВ) — воздействия на информационный ресурс, информационную систему, информационную инфраструктуру, технические средства или программы, предназначенные для получения и передачи, обработки и хранения, а также воспроизведения информации с целью вызвать структурные или функциональные изменения в системе. ИТВ (рис. 4) делится [9] по виду (одиночные и групповые), по характеру поражающих свойств (обычные, высокоточные, комплексные), по типу (пассивные (перехват и НСД) и активные (разрушающие, манипулирующие, блокирующие, отвлекающие)), по цели использования (атакующие (по ориентированности на свойства информационной безопасности (нарушающие конфиденциальность, целостность, доступность), психологические воздействия на пользователей), обеспечивающие (разведка (традиционная техническая, компьютерная, из открытых источников), преодоление системы защиты), оборонительные (выявляющие, блокирующие, контр-атакующие, отвлекающие, противодействие обеспечивающим воздействиям), комбинированные), по способу реализации (алгоритмические (программные и аппаратные), физические (электромагнитные, акустические, гидроакустические и др)

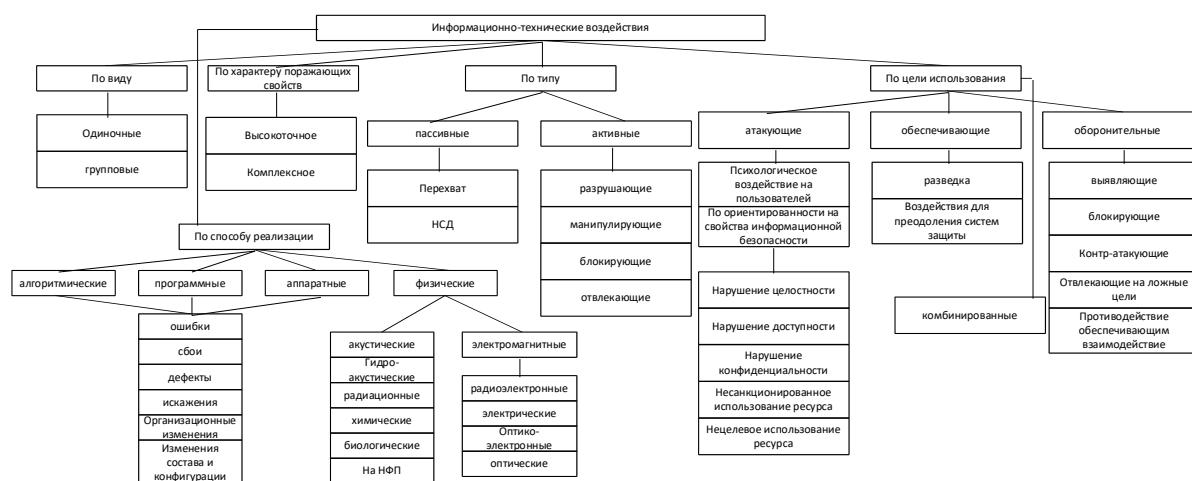


Рис. 4. Классификация ИТВ, влияющих на функционирование системы связи

Активные, в отличие, от пассивных оказывают воздействие на систему с целью нарушения ее функционирования, поэтому обнаружение пассивных ИТВ затруднительно. При воздействии активных ИТВ возникают (может возникнуть) ошибки в оборудовании, сбои и другие отклонения, приводящие (могущие привести) к нарушению функционирования отдельных элементов и системы в целом.

Оборонительные предназначены для противодействия атакующим воздействиям и, как правило, являются основными элементами системы обеспечения информационной безопасности. К ним относятся средства антивирусной защиты, системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак (КА), средства криптографической защиты информации, средства противодействия техническим разведкам, предназначенные для выявления закладок, скрытых возможностей, стенографические средства обеспечения конфиденциальности, целостности и

скрытности информации, средства тестирования оборудования и программного обеспечения и др.

Обеспечивающие применяются для более эффективного использования атакующих и оборонительных ИТВ, их основной целью является сбор и обработка данных, в первую очередь, о возможностях противника по воздействию на собственные (наши) объекты, сети и системы. Основным средством, обеспечивающим получение таких сведений, является разведка. Разведка бывает технической, использующей для добывания сведений технические средства, агентурной, добывание информации осуществляется с помощью агентов разведки, разведка на основе открытых источников и др. [9] В зависимости от вида разведки осуществляется получение различной информации [9, 10]. Наиболее опасной для современных сетей и систем связи, использующих цифровые технологии, является компьютерная разведка [9, 11]. Основным способом ведения компьютерной разведки является реализация компьютерных атак (КА). Классификация КА представлена в [9, 11].

Для сбора разведанных и информации используются открытые источники: телевидение, радио, интернет, газеты и т. д. Синтез отдельных, казалось бы, не взаимосвязанных сообщений позволяет получать нужную информацию об объектах, процессах, системах, людях и т. д. Полученная таким образом информация тщательно обрабатывается. Для ведения такой разведки используются специальные подразделения аналитиков, различные программные средства анализа данных на основе семантических поисковых алгоритмов.

Атакующие ИТВ направлены на информацию, различные системы сбора, обработки, хранения, передачи, представления информации с целью нарушения функционирования системы или снижения уровня информационной безопасности объекта. Информационно-психологические воздействия оказываются на отдельных лиц или группы лиц, в основном, выполняющих функции управления. В результате воздействия могут меняться поведение, восприятие реальности, отклонения поведенческих функций, нарушения функционирования органов, организма. Более подробно данный вопрос проработан в литературе [12].

Комбинированные ИТВ выполняют полностью или частично функции атакующих, обеспечивающих и оборонительных ИТВ.

По способу реализации ИТВ делятся на алгоритмические, программные, аппаратные и физические воздействия.

Алгоритмические представляют собой алгоритмы использующие возможности санкционированные и несанкционированные ПО, оборудование и возможности для воздействия и специальные программы направленные на управляющие, прикладные программы системы, сетевые протоколы, и системы элементы системы защиты. Программные — различные вирусы, закладки, нейтрализаторы программ, программные средства ведения разведки, САВЗ, средства обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий вторжений и КА, средства криптографической ЗИ, программы создания ложных объектов и тестирования ПО, стенографические средства. К аппаратным относятся аппаратные закладки и средства технического анализа для

обнаружения закладок и странного поведения объектов. Физические основаны на использовании ОНФП и возможностей разведки.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При рассмотрении дестабилизирующих факторов влияющих на функционирование системы связи необходимо рассматривать два основных класса воздействий: искусственные и естественные. Естественные факторы обусловлены объективной реальностью и возникают из-за особенностей местности, климата, погодных изменений. Для обеспечения функционирования системы влияние данных факторов учитывается на этапе проектирования системы и разработки ее элементов, основной показатель — надежность. Частично надежность характеризует защиту от непреднамеренных искусственных воздействий, которые носят случайный характер и обусловлены условиями функционирования системы и ее объектов. Искусственные преднамеренные воздействия наносят наибольший вред системе и ее объектам. В современных условиях большую опасность представляют точечные целенаправленные воздействия на элементы системы, от которых зависит функциональная устойчивость системы. Такие объекты имеют критическое значение. Критичность обусловлена влиянием функций, выполняемых объектов, на функционирование системы, выполнение ее своего целевого предназначения. Проведенный анализ показал, что на функционирование системы наибольшее влияние оказывают различные виды оружия и информационно-технические воздействия, которые позволяют не только уничтожить объект, но и нарушить функции системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Burlov, V.G., Lepeshkin, O.M., Lepeshkin, M.O., Solovev, D.B. Organization of Management of Social and Economic Systems of the Region in the Conditions of the Required Technosphere Safety IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 459(2), 022081
2. Лепешкин О.М., Р.С. Гаппоев Оптимизация структуры комплекса технических средств в информационно-управляющих системах государственного управления // Научно-технические ведомости СпбГПУ. 2011. №5. с. 129-132.
3. Груздев Д.А., Закалкин П.В., Кузнецов С.И., Тесля С.П. Мониторинг информационно-телекоммуникационных сетей // Труды учебных заведений связи. 2016. Т.2. №4. с. 46-50.
4. Остроумов О.А., Лепешкин О.М., Ковалев Д.С. К вопросу о понятии критической информационной инфраструктуры системы управления // Всероссийская межведомственная научно-техническая конференция по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования АСУ и связи специального назначения «Наука и АСУ-2020» (Москва, Зеленоград, 20.10.2020): Сборник тезисов. – М.: Изд-во НИУ «МИЭТ», 2020. – с. 61-63.
5. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования,
6. ГОСТ Р 52448-2005 Защита информации. Обеспечение сетей электросвязи
7. <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/> (дата обращения 30.08.2021).
8. Селиванов В.В., Левин Д.П. Оружие нелетального действия: учебник для высших учебных заведений. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 356 с.
9. Макаренко С.И. Аудит безопасности критической информационной инфраструктуры специальными информационными воздействиями. Монография. – Спб.: Наукомемкие технологии, 2018. – 122 с.
10. Меньшаков Ю.К. Защита объектов и информатизации от технических средств разведки. М.: Российский гос. гуманит. университет, 2002. – 399 с.

11. Климов С.М., Поликарпов С.В., Рыжов Б.С., Тихонов Р.И., Шпырня И.В. Методика обеспечения устойчивости функционирования критической информационной инфраструктуры в условиях информационных воздействий // Вопросы кибербезопасности. 2019. №6. с. 37-48.
12. Паршаков Е.Д. Информационные войны: учебное пособие. - Краматорск: ДГМА, 2012. – 92 с.

REFERENCES

1. Burlov, V.G., Lepeshkin, O.M., Lepeshkin, M.O., Solovev, D.B. Management organization of the Region Social and Economic Systems in the Conditions of the Required Technosphere Safety IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 459 (2), 022081
2. Lepeshkin OM, R.S. Gappoev The structure optimization of a technical means complex in information and control systems of public administration // St. Petersburg State Pedagogical University scientific and technical statements. 2011. N 5. pp. 129-132.
3. Gruzdev D.A., Zakalkin P.V., Kuznetsov S.I., Teslya S.P. Information monitoring and telecommunication networks // Communication educational institutions proceedings. 2016. T.2. N 4. p. 46-50.
4. Ostroumov O.A., Lepeshkin O.M., Kovalev D.S. On the concept of a control system critical information infrastructure // All-Russian interdepartmental scientific and technical conference on theoretical and applied problems of ACS development and improvement and special-purpose communications "Science and ACS-2020" (Moscow, Zelenograd, 20.10.2020): Abstracts collection. - M.: NRU "MIET" publishing house, 2020. – p. 61-63.
5. GOST R 53111-2008 The functioning stability of the public communication network,
6. GOST R 52448-2005 Information security. Telecommunication networks provisions
7. <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/> (date of access 08/30/2021).
8. Selivanov V.V., Levin D.P. Non-lethal weapons: a textbook for higher educational institutions. - M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2017. – 356 p.
9. Makarenko S.I. Security audit of critical information infrastructure by special information impacts. Monograph. - SPb.: Science-intensive technologies, 2018. – 122 p.
10. Menshakov Yu.K. Objects protection and informatization from technical means of intelligence. M.: Russian state. humanizes. University, 2002. – 399 p.
11. Klimov S.M., Polikarpov S.V., Ryzhov B.S., Tikhonov R.I., Shpyryna I.V. Ensuring the stability methods of the critical information infrastructure functioning in conditions of information influences // Issues of cybersecurity. 2019. N. 6. pp. 37-48.
12. Parshakov E. D. Information wars: a tutorial. - Kramatorsk: DSMA, 2012. – 92 p.

АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА В УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМОЙ СВЯЗИ

М.В. Митрофанов¹, О.А. Остроумов¹, Н.В. Савищенко¹, С.Н. Ракицкий¹,
М.А. Остроумов¹

¹Военная орденов Жукова и Ленина краснознаменная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (Военная академия связи), Россия, Санкт-Петербург

Аннотация. Развитие техники, усложнение систем и необходимость быстрого реагирования на сбои, отказы, нарушение функционирования систем определяет необходимость рассмотрения их в режиме времени максимально приближенному в реальному. Наиболее опасным является нарушение функционирования критически важных объектов инфраструктуры. Для своевременного реагирования на нарушения функционирования предлагается использовать процессный подход к управлению, являющийся основой для международных стандартов качества управления.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, критически важный объект, устойчивость функционирования, система управления, система связи, процессный подход.

A PROCESS APPROACH IMPLEMENTATION ANALYSIS IN CONTROL OF A COMMUNICATION SYSTEM

M.V. Mitrofanov¹, O.A. Ostroumov¹, N.V. Savishchenko¹,
S.N. Rakitskiy¹, M.A. Ostroumov¹

¹Military Orders of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Telecommunications. Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (Military Academy of Communications), Russia, St. Petersburg

Abstract. The technology development, the systems complication and the need for a quick response to failures, failures, systems functioning disruption determines the need to consider them in a time mode as close as possible to real. The most dangerous is the critical infrastructure facilities functioning disruption. For a timely response to malfunctions, it is proposed to use a process approach to management, which is the basis for international management quality standards.

Keywords: critical information infrastructure, critical object, stability of functioning, control system , communication system, process approach.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние техники, загруженность информацией, динамика изменения обстановки функционирования систем предполагает необходимость учета всего этого. Систему необходимо рассматривать в режиме реального времени или близком к реальному. Используемые вероятностные характеристики, описывающие их функционирование, хороши на этапе проектирования систем, а также могут использоваться при функционировании, однако вероятностные значения точно не могут сказать, когда произойдет нарушение функционирования.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Сбои, нарушения функционирования в одних системах могут привести к нарушениям (прекращению) функционирования других, зависимых от первых систем. В

в этом случае первая система становится критически важной для второй. Рассматривая критичность систем нужно говорить о критичности постоянной, определяемой через зависимость одной системы от другой, и временной, определяемой через выполнение функций и задач системы в режиме времени близком к реальному. Временную критичность в процессе функционирования системы можно изменять за счет использования ресурсов и синтеза системы, позволяющих уйти от критичности.

Понятие критичности и важности объектов в области защиты населения от чрезвычайных ситуаций приводится в документах, а также работах специалистов по чрезвычайным ситуациям. Под критически важными объектами (КВО) понимаются объекты, нарушение (или прекращение) функционирования которых приводит к потере управления экономикой страны, субъекта или административно-территориальной единицы, ее необратимому негативному изменению (или разрушению) или существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения, проживающего на этих территориях, на длительный период времени [1]. 3, 4]

Понятие для информационной инфраструктуры приведено в [2]. Критическая информационная инфраструктура (КИИ) - информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления субъектов критической информационной инфраструктуры, а также сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов. КИИ являются лишь сети электросвязи, обеспечивающие взаимодействие объектов КИИ, однако через другие сети связи может осуществляться воздействие на сети обеспечивающие объекты КИИ. Кроме этого, нарушение функционирования других сетей также может влиять на сети обеспечивающие объекты КИИ. Все это обуславливает необходимость предъявления таких же жестких требований ко всей СС, что и к объектам КИИ [3, 4].

Определяется необходимость создания и поддержания функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак (КА), которые могут являться причиной нарушения функционирования системы [5, 6, 7, 8]. Однако КА не ограничивается весь перечень дестабилизирующих факторов влияющих на функционирование объектов КИИ и СС, что обуславливает необходимость их мониторинга и контроля функционирования в режиме времени близком к реальному и воздействия комплекса дестабилизирующих факторов [9, 10].

При функционировании системы связи выполняются возложенные на нее функции и задачи, обеспечивающие целевую функцию. Существенным вопросом является обеспечение функциональной устойчивости, т. е. способности системы обеспечивать выполнение функций и задач с заданным качеством и в установленные сроки в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов, нарушения (прекращения) функционирования отдельных элементов системы.

На практике каждую функцию системы связи рассматривают, как совокупность задач, ее обеспечивающих, а задачу, как элементарную процедуру можно рассмотреть в виде регламента. Регламент становится ключевым элементом системы связи и системы управления связью. Для обеспечения выполнения регламентов системой связи важное значение имеет информационная поддержка функционирования системы, являющаяся

основой для принятия решений системой и органами управления, в первую очередь для обеспечения выполнения регламентов в системе.

Нарушение функционирования отдельных критически важных объектов системы связи может привести (приведет) к нарушению (срыву) управления, что может иметь пагубные последствия на разных уровнях государственного управления для обороны, экономики, экологии, населения государства, его регионов и других образований. В сфере управления бизнесом вопросы устойчивого успеха организаций регламентируются международными стандартами серии ISO, описывающих организацию деятельности в производящих системах. На базе международного стандарта разработаны ГОСТ РФ. Данные стандарты носят рекомендательный характер, однако целенаправленная политика государства на обеспечение стандартизации подходов в управлении, а также использование стандартов на международной арене способствуют использованию их на все больших предприятиях и организациях. Развитие международного и российского стандарта представлено в таблице 1.

Таблица 1. Развитие международного и российского стандартов управления качеством

| Международные стандарты | Российский ГОСТ | Содержание стандарта |
|---|--|--|
| ISO 9000:2005 «Quality management systems – Fundamentals and vocabulary» | ГОСТ ИСО 9000-2011 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» | Дает представление о терминах и определениях системы менеджмента компании |
| ISO 9001:2008 «Quality management systems – Requirements» | ГОСТ ИСО 9001-2011 «Системы менеджмента качества. Требования» | Направлен на обеспечение качества продукции и повышения удовлетворенности потребителей, предназначен для сертификации системы менеджмента компании |
| ISO 9004:2009 «Managing for the sustained success of an organization – A quality management approach» | ГОСТ Р ИСО 9004-2010 «Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества» | Нацеливает на удовлетворение потребностей всех заинтересованных сторон, на улучшение деятельности организации, не предназначен для сертификации системы менеджмента компании |
| ISO 9004:2018 «Quality management - Quality of an organization – Guidance to achieve sustained success» | ГОСТ Р ИСО 9004-2019 «Руководство по достижению устойчивого успеха организации» | Нацеливает работу организации на достижение устойчивого успеха. Обосновывается необходимость перестройки (адаптации) динамичной организации (системы) в условиях меняющейся обстановки для достижения устойчивого успеха. Представлен механизм самооценки организаций. |

Основной причиной внедрения управления качеством является желание обеспечения устойчивого функционирования системы, повышение ее эффективности и улучшение качества производимой продукции. В органах управления системой связи существуют аналогии с основными функциями управления компанией (организацией): целеполагание, планирование, организация структуры, управление процессами, управление персоналом и др. [11], поэтому для организации и обеспечения устойчивого функционирования системы связи и системы управления связью, автоматизации процесса управления, мониторинга и контроля состояния системы и выполнения функций, задач и регламентов могут использоваться стандарты управления качеством ИСО.

Органы управления связью достаточно эффективны, однако для улучшения качества процессов управления можно использовать профили и регламенты выполнения функций и задач системы. Использование процессного подхода позволить обеспечить в условиях дефицита ресурсов устойчивое функционирование системы связи.

Идея процессного подхода появилась в конце двадцатого века в США. В работе М. Хаммера и Д.Чампи «Реинжиниринг корпорации» для оптимизации деятельности предприятий предлагалось создание новых процессов «с чистого листа». На основе анализа и изучения систем управления различных предприятий и системы управления штаба НАТО, описывающих свои регламенты в терминах процессов по нотации IDEF (Integrated Difinition), выявили что для систем управления характерны централизация, иерархичность и функциональность структуры.

В основе стандартов лежит методология процессного подхода, разработанная на основе теории вариабельности У.Шухарта. По его мнению все процессы производства продукции (услуг) в организациях претерпевают отклонения от заданных эталонных значений [12], по причине различных общих (внутренних) и специальных (внешних) по отношению к процессу причин [13]. Для снижения таких отклонений он предложил при управлении организацией использовать концепцию PDCA (Plan (планируй), Do (делай) Check (проверяй) и Act (воздействуй)) [14]. Более позднее Э.Деминг развел данную концепцию, предложив использовать вместо PDCA цикл PDSA (study - изучай).

В циклах Деминга и Шухарта (рис. 1) обеспечивается управление с обратной связью по заданному критерию (параметру). Управление направлено на достижение устойчивого функционирования организации (системы).



Рис. 1. Цикл Деминга-Шухарта

В рамках выполнения цикла осуществляется разработка целей, функций, задач и процессов необходимых для достижения цели (целевой функции) системы в соответствии с требованиями, предъявляемыми к ней органами управления, потребителями, старшей системой (согласование цели и требований), формирование плана функционирования системы (принятие решения о необходимости повышения эффективности, улучшении чего-либо, переменах). При формировании задач прорабатывается вопрос их ресурсного обеспечения, а также сроки выполнения и качество результата. В процессе функционирования системы реализуется разработанный план, при этом с использованием мониторинга и контроля осуществляется изучение (проверка выполнения плана) изменения состояния системы. При исправлении, фактически реализации обратной связи в управлении через воздействие органов управления на систему и принятие действий направленных на улучшение (обеспечение) процессов функционирования организации. В дальнейшем цикл повторяется.

Контр управления (рис. 1) отражает непрерывность процесса управления через периодически повторяющиеся и следующие друг за другом этапы [14], при этом одними из основных этапов его реализации являются составление планирование деятельности организации, мониторинг и контроль его выполнения, фактически функционирования системы.

В рамках процессного подхода можно отслеживать изменение состояния системы и осуществление хода управления в режиме времени близком к реальному на каждом этапе ее функционирования.

В соответствии с ГОСТ ИСО 9001-2011 в основе процессного подхода лежит идентификация процессов, взаимодействие между ними и управление ими. Идентификация основных процессов включает перечисление их, определение значимости (критичности) каждого процесса для системы и анализа потребности в оптимизации [15]. В стандарте ГОСТ ИСО 9000-2011 определяется необходимость определения последовательности и порядка взаимодействия процессов [16].

В соответствии со стандартами ИСО под процессом понимается совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, преобразующая входы в выходы [16]. Неотъемлемой частью процесса является обратная связь, позволяющая органам управления осуществлять воздействие на систему и ее элементы. Схему процесса в виде черного ящика, который имеет вход и выход предложил кибернетик Н.Винер, однако в отличии от Шухарта и Деминга он не рассматривал обратную связь.

Под управлением понимается процесс целенаправленного воздействия на объект, осуществляемого для организации его функционирования по заданной программе [17].

Процесс управления СС — совокупность управлеченческих воздействий органов управления, направленных на достижение целевой функции системы (организации) путем синтеза элементов системы или маневра ресурсами на входе для достижения требуемого результата по обеспечению устойчивого функционирования на выходе.

Выход процесса обладает ценностью для потребителя. По мнению М.Портера, который ввел понятие «процессная ориентация» основным принципом деятельности

организации является обеспечение взаимодействия между звеньями цепи при обеспечении функционирования ее, т. е. при создании выхода процесса (ценности). Процессы в организации подразделяют на основные, создающие ценность для потребителя, и вспомогательные, не создающие такой ценности.

Использование процессного подхода построено на следующих принципах:

любой процесс рассматривается как совокупность подпроцессов;

любой процесс формально описывается, а его выполнение обязательно документируется;

у каждого процесса есть потребитель, определяющий требования к нему и его целевое предназначение;

за выполнение процесса всегда кто-то отвечает;

каждый процесс описывается показателями, описывающими его исполнение, результат выполнения, влияние другие процессы и на всю систему.

Процессный подход основывается на принципе регулирования последовательности выполняемых операций [18]. Беккер отмечает, что организация процессов является основным средством контроля выполнения задач организации (системы), координации временных и пространственных аспектов их выполнения [19].

Использование процессного подхода в управлении обусловлено более гибким управлением обеспечения устойчивого функционирования сложной системой, однако для таких систем необходимо учитывать сложность, иерархичность, критичность и масштабность систем связи.

Аналогом бизнес-системы для системы связи является подсистема управления системой связи, организующая, обеспечивающая и контролирующая процесс функционирования системы связи, представляющий собой совокупность последовательно выполняемых операций. Аналогом продукции является результат обеспечения устойчивого функционирования системы, выполнение ее своей целевой функции по обеспечению обмена сообщениями, информацией и представления различных видов услуг.

Аналогом бизнес-процесса для системы связи является совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности для обеспечения устойчивого функционирования системы и преобразовывающая входные элементы (ресурсы, требования, задачи и т.д.) в выходные (результат имеющий ценность для системы связи, вышестоящей системы управления). Органы управления формируют задачи системе и контролируют их выполнение.

При процессном подходе процессы привязываются к функциональным подразделениям, отвечающим за свои процессы. В процессе функционирования системы процессы осуществляются с помощью реализации определенного набора функций. Под функцией управления понимается форма осуществления определенной структурированности, внутренней упорядоченности, согласованности взаимодействия автономных частей в системном объекте [20].

Впервые выделил функции управления в начале 18 век А.Файоль. По его мнению, при управлении выполняются функции планирования, организации, распоряжения, координации и контроля.

При применении функционального подхода каждая функция рассматривалась отдельно, без связи с другими, что привело к разрыву единой цепочки управления. С увеличением специализаций произошло обособление функциональных подразделений, а также уменьшение межфункциональных связей [21]. Каждое подразделение занимались оптимизацией своей функциональной деятельности, что привело к подмене главной цели системы (организации) целевыми функциями отдельных подразделений. Стремление ученых интегрировать все виды деятельности обеспечивающих функционирование системы (организации) в единую последовательность действий привело к необходимости использования процессного подхода в управлении и обеспечении устойчивого функционирования. Суть которого сводится к совокупности динамически изменяющихся в пространстве и времени, связанных между собой функций и задач системы для обеспечения ее устойчивого функционирования.

Необходимость выбора одного из возможных вариантов построения системы из совокупности ограниченного количества вариантов, характеризующих конкретную ситуацию часто приводит к искажению процесса управления, представляющему последовательность действий направленных на принятие решения. Такой подход служает содержание процесса управления. Управление представляет собой последовательность действий, этапов, имеющих свою цель. Этапы управления могут делиться в зависимости от специфики действий, функций управления.

Процессу управления, за счет реализации обратной связи, свойственна цикличность, управление представляет собой последовательность взаимосвязанных повторяющихся действий.

В процессе управления осуществляется сбор, обработка информации, выработка управленческих решений, согласование их с требованиями, предъявляемыми к системе, проверка их реализации на управляемом объекте, регистрация их на носителях, в различных подразделениях, передача управленческих решений по каналам связи, реализация управленческих решений на объекте управления, контроль выполнения их, корректировка управленческих решений в зависимости от отклика управляемого объекта. Повторение цикла.

Существует точка зрения, что процесс управления, который носит цикличный характер, начинается с обнаружения несоответствия фактических параметров системы требуемым, плановым и заканчивается принятием решения на устранение возникающих отклонений от нормы [22, 23]. Возникает взаимопроникновение процессного и функционального подходов, через выполнение на каждом этапе, цикле управления определенного количества функций управления.

При использовании процессного подхода для описания управления весь процесс управления разбивается на подпроцессы — функции, функции — на задачи. В процессе управления происходит вмешательство в каждую задачу для обеспечения гарантированного ее выполнения. Процессы системы управления имеют различное

предназначение, ориентированы на результат, и представляют собой совокупность действий, воздействия органов управления на объект управления с целью получения планируемого результата.

Процессный подход при реализации его в системе управления за счет разделения на подпроцессы, определения ответственных за них, выделения необходимых ресурса и последовательности действий для их реализации позволяют оперативно реагировать на отклонения от норм при их выполнении. Кроме этого такой подход позволяет обнаруживать проблемы в процессе функционирования объекта в режиме времени близком к реальному, а также обеспечивать взаимодействие различных подразделений при выполнении общих процессов.

В условиях функционирования системы (организации) выполняется большое количество процессов, которые включают в себя много более простых задач. В [24] В.В. Репин и В.Г. Елиферов управление рассматривают через разделение процессов управления по уровням: верхний, детальный, элементарные операции (не требуют детального описания).

Рассматривая систему связи через такой подход можно разложить всю совокупность процессов реализуемых в процессе ее функционирования на самые простые задачи, большую актуальность приобретает такой подход при решении конкретных задач. Процессы нижнего уровня будут элементами процессов более высокого уровня [25, 26].

Основой для пользования процессного подхода в управлении системой связи и обеспечении ее синтеза является выявление в процессе функционирования и управления системой основных ее процессов. При определении процесса должно четко регламентироваться, кто является ответственным за процесс, порядок взаимодействия подразделений при выполнении процессов, в интересах кого выполняется процесс.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессный подход дает представление о том, что результат деятельности организации (системы) является совокупность всех процессов, подпроцессов, действий и задач всех элементов организации (системы), позволяет обеспечить взаимодействие различных элементов и устраниТЬ разрыв между процессами выполняемыми в рамках одной цели. Он позволяет находить пути улучшения качества функционирования системы управления. Кроме этого, процессный подход при функционировании системы связи позволит выявлять проблемы в режиме времени близком к реальному.

При использовании процессного подхода процессы функционирования и управления в системе разделяются по подпроцессы, функции, задачи, определяемые элементарные операции и характеризующиеся совокупностью необходимого ресурса и времени для обеспечения их выполнения. Элементарные задачи представляются в виде регламентов - выполнение задачи системы связи в заданные сроки с требуемым качеством (последовательность и порядок действий с указанием сроков их выполнения). Существующие методики разработки регламентов, обычно, сводятся основных этапов создания регламентов. Они носят, как правило, рекомендательный характер, и, в

большинстве, соответствуют требованиям стандартов ИСО. Недостатком таких методик является отсутствие учета влияния и взаимосвязи процессов друг на друга, поэтому необходимо разработать математические подходы к описанию функционирования и управления системы связи на основе процессного подхода с учетом иерархичности системы, процессов ее описывающих и их взаимовлияния, а также их критичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Правительства РФ от 27.08.2005 N 1314-р «Об одобрении Концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры Российской Федерации и опасных грузов».
2. Федеральный закон от 26.07.2017 N 187-ФЗ О безопасности критической информационной инфраструктуры РФ.
3. Остроумов О.А., Лепешкин О.М., Ковалев Д.С. К вопросу о понятии критической информационной инфраструктуры системы управления // Всероссийская межведомственная научно-техническая конференция по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования АСУ и связи специального назначения «Наука и АСУ-2020» (Москва, Зеленоград, 20.10.2020): Сборник тезисов. - М.: Изд-во НИУ «МИЭТ», 2020. - с. 61-63.
4. Лысов А.В. Обеспечение безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры: Уч. пособие. СПб.: Медиапапир, 2019. 314 с.
5. Груздев Д.А., Закалкин П.В., Кузнецов С.И., Тесля С.П. Мониторинг информационно-телекоммуникационных сетей // Труды учебных заведений связи. 2016. Т.2. №4. с. 46-50.
6. Пермяков А.С., Сташко Я.С. Вопросы повышения защищенности информационно-телекоммуникационной сети на основе интеллектуализации // Нейрокомпьютеры и их применение XVIII Всероссийская научная конференция. Тезисы докладов. 2020. с. 226-227.
7. Коцыняк М.А., Карпов М.А., Лаута О.С., Дементьев В.Е. Управление системой обеспечения безопасности информационно-телекоммуникационной сети на основе алгоритмов функционирования искусственной нейронной сети. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №4. с. 3-10.
8. Стародубцев Ю.И., Закалкин П.В., Иванов С.А. Техносферная война как основной способ разрешения конфликтов в условиях глобализации // Военная мысль. 2020. №10. С.16-21.
9. Лепешкин О.М., Остроумов О.А., Митрофанов М.В., Синюк А.Д. Подходы к определению критичности объектов инфраструктуры в различных странах мира // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению “Информационная безопасность” III Всероссийская научно-техническая конференция. Сборник статей. 2021. с. 391-400.
10. Лепешкин О.М., Остроумов О.А., Савищенко Н.В. Выполнение регламента процесса управления- критерий определения критичности системы // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению “Информационная безопасность” III Всероссийская научно-техническая конференция. Сборник статей. 2021. с. 625-634.
11. Региональная стратегия экономического роста -2015 / Под научн. Рук. В.А. Ильина. - Вологда:ВНКЦ ЦЭМИ РАН, 2005. - 224 с.
12. Shewhart Valter Andrew Economic control of quality of manufactured product. - D.Van Nostrand Company, 1931. - 501 р.
13. Горлопанов В.В., Дуденков С.В. Инновационное развитие экономики России. Ч.!. Вопросы теории инновационного развития экономики. - М., 2009. - с. 50-55.
14. Shewhart Valter Andrew Statistical method from the viewpoint of quality control. Washington, The Graduate school, the Department of Agriculture, 1939. 155 p.
15. Davenport T. Process Innovation: Reengineering work through informatio technology. - Boston, Harvard Business School Press, 1993. - с. 23.
16. ГОСТ ИСО 9001-2011 «Системы менеджмента качества. Требования»
17. А.Г. Ермишян Теоритические основы построения военной связи в объединениях и соединениях Ч.1 Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи. - Спб: ВАС, 2005 г. - 740 с.

18. Алимова Н.К. Процессный подход — революция в управлении? // Стандарты и качество. - 2006. - №5, с. 10-14.
19. Менеджмент процессов / Под ред. Й.Беккера [пер. с нем.]. - М.: Эксмо, 2007. - 384 с.
20. Беляев А.А., Коротков Э.М. Системология организации. / под ред. д.э.н., профессора Э.М.Короткого. - М.: ИНФА. 2000. - 182 с.
21. Бьерн Андерсен Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования / Б. Андерсен. - М.: РИА «Стандарты и качество», 2003. - 272 с.
22. Архопова Н.И., Кульба В.В., Косяченко С.А., Чанхиева Ф.Ю. Исследование систем управления. - М.: Приор, 2002. - 384 с.
23. Герасимов Б.Н., Морозов В.В. Технологии менеджмента: Монография. - Самара: СГТУ, 2001. - 182 с.
24. Репин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. - М.: РИА «Стандарты и качество», 2009. - 408 с.
25. Burlov, V., Lepeshkin, O., Lepeshkin, M. Algorithmic support for the dynamic functioning of transport systems in the region IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 918(1), 012224.
26. Burlov, V.G., Lepeshkin, O.M., Lepeshkin, M.O., Solovev, D.B. Organization of Management of Social and Economic Systems of the Region in the Conditions of the Required Technosphere Safety IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 459(2), 022081

REFERENCES

1. The Russian Federation government order of August 27, 2005 N 1314-r "On Approval of the Federal Monitoring System concept for Critical Objects and (or) Potentially Hazardous Infrastructure of the Russian Federation and Dangerous Goods".
2. Federal Law of July 26, 2017 N 187-FZ On the critical information infrastructure security of the Russian Federation.
3. Ostroumov O.A., Lepeshkin O.M., Kovalev D.S. On the concept of a control system critical information infrastructure // All-Russian interdepartmental scientific and technical conference on theoretical and development and improvement applied problems of ACS and special-purpose communications "Science and ACS-2020" (Moscow, Zelenograd, 20.10.2020): Collection of abstracts. - M.: Publishing house of NRU "MIET", 2020. – pp. 61-63.
4. Lysov A.V. Critical information infrastructure significant objects security ensuring: Uch. allowance. SPb.: Mediaapir, 2019.314 p.
5. Gruzdev D.A., Zakalkin P.V., Kuznetsov S.I., Teslya S.P. Information and telecommunication networks monitoring // Communication educational institutions proceedings. 2016. T.2. N 4. p. 46-50.
6. Permyakov A.S., Stashko Y.S. Increasing issues the security of the information and telecommunication network based on intellectualization // Neurocomputers and their application of the XVIII All-Russian Scientific Conference. Abstracts of reports. 2020. p. 226-227.
7. Kotsynyak M.A., Karpov M.A., Lauta O.S., Dementyev V.E. The information and telecommunication network security system management based on the algorithms for the functioning of an artificial neural network. // Bulletin of the Tula State University. Technical science. 2020. N 4. pp. 3-10.
8. Starodubtsev Yu.I., Zakalkin P.V., Ivanov S.A. Technosphere war as the main way of resolving conflicts in the context of globalization // Military Thought. 2020. N 10. pp.16-21.
9. Lepeshkin O.M., Ostroumov O.A., Mitrofanov M.V., Sinyuk A.D. Approaches to Determining the Infrastructure Objects criticality in Various Countries of the World // State and Prospects for the Development of Modern Science in the Field of Information Security III All-Russian Scientific and Technical Conference. Digest of articles. 2021. p. 391-400.
10. Lepeshkin O.M., Ostroumov O.A., Savishchenko N.V. Implementation of the management process regulation - a criterion for determining the criticality of the system // State and prospects for the development of modern science in the direction of "Information Security" III All-Russian Scientific and Technical Conference. Digest of articles. 2021. p. 625-634.

11. Regional strategy for economic growth -2015 / Under scientific. Hands. V.A. Ilyin. - Vologda: VNKTs CEMI RAN, 2005. – 224 p.
12. Shewhart Valter Andrew Economic control of manufactured product quality. - D. Van Nostrand Company, 1931. – 501 p.
13. Gorlopanov V.V., Dudenkov S.V. Russian economy innovative development. Ch.! Questions of the theory of economy innovative development. – M., 2009. – p. 50-55.
14. Shewhart Valter Andrew Statistical method from the viewpoint of quality control. Washington, The Graduate school, the Department of Agriculture, 1939. – 155 p.
15. Davenport T. Process Innovation: Reengineering work through informatio technology. - Boston, Harvard Business School Press, 1993. – p. 23.
16. GOST ISO 9001-2011 "Quality management systems. Requirements"
17. A.G. Yermishyan Theoretical Foundations of Building Military Communications in Combinations and Formations Part 1 Methodological Foundations of Building Organizational and Technical Systems of Military Communications. – SPb: VAS, 2005. – 740 p.
18. Alimova N.K. Is the process approach a revolution in management? // Standards and quality. - 2006. – N 5, p. 10-14.
19. Process management / Ed. J. Becker [trans. with it.]. - M.: Eksmo, 2007. – 384 p.
20. Belyaev A.A., Korotkov E.M. Systemology of the organization. / ed. Doctor of Economics, Professor E.M. Korotkoy. - M.: INFA. 2000. – 182 p.
21. Bjorn Andersen Business processes. Improvement tools / B. Andersen. - M.: RIA "Standards and Quality", 2003. – 272 p.
22. Arkhopova N.I., Kulba V.V., Kosyachenko S.A., Chankhieva F.Yu. Research of control systems. - M.: Prior, 2002. – 384 p.
23. Gerasimov B.N., Morozov V.V. Management Technologies: Monograph. - Samara: SSTU, 2001. – 182 p.
24. Repin V.V., Eliferov V.G. Process approach to management. Business process modeling. – M.: RIA "Standards and Quality", 2009. – 408 p.
25. 25. Burlov, V., Lepeshkin, O., Lepeshkin, M. Algorithmic support for the dynamic functioning of transport systems in the region IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 918 (1), 012224.
26. Burlov, V.G., Lepeshkin, O.M., Lepeshkin, M.O., Solovev, D.B. Organization of Management of Social and Economic Systems of the Region in the Conditions of the Required Technosphere Safety IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 459 (2), 022081

АНАЛИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. Ю. Трофимов¹, А. Ю. Живодерников¹, Н. В. Трофимова², М. И. Рафальская¹

¹Военная академия связи им. С. М. Буденного (ВАС), г. Санкт-Петербург, РФ

²ООО «ТАиП», г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация. В статье рассматривается анализ существующих систем мониторинга, используемых в мультисервисных сетях связи специального назначения. На основе анализа выработаны предложения по наиболее эффективному их применению на сетях связи специального назначения.

Ключевые слова: система мониторинга, мультисервисная сеть связи специального назначения, система управления функционированием.

ANALYSIS OF MONITORING SYSTEMS OF MULTISERVICE COMMUNICATIONS NETWORK FOR SPECIAL PURPOSE

A. Y. Trofimov¹, A. Y. Zhivodernikov¹, N. V. Trofimova², M. I. Rafalskaya¹

¹Military Academy of Telecommunications named after S. M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia

²LLC “ТАиП”, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The article discusses the analysis of existing monitoring systems used in multiservice communication networks for special purposes. On the basis of the analysis, proposals were developed for their most effective application in special-purpose communication networks.

Keywords: monitoring system, multi-service communication network for special purposes, operation control system.

1. ВВЕДЕНИЕ

Мультисервисная сеть связи специального назначения (далее – МСС СН) предназначена для обеспечения обмена всеми видами информации в интересах систем управления министерствами, ведомствами и организациями, в различных условиях деятельности. Как правило, телекоммуникационным ядром таких сетей являются IP-сети или IP/MPLS-сети, наложенные на ресурсы сетей операторов связи.

Основная задача управления МСС СН – обеспечение функционирования сети с заданными показателями качества при внешних и внутренних дестабилизирующих воздействиях. Иначе говоря, обеспечение выполнения МСС СН её целевой функции – предоставление пользователям различного типа требуемых услуг с гарантированным качеством в условиях воздействий на её сетевые элементы. Наиболее эффективно эту задачу можно решать, основываясь на концепции сетей управления телекоммуникациями (Telecommunication Management Network, TMN) [1].

В настоящее время происходит активное увеличение числа МСС СН. Основное направление использования МСС СН, как во время борьбы с пандемией Covid-19, так и в рамках управления ведомственными сетями, – предоставление услуг телефонии, видеонаблюдения, передачи данных, охраны и других. Основными показателями

качества услуг являются: время задержки пакета, джиттер задержки пакета и пропускная способность канала.

2. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ МСС СН

Структурно, модель TMN состоит из 4 уровней: административное управление и управление услугами (верхние уровни управления), управление сетью и управление отдельными её элементами (нижние уровни управления), в основе которых находится организационно-технический комплекс взаимодействующих сетевых элементов.

Для обеспечения устойчивого и качественного функционирования МСС СН, в условиях существенного влияния внешних и внутренних дестабилизирующих факторов и возросшей потребности пользователей в услугах трафика реального времени, в комплексе задач системы управления можно выделить ряд функциональных подзадач, без выполнения которых, сеть не сможет выполнять свои функции по предоставлению услуг связи. К таким задачам относятся задачи управления трафиком и качеством обслуживания. Решение данных задач возлагается на подсистему управления функционированием МСС СН. Для эффективного управления функционированием необходимо решение следующих подзадач: управление маршрутизацией, классификацией, приоритезацией, маркировкой пакетов, ресурсами (пропускной способностью), очередями, перегрузками, мониторинг и оценка состояния сети и сетевых элементов.

При этом общую задачу эффективного управления функционированием МСС можно разделить на три этапа:

- контроль показателей качества функционирования сети, нагрузки на сетевых элементах и линиях связи, а также показателей производительности сетевого оборудования;

- управление трафиком на сети;

- изменение процедур управления функционированием, с целью обеспечить требуемые показатели качества.

При решении задач управления функционированием МСС СН, важную роль играет задача мониторинга показателей качества функционирования сети. Именно от своевременного получения текущего состояния сети, которое сигнализирует об отклонении от нормы, зависит способность системы управления качественно и вовремя применить управляющее воздействие на МСС СН, с целью обеспечения пользователей. К главным функциям мониторинга состояния МСС СН можно отнести следующие процедуры контроля:

- контроль и измерение рабочих характеристик сетевого оборудования, параметров его производительности и оценка загруженности сети;

- контроль и обнаружение физического нарушения связи между элементами сети (обрыв соединительной линии);

- определение «точек уязвимости» – сетевых устройств, наиболее подверженных внешнему или внутреннему воздействию дестабилизирующих факторов;

- своевременное доведение результатов контроля до «Администратора».

Работа систем мониторинга и управления функционированием сетей основана на работе протокола SNMP, который позволяет работать с MIB-базами телекоммуникационного оборудования, а также сигнализацией о выходе из строя элемента сети или превышением допустимых норм нагрузки на направлениях связи. При этом процесс, позволяющий помочь в выработке решения по восстановлению данных показателей в норму, не автоматизирован [2].

Так как система управления функционированием использует каналы и оборудование самой МСС СН, важнейшей задачей является обеспечение приоритетного обслуживания подсети управления. Стоит отметить, что сокращение времени цикла этих процедур управления приводит к повышению эффективности функционирования системы управления МСС СН в целом.

Требования, предъявляемые к современным системам мониторинга, достаточно широки:

- автоматическое обнаружение конфигурации сети (на основе шаблонов устройств) и ее схематичное отображение;
- схематичное отображение каналов транспортной сети;
- графическое представление топологии на GIS подложке;
- мониторинг неисправностей элементов сети (активные аварии и проактивный мониторинг);
- поиск ключевой причины возникшей неисправности (корреляция аварий);
- мониторинг производительности элементов сети;
- мониторинг QoS [3].

3. Существующие системы мониторинга МСС СН

В настоящее время, основными системами, используемыми в интересах министерств и ведомств, являются системы, построенные на “ядре” системы Zabbix. При этом стоит отметить, что такое широкое использование данной системы, обусловлено её главным преимуществом – «Open Source» (открытый код).

Zabbix представляет собой наиболее гибкое решение, которое администратор получает комплексно, без установки дополнительного стороннего программного обеспечения. Система обладает возможностями создания и дальнейшего использования подключаемых модулей, способных контролировать различные параметры оборудования сети и возможностью гибкого масштабирования, путем распределения вычислительных мощностей на несколько АРМ. Zabbix-agent может быть установлен на UNIX-подобных или Windows-хостах [4]. В состав системы мониторинга Zabbix входят:

- сервер мониторинга, обеспечивающий получение данных, их обработку, анализ, хранение и запуск сценариев оповещения;
- базы данных: MySQL, Oracle, PostgreSQL;
- web-интерфейс;
- агенты, которые выполняются на отслеживаемых объектах и обеспечивают передачу данных от оборудования к серверу.

К основным возможностям Zabbix, следует отнести:

- автоматическое обнаружение серверов и других устройств в сети;
- распределенный мониторинг с централизованным администрированием через Web-интерфейс;
- поддержка обоих механизмов пуллеров и трапперов;
- мониторинг без агентов;
- поддержка JMX и мониторинга логов в базовой поставке;
- мощная поддержка пользовательских параметров (порогов, оповещений, графиков).

Большой интерес представляет графическая система представления статистических данных, позволяющая формировать графики изменения наблюдаемых параметров с произвольной временной выборкой и, таким образом, производить оценку и анализ качества предоставляемых услуг с течением времени в различных условиях обстановки.

Так, на «ядре» системы Zabbix, российская компания «РОССИННО», разработала программный продукт – «Центральный Пульт», одной из главных функций которого является мониторинг МСС СН. Платформа предназначена для визуализации и мониторинга работы сети, оборудования, приложений и сервисов. В качестве объекта мониторинга может выступать практически любой объект физического или логического мира – например, память, процессор, файловая система, процесс или программа, количество пользователей, очередь файлов на обработку, объем обработанного трафика. Пользователей платформы можно встретить в сфере телекоммуникаций и связи, промышленности, логистике, финансовых организациях, электроэнергетике, и здравоохранении.

Также существует еще один программный продукт с «открытым кодом», часто используемый в МСС СН. Это система мониторинга Nagios. Nagios – программа с открытым кодом, предназначенная для мониторинга компьютерных систем и сетей. Она следит за указанными узлами и службами, и оповещает администратора в случае, если какие-либо из служб прекращают (или возобновляют) свою работу. Программа предусматривает возможность создания карты сети, с указанием детальной информации об анализируемых объектах.

Nagios была разработана для работы под Linux, но работает и с другими ОС. Основные возможности системы:

- мониторинг сетевых служб (SMTP, POP3, HTTP, NNTP, ICMP, SNMP);
- мониторинг состояния хостов (загрузка процессора, использование диска, системные логи) в большинстве сетевых операционных систем;
- поддержка удаленного мониторинга через шифрованные туннели SSH или SSL;
- возможность определять иерархии хостов сети с помощью «родительских» хостов, позволяет обнаруживать и различать хосты, которые вышли из строя, и те, которые недоступны;
- отправка оповещений в случае возникновения проблем со службой или хостом;
- возможность организации совместной работы нескольких систем мониторинга с целью повышения надёжности и создания распределенной системы мониторинга;

- включает в себя утилиту nagiostats, которая выводит общую сводку по всем хостам, по которым ведется мониторинг [6].

К минусам Nagios можно отнести:

- отсутствие системы, позволяющей снимать данные о состоянии сети и длительно их хранить;
- отсутствие возможности программно анализировать полученные данные;
- сложность настройки Nagios (состоит в отсутствии готовых рецептов именно под конкретную систему).

Другой системой распределенного мониторинга сетей связи является «СПАЙДЕР», обеспечивающий мониторинг сети связи, как на уровне сети, так и на уровне услуг. Система выполняет функции контроля состояния, анализа производительности сети связи, наблюдения за текущей конфигурацией, учета сигнального и разговорного трафика, измерения показателей качества обслуживания и обеспечения безопасности.

Система СПАЙДЕР предоставляет органам управления следующие возможности:

- мониторинг сети связи в режиме реального времени;
- автоматический расчет показателей QoS;
- анализ изменений нагрузки в режиме реального времени;
- трассировка вызова;
- сбор CDR/TDR в режиме реального времени;
- отслеживание незавершенных и неотвеченных вызовов;
- мультипротокольные xDR (ISUP, MAP, DSS1, H.323, SIP).

В целях эксплуатации и планирования на основании анализа сигнального трафика система в реальном времени рассчитывает и формирует унифицированные отчеты и графики показателей QoS (ASR, NER, PDD, BMI и др.) для трактов разных типов (ОКС-7, ISDN PRI, VoIP) с разбивкой по присоединенным операторам, кодам направлений, кодам услуг сетей, пучкам звеньев. Система контролирует соблюдение согласованного с ними уровня качества обслуживания (SLA) посредством формирования отчетов по SLA и выдачу тревожных сообщений при отклонении уровней качества от заданных в SLA [5].

Также производители современного телекоммуникационного оборудования выпускают собственные решения систем мониторинга и управления для собственных изделий. Ярким примером такого ПО является единая система администрирования и мониторинга инфраструктуры – Cisco Prime Infrastructure.

Основные задачи, которые решает данная система (CPI):

- поддержка постоянных задач: мониторинг оборудования, резервное копирование, восстановление, сбор базовой статистики, сетевой аудит, настройка оборудования по готовым сценариям и шаблонам;
- контроль работы приложений (модуль Assurance);
- автоматическая установка оборудования «с нуля» без использования консольного доступа (модуль Plug and Play).

Однако, стоит отметить, что Cisco как производитель не гарантирует совместимость и корректную работу своего программного обеспечения с другими производителями. Именно поэтому специализированные системы мониторинга и управления сетью создаются как моновендорные системы.

При этом унификация оборудования МСС СН, в данный момент времени, не возможна. Это обусловлено тем, что отечественные производители оборудования и производители программного обеспечения преследуют разные цели. В интересах функционирования МСС СН, производители систем мониторинга и управления функционированием сети закладывают реализацию максимально возможных решений получения статистики и анализа показателей качества функционирования самой МСС СН с разнотипного оборудования, которое в данный момент актуально на «рынке», с последующим решением органа управления на управляющее воздействие. При этом, производитель оборудования нацелен на интеграцию оборудования в единую сеть ОАЦСС и Указом Президента «по импортозамещению».

Основной задачей системы управления функционированием МСС СН, состоит в обеспечении пользователей услугами связи, согласно SLA.

Показатель эффективности МСС СН имеет вид:

$$R = R(X, X^{\dagger}) \quad (1)$$

где X – набор характеристик, определяющих вариант построения МСС СН,

X^{\dagger} – набор характеристик, определяющих систему управления.

При этом, в качестве показателя качества, определяющего автоматизацию управления МСС СН, следует рассмотреть зависимость:

$$P_s = R(X, X^{\dagger}) / R(X_a, X_a^{\dagger}) \quad (2)$$

где X_a, X_a^{\dagger} – характеристики автоматизированного управления МСС СН.

Следует выделить, что в настоящее время для объективной оценки показателей качества обслуживания МСС СН наиболее важны:

- мониторинг сети связи в режиме реального времени;
- автоматический расчет показателей QoS;
- анализ изменений нагрузки в режиме реального времени;
- время реакции администратора сети;
- расчет таблиц маршрутов;
- характеристики потери пакета.

Набор этих функций является наиболее важным при планировании и построении системы мониторинга, что влияет на эффективность управления функционированием МСС СН.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как правило, все, описанные выше, системы мониторинга достаточно эффективно решают задачи сбора и обработки данных в своей узкоспециализированной области, но не обладают возможностью взаимодействия друг с другом, что исключает использование в работе всего набора возможных первичных данных и средств их

интерпретации. Таким образом, для поддержки и оценки функционирования сети и её ресурсов необходимо поддерживать и работать со множеством различных специализированных информационных систем. Это создает очевидные ограничения и неудобства, которые приводят к снижению скорости реакции на возникающие инциденты и увеличения вероятности возникновения ошибки администратора при работе с большим числом инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буренин А. Н. Теоретические основы управления современными телекоммуникационными сетями: Монография. / А.Н. Буренин, В.И. Курносов // Под общей редакцией В.И. Курносова - М.: Наука, 2011. – 464 с.
2. Гребешков А. Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи / А.Ю. Гребешков – М.: ЭкоТрендз, 2003. – 288 с.:илл.
3. Голяков Д. А., Ковайкин Ю. В., Лебедев П.В. Структура протоколов управления и мониторинга // Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т., Воронеж, 2020 – С.353-360
4. Официальный сайт Zabbix. <https://www.zabbix.com/ru>, 6.09.2021.
5. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник для вузов. - 4-е изд. - СПб.: Питер, 2010. - С.943
6. Лихтциндер Б. Я. Анализ трафика мультисервисных сетей: Монография / Б. Я. Лихтциндер – Самара.: ПГУТИ 2015. – 164 с.

REFERENCES

1. Burenin AN Theoretical foundations of modern telecommunication networks management: Monograph. / A.N. Burenin, V.I. Kurnosov // Under the general editorship of V.I. Kurnosova - Moscow: Nauka, 2011 .-- 464 p.
2. Grebeshkov A. Yu. Standards and technologies for control of communication networks / A.Yu. Grebeshkov - M .: EcoTrends, 2003 .-- 288 p.: Ill.
3. Golyakov D. A., Kovaykin Yu. V., Lebedev P. V. The structure of management and monitoring protocols // Proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference, in 6 volumes, Voronezh, 2020 - pp. 353-360
4. Official site Zabbix. <https://www.zabbix.com/ru>, 6.09.2021.
5. Olicer V.G., Olicer N.A. Computer networks. Principles, technologies, protocols. Textbook for universities. - 4th ed. - SPb .: Peter, 2010. - p. 943
6. Likhtzinder B. Ya. Analysis of traffic of multiservice networks: Monograph / B. Ya. Likhtzinder - Samara .: PGUTI 2015. - 164 p.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ УЯЗВИМОСТЕЙ

А.В. Веденеев, В.С. Котельников, И.Н. Малышева

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Российской Федерации

Аннотация. В работе проводится анализ современных процессорных уязвимостей, для этого исследуются потенциальные источники данных уязвимостей - различные способы увеличения эффективности процессорных мощностей как на аппаратном уровне, так и на программном. Рассматривается один из основных методов для повышения работоспособности процессов, а именно, параллелизмом на уровне команд, позволяющий современному процессору комбинировано обрабатывать несколько программ. Приводится таблица с актуальными уязвимостями процессов и возможными вариантами защиты от них.

Ключевые слова: процессорные уязвимости, параллелизм на уровне команд, спекулятивное выполнение, информационная безопасность.

THE ANALYSIS OF MODERN PROCESSOR VULNERABILITYS

A.V. Vedeneyev, V.S. Kotelnikov, I.N. Malysheva

Concern «Constellation» JSC, Voronezh, Russian Federation

Abstract. In operation the analysis of modern processor vulnerability is carried out, potential sources of the data vulnerability - various methods of magnification of efficiency of processor capacities both at a hardware level, and on program are for this purpose researched. One of the main methods for increase of serviceability of processes is considered, namely, the instruction level parallelism, allowing the modern processor is combined to process some commands. The table with actual vulnerability processes and possible variants of protection against them is resulted.

Keywords: processor vulnerability, instruction level parallelism, speculative выполнение, information security.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в настоящее время применяются различные способы для увеличения производительности и повышения эффективности функционирования современных процессоров. Раньше считалось, что существенным методом для повышения быстродействия процессора является увеличение числа транзисторов, и соответственно, наращивание тактовой частоты, то есть изменение свойств и конфигурации самого процессора. Но подобная методика имеет ряд своих недостатков, заключающихся, основным образом, в необходимости переоборудования производства и необходимости больших экономических вложений.

В настоящее время стали появляться методы, основанные на программном и (или) аппаратном подходе, которые привели к весомому приросту продуктивности мощностей самого процессора. Подобные подходы берут начало в параллельном использовании команд, а именно, выполнении процессором нескольких операций одновременно. Стоит отметить, что данный метод выглядит весьма привлекательно со стороны эффективности. Но в аспекте информационной безопасности, как показывает практика, возможны некоторые сложности и недоработки, что позволит потенциальным

«злоумышленникам» произвести атаку на информационные ресурсы, в которых используются современные процессоры [1].

2. ПАРАЛЛЕЛИЗМ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОРАХ

Параллелизмом называют свойство процессоров выполнять несколько команд одновременно, «параллелизмом на уровне команд» называют комбинирование выполнения команд.

В настоящее время существуют два типа выполнения параллелизма в процессорах:

- путем использования аппаратных средств – при установлении параллелизма в множестве процессов используются необходимые механизмы, встроенные в сам процессор, это происходит при осуществлении бинарных операций программ;
- путем реализации программного обеспечения – идентификация параллелизма осуществляется компилятором, который синтезирует исходный код программы под определенный процессор.

Стоит отметить, что степень аппаратного оснащения реализует так называемый динамический параллелизм (представителем является процессор Intel Pentium 4), а программным обеспечением реализуется статический параллелизм (представителем является процессор Itanium).

Основной задачей при создании процессора и, соответственно, компилятора является идентификация параллелизма, а также его применение с целью наибольшего выигрыша в производительности микросхемы. Стандартные программные продукты ориентированы на последовательную модель выполнения, где команды осуществляются одна за другой в порядке, определенном разработчиком. Параллелизм на уровне команд создает условия для компилятора и/или процессора рассредоточивать реализацию ряда инструкций или даже изменять порядок их выполнения. В каждой программе, в зависимости от ее направленности, может находиться ряд возможных команд или инструкций, которые должны выполняться параллельно. Само количество «параллелизма на уровне команд» в некоторых областях программного обеспечения, таких как научные вычисления и компьютерная графика, может достигать огромного количества. Некоторые задачи могут демонстрировать гораздо меньше параллелизма (например, криптография).

Основной интерес со стороны исследования уязвимостей и практического применения вызывают методы аппаратного выявления и использования параллелизма, классификация указанных методов представлена на рисунке 1.

На рисунке показано, что существует множество различных аппаратных методов использований параллелизма. Наиболее уязвимыми и небезопасными методами являются спекулятивное выполнение и внеочередное исполнение. Ввиду своих архитектурных особенностей данные методы позволяют выполнять «нежелательные» операции, что в свою очередь может поставить под угрозу сам процессор, а также данные пользователей.

3. СПЕКУЛЯТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ - ОСНОВНАЯ УЯЗВИМОСТЬ

Учитывая архитектурные особенности и способы применения методик повышения производительности процессоров, спекулятивное выполнение и внеочередное исполнение на сегодняшний день могут являться «краеугольными камнями» в процессорах, а также микросхемах, в которых применяются подобные методики. Стоит отметить, что наиболее часто эксплуатируется именно спекулятивное выполнение команд.

Вычислительный конвейер, где выполнение нескольких инструкций может частично перекрываться;

Суперскалярное выполнение операций, в которой несколько функциональных блоков используется для выполнения нескольких команд одновременно;

Внеочередное исполнение, где инструкции выполняются в любом порядке, который не нарушает зависимости данных. Этот метод не зависит ни от конвейера, ни от суперскалярного выполнения. Текущие реализации внеочередного исполнения динамически (т.е. в время выполнения программы и без помощи со стороны компилятора) получают «параллелизм на уровне команд» из обычных программ. Альтернативой является получение параллелизма во время компиляции и передача этой информации аппаратному обеспечению. Из-за сложности масштабирования техники внеочередного исполнения отрасль пересмотрела набор команд, которые явно кодируют несколько независимых операций в инструкции;

Переименование регистров — метод, используемый для устранения ненужной сериализации (последовательного выполнения) операций, к которой приводят переиспользование регистров этими операциями, и используемый для внеочередного исполнения;

Спекулятивное исполнение, которое позволяет выполнять инструкции целиком или частично до того, как станет ясно, нужно ли это выполнение. Часто используемой формой спекулятивного исполнения является спекулятивное исполнение потока управления, при котором инструкции (например, переход) за потоком управления выполняются до того, как определится та ветка программы, которую определяет инструкция перехода. Были предложены и используются несколько других форм спекулятивного исполнения, в том числе для спекулятивного исполнения, обусловленного предсказанием значения, предсказание зависимости по памяти и предсказание задержек кэша.

Рис.1. Аппаратные методы выявления и использования параллелизма.

В настоящее время группы исследователей безопасности, работающие в Google Project Zero [2], в академических институтах выявили огромное количество угроз, связанных именно со спекулятивным выполнением команд в процессорах. Таким образом, фактически любой новейший процессор, применяемый в настольных ПК или серверах, подвержен угрозам для одного или более экспloitов.

В таблице 1 приведены типы современных процессорных уязвимостей. Самые распространенные из существующих процессоров, которые подвержены уязвимостям – это Intel, AMD, ARM. Главным эксплуатируемым алгоритмом, который повышает производительность процессора, выступает спекулятивное выполнение команд процессора. Возможными вариантами защиты выступают стандартные методики защиты, такие как программные коррекции ОС и микрокода, использование межсетевого экранирования.

Таблица 1. Типы современных процессорных уязвимостей

| № п/п | Тип эксплуатируемого алгоритма процессора | Процессоры, подверженные уязвимостям | Возможные варианты защиты от уязвимостей | Примеры существующих уязвимостей |
|----------|---|---|---|-----------------------------------|
| 1 | Спекулятивное выполнение команд процессора | Процессоры Intel, AMD, ARM, POWER, возможно и другие процессоры со схожей архитектурой. | программные коррекции ОС и микрокода, использование межсетевого экранирования | Meltdown и Spectre |
| 2 | Спекулятивное выполнение команд процессора | Процессоры Intel, возможно и другие процессоры со схожей архитектурой. | программные коррекции ОС и микрокода, использование межсетевого экранирования | ZombieLoad, RIDL, Fallout, SLF |
| 3 | Спекулятивное выполнение команд процессора | Процессоры Intel, возможно и другие процессоры со схожей архитектурой. | программные коррекции ОС и микрокода, использование межсетевого экранирования | CasheOut, SG Axe |
| 4 | Спекулятивное и внеочередное выполнение команд процессора | Процессоры Intel и другие процессоры со схожей архитектурой | программные коррекции ОС и микрокода, использование межсетевого экранирования | L1 Terminal Fault, или Foreshadow |
| 5 | Спекулятивное и внеочередное выполнение команд процессора | Процессоры AMD, возможно и другие процессоры со схожей архитектурой | программные коррекции ОС и микрокода, использование межсетевого экранирования | SMM Callout Privilege Escalation |

Что касается уязвимостей, то наиболее «опасными» на сегодняшнее время считаются Meltdown и Spectre, что подтверждается многочисленными публикациями (например, [3-6]).

Уязвимость Meltdown в основном касается процессоров Intel, хотя есть доказательства об уязвимости нескольких процессоров ARM. С использованием Meltdown информационное воздействие может злоупотреблять реализациями спекулятивного выполнения Intel и ARM, в свою очередь это вызовет утечку информации из программных процессов – напрямую из ядра операционной системы. Кроме того, Meltdown позволяет свободно осуществлять идентификацию иных процессов и похищение информации, которая должна быть изолирована ядром, другими программами или другими виртуальными машинами.

Уязвимость Spectre является более серьезной, чем Meltdown, так как данной уязвимости подвержены фактически абсолютно любые современные процессоры.

Необычность Spectre заключается в том, что это более высокоуровневое информационное воздействие. В то время как Meltdown эксплуатирует определенное спекулятивное выполнение, Spectre можно считать основной угрозой всего спекулятивного выполнения.

Meltdown уничтожает изоляцию между конкретными программами и операционной системой. Подобное информационное воздействие позволяет программе получить прямой доступ к памяти, а значит, к ограниченной информации других программ и оперативной системы. Spectre вмешивается в изоляцию между различными

приложениями, что дает возможность добиться информации даже из программ, которые соблюдают все правила безопасности и работают без ошибок. Более того, проверки безопасности упомянутых программ лишь повышают степень потенциального информационного влияния со стороны Spectre.

Стоит отметить, что интеграция и развертка эксплойта Spectre в системе значительно труднее по сравнению с тем же Meltdown. Соответственно, отразить данное информационное воздействие также намного труднее.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в существующих современных процессорах, несмотря на прогрессивные механизмы поддержания безопасности, все ещё присутствует целый ряд всевозможных уязвимостей, которые в свою очередь позволяют получать «злоумышленникам» всю закрытую информацию с устройств, в которых применяются указанные процессоры. Ввиду этого, вопросы информационной безопасности и защиты процессоров и на сегодняшний день являются весьма актуальными и требуют комплексного подхода к организации информационного противоборства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веденеев А.В., Толстых Н.Н., Котельников В.С. К вопросу о надежности управления инфокоммуникационным комплексом. // Теория и техника радиосвязи, 2020, №2. – С. 40-50.
2. Fangfei Liu, Yuval Yarom, Qian Ge, Gernot Heiser, Ruby B. Lee. Last-Level Cache Side-Channel Attacks are Practical. // IEEE Symposium on Security and Privacy, 2015.
3. M. Lipp, M. Schwarz, D. Gruss, T. Prescher, W. Haas, A. Fogh, J. Horn, S. Mangard, P. Kocher, D. Genkin et al., Meltdown: Reading Kernel Memory from User Space. // USENIX Security Symposium (SEC), 2018.
4. P. Kocher, J. Horn, A. Fogh, D. Genkin, D. Gruss, W. Haas, M. Hamburg, M. Lipp, S. Mangard, T. Prescher, M. Schwarz, Y. Yarom. Spectre attacks: Exploiting speculative execution. // IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P), 2019.
5. Z. Hua, D. Du, Y. Xia, H. Chen, B. Zang, EPTI: Efficient Defence against Meltdown Attack for Unpatched VMs. // USENIX Annual Technical Conference (ATC), 2018.
6. M. Schwarz, M. Schwarzl, M. Lipp, D. Gruss. NetSpectre: Read arbitrary memory over network. // arXiv:1807.10535, 2018.

REFERENCES

1. Vedeneyev A.V. Tolstoy N.N., Kotelnikov V.S. To a question on reliability of control the communication a complex. // the Theory and technics of the radio service, 2020, №2. – pp. 40-50.
2. Fangfei Liu, Yuval Yarom, Qian Ge, Gernot Heiser, Ruby B. Lee. Last-Level Cache Side-Channel Attacks are Practical. // IEEE Symposium on Security and Privacy, 2015.
3. M. Lipp, M. Schwarz, D. Gruss, T. Prescher, W. Haas, A. Fogh, J. Horn, S. Mangard, P. Kocher, D. Genkin et al., Meltdown: Reading Kernel Memory from User Space. // USENIX Security Symposium (SEC), 2018.
4. P. Kocher, J. Horn, A. Fogh, D. Genkin, D. Gruss, W. Haas, M. Hamburg, M. Lipp, S. Mangard, T. Prescher, M. Schwarz, Y. Yarom. Spectre attacks: Exploiting speculative execution. // IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P), 2019.
5. Z. Hua, D. Du, Y. Xia, H. Chen, B. Zang, EPTI: Efficient Defence against Meltdown Attack for Unpatched VMs. // USENIX Annual Technical Conference (ATC), 2018.
6. M. Schwarz, M. Schwarzl, M. Lipp, D. Gruss. NetSpectre: Read arbitrary memory over network. // arXiv:1807.10535, 2018

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ НЕИДЕАЛЬНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

В. Д. Ле, В. И. Парфенов

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Аннотация. В работе выполнен анализ эффективности алгоритмов распределенного обнаружения на основе различных решающих правил при неидеальном канале связи с гауссовскими помехами и канале с рэлеевскими замираниями. Приведены зависимости вероятности полной ошибки подобных решающих правил от отношения сигнал/шум (ОСШ) в канале связи при применении разных видов модуляции. Определен выигрыш в эффективности распределенной системы с применением BPSK модуляции по сравнению со случаем применения BFSK модуляции. Показано, что эффективность системы может быть повышена за счет увеличения количества сенсоров, даже в условиях замираний в канале связи.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная система (БСС); распределённое обнаружение; сенсор; рэлеевское замирание; канал связи; вероятности ошибок; вероятность выхода из строя.

EFFICIENCY ANALYSIS OF DISTRIBUTED DETECTION ALGORITHMS UNDER NON-IDEAL CHANNEL CONDITIONS

V. D. Le, V. I. Parfenov

Voronezh State University (VSU), Voronezh, Russia

Abstract. In this work, the efficiency of distributed detection basis on the various decision fusion rules with gaussian noise communication channel and Rayleigh fading communication channel is analyzed. The dependencies of the total error probability of such decision fusion rules on SNR channel when using various modulation types are presented. The gain in the detection efficiency of the distributed system using BPSK modulation compared to the case of using BFSK modulation is shown. In addition, the efficiency of the system can be increased by increasing the number of sensors, even under fading communication channel.

Keywords: wireless sensor networks (WSN); distributed detection; sensor; Rayleigh fading; communication channel; error probability; probability of failure.

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительные новые достижения и новейшие сетевые технологии в области микропроцессорной техники играют важную роль в распределенных коммуникационных системах; при этом большое внимание уделяется разработке и применению инновационных технологий миниатюрных вычислительных и коммуникационных систем, в том числе, беспроводных сенсорных систем (БСС). Благодаря своей высокой гибкости, расширенному охвату наблюдения, надежности, мобильности и энергетической эффективности, БСС находят широкое применение и высокий потенциал в области военного наблюдения, безопасности, мониторинга окружающей среды и т. д. [1, 2]. БСС – это пространственно-распределенная специализированная сеть, состоящая из множества миниатюрных локальных сенсоров, предназначенных для мониторинга и записи физических явлений или условий

окружающей среды, а также исполнительных устройств, объединенных между собой радиоканалом [1]. Кроме того, БСС обладают способностью к автономности и самоорганизации.

В БСС каждые элементы выполняют свои предназначенные функции, при этом они одновременно подчиняются общим принципам функционирования. А именно: каждый локальный сенсор предварительно обрабатывает наблюдения и извлекает информацию об интересуемых объектах, затем передаёт эту информацию через канал связи с помощью сигналов с различными методами модуляции [3, 4], например, частотной (BFSK) или фазовой (BPSK), в центральный узел (ЦУ), в котором и реализуется совместная обработка принятых данных и выносится окончательное решение на основе решающего правила. Типичными решаемыми задачами в БСС являются обнаружение, оценивание параметров или отслеживание цели (объекта наблюдения). В частности, распределенное обнаружение – это одна из наиболее важных задач при мониторинге. При решении задачи распределённого обнаружения одной из важных проблем является формирование оптимального решающего правила в ЦУ, которое может быть основано на принципе комплексирования полученной информации о локальных решениях, характеристиках эффективности сенсоров и канала связи [5-12]. При условии неидеальности канала связи ранее были получены оптимальное решающее правило принятия решения системой в [10, 11] и решающее правило с учетом вероятности выхода из строя сенсоров в [12]. Для таких каналов характерно воздействие различных помех, замираний и пр., вследствие чего искажается передаваемый сигнал и ухудшается эффективность канала связи. В данной работе как раз и была выполнена попытка исследования степени влияния таких явлений на эффективность обнаружения всей системой. На основе полученных в [10-12] результатов в данной работе проанализирована эффективность подобных решающих правил, как при условии гауссовых помех, так и при условии рэлеевских замираний в канале связи.

2. РАСПРЕДЕЛЁННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИ НЕИДЕАЛЬНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Рассмотрим следующие общие условия функционирования БСС, характерные для распределённого обнаружения. Предположим, что для наблюдения (с целью охраны) за некоторым объектом БСС содержит K сенсоров. Введем в рассмотрение две гипотезы: H_1 и H_0 (гипотеза H_1 означает, что проникновение на наблюдаемый объект присутствует, H_0 – то, что такого проникновения нет). Каждый из K локальных сенсоров на основе заложенного в нем алгоритма обнаружения независимо друг от друга выносит одно из двух решений: $u_i = 1$, если i -й сенсор обнаруживает проникновение, и $u_i = -1$ в противном случае ($i = 1, \dots, K$). Далее, для характеристики эффективности обнаружения i -м сенсором обозначим через α_i – вероятность ложной тревоги и β_i – вероятность пропуска цели.

Аналогично, обозначим через U_i – решение, выносимое центральным узлом в результате обработки сигнала, пришедшего от i -го сенсора. Это решение также может

быть представлено в бинарной форме: $U_i = 1$, если в ЦУ на основе обработки принятого сигнала выносится решение о том, что сенсор обнаружил проникновение на охраняемый объект, и $U_i = -1$ – в противном случае. При этом характеризовать эффективность радиоканала между i -м сенсором и ЦУ будем вероятностями ошибок первого и второго рода $A_i = P(U_i = 1|u_i = -1)$ и $B_i = P(U_i = -1|u_i = 1)$.

В случае идеального канала или очень большого отношения сигнал/шум (ОСШ) в канале связи оптимальным является классический алгоритм Chair-Varshney [5, 6]. В этом случае ЦУ принимает локальные сенсорные решения безошибочно и вероятности ошибок первого и второго рода A_i и B_i считаются равными нулю. Однако алгоритм Chair-Varshney является оптимальным только в случае идеального канала связи между сенсорами и ЦУ. Следует отметить, что в связи с миниатюризацией сенсоров, обусловленной очевидно имеющимися энергетическими ограничениями в БСС, мощности передачи сенсоров невелики; кроме того, из-за наличия замираний, влияния шумов окружающей среды и пр. неизбежно возникают ошибочные решения за счет искажения передаваемого сигнала в канале связи. Следовательно, необходимо учитывать эти особенности при решении задачи распределённого обнаружения. Для выхода из этого положения были исследованы различные решающие правила в работах [7-9]. В зависимости от степени мгновенного состояния канала были предложены оптимальное решающее правило на основе алгоритма максимального правдоподобия (LR) и несколько неоптимальных решающих правила типа “maximum ratio combiner (MRC)”, “equal gain combiner (EGC)” и т.д. [7, 8]. В условиях ограниченных ресурсов получение мгновенной информации о состоянии канала связи и формирование таких решающих правил на основе большого количества совместных принятых сигналов в ЦУ являются громоздкими и непрактичными, особенно, при динамичном изменении информационной обстановки. Чтобы избежать подобного требования знания мгновенного состояния канала, также были предложены правило “LRT-CS”, основанное на статистике канала [8] и решающее правило “LRT-BER”, учитывающее средние вероятности битовых ошибок (BER) [9]. Однако необходимо отметить, что в этих литературных источниках для вычисления показателей эффективности принятия решения системой обычно используются либо аналитические выражения, полученные приближенно на основе применения центральной предельной теории (CLT), либо метод компьютерного моделирования. Для разрешения данного вопроса в работах [10, 11] приведены авторами статьи оптимальное решающее правило принятия решения и его точные характеристики эффективности, найденные с помощью рекуррентных соотношений.

В соответствии с [10, 11] оптимальное решающее правило (LRT-Opt) записывается в следующем виде:

$$N = \sum_{i=1}^K Y_i > h, \quad \begin{cases} H_1 \\ H_0 \end{cases}$$

$$Y_i = \begin{cases} C1_i = \ln(\varphi_i^{(1)} / \varphi_i^{(0)}), & U_i = 1, \\ C2_i = \ln[(1 - \varphi_i^{(1)}) / (1 - \varphi_i^{(0)})], & U_i = -1, \end{cases} \quad (1)$$

где $\varphi_i^{(0)} = \alpha_i(1 - B_i) + (1 - \alpha_i)A_i$, $\varphi_i^{(1)} = (1 - \beta_i)(1 - B_i) + \beta_i A_i$ и пороговое значение h также определяется, исходя из выбранного критерия оптимальности.

В случае применения сигналов с выбранным методом модуляции для передачи локальных решений в ЦУ через двоичный симметричный канал связи эффективность приема часто характеризуется средними вероятностями битовых ошибок – Pe . В дальнейшем положим, что вероятности ошибок первого и второго рода в канале связи равны: $A_i = B_i = Pe_i$ [3, 4].

При воздействии лишь аддитивных гауссовых помех в подобном канале связи для BFSK или BPSK модуляции средние вероятности битовых ошибок можно определить как [3, 4]:

$$A_i = B_i = Pe_i = \begin{cases} Q(\sqrt{2q_b}) & \text{для BPSK модуляции,} \\ Q(\sqrt{q_b}) & \text{для BFSK модуляции,} \end{cases} \quad (2)$$

где $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$, $q_b = \frac{E_b}{N_0}$ – отношение сигнал/шум, причем E_b –

энергия одного бита, N_0 – спектральная плотность мощности шума.

В случае воздействия медленных рэлеевских замираний в канале связи также при применении сигналов с BFSK или BPSK модуляциями эти вероятности ошибок могут быть найдены как [4, 12]:

$$A_i = B_i = Pe_i = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{q_b}{1+q_b}} \right] & \text{для BPSK модуляции,} \\ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{q_b}{2+q_b}} \right] & \text{для BFSK модуляции.} \end{cases} \quad (3)$$

Для характеристики эффективности принятия решения всей системой выберем критерий минимума полной вероятности ошибки $Pe_{\Sigma\min} = \min(A_\Sigma + B_\Sigma)/2$, достигаемый при определённом значении порога h^* , где A_Σ и B_Σ – суммарные вероятности ошибок первого и второго рода всей системы соответственно. Аналогично [10,11] можно показать, что вероятности ошибок удовлетворяют следующим рекуррентным соотношениям:

$$A_\Sigma = 1 - \Psi_K^{(0)}(h^*), \quad B_\Sigma = \Psi_K^{(1)}(h^*), \quad (4)$$

$$\Psi_k^{(i)}(h^*) = \varphi_k^{(i)} \cdot \Psi_{k-1}^{(i)}(h^* - C1_k) + (1 - \varphi_k^{(i)}) \cdot \Psi_{k-1}^{(i)}(h^* + C2_k), \quad (5)$$

причем $i=0$ или 1 ; $k=1,\dots,K$; $\Psi_0^{(i)}(h^*)=\sigma(h^*)$, где $\sigma(\cdot)$ – функция единичного скачка.

Для рассматриваемых условий функционирования БСС с целью анализа эффективности обнаружения распределенной сенсорной системой на основе решающего правила (1) были вычислены минимумы вероятности полной ошибки $P_{e_{\Sigma \min}}$ в предложении, что эффективность самих сенсоров известна и постоянна, а именно, вероятности ошибок как первого, так и второго рода всех сенсоров одинаковы: $\alpha_i = \beta_i = 0,01$. Полученные результаты расчетов представлены на рис. 1. На этом рисунке приведены зависимости вероятности полной ошибки от ОСШ q_b для канала связи при наличии лишь аддитивных гауссовских помех (сплошные линии) и с замираниями (штриховые линии) при разном количестве сенсоров K .

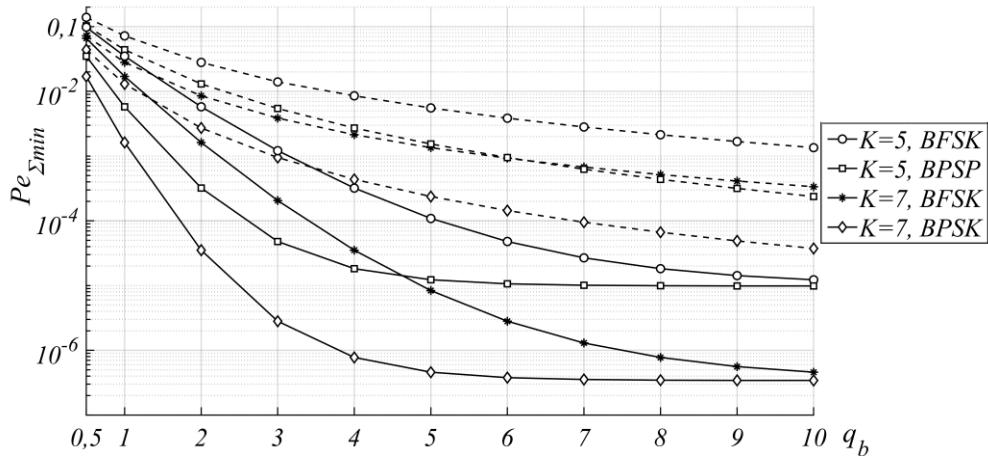


Рис. 1. Зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ q_b для канала связи с аддитивным гауссовским шумом и с замираниями при разном количестве сенсоров K .

Из анализа рисунка 1 можно констатировать, что наличие помех и замираний в канале связи оказывает существенное влияние на эффективность всей распределенной системы. При одном и том же количестве сенсоров с увеличением ОСШ в канале связи q_b эффективность системы возрастает и стремится к предельному значению. Видно, что для канала связи как с гауссовскими помехами, так и с замираниями, система с применением BPSK модуляции (изображены кривыми с квадратиками и кривыми с ромбиками) имеет определенный выигрыш в эффективности относительно системы с применением BFSK модуляции (изображены кривыми с окружностями и кривыми с звездочками) особенно при небольших значениях ОСШ. Это несложно объяснить тем, что при использовании сигнала с BPSK модуляцией вероятность битовых ошибок всегда меньше, чем в случае применения BFSK модуляции за счет энергетического выигрыша (см. в формулы (2) и (3)).

Наличие замираний в канале связи существенно ухудшает эффективность обнаружения системой (см. штриховые линии). Действительно, при одном и том же количестве сенсоров вероятность полной ошибки системы с учетом замираний в канале связи на несколько порядков превышает аналогичную вероятность в случае воздействия

лишь гауссовских помех в канале связи, даже при больших ОСШ, причем это ухудшение возрастает с увеличением количества сенсоров. Кроме того, очевидно, эффективность обнаружения (до определенного предела) также можно повысить путем увеличения количества сенсоров. В случае отсутствия замираний (сплошные кривые) с ростом ОСШ q_b вероятность полной ошибки быстро уменьшается и достигает предельного значения. В канале с замираниями подобная тенденция также наблюдается, только предельное значение достигается при значительно большем значении ОСШ.

3. РАСПРЕДЕЛЁННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ С УЧЕТОМ НЕНАДЕЖНОСТИ СЕНСОРОВ ПРИ НЕИДЕАЛЬНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Как уже отмечалось ранее, характерной особенностью БСС является миниатюризация сенсоров. Вследствие этого необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на надежность сенсоров в процессе функционирования БСС: небольшой срок службы батарей, большая возможность физического уничтожения при их функционировании, в значительной степени, на открытой местности, и пр. С этой целью в работе [12] авторами статьи был приведен алгоритм распределенного обнаружения с учетом ненадежности сенсоров, степень которой на практике часто характеризуется априорной вероятностью выхода из строя сенсоров. На основе полученных результатов далее мы будем исследовать эффективность принятия решения подобным алгоритмом при неидеальном канале связи как с гауссовскими помехами, так и с рэлеевскими замираниями.

В соответствии с [12], решающее правило принятия решения записывается в следующем виде:

$$L = \sum_{i=1}^K Z_i \begin{cases} > h_1, \\ < h_0 \end{cases},$$

$$Z_i = \begin{cases} C1'_i = \ln \left[\frac{(1-p_0)\varphi_i^{(1)} + p_0\tilde{p}_i}{(1-p_0)\varphi_i^{(0)} + p_0\tilde{p}_i} \right], & U_i = 1, \\ C2'_i = \ln \left[\frac{(1-p_0)(1-\varphi_i^{(1)}) + p_0(1-\tilde{p}_i)}{(1-p_0)(1-\varphi_i^{(0)}) + p_0(1-\tilde{p}_i)} \right], & U_i = -1, \end{cases}, \quad (6)$$

где p_0 – априорная вероятность выхода из строя сенсора, \tilde{p}_i – вероятность, которая зависит только от алгоритма вынесения решения, используемого в ЦУ, в пользу соответствующего i -го локального решения. Порог h_1 также определяется, исходя из выбранного критерия оптимальности.

Отметим, что для случая использования сигналов с BFSK или BPSK модуляциями порог обнаружения алгоритма приема локальных решений в ЦУ был принят равным нулю [3, 4]. Отметим, что при выходе из строя сенсора он ничего не передает в ЦУ и очевидно, что на входе приемного устройства ЦУ присутствует только шум. Предположим, что шум является белым гауссовским. В этом случае несложно показать,

что значение вероятности $\tilde{p}_i = Q(0) = 0,5$. Однако при рабочем состоянии сенсоров характеристики эффективности каналов связи (или алгоритма приема локальных решений в ЦУ) могут быть определены на основе (2) для случая аддитивных гауссовских помех и (3) при наличии медленных рэлеевских замираний в канале связи соответственно.

Предположим, что для передачи локальных решений применяется сигнал с BPSK модуляцией. Учитывая (2) и (3), суммарные вероятности ошибок первого и второго рода для алгоритма (6) могут быть найдены как [12]

$$A'_\Sigma = \int_{h_2}^{+\infty} p_K(L|H_0)dL = 1 - \Psi_K'^{(0)}(h_2), \quad B'_\Sigma = \int_{-\infty}^{h_2} p_K(L|H_1)dL = \Psi_K'^{(1)}(h_2), \quad (7)$$

$$\text{где } \Psi_K'^{(i)}(h_2) = V_K^{(i)} \Psi_{K-1}'^{(i)}(h_2 - C1'_K) + (1 - V_K^{(i)}) \Psi_{K-1}'^{(i)}(h_2 - C2'_K), \quad \Psi_0'(h_2) = \sigma(h_2),$$

$$V_k^{(i)} = (1 - p_0) \cdot \varphi_k^{(i)} + p_0 \cdot \tilde{p}_k, \text{ причем } i=0 \text{ или } 1.$$

Эффективность принятия решения распределенной сенсорной системой в случае возможности выхода из строя сенсоров также будем описывать минимумом вероятности полной ошибки $Pe_{\Sigma \min} = (A'_\Sigma + B'_\Sigma)/2$, достигаемым при определённом значении порога. Результаты расчетов приведены на рис. 2. На рис. 2 представлены графики зависимости полной вероятности ошибок от ОСШ q_b для BPSK модуляции при различных значениях вероятности выхода из строя сенсоров p_0 и количестве сенсоров $K=5$. Остальные условия расчетов были выбраны аналогичными тем, что были использованы при построении рис. 1.

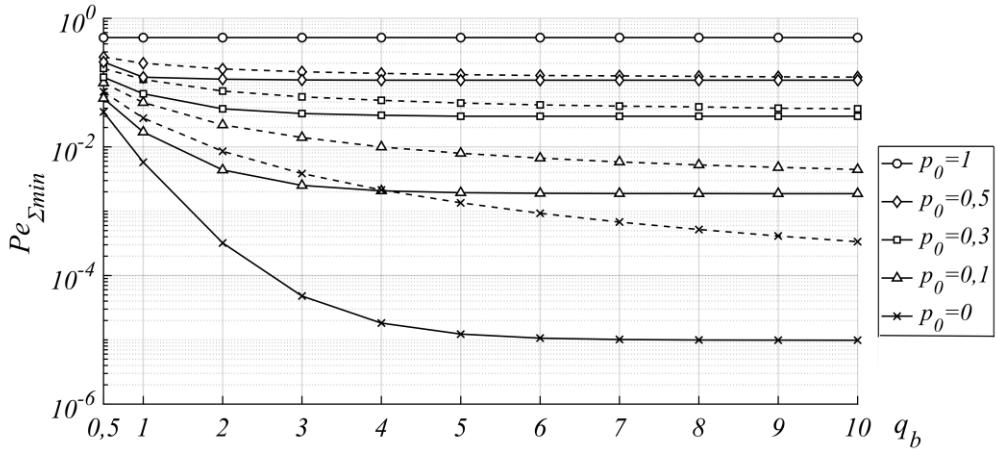


Рис. 2. Зависимости вероятности полной ошибки от ОСШ q_b распределенного обнаружения с учетом ненадежности сенсоров в случае гауссовских помех (сплошные кривые) и замираний (штриховые кривые) в канале связи K .

Из анализа рис. 2 следует, что, если $p_0 = 0$ (т.е. все сенсоры находятся в надежном состоянии), то результаты расчетов (изображены кривой с крестиками на рис. 2) совпадают с соответствующими результатами, приведенными на рис. 1. В тоже время, если $p_0 = 1$, вероятность полной ошибки становится равной 0,5, как для случая

гауссовских помех, так и для случая замираний в канале связи (изображены кривыми с окружностями на рис.2). Кроме того, анализ приведенных зависимостей на рис. 2 свидетельствует о том, что в случае замираний в канале связи ухудшение эффективности обнаружения системой с учетом ненадежности сенсоров резко возрастает при небольших значениях вероятности выхода из строя сенсоров ($p_0 < 0,1 \div 0,3$). В тоже время при $p_0 \geq 0,3$ вероятность полной ошибки всей системы может стать излишне большой, причем она слабо зависит от ОСШ q_b .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был выполнен анализ эффективности распределенного обнаружения на основе разработанных авторами решающих правил принятия решений в различных условиях наблюдения. Приведенные результаты позволяют оценить эффективность принятия решения системой в случае гауссовских помех и замираний в канале связи, а также оценить эффективность системы с учетом ненадежности сенсоров в таких условиях. Применение методов модуляции с большей помехоустойчивостью, в частности, BPSK модуляции, позволяет повысить эффективность системы за счет энергетического выигрыша. Наличие помех и замираний в канале связи существенно ухудшает эффективность системы, причем это ухудшение более значительно при наличии замираний, что приводит к необходимости использования известных методов борьбы с замираниями, в частности, методов разнесённого приема [13].

В случае гауссовских помех в канале связи для повышения эффективности приема сигнала в ЦУ и эффективности системы в целом одним из способов является применение мягких схем вынесения решений [14]. Следовательно, дальнейшим направлением исследований может стать разработка алгоритма распределенного обнаружения на основе использования мягких схем в канале связи с замираниями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Урманов Д., Болдова О. Беспроводные сенсорные системы для обеспечения безопасности подвижных и неподвижных объектов // Электроника: наука, технология, бизнес, 2013, № 3 (125). – С. 128-134.
2. Sohraby K., Minoli D., Znati T. Wireless sensor networks: Technology, protocols, and applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 236 p.
3. Скляр Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
4. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005. – 644 p.
5. Thomopoulos S. C. A., Viswanathan R., Bougoulias D. C. Optimal decision fusion in multiple sensor systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, Vol. 23, No. 5. – Pp. 644-653.
6. Chair Z., Varshney, P. K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, Vol. 22, No. 1. – Pp. 98-101.
7. Chen B. Fusion of decisions transmitted over fading channels in wireless sensor networks // In Proceedings of the Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2002, Vol. 2. – Pp. 1184-1188.

8. Chen B. Channel aware decision fusion in wireless sensor networks / Chen B., Jiang R., Kasetkasem T., Varshney P. K. // IEEE Trans. Signal Process, 2004, Vol. 52, No. 12. – Pp. 3454-3458.
9. Yongsheng Yan. Decision Fusion with Channel Errors in Distributed Decode-Then-Fuse Sensor Networks / Yongsheng Yan, Haiyan Wang, Xiaohong Shen, Xionghu Zhong // Sensors, 2015, Vol. 15(8). – Pp. 19157-19180.
10. Парфенов В. И., Ле В. Д. Анализ показателей эффективности алгоритмов обработки информации в беспроводных сенсорных сетях // Радиолокация, навигация, связь: XXV международная научно-техническая конференция, 2019, Т. 1. – С. 63-70.
11. Парфенов В. И., Ле В. Д. Оптимальный алгоритм комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом влияния помех в канале радиосвязи // Телекоммуникации, 2020, № 2. – С. 12-17.
12. Парфенов В. И., Ле В. Д. Алгоритмы комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом вероятности выхода сенсоров из строя // Радиотехника, 2019, № 12(19). – С. 53-59.
13. Сидельников Г. М., Макаров А. А. Статистическая теория радиотехнических систем: Учебное пособие. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики, 2015. – 194 с.
14. Парфенов В. И., Ле В. Д. Распределенное обнаружение на основе применения мягких схем вынесения решений как в локальных сенсорах, так и в центральном узле // Вопросы радиоэлектроники, 2021, № 3. – С. 49-56.

REFERENCES

1. Urmanov D., Boldova O. Wireless sensor systems for security of moving and stationary objects // Electronics: science, technology, business. 2013, No. 3 (125). – Pp. 128-134.
2. Sohraby K., Minoli D., Znati T. Wireless sensor networks: Technology, protocols, and applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 236 p.
3. Sklar B. Digital communications: Fundamentals and applications. M.: Publishing house “Williams”, 2003. – 1104 p.
4. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005. – 644 p.
5. Thomopoulos S. C. A., Viswanathan R., Bougoulias D. C. Optimal decision fusion in multiple sensor systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, Vol. 23, No. 5. – Pp. 644-653.
6. Chair Z., Varshney, P. K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, Vol. 22, No. 1. – Pp. 98-101.
7. Chen B. Fusion of decisions transmitted over fading channels in wireless sensor networks // In Proceedings of the Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2002, Vol. 2. – Pp. 1184-1188.
8. Chen B. Channel aware decision fusion in wireless sensor networks / Chen B., Jiang R., Kasetkasem T., Varshney P. K. // IEEE Trans. Signal Process, 2004, Vol. 52, No. 12. – Pp. 3454-3458.
9. Yongsheng Yan. Decision Fusion with Channel Errors in Distributed Decode-Then-Fuse Sensor Networks / Yongsheng Yan, Haiyan Wang, Xiaohong Shen, Xionghu Zhong // Sensors, 2015, Vol. 15(8). – Pp. 19157-19180.
10. Parfenov V. I., Le V. D. Analysis of indicators of efficiency of algorithms of information processing in wireless sensor networks // Radar, navigation, communication: XXV International Scientific and Technical Conference, 2019, Vol. 1. – Pp. 63-70.
11. Parfenov V. I., Le V. D. The optimal algorithm of aggregation of information in wireless sensor networks taking into account the influence of interference in the radio channel // Telecommunications, 2020, No 2. – Pp.12-17.
12. Parfenov V. I., Le V. D. Algorithms of information aggregation in wireless sensor networks taking into account probability of sensors failure // Radioengineering, 2019, No 12(19). – Pp. 53-59.
13. Sidelnikov GM., Makarov AA. Statistical theory of radio engineering systems. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2015. – 194 p.
14. Parfenov V. I., Le V. D. Distributed detection basis on using soft decision scheme both in local sensors and in fusion center// Issues of radio electronics, 2021, No 3. – Pp. 49-56.

АСПЕКТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В КОГЕРЕНТНОЙ СИСТЕМЕ РАДИОСВЯЗИ

А. Н. Асосков, И. Н. Малышева, Ю. А. Плахотнюк

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются аспекты синтеза синхропараметров для системы радиосвязи с широкополосными сигналами. Предложен альтернативный вариант реализации ФАПЧ без традиционной цепи обратной связи. Описываются преимущества реализации на основе комбинированного использования методов автоматического управления и нечеткого регулирования.

Ключевые слова: фазовая автоподстройка частоты, когерентная система радиосвязи, синхронизация.

ASPECTS OF PRACTICAL IMPLEMENTATION OF PHASE LOCKED LOOP IN THE COHERENT RADIOPHYSICS SYSTEM

A. N. Asoskov, I. N. Malysheva, Yu. A. Plakhotnyuk

JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation

Abstract. This article presents aspects of synchronization for radiocommunication system based on broadband signals. It also offers the alternative variant of implementation of a phase locked loop without a traditional circuit of back coupling. It also describes advantages of implementation based on combined usage of methods of automatic control and fuzzy regulation.

Keywords: phase locked loop, coherent radio communication system, synchronization.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что достижение максимальной эффективности функционирования системы радиосвязи требует, в числе прочих, обеспечения синхронизации [1-2]. В когерентной системе радиосвязи задача достижения синхронизма по фазе несущей частоты является одной из важнейших, поскольку решение этой задачи обеспечивает, соответственно, минимум вероятности ошибок. Однако, несмотря на детальную и глубокую проработку вопросов синхронизации в фундаментальных работах, задачам анализа и синтеза систем синхронизации, моделям и алгоритмам их поведения посвящено немало современных исследований [3-7], что свидетельствует об актуальности данной задачи.

2. ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ФАПЧ

Как известно, процедура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) является неотъемлемой частью всех устройств фазовой синхронизации для систем с формированием опорного сигнала [2]. Как правило, типовые системы ФАПЧ строятся в виде замкнутого контура управления с обратной связью (рис. 1). Принципы функционирования системы ФАПЧ заключаются в следующих действиях.

С выхода преобразователя частоты сигнал поступает на вход фазового дискриминатора, на выходе которого формируется сигнал, зависящий от ошибки

установки частоты управляемого гетеродина и используемый для ее коррекции. Как правило, сигнал непосредственно с выхода дискриминатора должен быть дополнительно обработан и преобразован до подачи на вход гетеродина. Используемый для этого формирователь управляющего воздействия – один из главных блоков системы – может представлять собой достаточно сложное устройство, в общем случае содержащее усилители, фильтры и нелинейные элементы. Собственно, эффективность работы всей системы ФАПЧ в значительной степени определяется именно этим блоком.

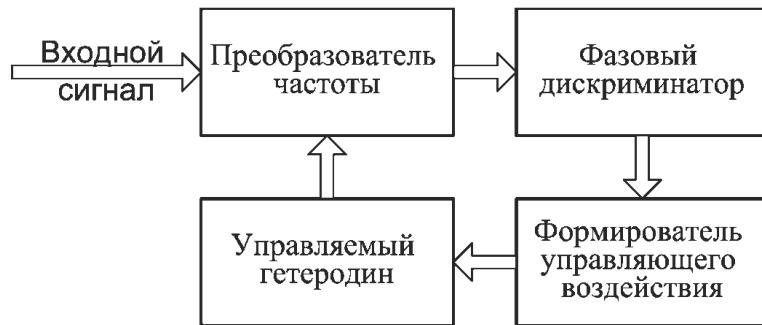


Рис. 1. Упрощенная структурная схема системы ФАПЧ

Первоочередные задачи формирователя управляющего воздействия заключаются в

- обеспечении устойчивости всей системы как схемы с обратной связью; при неудачном сочетании параметров в системе могут возникать колебательные процессы, приводящие к срыву радиосвязи;
- оптимизации работы ФАПЧ по скорости и точности слежения в соответствии с особенностями конкретной системы радиосвязи.

Далее описаны особенности реализованной системы ФАПЧ в составе когерентной цифровой системы радиосвязи.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ БЛОКОВ СИСТЕМЫ ФАПЧ

Очевидно, что цифровая система ФАПЧ обладает «интеллектуальным превосходством» по сравнению с аналоговыми схемными решениями, что обусловлено особенностями структурных блоков, реализованных на программируемых устройствах. Существенные отличия заключаются в возможностях целевых функций блоков, основанных на многоядерных DSP-процессорах с управляющим RISC-контроллером.

Общие принципы функционирования и структурная схема цифровой системы ФАПЧ, реализованной на основе сочетания классической теории управления и технологий экспертных систем и нечеткой логики, подробно описаны в работе [7]. Главные блоки системы организованы и функционируют следующим образом.

Фазовый дискриминатор реализован в виде буфера, содержащего набор последовательных результатов прямого измерения фазы сигнала. При наполнении буфера вычисляется итоговая высокоточная оценка ошибки частоты гетеродина, после чего процесс накопления начинается заново.

Формирователь управляющего воздействия реализует всю логику работы ФАПЧ. Если оценка ошибки частоты гетеродина превышает заданный порог, управляемый цифровой гетеродин перенастраивается на требуемую частоту. Таким образом, ошибка установки частоты гетеродина в большинстве сеансов связи устраняется единовременно и практически полностью.

На практике необходимость повторных коррекций частоты гетеродина возникает крайне редко и обусловлена, как правило, существенным уходом несущей частоты из-за эффекта Доплера. Это означает, что система ФАПЧ фактически является разомкнутой, что, как известно, исключает проблемы ее устойчивости. В описываемой системе оценка остаточной погрешности частоты, не превышающая установленный порог, поступает непосредственно в решающее устройство приемной системы и учитывается при определении информации.

Таким образом, в цифровой системе ФАПЧ нет необходимости полного устранения погрешности установки частоты, в чем и заключается ее главное отличие от аналоговых систем. Для оптимальной работы достаточно знания значения этой погрешности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное отличие предлагаемого подхода заключается в том, что не производится непрерывной подстройки генератора опорных сигналов на этапах обнаружения и приема. Необходимая компенсация рассогласования параметров фазы принимаемого и опорного сигналов учитывается программным образом, что позволяет скомпенсировать нарушения и ошибки управления синхронизацией.

Предложенный способ используется в серийно выпускаемом радиоприемном устройстве, что подтверждает эффективность и жизнеспособность цифровой системы ФАПЧ, и в итоге повышает эффективность и отказоустойчивость когерентной системы радиосвязи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемов М. Л., Борисов В. И., Маковий В. А., Сличенко М. П. Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения. Монография / Под ред. М.Л. Артемова // М.: Радиотехника, 2021. – 556 с.
2. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи: основы теории и принципы реализации. М.: Наука, 2009. – 358 с.
3. Цимбал В. А., Мокринский Д. В., Парфентьев А. А. Варианты реализации схем частотно-фазовой синхронизации в условиях многолучевого распространения сигнала // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции (г. Воронеж) в 6 т. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019, Т. 2. – С. 212-218.
4. Асосков А. Н., Малышев И. И., Мордовин А. И. Статистические характеристики помехоустойчивой синхронизации в системах телекоммуникаций с широкополосными сигналами // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции (г. Воронеж) в 6 т. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019, Т. 2. – С. 423-431.
5. Леньшин А. В., Матуразов М. В., Матуразова Т. В., Шаталов Е. В. Методика проектирования астатической по фазе системы фазовой автоподстройки для цифровых синтезаторов частот // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXV

- Международной научно-технической конференции (г. Воронеж) в 6 т. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019, Т. 5. – С. 347-356.
6. Парфентьев А. А. Математическая модель подсистемы синхронизации сети декаметровой радиосвязи // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции (г. Воронеж) в 6 т. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020, Т. 1. – С. 187-192.
 7. Малышева И. Н., Козирацкий Ю. Л., Панов С. А., Плахотнюк Ю. А. О реализации системы автоматического управления для радиоприемной системы на основе совместного использования методов экспертных систем и нечеткой логики // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIII научно-технической конференции (г. Воронеж), 2017, Т.1. – С.63–68.

REFERENCES

1. Artemov M. L., Borisov V. I., Makovij V. A., Slichenko M. P. The automated management systems, radio communications and radio-electronic struggle. Bases of the theory and creation principles. The monography / ed. M. L. Artemov // M.: Radio engineering, 2021. – 556 p.
2. Borisov V. I. Noise immunity of radiocommunication systems: bases of the theory and implementation principles. M.: Science, 2009. – 358 p.
3. Tsimbal V. A., Mokrinsky D. V., Parfentiev A. A. Options for the implementation of frequency-phase synchronization schemes in the conditions of multipath propagation of a signal // Proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference «Radiolocation, Navigation, Communication» (Voronezh), 2020, V. 2 – pp. 212-218.
4. Asoskov A. N., Malyshev I. I., Mordovin A. I. Statistical characteristics of noise-resistant synchronization in telecommunication systems with broadband signals // Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference «Radiolocation, Navigation, Communication» (Voronezh), 2019, V. 2 – pp. 423-431.
5. Lenshin A. V., Maturazov M. V., Maturazova T. V., Shatalov E. V. Method of designing an astatic phase system phase locked loop for digital frequency synthesizers // Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference «Radiolocation, Navigation, Communication» (Voronezh), 2019, V. 5 – pp. 347-356.
6. Parfentev A. A. Mathematical model of the decameter radio network synchronization subsystem // Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference «Radiolocation, Navigation, Communication» (Voronezh), 2020, V. 1 – pp. 187-192.
7. Malysheva I. N., Koziratsky Y. L., Panov S. A., Plahotnuk Y. A. About realization of system of automatic control for radio reception system with application of methods expert systems and fuzzy logic // Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Conference «Radiolocation, Navigation, Communication» (Voronezh), 2017, V. 1 – pp. 63-68.

ВЕРБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАЩИТЫ FTP-СЕРВЕРА ОТ СЕТЕВОЙ РАЗВЕДКИ

Т. В. Лебедкина¹

¹Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко, Краснодар, Россия

Аннотация. Защита серверов информационных систем файлового обмена специального назначения от деструктивных воздействий является важной задачей обеспечения информационной безопасности. Система информационного взаимодействия в любых условиях обстановки должна организовывать своевременный, достоверный и безопасный обмен данными. В статье приведена вербальная модель процесса проактивной защиты FTP-сервера от сетевой разведки.

Ключевые слова: информационная система, FTP-сервер, сетевая разведка, проактивная защита.

VERBAL MODEL OF THE PROCESS OF PROTECTING THE FTP SERVER FROM NETWORK RECONNAISSANCE

T.V. Lebedkina¹

¹Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russia

Abstract. Protecting servers of special-purpose file exchange information systems from destructive influences is an important task of ensuring information security. The system of information interaction in any conditions of the situation should organize a timely, reliable and safe exchange of data. The article provides a verbal model of the process of proactively protecting an FTP server from network reconnaissance.

Keywords: information system, FTP-server, network reconnaissance, proactive defense.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большие обороты набирает борьба между злоумышленниками, осуществляющими кибератаки на объекты информационной инфраструктуры и службами безопасности, отражающими эти атаки с обоюдным применением каждой из сторон самых современных технологий атаки и защиты, позволяющих избежать традиционные, ранее известные подходы. Каждая из противоборствующих сторон стремится использовать сложные методы обмана «следующего поколения», направленные как на скрытие злонамеренного поведения и маскирование его под штатную деятельность или поведение, не относящееся к явно вредоносному со стороны злоумышленника

Одним из перспективных направлений противодействия средствам сетевой разведки является применение сетевых «ловушек», активно воздействующих на средства сетевой разведки, замедляющих работу и истощающих вычислительный ресурс средств разведки (так называемые «проактивные» средства защиты информационных систем) [1-6].

С целью выбора оптимальных параметров функционирования средств проактивной защиты ИС ФО специального назначения существует необходимость разработки вербальной модели процесса защиты FTP-сервера от сетевой разведки.

2. РАЗРАБОТКА ВЕРБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЗАЩИТЫ FTP-СЕРВЕРА

Модель может быть использована в информационных системах файлового обмена, функционирующих на основе стека сетевых протоколов TCP/IP, с целью снижения результативности сетевой разведки. Основные услуги по пересылке файлов в ИС ФО обеспечиваются протоколом FTP (File Transfer Protocol), определенным стандартом Совета по архитектуре Internet RFC 959 в защищенном варианте. Простейшая схема работы протокола FTP представлена на рисунке 1.

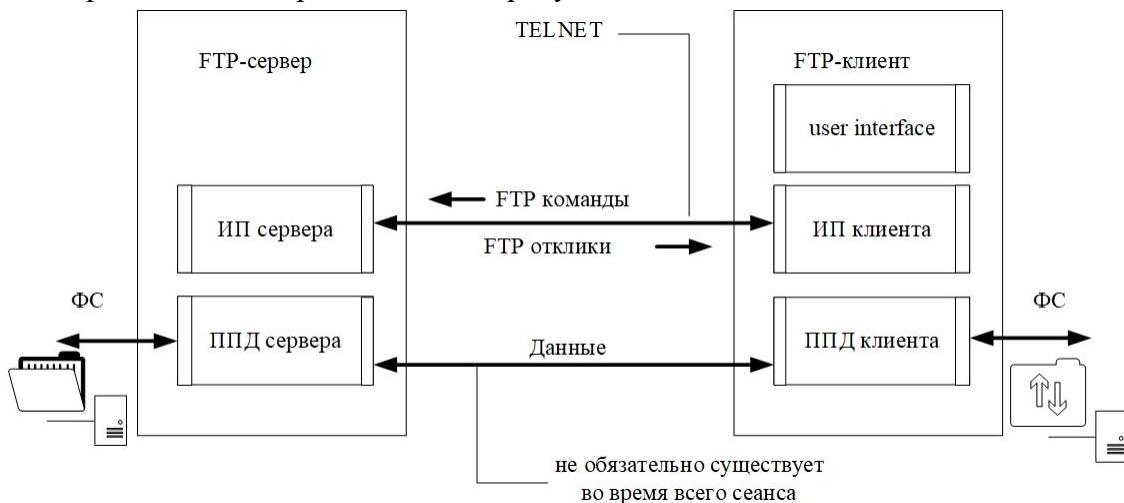


Рис. 1. Простейшая схема работы протокола FTP

Основу передачи данных FTP составляет механизм установления соединения между соответствующими портами и выбора параметров передачи.

Сервер FTP использует в качестве управляющего, соединение на TCP порт 21, который всегда находится в состоянии ожидания соединения со стороны пользователя FTP. Устанавливается управляющее соединение, клиент отправляет на сервер команды. FTP команды определяют параметры соединения передачи данных: роль участников соединения (активный или пассивный), порт соединения, тип передачи, тип передаваемых данных, структуру данных и управляющие директивы, обозначающие действия, которые клиент хочет совершить (например, сохранить, считать, добавить или удалить данные). После согласования параметров канала передачи данных, клиент становится в режим ожидания открытия соединения на заданный для передачи данных порт. Сервер открывает соединение и начинает передачу данных. После окончания передачи данных, соединение передачи данных закрывается, управляющее соединение остается открытым. Клиент, не закрывая сессии FTP, может еще раз открыть канал передачи данных. Протокол FTP требует, чтобы управляющее соединение было открыто, пока по каналу обмена данными идет передача. Сессия FTP считается закрытой только после закрытия управляющего соединения.

Наиболее существенным недостатком протокола является передача всей информации, а также имен и паролей пользователей, в открытом виде. Это обуславливает невозможность использования данного протокола для передачи конфиденциальной информации без использования сторонних программных и аппаратных средств.

Разработанная модель описывает процесс защиты ИС ФО специального назначения от сетевой разведки за счет применения методов проактивной защиты, имитирующих канал связи с плохим качеством. Имитация осуществляется с использованием различных механизмов замедления сетевого соединения между злоумышленником и FTP-сервером в ходе установления соединения и передачи данных. К примеру, одним из механизмов замедления файлового обмена является использование специального формата откликов сервера в ходе сеанса связи. В соответствии со спецификацией протокола FTP-сесанс связи между сервером и клиентом осуществляется в текстовом режиме с использованием следующих основных команд: USER, PASS, PORT [7]. Сервер отвечает на команды клиента откликами с особым форматом командных строк, где первые три цифры представляют собой код отклика, а следующая часть строки состоит из осмысленного текста (комментария). Если между кодом и текстом отклика установлен пробел, то сервер закончил свой ответ, если дефис, то клиент должен ожидать от сервера дополнительные командные строки, то есть сервер возвращает многострочный отклик. На рисунке 2 представлен пример FTP-сессии, где строки с 8 по 19 являются многострочным откликом.

```
Файл Командная строка - ftp ftp.altap.cz
(c) Корпорация Майкрософт (Microsoft Corporation). Все права защищены.

C:\Users\alina>ftp ftp.altap.cz
Связь с www.altap.cz.
220 FTP server ready.
200 UTF8 set to on
Пользователь (www.altap.cz:(none)): anonymous
331 Anonymous login ok, send your complete email address as your password
Пароль:
230-
230- Welcome from 128.70.105.224!
230- This is ftp.altap.cz FTP server.
230-
230- Current server time is Thu Aug 12 14:47:01 2021.
230- The number of current users is 2 (from max. 100).
230- If you have any unusual problems, please report them
230- via e-mail to ftp@altap.cz.
230-
230- Your session is logged, if you do not like this policy, disconnect now.
230-
230 Anonymous access granted, restrictions apply
ftp> ls
```

Рис. 2. Пример FTP-сессии

На рисунке 3 представлена обобщенная блок-схема, включающая действия злоумышленника и противодействие им со стороны средств проактивной защиты FTP-сервера, составляющая основу вербальной модели защиты FTP-сервера от сетевой разведки.



Рис. 3. Обобщенная блок-схема, включающая действия злоумышленника и противодействие им со стороны средств проактивной защиты FTP-сервера

На начальном этапе (блок 1) идет формирование исходных данных: модуля хранения, модуля обнаружения и анализа, модуля проактивной защиты. Далее (блок 2) идет установление сетевого соединения клиентов с сервером. Затем (блоки 3-5) происходит направление команды с идентификаторами клиента и сравнение с опорными идентификаторами санкционированных клиентов. После этого если клиент несанкционированный (блок 6) формируются ответные отклики клиенту с ложным сообщением о временной ошибке, с определенным временем задержки. В ином случае клиенту предоставляется (блок 7) доступ к информационным ресурсам FTP-сервера.

Верbalная модель описывающая процесс защиты FTP-сервера, позволяет повысить результативность защиты, за счет снижения возможностей по подбору имен и паролей несанкционированным клиентом для авторизации на FTP-сервере ИС ФО, что достигается имитацией канала связи с плохим качеством, обеспечивающим значительное увеличение времени для проведения атак с подбором пароля, за счет направления злоумышленнику, не прошедшему успешную авторизацию, фрагментированного ответного отклика с ложным сообщением о временной ошибке, фрагменты которого направляются через малые интервалы времени задержки, после множества промежуточных откликов.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная вербальная модель позволяет перейти к разработке математической модели функционирования FTP-сервера в условиях воздействия

средств сетевой разведки с целью формирования требований к техническим характеристикам средств проактивной защиты и определения оптимальных режимов их функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколовский С.П., Орехов Д.Н. Концептуализация проблемы проактивной защиты интегрированных информационных систем // Научные чтения имени профессора Н. Е. Жуковского: сб. научн. стат. VIII Междунар. науч. метод. конф. – Краснодар. 2018. С. 47–52.
2. Максимов Р. В., Соколовский С.П., Орехов Д.Н. Особенности детектирования и способы маскирования демаскирующих признаков средств проактивной защиты вычислительных сетей // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. Том 2. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018. С. 169-179.
3. Соколовский С. П., Гаврилов А.Л., Орехов Д.Н. Способы снижения информативности демаскирующих признаков средств проактивной защиты вычислительных сетей // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2018. № 3. С. 211-220.
4. Соколовский С. П., Ворончихин И.С. Обоснование задач динамического конфигурирования информационных систем для обеспечения их безопасности // Радиоэлектронная борьба в современном мире: сб. тр. участников I Всерос. научно-методич. конф. "Радиоэлектронная борьба в современном мире". – Воронеж, 2019. – С. 300-304.
5. Шерстобитов Р.С., Шарифуллин С.Р., Максимов Р.В. Маскирование интегрированных сетей связи ведомственного назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 136–175
6. Maksimov R.V., Sokolovsky S.P., Voronchikhin I.S. Algorithm and technical solutions for dynamic configuration of client-server computer networks // Proceedings of SPIIRAS. 2020.Vol. 19.No. 5.P. 1018-1049.Горбачев А. А., Соколовский С. П., Усатиков С. В. Модель функционирования и алгоритм проактивной защиты сервиса электронной почты от сетевой разведки // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 60-109.
7. RFC 959. File Transfer Protocol (FTP). 1985. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc959> (дата обращения: 04.08.2021).

REFERENCES

1. Sokolovsky S.P., Orehov D.N. Conceptualization of the problem of proactive protection of integrated information systems // Scientific readings named after Professor N. Ye. Zhukovsky: collection of articles. scientific. stat. VIII Int. scientific. method. conf. - Krasnodar., 2018, p. 47–52.
2. Maksimov R.V., Sokolovsky S.P., Orehov D.N. Features of detection and methods of masking unmasking features of proactive protection of computer networks // Radar location, navigation, communication: Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference. Volume 2. - Voronezh: Wellborn LLC, 2018, p. 169-179.
3. Sokolovsky S. P., Gavrilov A. L., Orehov D. N. Ways to reduce the information content of unmasking features of proactive protection means for computer networks // Scientific works of the Kuban State Technological University. 2018, No. 3, p. 211-220.
4. Sokolovsky S. P., Voronchikhin I. S. Substantiation of the tasks of dynamic configuration of information systems to ensure their safety // Electronic warfare in the modern world: collection of articles. tr. participants of the I All-Russia. scientific and methodical. conf. "Electronic warfare in the modern world". - Voronezh, 2019, p. 300-304.
5. Sherstobitov R.S., Sharifullin S.R., Maksimov R.V. Masking of integrated communication networks for departmental purposes // Control systems, communications and security. 2018, No. 4, p. 136–175.
6. Maksimov R.V., Sokolovsky S.P., Voronchikhin I.S. Algorithm and technical solutions for dynamic configuration of client-server computer networks // Proceedings of SPIIRAS, 2020, Vol. 19, No. 5, p. 1018-1049.
7. RFC 959. File Transfer Protocol (FTP). 1985. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc959> (date of access: 04.08.2021).

ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ С НЕОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ ДЛЯ ВОЕННЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ

А. В. Леншин, А. Д. Музыченко

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Аннотация. Проанализированы современные беспроводные технологии в военных системах радиосвязи. Рассмотрены особенности спектрально эффективных сигналов с ортогональным и неортогональным частотным уплотнением. Приведены схемы формирователей SEFDM-сигналов с применением обратного быстрого преобразования Фурье.

Ключевые слова: система радиосвязи, спектрально эффективные сигналы, частотное уплотнение, обратное быстрое преобразование Фурье.

SIGNAL GENERATION CAPABILITIES WITH NON-ORTHOGONAL FREQUENCY COMPACTION FOR MILITARY RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

A. V. Lenshin, A. D. Muzyichenko

Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

Abstract. Modern wireless technologies in military radio communication systems are analyzed. The features of spectrally effective signals with orthogonal and non-orthogonal frequency densification are considered. Schemes of SEFDM signal generators using the inverse fast Fourier transform are presented.

Keywords: radio communication system, spectrally efficient signals, frequency compaction, inverse fast Fourier transform.

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы и тактику военных операций на полях сражений и обеспечение жизнедеятельности войск в мирное время коренным образом изменили современные мобильные технологии. Надежная радиосвязь с возможностью передачи оцифрованной речи, цифровых данных, видео, координат и другой информации между подразделениями, самолетами и вертолетами, робототехническими комплексами является одним из ключевых факторов успеха военных операций и эффективности вооруженных сил в целом. Новые виды высокоскоростных ДКМВ модемов для современных авиационных широкополосных модулей связи предлагается строить на базе современного стандарта MIL-STD-188-110D (скорости передачи до 240 кбит/с), котором содержатся требования к модуляторам-демодуляторам (модемам) систем дальней связи и систем тактической связи. Применяется квадратурная амплитудная модуляция QAM-32, QAM-64, QAM-256, модуляция с помощью ортогональных функций Уолша [1]. Используется также многопозиционная фазовая модуляция (BPSK, QPSK, 8PSK). АО «НПП «Полет» ведет работы по созданию новых модулей связи в ДКМВ диапазоне на базе современных сигнально-кодовых конструкций (СКК).

В качестве наиболее подходящих для военного использования коммерческих технологий рассматривается применяемый в мире стандарт мобильной связи LTE и внедряемый в настоящее время стандарт 5G [2]. Среди возможностей мобильных технологий 5G в военной связи следует отметить обеспечение: 1) повседневной жизнедеятельности воинских частей, военных городков и учреждений в мирное время; 2) деятельности военных объектов в периоды осуществления военных операций; 3) процесса обучения военнослужащих и поддержание постоянной боеготовности подразделений [3]. Востребованность мобильной связи в различных сферах деятельности требует дальнейшего развития беспроводных технологий, а загруженность частотного диапазона требует освоения новых высокочастотных радиодиапазонов [4].

На будущий облик сетей 5G и их потребности в радиочастотном спектре будут оказывать влияние следующие факторы [5]: 1) прогнозы объема потребления трафика различными пользователями при оказании услуг мобильного беспроводного доступа; 2) изменение парадигмы развития мобильной связи в направлении сетей M2M; 3) достижение предела спектральной эффективности технологиями мобильной связи 3G/4G; 4) технические требования к сетям 5G, представленные в разработках европейских проектов METIS и 5GIS, а также проекта IMT-2020 [6, 7].

Ключевыми сервисами сетей 5G станут: 1) URLLC (Ultra-Reliable Low latency Communication) – ультранадежная связь с малыми задержками (менее 0,5 мс); 2) mMTC (massive Machine Type Communication) – возможность обслуживания до 1 млн устройств на квадратный километр; 3) eMBB (enhanced Mobile Broadband) – высокоскоростной широкополосный доступ в Интернет, скорость передачи данных до 20 Гбит/с [8].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы разделения каналов связи определяют, каким образом выделенный для сети связи общий частотный ресурс используется для одновременной реализации нескольких сеансов связи. Основными методами разделения общего частотного ресурса на отдельные радиоканалы являются [9]:

1. FDMA (Frequency Division Multiple Access) – метод частотного разделения каналов). Каждому каналу выделяется определенный частотный ресурс.
2. TDMA (Time Division Multiple Access) – метод временного разделения каналов. Каждому каналу выделяется определенный временной ресурс.
3. CDMA (Code Division Multiple Access) – метод кодового разделения каналов. Каждому каналу выделяется сигнал из ансамбля ортогональных или квазиортогональных последовательностей.
4. OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) – ортогональное частотное разделение каналов. Каждому каналу выделяется участок частотно-временного ресурса в виде набора ортогональных поднесущих и временного слота с использованием OFDM-модуляции.
5. SDMA (Space Division Multiple Access) – пространственное разделение каналов. Формируется многолучевая диаграмма направленности и каждый луч направлен в сторону абонента с помощью аддитивной фазированной антенной решетки (АФАР).

6. PDMA (Polarization Division Multiple Access) – поляризационное разделение каналов. Для разделения сигналов используется ортогональная поляризация, что позволяет использовать один частотно-временной ресурс.

7. WDM (Wavelength Division Multiplexing) – разделение каналов по длине волн. Аналог FDMA, но выполняемое в оптической среде передачи.

В системах мобильной связи до настоящего момента использовались первые четыре метода. В рамках проекта METIS предложены СКК для сетей 5G [5]:

1. Cyclic Prefix OFDM (CP-OFDM) – сигнал OFDM с циклическим префиксом.

2. Universal Filtered OFDM (UF-OFDM) – универсальный сигнал OFDM с фильтрацией внеполосных излучений.

3. Filter Bank Multicarrier (FBMC) – гребенчатый фильтрованный многочастотный сигнал.

Одной из альтернатив OFDM технологий в стандартах связи следующих поколений является метод неортогонального частотного уплотнения SEFDM (Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing). SEFDM-сигналы формируются из ортогональных сигналов путем уменьшения разноса между поднесущими частотами в $1/\alpha$ раз (α – коэффициент частотного уплотнения поднесущих частот), тем самым повышая спектральную эффективность [10, 11].

Для достижения скоростей передачи данных больше 20 Гбит/с в радиоинтерфейсе 5G RAN потребуется значительное расширение спектров сигналов за счет применения неортогонального множественного доступа NOMA и четырехкратного увеличения спектральной эффективности в 5G RAN до 5...10 бит/с/Гц. В качестве перспективных СКК для радиоинтерфейса 5G RAN ведущими мировыми вендорами – Huawei, Samsung, ALU рассматриваются также SCMA, FBMC и UFMC. Компания «Huawei» предлагает применять сигналы SCMA (Sparse Code Multiple Access) многостанционного доступа на основе разреженных кодов. Компания «Samsung» и проект METIS (компания «Ericsson») предлагают использовать сигналы FBMC (Filter Bank Multicarrier) – гребенчато-фильтруемые многочастотные сигналы на основе гибридной модуляции FSK и QAM, а компания ALU (Bell Labs) предлагает использовать сигналы UFMC – универсальные фильтруемые многочастотные сигналы [5].

Целью данной статьи является анализ способов формирования спектрально эффективных SEFDM-сигналов на основе обратного дискретного преобразования Фурье.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сигнал с неортогональным частотным уплотнением (SEFDM-сигнал) аналитически можно представить в виде

$$s_{\text{SEFDM}}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k(t) \exp(j2\pi\Delta f k t), \quad (1)$$

где N – количество поднесущих частот; Δf – разнесение соседних поднесущих частот; $C_k(t)$ – комплексная функция, показывающая комплексные модуляционные

символы и огибающую k -ой поднесущей во времени, $C_k(t) = \text{const}(t) = C_N^{(n)}(k)$, при $t \in [(n-1)T_S; nT_S]$, $n \in N$; $C_N^{(n)}(k)$ – манипуляционный символ, соответствующий n -ому символу сигнала с частотным мультиплексированием (FDM); $T_S = 1/\Delta f$ – длительность FDM-символа [12].

Важной характеристикой SEFDM-сигналов является коэффициент частотного уплотнения поднесущих частот $\alpha = \Delta f / \Delta f_{\text{ORT}}$ (Δf_{ORT} – разнесение между поднесущими частотами, обеспечивающее их ортогональность [13]). Для сигналов с OFDM $\alpha = 1$, для рассматриваемых сигналов с SEFDM $\alpha < 1$. Для уменьшения влияния наложения спектров соседних по частоте сигналов используются защитные интервалы (ЗИ) по частоте

$$C_k = 0 \text{ при } k \in [0; N_{\text{ЗИ_left}} - 1] \text{ и } k \in [N - N_{\text{ЗИ_right}}; N - 1], \quad (2)$$

где $N_{\text{ЗИ_left}}$ – количество неиспользуемых поднесущих «слева» в области отрицательных частот; $N_{\text{ЗИ_right}}$ – количество неиспользуемых поднесущих «справа» в области положительных частот.

Если ввести частоту дискретизации F_{Δ} , определяемую как $F_{\Delta} = 1/\Delta t = N\Delta f$, можно получить равенства $\Delta t\Delta f = 1/N$ и $T_S/\Delta t = N\alpha = L$. Количество отсчетов в SEFDM-сигналах уменьшается в $1/\alpha$ раз по сравнению с OFDM-сигналами.

Представление SEFDM-сигнала в частотной области (спектр SEFDM-сигнала) можно определить с помощью следующего выражения

$$S_{\text{SEFDM}}(f) = F[s_{\text{SEFDM}}(t)] = \sum_{k=0}^{N-1} C_N^{(n)}(k) F[\exp(j2\pi\Delta f kt)], \quad (3)$$

где $F[s_{\text{SEFDM}}(t)]$ – обозначение операции преобразования Фурье.

Администрация связи России и Регионального содружества в области связи (РСС) включает в будущие полосы развития сетей 5G следующие полосы частот: 25,5...27,5 ГГц, 31,8...33,4 ГГц, 39,5...40,5 ГГц, 40,5...41,5 ГГц, 45,5...47,5 ГГц, 48,5...50,2 ГГц, 50,4...52,6 ГГц, 66...71 ГГц, 71...76 ГГц, 81...86 ГГц. Администрация связи стран СЕРТ включает в будущие полосы развития сетей 5G следующие полосы частот: 31,8...33,4 ГГц, 40,5...43,5 ГГц, 45,5...48,9 ГГц, 71...76 ГГц, 81...86 ГГц [5].

Основными достоинствами технологии SEFDM по сравнению с традиционной передачей информации на одной несущей можно отнести следующие:

- а) высокая спектральная эффективность;
- б) устойчивость к узкополосным помехам;
- в) устойчивость к замираниям, обусловленным многолучевостью распространения;
- г) адаптация к неблагоприятным условиям канала без использования сложных эквалайзеров;
- д) низкая вычислительная сложность, связанная с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ);

- е) низкая чувствительность к ошибкам временной синхронизации;
ж) не требуются настраиваемые фильтры на поднесущих, которые необходимы в традиционной системе с частотным разделением каналов [14].

Среди основных недостатков технологии SEFDM выделяют:

- 1) чувствительность к доплеровскому сдвигу по частоте, к доплеровскому расширению спектра, к ошибкам частотной синхронизации;
- 2) высокий пик-фактор, необходимость линейной характеристики усилителя;
- 3) межсимвольная интерференция;
- 4) снижение спектральной эффективности из-за использования защитного интервала [14].

Процедура формирования SEFDM-сигналов (рисунок 1) отличается от алгоритма формирования OFDM-сигналов тем, что после выполнения обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) отбрасываются несколько отсчетов сигнала [12, 14].

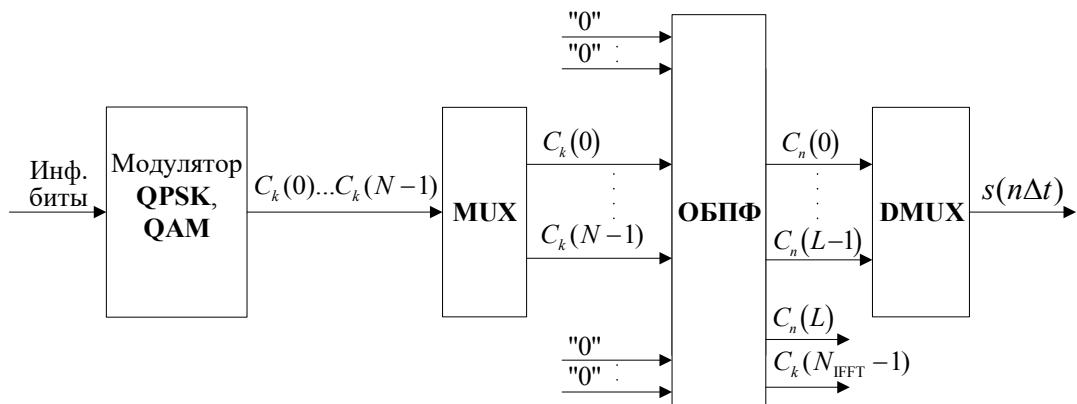


Рис. 1. Схема формирователя SEFDM-сигналов с применением ОБПФ размерности N

Информационные биты подвергаются квадратурной фазовой манипуляции (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying) или квадратурной амплитудной модуляции QAM-64 (QAM – Quadrature Amplitude Modulation), образуя модуляционные символы (отсчеты). Высокочастотный QPSK-сигнал можно записать в виде

$$s_{\text{QPSK}}(t) = q(t) \cos \left[\omega_0 t + a_k \frac{\pi}{4} \right], \quad (4)$$

где $\mathbf{a} = \{-3, -1, 1, 3\}$ – множество нормированных амплитуд импульсов цифрового модулирующего сигнала, соответствующих множеству абсолютных значений фазы модулированного сигнала $\Theta = \{\pm \pi/4, \pm 3\pi/4\}$.

Комплексная огибающая и модулированный ВЧ QAM-сигнал на k -ом символьном интервале можно представить в виде

$$g(t) = a_k q(t) \exp(j\theta_k) = q(t)(I_k + jQ_k), \quad (5)$$

$$s_{\text{QAM}}(t) = a_k q(t) \cos(\omega_0 t + \theta_k) = q(t)[I_k \cos(\omega_0 t) - Q_k \sin(\omega_0 t)], \quad (6)$$

где a_k , θ_k – нормированная амплитуда и фаза комплексной огибающей; I_k , Q_k – квадратурные компоненты комплексной огибающей; $q(t)$ – форма комплексной огибающей после ограничения спектра.

При накоплении требуемого количества отсчетов (N_{ifft}) происходит их мультиплексирование (преобразование последовательного потока отсчетов в N_{ifft} параллельных потоков). Далее к этому параллельному потоку отсчетов «справа» и «слева» добавляются нулевые отсчеты, представляющие собой ЗИ в частотной области. Полученный массив отсчетов подвергается ОБПФ, затем происходит отбрасывание крайних ($N_{\text{ifft}} - L$) отсчетов. Отбрасывание таким образом отсчетов не приводит к уменьшению количества поднесущих в спектре сигнала, а приводит к уменьшению ширины спектра. Оставшийся массив преобразуется в последовательность данных с помощью демультиплексора (DMUX). Формирователь SEFDM-сигнала выполняет функцию преобразования модуляционных символов на его выходе в символы SEFDM-сигнала.

На рисунке 2 представлены модели OFDM- и SEFDM-сигналов (во временной и частотной областях), разработанные в среде MATLAB [15] на основе формирователя сигналов (рисунок 1) при $N_{\text{ifft}} = 2048$, $\alpha = 3/4$, тип модуляции – QAM-64. Недостаток данного способа формирования SEFDM-сигнала (рис. 1) – необходимость выполнения

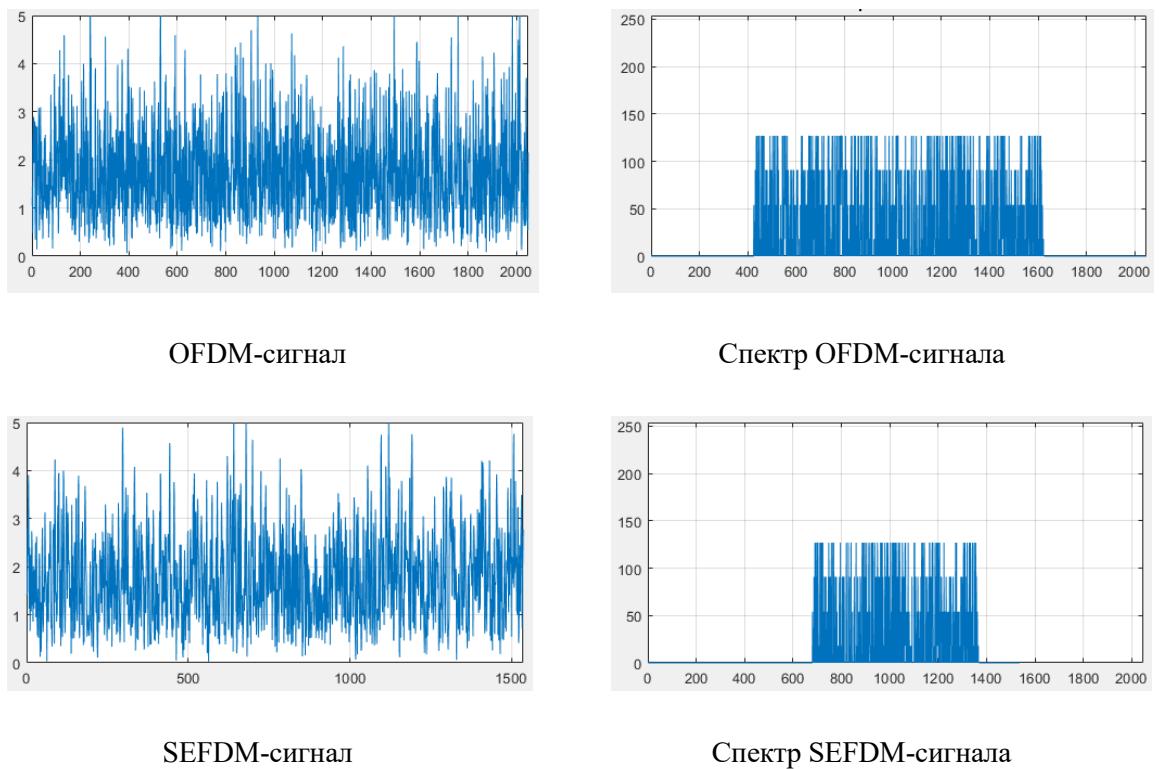


Рис. 2. Модели OFDM- и SEFDM-сигналов во временной и частотной областях

N -размерного ОБПФ, при этом количество передаваемых отсчетов SEFDM-символа равно $L < N$. Сигнал $s_{\text{SEFDM}}(t)$ будет представлен упорядоченным набором своих отсчетов $s_{\text{SEFDM},N}^{(n)}(i) = s_L^{(n)}(i)$, где индекс L обращает внимание, что общее количество отсчетов, используемых для передачи непрерывного сигнала $s_{\text{SEFDM}}(t)$, составляет L [10].

Обозначив соответствующие спектральные отсчеты как $S_L^{(n)}(l)$, переход к преобразованиям размерности L осуществляется с помощью формул (8), (9) и (10), определяющих различные формы записи дискретного преобразования Фурье для периодического продолжения сигнала $s_L^{(n)}(i)$.

$$S_L^{(n)}(k') = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} D_N^{(n)}(k) \cdot h'_e(k, k'), \quad (8)$$

$$h'_e(k, k') = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \exp \left[j2\pi i \left(\frac{k}{N} - \frac{k'}{L} \right) \right], \quad (9)$$

$$\bar{S}_L^{(n)} = H_{L \times N} \cdot \bar{D}_N^{(n)}, \quad (10)$$

где $\bar{D}_N^{(n)}$ – вектор-столбец, состоящий из элементов $D_N^{(n)}(k)$, $k = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}-1$;

$H_{L \times N}$ – матрица размерности $L \times N$, состоящая из элементов $h'(k, k')$.

Структурная схема формирователя SEFDM-сигналов с применением ОДПФ размерности L представлена на рисунке 3.

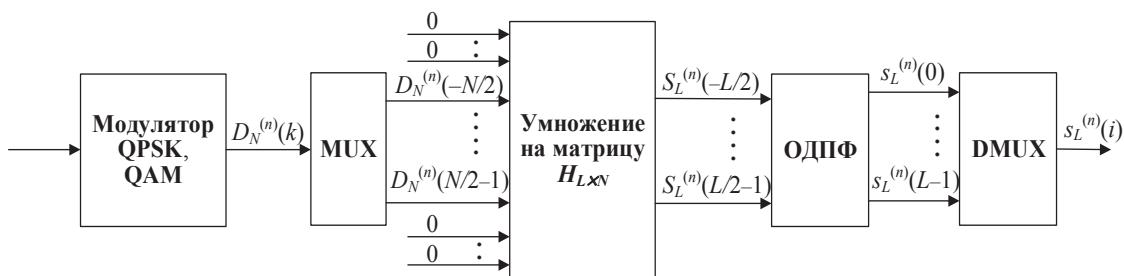


Рис. 3. Схема формирователя SEFDM-сигналов с применением ОДПФ размерности L

На основе MATLAB-модели спроектирован формирователь SEFDM-сигналов в системе автоматизированного проектирования САПР *Quartus Prime*, а также реализован в ПЛИС CycloneV 5CSEBA6U23I7 при помощи отладочной платы DE10-Nano. Семейство **Cyclone V** имеет в своем составе микросхемы, DSP блоки, RAM, а также двухъядерный процессор **ARM Cortex A9** [16].

Разработанный проект формирователя SEFDM-сигналов в САПР *Quartus Prime* [17] представлен на рисунке 4.

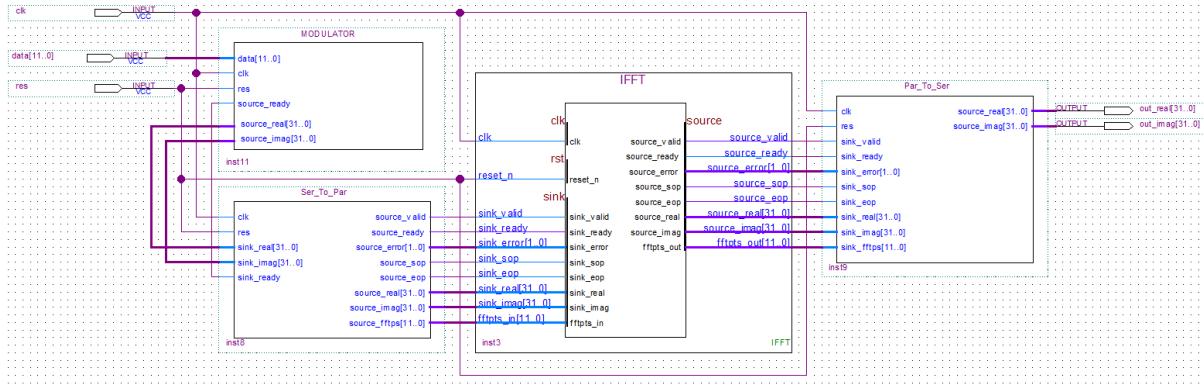


Рис. 4. Формирователь SEFDM-сигналов в САПР *Quartus Prime*

На вход модулятора *data* [11..0] (блок *modulator*) поступают данные, которые подвергаются кодированию посредством модуляции. С выходов модулятора *source_real* [31..0] и *source_imag* [31..0] закодированные данные поступают на входы *sink_real* [31..0] и *sink_imag* [31..0] последовательно-параллельного преобразователя (блок *Ser_To_Par*), где к ним добавляются нулевые отсчеты. Данные подвергаются неортогональному частотному мультиплексированию посредством ОБПФ (блок *IFFT*) и параллельно-последовательного преобразователя (блок *Par_To_Ser*), где отбрасывается ($N - L$) отсчетов. Работа всех блоков синхронизирована тактовым импульсом *clk*, а также при помощи сигналов *ready* и *valid*, сигнализирующих о готовности к приему и передачи данных, сигналы *eof* и *sop* символизируют начало и конец пакета. Сигнал *error* указывает на возникновение ошибок, при корректной передаче данных он равен логическому нулю. Сигнал *res* производит мгновенный сброс всех регистров. Ключевую роль в работе формирователя SEFDM-сигналов имеет блок *IFFT*, который сгенерирован при помощи встроенной функции *IP MegaCor FFT*, что позволяет выбрать нужную длину N , разрядность данных, тип вычислений с плавающей или фиксированной точкой, а также оптимизировать проект под ресурсы ПЛИС, обеспечивая максимальную производительность системы [12].

Проведен анализ производительности реализованного формирователя SEFDM-сигналов в САПР *Quartus Prime* при помощи утилиты *TimeQuest Timing Analyzer*. Проведено имитационное моделирование спроектированного формирования SEFDM-сигналов в программе *ModelSim* на языке описания аппаратуры интегральных схем *Verilog* [18]. Временной фрагмент работы блока *IFFT* иллюстрируется рисунком 5.

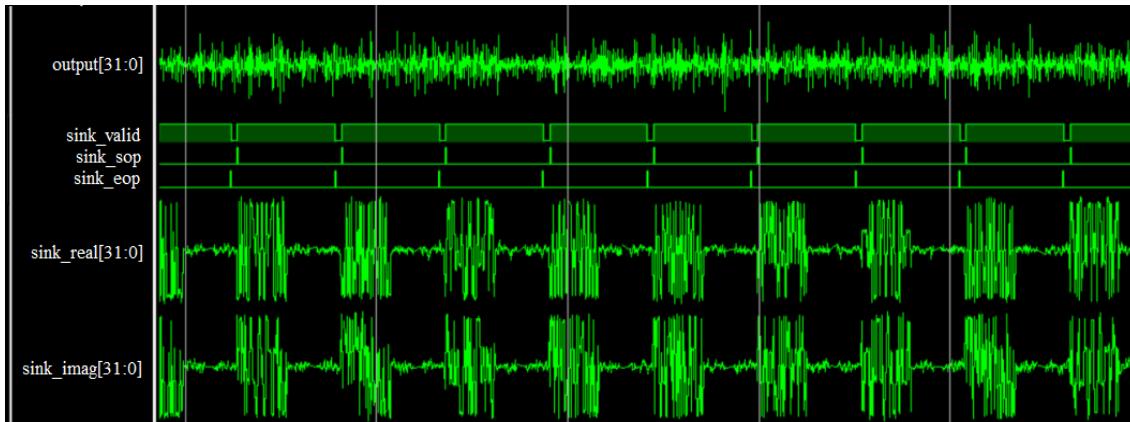


Рис. 5. Временной фрагмент работы блока IFFT

В работе [12] показано, что точность вычислений формирователя SEFDM-сигналов, реализованного в ПЛИС CycloneV 5CSEBA6U23I7, составляет 98,5 % по сравнению с моделью в среде MATLAB. Поэтому можно сделать вывод, что формирователь SEFDM-сигналов на ПЛИС CycloneV обеспечивает достаточно высокую точность формирования сигналов с неортогональным частотным уплотнением.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

SEFDM-сигнал $s_{\text{SEFDM}}(t)$ может быть сформирован следующими способами.

Информационные биты подвергаются квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) или квадратурной амплитудной модуляции QAM-64, образуя модуляционные символы (отсчеты). После мультиплексирования (преобразование последовательного потока отсчетов в N_{ifft} параллельных потоков) к параллельному потоку отсчетов добавляются ЗИ в частотной области. Массив отсчетов подвергается ОБПФ, затем происходит отбрасывание крайних $(N_{\text{ifft}} - L)$ отсчетов. Оставшийся массив преобразуется в последовательность данных с помощью DMUX.

В альтернативном варианте формирования для каждого n -го SEFDM-символа вычисляется последовательность спектральных отсчетов $S_L^{(n)}(l)$, $l = \overline{0, L-1}$ посредством вычисления линейной комбинации преобразованных манипуляционных символов $D_N^{(n)}(l)$, $l = \overline{0, N-1}$. Отсчеты $S_L^{(n)}(l)$ поступают на вход блока ОДПФ размерности L , выход с которого и образует отсчеты n -го SEFDM-символа во временной области $s_N^{(n)}(i)$.

Создана имитационная модель для формирования SEFDM-сигналов на основе ОБПФ в среде MATLAB. Спроектирован формирователь SEFDM-сигналов в САПР *Quartus Prime* на высокоуровневом языке описания аппаратуры интегральных схем *Verilog*. Проведено имитационное моделирование спроектированного формирователя SEFDM-сигналов в программе ModelSim, а также осуществлена реализация SEFDM-формирователя на ПЛИС CycloneV 5CSEBA6U23I7.

ЛИТЕРАТУРА

1. MIL-STD-188-110D. Military Standard – Ineroperability and Performance Standards for Data Modems // US Department of Defense Interface Standard. – 29 December 2017. – 270 c.
2. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. – М.: Медиа Паблишер, 2019. – 376 с.
3. Кондаков М.С., Солопов В.В. Возможности мобильных технологий LTE/5G в военной связи // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – № 4. – С. 36–47.
4. Борисов В.И., Малышев И.И., Шестопалов В.И., Голубинский А.Н. О системах связи миллиметрового диапазона // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – № 1. – С. 5–14.
5. Тихвинский В.О., Коваль В.А., Бочечка Г.С., Бабин А.И. Сети IoT/M2M: технологии, архитектура и приложения. – М.: Медиа Паблишер, 2017. – 320 с.
6. Report ICT-317669-METIS/D5/1 Inter mediate description of the spectrum needs and usage principles. 2013.
7. Recommendation ITU-R M.2083 – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.
8. Ворожищев И.В., Бочечка Г.С., Тихвинский В.О. Сравнительный анализ использования технологий UFMC и OFDM в сетях 5G // Электросвязь. – 2017. – № 11. – С. 46–51.
9. Склар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: ИД «Вильямс», 2003. – 1104 с.
10. Раич А.В., Горбунов С.В. Итеративный прием многочастотных сигналов с неортогональным частотным уплотнением в каналах с замираниями // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2019. – Т. 12. – № 4. – С. 58–71.
11. Леньшин А.В., Шаталов Е.В. Помехоустойчивость приема спектрально эффективных сигналов с неортогональным частотным уплотнением // Телекоммуникации. – 2021. – № 7. – С. 18–25.
12. Музыченко А.Д., Гуляев Г.А. Реализация формирователя сигналов с ортогональным и неортогональным частотным уплотнением на ПЛИС Cyclone V // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. науч. статей по материалам докл. VIII Международной научно-практической конференции «АВИАТОР». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2021. – С. 188–193.
13. Дядюнов Н.Г., Сенин А.И. Ортогональные и квазиортогональные сигналы / Под ред. Е.М. Тараканко. – М.: Связь, 1977. – 224 с.
14. Лукин А.В., Леньшин А.В. Архитектура формирователя спектрально эффективных сигналов с частотным мультиплексированием // Актуальные проблемы развития вооружения и военной авиационной техники (вертолетов): сборник материалов I Международной ВНК, посвященной памяти конструкторов вертолетов М.Л. Миля и Н.И. Камова (19–20 ноября 2020 г., г. Сызрань) / Под ред. А.Н. Моисеева. – Киров: Изд-во МЦИТО, 2021. – С. 165–169.
15. Солонина А.И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.
16. СБИС ПЛ семейства Cyclone V. – URL: <http://altera.ru/sbis-pl-cyclone-V.html>.
17. Intel® Quartus® Prime Software. – URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/software/programmable/quartus-prime/download.html>.
18. Поляков А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. – М.: СОЛООН-Пресс, 2016. – 314 с.

REFERENCES

1. MIL-STD-188-110D. Military Standard – Ineroperability and Performance Standards for Data Modems // US Department of Defense Interface Standard. – 29 December 2017. – 270 c.
2. Tikhvin V.O. Terent'ev S.V., Koval V.A. mobile Network 5G: technology, architecture, and services. – M.: Media Publishers, 2019. – 376 p.
3. Kondakov M.S., Solopov V.V. Possibilities of mobile LTE/5G technologies in military communications // Theory and technology of radio communications. – 2020. – No. 4. – P. 36–47.

4. Borisov V.I., Malyshev I.I., Shestopalov V.I., Golubinsky A.N. About communications systems in the millimetre range // Theory and technique of radio communication. – 2020. – No. 1. – P. 5–14.
5. Tikhvinsky V.O., Koval V.A., Bochechka G.S., Babin A.I. IoT/M2M networks: technologies, architecture and applications. – Moscow: Media Publisher, 2017. – 320 p.
6. Report ICT-317669-METIS/D5/1 Inter mediate description of the spectrum needs and usage principles. 2013.
7. Recommendation ITU-R M.2083 – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.
8. Vorozhishchev I.V., Bochechka G.S., Tikhvinsky V.O. Comparative analysis of the use of UFMC and OFDM technologies in 5G networks // Telecommunications. – 2017. – No. 11. – P. 46–51.
9. Sklyar B. Digital communication. Theoretical foundations and practical application. – M.: Williams Publishing House, 2003. – 1104 p.
10. Rashich A.V., Gorbunov S.V. Iterative reception of multi-frequency signals with non-orthogonal frequency compaction in channels with fading // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Computer science. Telecommunications. Management. – 2019. – Vol. 12. – No. 4. – P. 58–71.
11. Lenshin A.V., Shatalov E.V. Noise immunity of receiving spectrally effective signals with non-orthogonal frequency compaction // Telecommunications. – 2021. – No. 7. – P. 18–25.
12. Muzychenko A.D., Gulyaev G.A. Implementation of a signal shaper with orthogonal and non-orthogonal frequency compaction on the Cyclone V FPGA // Actual questions of research in avionics: theory, service, development: collection of scientific papers. articles based on the materials of the docl. VIII International Scientific and Practical Conference «AVIATOR». – Voronezh: VUNTS VVS «VVA», 2021. – P. 188–193.
13. Dyadyunov N.G., Senin A.I. Orthogonal and quasi-orthogonal signals / Ed. by E.M. Tarasenko. – M.: Svyaz, 1977. – 224 p.
14. Lukin A.V., Lenshin A.V. Architecture of the spectral-effective signal shaper with frequency multiplexing // Actual problems of the development of armaments and military aviation equipment (helicopters): collection of materials of the I International VNК dedicated to the memory of helicopter designers M.L. Mil and N.I. Kamov (November 19-20, 2020, Syzran) / Edited by A.N. Moiseev. – Kirov: Izd-vo ICITO, 2021. – P. 165–169.
15. Solonina A.I., Arbuzov S.M. Digital signal processing. Modeling in MATLAB. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2008. – 816 p.
16. VLSI PL of the Cyclone V family. – URL: <http://altera.ru/sbis-pl-cyclone-V.html>.
17. Intel® Quartus® Prime Software. – URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/software/programmable/quartus-prime/download.html>.
18. Polyakov A.K. VHDL and VERILOG languages in the design of digital equipment. – Moscow: SOLON-Press, 2016. – 314 p.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

О.А. Кудрявцев

АО «Концерн «Созвездие»

Аннотация. Разработана имитационная модель инфокоммуникационной системы (ИКС) военного назначения в условиях информационного воздействия. С использованием метода управления программно-аппаратным комплексом функционирования ИКС в условиях информационного воздействия, спрогнозировано условие для выполнения целевой функции управления в целом для всех комплексов входящих в ИКС. Построена структурная схема компонента выработки управляющих воздействий (адаптивное управление) ИКС военного назначения. Определены интегральные показатели устойчивости функционирования ИКС в условиях информационного воздействия.

Ключевые слова: Структурная схема компонента выработки управляющих воздействий (адаптивное управление) ИКС, каналы наблюдения системы связи (СС) со стороны системы управления и системы воздействий, интегральные показатели устойчивости функционирования ИКС, система управления связью (СУС), информационно-управляющая система (ИУС).

A SIMULATION MODEL OF THE FUNCTIONING OF A MILITARY INFOCOMMUNICATION SYSTEM UNDER CONDITIONS OF INFORMATION IMPACT

O.A.Kudryavtsev

JSC «Concern «Sozvezdie»

Abstract. A simulation model of an infocommunication system (ICS) for military purposes in conditions of information impact has been developed. Using the method of controlling the hardware and software complex for the functioning of the ICS in conditions of information impact, the condition for the performance of the target control function as a whole for all complexes included in the ICS was predicted. The structural diagram of the component for the development of control actions (adaptive control) of the ICS for military purposes has been built. The integral indicators of the stability of the functioning of the ICS in the conditions of information impact have been determined.

Keywords: Block diagram of the component for generating control actions (adaptive control) of the ICS, observation channels of the communication system (CC) from the control system and the action system, integral indicators of the stability of the ICS functioning, the communication control system (CMS), information management system (ICS).

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно [1] в настоящее время стремительно развиваются телекоммуникационные технологии. Внедрение концепции сетей следующего поколения NGN (Next Generation Networks) и глобальной информационной инфраструктуры GII (Global Information Infrastructure) создают предпосылки для

коренного изменения архитектуры и принципов построения сетей связи специального назначения. Отличительной особенностью сетей связи специального назначения (СС СН) является то, что, с одной стороны, они традиционно являются наиболее консервативным объектом в отрасли связи, а с другой стороны – они должны быть основаны на новейших достижениях этой отрасли связи, чтобы обеспечить высокое качество обслуживания специальных абонентов. Переход от СС СН на основе NGN к инфокоммуникационным сетям связан с развитием АСУ связью и интеграцией существующего в них задела в области управления ресурсами связи в системах связи общего пользования (прежде всего стандартов концепции TMN), виртуализацией сетевых и вычислительных ресурсов, а также использование новых технологических решений по обеспечению устойчивости такой сети в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий.

Эффективность функционирования любых систем управления в значительной мере определяется уровнем и качеством автоматизации управления. СС не является исключением, т.к. подавляющее большинство современных средств связи (СрС) предполагают дистанционное автоматизированное управление и контроль. Автоматизация облегчает процесс мониторинга состояния СрС и сложной настройки большого количества параметров функционирования.

Функционирование ИКС, происходит на основе информационных технологий (ИТ). Целесообразно выделить ИТ (методы обработки, хранения и обмена информацией) и их применение в сервисных устройствах для повышения их функционирования и вероятности решения с их помощью задач информационного обмена, в частности, в АСУ военных систем. Это обусловлено, главным образом, тем, что в основе конкретных применений ИТ может находиться единый объект – основа этих технологий, - процессорная обработка сигналов и данных [2, 3].

ИКС предназначена для повышения эффективности контроля, состояния и управления АСУ в процессе организации каналов (сетей) связи центрального боевого и оперативного боевого управления (в установленные сроки с требуемым качеством), обеспечения устойчивого обмена информацией оперативного боевого управления и взаимодействия различных пунктов управления (как мобильных, так и стационарных).

Поэтому необходимо решить следующие задачи:

- Провести формализацию основных принципов взаимодействия двух систем в ИКС, определяющих условие перехода из устойчивого в неустойчивое состояние в информационном конфликте;

- Разработать алгоритм имитационной модели ИКС военной связи в условиях информационного воздействия;

В результате целью данной статьи является: формализованное представление имитационной модели ИКС в условиях информационного воздействия. С использованием метода управления программно-аппаратным комплексом функционирования ИКС, необходимо спрогнозировать условие для выполнения целевой функции управления в целом для автоматизированных комплексов СС, СрС входящих в ИКС.

2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ СИСТЕМ В ИКС, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УСЛОВИЕ ПЕРЕХОДА ИЗ УСТОЙЧИВОГО В НЕУСТОЙЧИВОЕ СОСТОЯНИЕ В ИНФОРМАЦИОННОМ КОНФЛИКТЕ

Функции управления реализуются в ИКС в двух аспектах: управление внутрисистемными ресурсами, а также управление внешними по отношению к ней системами и объектами в рамках своей центральной задачи. Под центральной задачей системы (компонента) здесь понимается ее проблемная ориентация, то есть некоторая общая или частная задача, решение которой и есть цель создания и функционирования данной ИКС. Конкретный способ решения центральной задачи можно тогда сопоставить с целевой функции ИКС. Целесообразно выделить типичные особенности процесса конфликтного взаимодействия ИКС в условиях применения сторонами адаптивного управления, как при защите своего информационного ресурса, так и при воздействии на информационный ресурс противоборствующей стороны, с целью определения «сильных» и «слабых» сторон используемых стратегий. Основным показателем эффективности принятой стратегии можно считать реакцию ИКС на входное воздействие [2,4].

Для формализации процесса взаимодействия СС (систем сязи) с системой информационных действий противника необходимо выделить 2 состояния в котором будет находиться ИКС военного назначения:

- целевое состояние системы СС S_1 после воздействий на нее управления ΔU_1 ;
- целевое состояние системы информационных действий S_2 после воздействий на нее управления ΔU_2 .

На ИКС влияют 2 вида управляющих воздействий управление $\Delta W_1, \Delta W_2$.

- управление ΔW_1 со стороны компонента реализации управляющих действий СС;
- управление ΔW_2 со стороны компонента реализации управляющей системы информационных действий противника.

Как показано в [2] в результате анализа функционирования ИКС в зависимости от целей синтеза управления выделены 2 задачи:

- Обеспечение устойчивости управления в максимальном диапазоне условий функционирования;
- Обеспечение условий перехода системы в неустойчивое состояние;

Для аналитического описания процесса взаимодействия во времени в этом случае можно воспользоваться известной моделью конкуренции между i -им и l -им элементами, которая имеет вид:

$$\frac{\partial S_{Di}(w_{i,l}^k, t)}{\partial t} = a_i(w_{i,l}^k) \cdot S_{Di}(w_{i,l}^k, t) - \sum_{i \neq l} b_{i,l}(w_{i,l}^k) S_{Di}(w_{i,l}^k, t) S_{Dj}(w_{i,l}^k, t) - c_i(w_{i,l}^k) S_{Di}^2(w_{i,l}^k, t)$$

где t – безразмерное время; $\partial S / \partial t$ – характеризует интенсивность реализации своей целевой функции (скорость изменения сигнала – реакции элемента на внешнее

воздействие), a_i , b_i и c_i – коэффициенты, характеризующие свойства элементов по восстановлению измененных показателей, уровень конфликтности и интенсивность информационного обмена, соответственно.

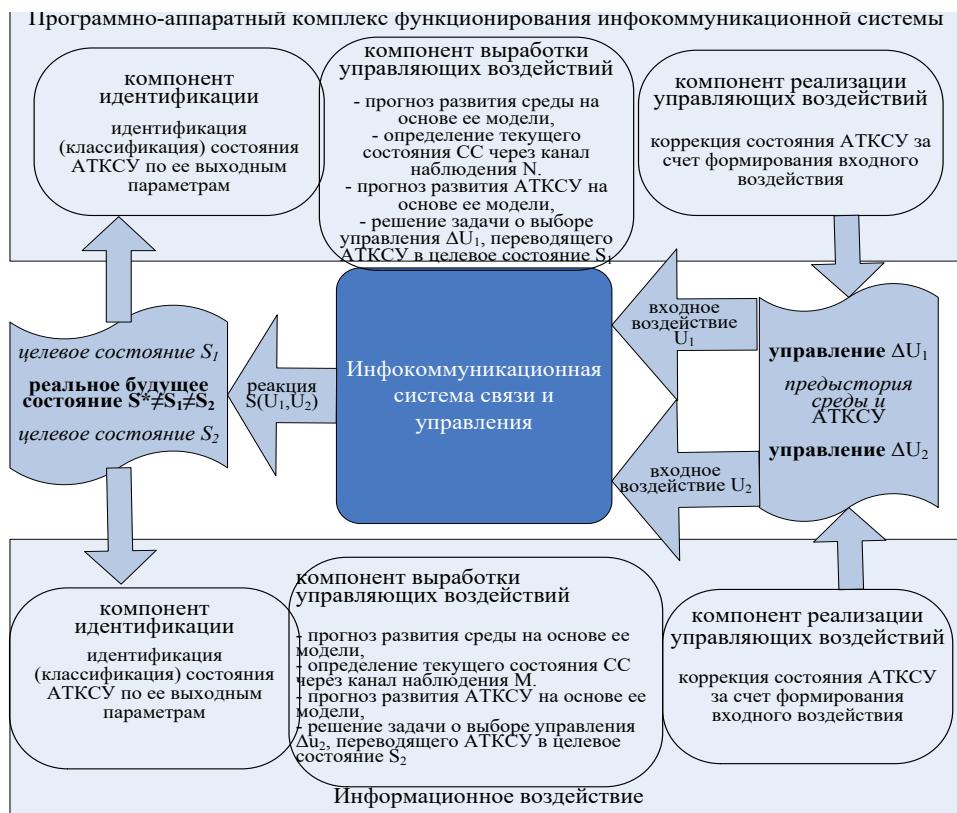


Рис.1. Программно-аппаратный комплекс функционирования инфокоммуникационной системы в условиях информационного воздействия

В зависимости от соотношения параметров a_i , b_{ij} и c_i система S_1 имеет разную структуру атTRACTоров. Например, для двух взаимодействующих элементов ($N=2$) возможны две основные ситуации. При $c_i / b_{ji} >> 1$ (режим кооперативного взаимодействия) в системе после переходного периода возникает устойчивое состояние всех конкурирующих элементов и вероятность реализации целевой функции, которая определяется стабильностью S_{Di} , не изменяется во времени. В обратной ситуации, когда $c_i / b_{ji} \ll 1$ (режим конфликтного функционирования), конкурентная борьба в ИКС в соответствии с (1) приводит в конечном итоге к доминированию в смысле реализации своей целевой функции одной из групп элементов. При этом вероятность реализации своей целевой функции будет выше у того элемента (или группы элементов), у которого соотношение параметров c_i / b_{ji} имеет меньшее значение.

В [2] математические модели отражают наиболее общие закономерности и особенности адаптивного управления элементов синтезированной системы в режиме ИК. При этом широкий диапазон вариабельности корректируемых параметров, а также

различие в интенсивности связей различных элементов и возможностях их реализации (изменение качества канала во времени, появление помех на сигнальном уровне и другие), требует конкретизации общего выражения по отношению к каждой конкретной системе. При этом компонент выработки управляющих воздействий (рисунок 2) строится по принципу взвешенной обработки потоков $S_{D,j}$ без предсказания возможного состояния системы после выполнения сформированного сигнала управления.

Для выработки решений на основе управления внутри системными ресурсами ИКС с целью оптимального использования радиоканалов и распределения информационных ресурсов в процессе решения центральной задачи, необходимо рассмотреть каналы наблюдения СС со стороны системы управления и системы воздействий.

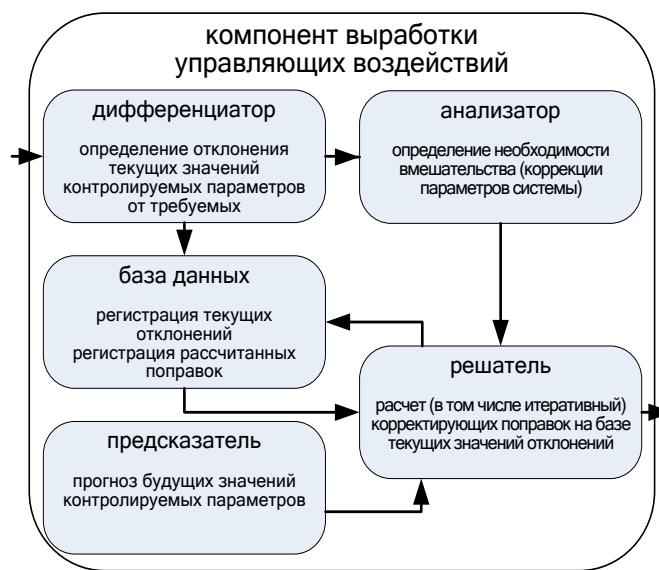


Рис. 2. Структурная схема компонента выработки управляющих воздействий: адаптивное управление

3. АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИКС ВОЕННОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Управление СС характеризуется рядом особенностей. Для динамической модели СС наиболее существенными из них являются:

- совокупность направлений связи, в которых обеспечивается обмен сообщениями абонентов и узлов;
- использование различных путей прохождения сообщений в рамках одного направления связи;
- зависимость множества реализуемых информационных путей передачи информации Λ от транспортной структуры $\langle Z, K \rangle$ и конфигурации СС S_{conf} ;
- изменение процессов управления состояниями транспортной и информационной структур, а также процессов изменения конфигурации СС.[6]

Управляющие воздействия U направляются на перестройку (создание) топологии СС $\langle Z, K \rangle$, преобразование структур транспортной S и информационной Λ сетей, управление резервами R протоколами СрС g (режимами помехозащиты, рабочими частотами, мощностью передачи, видом формируемых сигналов и способом их обработки) и т.д.

Особенностью построения системы управления связью (СУС) является то, что она с одной стороны функционально разобщена по уровням функционирования, что приводит к тому, система управления каждого уровня стремиться обеспечить выполнение только своих задач, а с другой стороны должна обеспечивать требуемое качество связи $Q_{\text{треб}}$ [4] в интересах ИУС более высокого уровня. Иерархический характер управления означает, что в рамках одного состояния СС, определяемого старшим элементом подсистемы управления (высшего уровня иерархии), допускается управление младшими элементами и состояниями СС на более низких уровнях иерархии. Процессы управления различных уровней иерархии различаются по масштабности и сложности решаемых задач, по степени их влияния на СС и ИУС в целом, по динамичности, уровню автоматизации и другим показателям. Все вышеуказанное, а также принцип функциональной независимости уровней, в соответствии с моделью OSI[3,4], позволяют рассматривать управление ресурсами отдельного уровня независимо от других.

Для формального представления каналов наблюдения СС со стороны системы управления и системы воздействий, необходимо определить следующие параметры характеризующие качество канала связи. В ИКС канал наблюдения - N со стороны СУС, должен включать в себя наблюдаемые параметры Q и Y :

$$N = UN_l = \langle QN \times YN \rangle \quad (1)$$

где: N – включает в себя наблюдаемые показатели качества канала наблюдения.

$Sconf$ – управляемые параметры СС и конфигурацию СС необходимо представить в следующем виде:

$$Sconf = \langle t, Z, K, R, g, A, \Omega, \Lambda \rangle \quad (2)$$

где: g - протоколы, A - множество элементов математического обеспечения (алгоритмов), реализующих функционирование протокола g СС и их параметры Ω на всех уровнях функционирования СС, $Z \times K$ топология СС, Λ - структура передачи информационных потоков, R - распределение ресурсов.

Полную формализацию канала наблюдения можно представить в виде $N \times Sconf$, причем управляемые как со стороны СУС, так и со стороны системы дестабилизирующих воздействий (ИВ).[3]

Канал наблюдения СС со стороны противника M также должен включать в себя показатели Q и Y :

$$M = UMl = \langle QM \times YM \rangle \quad (3)$$

В котором показатели, характеризующие вскрытие и идентификацию протоколов функционирования СС $g = Ug_l$, ее транспортной структуры $\langle Z, K \rangle$, а также

информационной структуры Λ , определяемой маршрутами передачи информационных потоков. Идеальным вариантом для противника является полное наблюдение конфигурации СС $S_{conf} = \langle t, Z, K, R, g, A, \Omega, \Lambda \rangle$. Однако фактически наблюдаемая конфигурация $S_{conf}^{набл}$ будет неполной $S_{conf}^{набл} \subset S_{conf}$. В таком случае канал наблюдения со стороны системы воздействий формально можно представить в виде $M \times S_{conf}^{набл}$.

В процессе функционирования канала наблюдения $M \times S_{conf}^{набл}$, со стороны системы воздействий формируется так называемая «картина наблюдения» идентифицирующая с определенной вероятностью (достоверностью) элементы S_{conf} , которую необходимо представить в виде:

$$M \times S_{conf}^{набл} \times t_{набл} \quad (4)$$

Как было показано выше на рисунке 2, в алгоритме адаптивного управления ИКС в условиях ИВ, база данных регистрации текущих отклонений и регистрации рассчитанных поправок позволяет каждой из сторон в конфликте регистрировать изменения разведпризнаков объектов за время $t_{набл}$ наблюдений.

Канал $U_{l,g}$ управления протоколом g_l со стороны СУС по наблюдению $N_{l,g}$ вырабатывает функционал, задающий множество управляющих воздействий $U_{l,g}$, которые по каналу управления воздействует на протокол g_l . С учетом конечности множества состояний для динамических систем в соответствии с [5]

$$H_\tau : \{U(t), e(t), x(t)\} \subseteq U \times E \times X \rightarrow \{y(t)\} \subseteq y \quad (5)$$

и последовательности моментов $\tau = [t_0, T] \subseteq \tau^*$ принятия решений по выдаче управляющих воздействий, в котором управление необходимо представить в виде программы управления

$$U_{l,q} = \langle U_{l,q}(t1), U_{l,q}(t2), \dots, U_{l,q}(tn), \dots \rangle \quad (6)$$

Программа управления при любом начальном состоянии протокола $g_l(t_0)$ и наличии преднамеренных дестабилизирующих воздействий $V_{l,g}$ должна обеспечивать выполнение критерия $\forall \{q_{l,g} \geq q_{l,g}^{mpe\bar{o}}\} \in Q_{l,g}$, т.е. существование предела:

$$Q_{l,g} = f_{l,g}(t, s_g, X_{l,g}, U_{l,g}, A_{l,g}) \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q_{l,g} = f_{l,g}(t, s_g, X_{l,g}, U_{l,g}, A_{l,g}) \\ \forall \{q_{l,g} \geq q_{l,g}^{mpe\bar{o}}\} \in Q_{l,g} \\ X_{l,g} = \langle R_{l,g} \times \chi_{l,g} \times V_{l,g} \rangle \\ U_{l,g} = \langle u_{l,g} \times T \rangle \end{cases} \quad (8)$$

Необходимо отметить, что ввиду особенностей наблюдения $N_{l,g}$ СС, в контуре управления всегда присутствует неопределенность в определении текущего состояния

протокола g_l . Еще одной чертой, характерной для протокола g_l , как для динамической системы, является наличие множества дестабилизирующих воздействий $V_{l,g}$. Эти аспекты позволяют отнести задачу разработки программы управления СС к задаче синтеза адаптивной системы управления, которая была приведена ранее в статьях [2, 3].

Наличие программы управления $U_{l,q}$ должно предусматривать план управления по обеспечению достижения выполнения критерия $\forall\{q_{l,g} \geq q_{l,g}^{mpe\delta}\} \in Q_{l,g}$.

$$U_{l,q}^{\text{план}} = \langle U_{l,q}(tme\kappa+1), U_{l,q}(tme\kappa+2), \dots, U_{l,q}(tme\kappa+n), \dots \rangle \quad (9)$$

за счетное число шагов n в будущие моменты времени. На план управления накладываются ограничения, что управление $U_{l,q}^{\text{план}}$, должно переводить протокол g_l в состояние, которое является допустимым для этого протокола:

$$s_g = \psi_{l,g}(t_0, t, s_g(t_0), S_{l,g}, X_{l,g}, U_{l,g}, A_{l,g}) \quad (10)$$

$$\begin{cases} s_g \in S_{l,g} \\ s_g = \psi_{l,g}(t_0, t, s_g(t_0), S_{l,g}, X_{l,g}, U_{l,g}, A_{l,g}) \\ X_{l,g} = \langle R_{l,g} \times \chi_{l,g} \times V_{l,g} \rangle \\ U_{l,g}^{\text{план}} = \langle u_{l,g} \times T_u \rangle \end{cases} \quad (11)$$

План управления должен предусматривать формирование управляющих воздействий U_l , который в зависимости от текущего наблюдения $N_{l,g}, g_l(tme\kappa)$, подчиняется определенной стратегии управления, связанной с реализацией цели управления $\forall\{q_{l,g} \geq q_{l,g}^{mpe\delta}\} \in Q_{l,g}$. [3]

Как правило, для СС можно рассмотреть две основные стратегии управления при допущении о том, что принятие решения по выработке управления $U_{l,q}(tme\kappa+1)$ осуществляется на каждом шаге независимо от предыдущих управлений и основано на результатах текущего наблюдения $N_{l,g}, g_l(tme\kappa)$.

1) Вероятностная стратегия, когда в условиях текущего наблюдения $N_{l,g}, g_l(tme\kappa)$ в следующий момент времени осуществляется выбор такого управляющего воздействия $U_l(tme\kappa+1)$ из имеющегося множества альтернатив $\{U_l(tme\kappa+1)\}$, которое с наибольшей вероятностью ведет к выполнению выбранного критерия эффективности $q_{l,g} \geq q_{l,g}^{mpe\delta}, (q_{l,g} \in Q_{l,g})$.

2) Стратегия максимального приближения, когда в условиях текущего наблюдения $N_{l,g}, g_l(tme\kappa)$ осуществляется выбор такого управляющего воздействия $U_{l,g}^{\text{план}}(tme\kappa+1)$, которое минимизирует отклонение выбранного показателя $(q_{l,g} \in Q_{l,g})$ от его требуемого значения $(q_{l,g} \in Q_{l,g}) q_{l,g}^{mpe\delta}$.

План управления $U_{l,g}^{\text{план}}$ состоит из отдельных объектов управления для протокола g_l , управление которыми планируется на очередном шаге ($tmek + 1$). В зависимости от объекта управления по отношению к произвольному протоколу l -го уровня можно выделить:

1) самонастраивающиеся управления:

- управление ресурсами $R_{l,g}$ выделяемыми протоколу g_l из общего пула ресурсов

l -го уровня $U_{l,q} : R_l \rightarrow \{R_{l,q}\}$;

- управление параметрами $\Omega_{l,q,a}$ отдельных алгоритмов $a \in A_{l,q}$ $U_{l,q} : \{\Omega_{l,q}\} \rightarrow argA_{l,q}$

2) самоорганизующиеся управления:

- управление алгоритмами $\{A_{l,q}\}$ используемыми протоколом g_l из совокупности математического обеспечения $\{A_{l,q}\}$ и последовательностью их выполнения

$\{\Theta_{l,q}\} U_{l,q} : \langle \{A_{l,q}\}, \{\Theta_{l,q}\} \rangle \rightarrow \langle A_{l,q}, \Theta_{l,q} \rangle$;

- управление структурой функционального взаимодействия протоколов g_l между собой на одном и том же уровне функционирования СС (отображение множества выходов $Y_{l,g}$ одних протоколов на множество входов $X_{l,g}$ других)

$U_l : \langle \{\Theta_l\} \rangle \rightarrow \Theta_l$, где $\Theta_l = \langle X_l, Y_l \rangle$.

Задачи выбора алгоритмов $A_{l,g}$ и их параметров $\Omega_{l,q,a}$, как правило, решается на основе методов линейного или динамического программирования с целью оптимизации выбранных показателей QoS : $\{q_{l,q} \rightarrow max q_{l,q} \geq q_{l,q}^{mpeb}\}, q_{l,q} \in Q_{l,q}$. [3]

Управление $U_{l,g}$ в общем случае должно соответствовать принципу компенсации из теории управления по отношению к дестабилизирующим воздействиям $V_{l,g}$ и условиям естественной среды $\chi_{l,g}$. При этом компенсация может быть:

- активной, за счет выдачи управляющих воздействий $U_{l,q}$ на соответствующие объекты управления;

- пассивной, за счет внесения некоторой избыточности (количественной, функциональной или временной) в математическое обеспечение $A_{l,g}$ в параметры $\Omega_{l,q}$ протокола g , в структуру взаимодействия протоколов g на множестве Θ_l - функциональных связей между протоколами $q_{l,q} \in Q_{l,q}$ в СС на различных ее уровнях, а также в распределяемый протоколу ресурс $R_{l,g}$.

Это позволит обеспечить выполнение требований по QoS : $\{q_{l,q} \rightarrow max q_{l,q} \geq q_{l,q}^{mpeb}\}, q_{l,q} \in Q_{l,q}$ в более широком диапазоне параметров среды $X_{l,g} = \langle R_{l,g} \times \chi_{l,g} \times V_{l,g} \rangle$.

Управляющие воздействия $U_{l,g}$ поступают по каналу управления, который представляет собой канал связи в составе сети связи или в отдельной управляющей сети. Это, а также общая специфика функционирования СС формирует основные особенности процесса управления протоколами в ней:

- дискретность процесса управления: $T_u = \langle t_1, t_2, \dots, t_3, \dots \rangle$;
- временные задержки в выдаче управляющих воздействий $U_{l,g}$ - потери сообщений об управляющих воздействиях $U_{l,g}$ в процессе передачи по сети связи;
- ситуации нарушения причинности процесса управления (в пакетной сети связи возможны ситуации, когда более позднее управление $U_{l,g}(t2)$ поступает раньше, чем сообщение о предыдущем управлении $U_{l,g}(t1)$, $(t2 > t1)$);
- наличие дестабилизирующих воздействий $V_{l,g}$ связанных с нарушением функционирования канала управления ($u_{l,g} = 0, u_{l,g} \in U_{l,g}$) или подменой сообщений управляющих воздействий ($U_{l,g} U_{l,g} = v_{l,g}$, где $u_{l,g} \in U_{l,g}, v_{l,g} \in V_{l,g}$).

Разно уровневые воздействия, а также глубокая функциональная взаимосвязь между уровнями СС требует реализации единой стратегии управления $U = UU_l$ на различных уровнях иерархии. Такое управление требует создания мегасистемы управления, которая бы обеспечивала управление каждым из уровней с квазипротимальной стратегией суммарных затрат ресурсов всех уровней $R(U, V) \rightarrow \min$. Данное управление должно быть адаптивным к преднамеренным воздействиям.

Применение корректирующего кодирования позволяет избежать многократного повышения полосы частот канала при одинаковой достоверности приема. А изменение маршрутов передачи в сети позволит избежать передачи данных по каналам, на которые оказываются преднамеренные воздействия, вместо того чтобы тратить частотно-временные и энергетические ресурсы физического и канального уровня на обеспечение их требуемой помехозащищенности.

Управление U в общем случае должно соответствовать принципу компенсации из теории управления по отношению к преднамеренным воздействиям V и условиям среды χ . [5] При этом компенсация может быть:

- активной за счет непосредственной выдачи управляющих воздействий U_l на объекты управления;
- пассивной за счет внесения некоторой избыточности (количественной, функциональной или временной) в математическое обеспечение A , в их параметры Ω протоколов g , в структуру взаимодействия протоколов, а также в ресурсы СС R . Это позволит обеспечить выполнение требований $Q \geq Q_{\text{треб}}$ в более широком диапазоне входных параметров $X = \langle R \times \chi \times V \rangle$ и сократить интенсивность выдачи управляющих воздействий U .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе разработана имитационная модель ИКС военного назначения в условиях ИВ. Разработан метод управления программно-аппаратным комплексом функционирования ИКС в условиях ИВ, в котором реализована целевая функция ИКС (функция управления), для качественного предоставления связи между взаимодействующими стационарными и подвижными пунктами управления. Построена структурная схема компонента выработки управляющих воздействий (адаптивное управление) ИКС военного назначения в условиях ИВ. Определены интегральные показатели устойчивости функционирования ИКС в условиях ИВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучин С.Б. Некоторые вопросы применения сетевых технологий и протоколов в современных сетях связи специального назначения // Информационно-телекоммуникационные технологии. Системы, средства связи и управления 2021, С.125-144.
2. Толстых Н.Н. Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности : учеб. пособие [Http:rsl.ru]. – Электрон. текстовые, граф. данные (1,95 Мб);
3. Кудрявцев О.А. Динамическая модель взаимодействия информационно-управляющей системы с системой дестабилизирующих воздействий в инфокоммуникационных системах "Теория и техника радиосвязи", №4 2020г. (24-30 с.);
4. Кудрявцев О.А. Анализ информационной устойчивости инфокоммуникационных систем в условиях информационного воздействия "Теория и техника радиосвязи". 2021. № 3. С. 89–94. С. 47–51.
5. Кудрявцев О.А. Оценка информационной устойчивости инфокоммуникационной системы // "Теория и техника радиосвязи". 2020. № 3. С. 89–94.
6. Кудрявцев О.А. Модель сети информационной системы для систем связи специального назначения в условиях информационного воздействия "Теория и техника радиосвязи", №1 2021г. С. 54-60 с.;

REFERENCES

1. Kuchin S.B. Some questions of application of network technologies and protocols in modern special-purpose communication networks // Information and telecommunication technologies. Systems, means of communication and control 2021, pp. 125-144.
2. Tolstykh N.N. Software and hardware for information security: textbook. manual [Http: rsl.ru]. - Electron. text, graph. data (1.95 MB);
3. Kudryavtsev O.A. A dynamic model of the interaction of the information and control system with the system of destabilizing influences in the information and communication systems "Theory and Technique of Radio Communication", No. 4 2020. (24-30 s.);
4. Kudryavtsev O.A. Analysis of information stability of infocommunication systems in conditions of information impact "Theory and technology of radio communication". 2021. No. 3. P. 89–94. S. 47-51.
5. Kudryavtsev O.A. Assessment of information stability of infocommunication system // "Theory and technology of radio communications". 2020. No. 3. P. 89–94.
6. Kudryavtsev O.A. Model of an information system network for special-purpose communication systems in conditions of information impact "Theory and technology of radio communication", No. 1 2021. C. 54-60 c.;

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ICMP-ТУННЕЛЯ, СРАВНЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ И СТРУКТУРЫ ТРАФИКА

К.А. Климантов, К.А. Батенков, В.Ю. Головачёв, О.В. Казаков

ФГКВОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», г. Орёл, Россия

Аннотация. В статье рассмотрен порядок организации ICMP-туннеля, как альтернативы обычного соединения. Выявлены и проанализированы основные параметры туннеля и стандартной службы ping, проведено их сравнение по структуре трафика и скорости передачи.

Ключевые слова: ICMP; ping; скрытый канал передачи данных; пакетная передача данных; Ptunnel;

RESEARCH OF ICMP TUNNEL PARAMETERS, COMPARISON OF TRANSMISSION RATE AND TRAFFIC STRUCTURE

K.A. Klimantov, K.A. Batenkov, V.Yu. Golovachev, O.V. Kazakov

«Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation», Orel, Russia

Abstract. The article describes the procedure for organizing an ICMP tunnel, as an alternative to a simple connection. The main parameters of the tunnel and the standard ping service are identified and analyzed, and they are compared in terms of traffic structure and transmission speed.

Keywords: ICMP; ping; covert channel; packet based transmission data; Ptunnel;

1. ВВЕДЕНИЕ

В повседневной и профессиональной деятельности приходится сталкиваться с ситуациями, когда необходимо получить доступ к какому-либо ресурсу в сети Internet, но администратор сети/провайдер запрещает доступ с помощью протокола TCP (Transmission Control Protocol) или UDP (User Datagram Protocol). Также, возможна необходимость в передаче какого-либо сообщения скрытно, а все входящие/исходящие TCP-соединения подлежат анализу. Выходом из данных ситуаций может стать организация скрытого канала передачи данных на основе протокола ICMP (Internet Control Message Protocol). Подробности о принципах его реализации, достоинствах и недостатках будут описаны далее.

2. ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для организации скрытого канала передачи данных использовалось следующее программное обеспечение:

- 1) VMware Workstation Pro – создание виртуальных машин на базе операционной системы Linux Mint, между которыми будет организована передача данных.
- 2) Ptunnel – программное обеспечение для Posix-совместимых операционных систем с libcap (библиотека, позволяющая производить анализ сетевых данных, которые поступают на сетевую карту компьютера)

Ptunnel является приложением, которое обеспечивает туннелирование соединений посредством протоколов TCP и ICMP, надежную передачу данных, т.к. утраченные пакеты будут отправлены повторно, аутентификацию для защиты соединения от сторонних пользователей. Заявленная пропускная способность – 150 кб/с в исходящем направлении и 50 кб/с в восходящем.

Для функционирования Ptunnel необходимо наличие клиента с разрешённым прохождением пакетов ICMP (устройство, которому необходимо получить доступ к ресурсу) и прокси-сервера (устройство, на которое будут приходить ICMP пакеты и которое имеет открытый доступ к сети интернет). В данной статье, в качестве клиента и прокси-сервера будут выступать виртуальные машины с операционной системой Linux Mint, возможно использование и других Posix-совместимых операционных систем.

3. МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ

Упрощённая модель взаимодействия устройств в сети представлена на рисунке 1. Клиент “общается” с прокси-сервером через сеть Internet (локальную сеть) с помощью ICMP-пакетов, прокси-сервер таким же образом связан с клиентом. Далее, полученные сервером данные передаются на сайт с помощью протокола TCP (UDP), получив пакеты с сайта, прокси-сервер передает информацию из них с помощью пакетов ICMP.

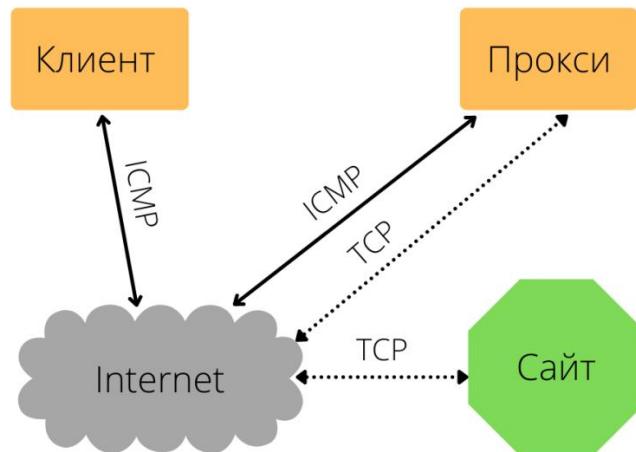


Рис. 1. Модель взаимодействия устройств.

4. Создание ICMP-туннеля

Начнём создание ICMP-туннеля с создания прокси-сервера на виртуальной машине. Для корректной работы программы необходимо производить действия с использованием прав администратора. Для всех действий используем командную строку, переходим в директорию ptunnel и запускаем файл ptunnel без передачи ему каких-либо параметров. Отсутствие параметра `-r` определяет в каком режиме будет функционировать виртуальная машина (режим прокси-сервера или режим клиента). Пример настройки прокси-сервера представлен на рисунке 2.

```

root@konstantin-virtual-machine:/home/konstantin/Рабочий стол/PingTunnel - 
Файл Правка Вид Поиск Терминал Справка
konstantin@konstantin-virtual-machine:~$ sudo -i
[sudo] пароль для konstantin:
root@konstantin-virtual-machine:~# cd "/home/konstantin/Рабочий стол/PingTunnel"
root@konstantin-virtual-machine:/home/konstantin/Рабочий стол/PingTunnel# ./ptunnel
[inf]: Starting ptunnel v 0.72.
[inf]: (c) 2004-2011 Daniel Stoeble, <daniels@cs.uit.no>
[inf]: Security features by Sebastien Raveau, <sebastien.raveau@epita.fr>
[inf]: Forwarding incoming ping packets over TCP.
[inf]: Ping proxy is listening in privileged mode.

```

Рис. 2. Включение и конфигурация прокси-сервера.

Теперь прокси-сервер ожидает входящий подключений от клиента. Перейдём к настройке клиентской части. Необходимо проделать те же самые действия, только запуск файла ptunnel будет осуществлён с определёнными параметрами. Пример конфигурации клиентской части представлен на рисунке 3.

```

root@konstantin-virtual-machine:/home/konstantin/Рабочий стол/PingTunnel - 
Файл Правка Вид Поиск Терминал Справка
konstantin@konstantin-virtual-machine:~$ sudo -i
[sudo] пароль для konstantin:
root@konstantin-virtual-machine:~# cd "/home/konstantin/Рабочий стол/PingTunnel"
root@konstantin-virtual-machine:/home/konstantin/Рабочий стол/PingTunnel# ./ptunnel -p 192.168.139.130 -lp 8020 -da www.my littlesite.com -dp 80
[inf]: Starting ptunnel v 0.72.
[inf]: (c) 2004-2011 Daniel Stoeble, <daniels@cs.uit.no>
[inf]: Security features by Sebastien Raveau, <sebastien.raveau@epita.fr>
[inf]: Relaying packets from incoming TCP streams.

```

Рис. 3. Включение и конфигурация клиентской части.

Список параметров, используемых для управления клиентской частью:

-р – адрес прокси-сервера; -lp – порт прослушивания; -да – адрес ресурса, к которому необходимо получить доступ; -dp – порт назначения;

Чтобы получить доступ к сайту, в данном случае это mylittlesite.com, необходимо ввести в адресной строке браузера: localhost: <порт входящих/исходящих ICMP пакетов

5. АНАЛИЗ ТРАФИКА С ПОМОЩЬЮ WIRESHARK

Запускаем Wireshark и выбираем сетевое подключение, используемое виртуальной машиной, организуем ICMP-туннель с помощью действий, описанных выше, и получаем доступ к сайту. Окно анализа трафика показано на рисунке 4. Одновременно с загрузкой сайта происходит и прием/передача ICMP пакетов, ставим фильтр icmp,

чтобы отсеять ненужные типы пакетов. В окне анализа трафика видно, что через сетевое подключение прошло 173 пакета ICMP. Используется два типа сообщений: эхо-запрос и эхо-ответ. На передачу пакетов было затрачено 6,527 с.

| No. | Time | Source | Destination | Protocol | Length | Info |
|-----|----------|-----------------|-----------------|----------|--------|---|
| 1 | 0.000000 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 70 | Echo (ping) request id=0x4ec6, seq=0/0, ttl=64 (reply in 3) |
| 2 | 0.000158 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 424 | Echo (ping) request id=0x4ec6, seq=1/256, ttl=64 (reply in 4) |
| 3 | 0.000220 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 70 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=0/0, ttl=64 (request in 1) |
| 4 | 0.000253 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 424 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=1/256, ttl=64 (request in 2) |
| 9 | 0.255810 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 70 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=0/0, ttl=64 |
| 13 | 0.767699 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 694 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=1/256, ttl=64 |
| 14 | 0.837264 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 394 | Echo (ping) request id=0x4ec6, seq=2/512, ttl=64 (reply in 15) |
| 15 | 0.837479 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 394 | Echo (ping) reply id=0xfcacf, seq=2/512, ttl=64 (request in 14) |
| 18 | 0.944171 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 70 | Echo (ping) request id=0xfcacf, seq=0/0, ttl=64 (reply in 20) |
| 19 | 0.944298 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 378 | Echo (ping) request id=0xfcacf, seq=1/256, ttl=64 (reply in 21) |
| 20 | 0.944369 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 70 | Echo (ping) reply id=0xfcacf, seq=0/0, ttl=64 (request in 18) |
| 21 | 0.944394 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 378 | Echo (ping) reply id=0xfcacf, seq=1/256, ttl=64 (request in 19) |
| 23 | 1.009198 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 70 | Echo (ping) request id=0x4ec6, seq=3/768, ttl=64 (reply in 24) |
| 24 | 1.009380 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 70 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=3/768, ttl=64 (request in 23) |
| 28 | 1.175450 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 70 | Echo (ping) reply id=0xfcacf, seq=0/0, ttl=64 |
| 32 | 1.227287 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=2/512, ttl=64 |
| 33 | 1.227398 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 446 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=3/768, ttl=64 |
| 36 | 1.235511 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=4/1024, ttl=64 |
| 37 | 1.235613 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 446 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=5/1280, ttl=64 |
| 46 | 1.241003 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=6/1536, ttl=64 |
| 47 | 1.241106 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=7/1792, ttl=64 |
| 48 | 1.241205 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=8/2048, ttl=64 |
| 49 | 1.241301 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=9/2304, ttl=64 |
| 50 | 1.241398 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=10/2560, ttl=64 |
| 51 | 1.241503 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 550 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=11/2816, ttl=64 |
| 55 | 1.241861 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=12/3072, ttl=64 |
| 56 | 1.241993 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 446 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=13/3328, ttl=64 |
| 58 | 1.242216 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 1094 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=14/3584, ttl=64 |
| 59 | 1.242327 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 446 | Echo (ping) reply id=0x4ec6, seq=15/3840, ttl=64 |

```
> Frame 1: 70 bytes on wire (560 bits), 70 bytes captured (560 bits) on interface \Device\NPF_{5C6E74AA-B49B-45C8-89A2-A155EF2A1C70}, id 0
> Ethernet II, Src: VMware_99:bf:31 (00:0c:29:99:bf:31), Dst: VMware_ee:a2:1c (00:0c:29:ee:a2:1c)
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.139.128, Dst: 192.168.139.130
> Internet Control Message Protocol
```

Рис. 4. Анализ трафика с помощью Wireshark при создании ICMP-туннеля.

Для наглядности отличия ICMP-туннеля от обычных ping-пакетов произведём анализ трафика при проверке доступности сервера с клиента с помощью стандартной процедуры ping, длительность обмена пакетами должна быть ограничена длительностью, которая получилась при анализе туннеля, т.е. 6,527 с. Скриншот программы при анализе трафика стандартной процедуры ping представлен на рисунке 5.

| No. | Time | Source | Destination | Protocol | Length | Info |
|-----|----------|-----------------|-----------------|----------|--------|---|
| 1 | 0.000000 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 98 | Echo (ping) request id=0x0007, seq=1/256, ttl=64 (reply in 2) |
| 2 | 0.000217 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 98 | Echo (ping) reply id=0x0007, seq=1/256, ttl=64 (request in 1) |
| 3 | 1.012636 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 98 | Echo (ping) request id=0x0007, seq=2/512, ttl=64 (reply in 4) |
| 4 | 1.012860 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 98 | Echo (ping) reply id=0x0007, seq=2/512, ttl=64 (request in 3) |
| 12 | 2.036363 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 98 | Echo (ping) request id=0x0007, seq=3/768, ttl=64 (reply in 13) |
| 13 | 2.036613 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 98 | Echo (ping) reply id=0x0007, seq=3/768, ttl=64 (request in 12) |
| 15 | 3.060390 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 98 | Echo (ping) request id=0x0007, seq=4/1024, ttl=64 (reply in 16) |
| 16 | 3.060755 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 98 | Echo (ping) reply id=0x0007, seq=4/1024, ttl=64 (request in 15) |
| 18 | 4.084054 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 98 | Echo (ping) request id=0x0007, seq=5/1280, ttl=64 (reply in 19) |
| 19 | 4.084273 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 98 | Echo (ping) reply id=0x0007, seq=5/1280, ttl=64 (request in 18) |
| 21 | 5.108705 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 98 | Echo (ping) request id=0x0007, seq=6/1536, ttl=64 (reply in 22) |
| 22 | 5.108889 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 98 | Echo (ping) reply id=0x0007, seq=6/1536, ttl=64 (request in 21) |
| 26 | 6.132447 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 98 | Echo (ping) request id=0x0007, seq=7/1792, ttl=64 (reply in 27) |
| 27 | 6.132657 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 98 | Echo (ping) reply id=0x0007, seq=7/1792, ttl=64 (request in 26) |
| 32 | 7.155842 | 192.168.139.128 | 192.168.139.130 | ICMP | 98 | Echo (ping) request id=0x0007, seq=8/2048, ttl=64 (reply in 33) |
| 33 | 7.156157 | 192.168.139.130 | 192.168.139.128 | ICMP | 98 | Echo (ping) reply id=0x0007, seq=8/2048, ttl=64 (request in 32) |

```
> Frame 1: 98 bytes on wire (784 bits), 98 bytes captured (784 bits) on interface \Device\NPF_{5C6E74AA-B49B-45C8-89A2-A155EF2A1C70}, id 0
> Ethernet II, Src: VMware_99:bf:31 (00:0c:29:99:bf:31), Dst: VMware_ee:a2:1c (00:0c:29:ee:a2:1c)
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.139.128, Dst: 192.168.139.130
> Internet Control Message Protocol
```

Рис. 5. Анализ трафика с помощью Wireshark при стандартной процедуре ping

Количество прошедших пакетов оказалось равным 16, что значительно меньше чем в ICMP-туннеле. Используются два типа сообщений – эхо-запрос и эхо-ответ, но, в отличие от туннеля, идёт строгое чередование запроса-ответа.

Чтобы подробнее рассмотреть различия трафиков, используем собранную статистическую информацию, значения различных параметров обоих захватов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение параметров ICMP-туннеля и процедуры ping

| Параметр | ICMP-туннель | Ping |
|-------------------------|--------------|--------|
| Число пакетов | 173 | 16 |
| Временной промежуток, с | 6.527 | 7.156 |
| В среднем, пакетов/с | 26.5 | 2.2 |
| В среднем, бит/с | 151k | 1.752k |

6. СРАВНЕНИЕ ПОТОКА ТУННЕЛЯ И СТАНДАРТНЫХ ПАКЕТОВ PING

В результате проведённой работы можно выделить сходства и различия двух потоков. Сходства:

1) Используются одинаковые типы сообщений. Так как в обоих случаях для передачи информации используется протокол ICMP, то и типы сообщений одинаковые: сообщения эхо-запроса (тип 8) и эхо-ответа (тип 0)

2) Адреса назначения и источника. Во всём трафике фигурируют два ip-адреса: 192.168.139.128 и 192.168.139.130. Данное сходство обусловлено тем, что ICMP-туннель организован между двумя устройствами и не включает в себя других устройств.

Различия:

1) Различное количество пакетов, передаваемых за одинаковый промежуток времени. Проведённый эксперимент показал, что среднее количество передаваемых пакетов в секунду различается в 12 раз, плотность трафика при организации ICMP-туннеля значительно больше.

2) Различия в порядке передаваемых пакетов. При использовании стандартной процедуры ping наблюдается чередование типов сообщений запрос-ответ, в ICMP-туннеле такое чередование нарушено.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что при необходимости возможна организация соединения через ICMP-туннель. По скорости передачи такой туннель будет уступать обычному соединению с использованием транспортных протоколов, также, такой туннель легко обнаружить, если анализировать трафик по количеству передаваемых ICMP-пакетов и чередованию типов сообщений.

ЛИТЕРАТУРА

- Фейт Сидни. TCP/IP Архитектура, протоколы, реализация. Казань.: Издательский дом Лори, 2000. – 101 с.
- Статья о ptunnel. <https://github.com/lnslblrty/ptunnel-ng>, 11.09.2020.
- Библиографическая ссылка. RFC 950 – 2008, J.C. Mogul, J. Postel, 1985. – 18 с.
- Батенков К.А. Обобщенный пространственно-матричный вид информационного показателя качества синтеза дискретных каналов связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 56–65.
- Батенков К.А. Модели системных характеристик линейных каналов связи на основе интегральных преобразований // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2012. – № 3 (4). – С. 120–125. URL: <http://journalmss.ru/wp-content/uploads/2013/01/3-4.pdf>.

6. Батенков К.А. Синтез детерминированных нелинейных дискретных отображений непрерывных каналов связи // Труды СПИИРАН. 2016. № 2 (45). С. 75–101.
7. Батенков К.А., Батенков А.А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости // Труды СПИИРАН. 2018. № 3 (58). С. 128–159.
8. Батенков К.А. Анализ статистики голосового трафика сети Ethernet с помощью программы Wireshark / Королев А.В., Миронов А.Е., Орешин А.Н. // Телекоммуникации. – 2018. – № 2. – С. 45–48.

REFERENCES

1. Faith Sidney. TCP / IP Architecture, protocols, implementation. Kazan: Lori Publishing House 2000. – 101 p.
2. An article about ptunnel. <https://github.com/lnslblrty/ptunnel-ng>, 11.09.2020.
3. Bibliographic reference. RFC 950 – 2008, J.C. Mogul, J. Postel, 1985. – 18 p.
4. Batenkov K.A. Generalized spatial matrix view of the information quality indicator of the synthesis of discrete communication channels // Bulletin of the Tula State University. Technical science. – 2014. – № 1. – С. 56–65.
5. Batenkov K.A. Models of system characteristics of linear communication channels based on integral transformations // Models, systems, networks in economics, technology, nature and society. – 2012. – № 3 (4). – С. 120–125. URL: <http://journalmss.ru/wp-content/uploads/2013/01/3-4.pdf>.
6. Batenkov K.A. Synthesis of deterministic nonlinear discrete mappings of continuous communication channels // Proceedings of SPIIRAS. 2016. № 2 (45). С. 75–101.
7. Batenkov K.A., Batenkov A.A. Analysis and synthesis of structures of communication networks by deterministic indicators of stability // Proceedings of SPIIRAS. 2018. № 3 (58). С. 128–159.
8. Batenkov K.A. Analysis of Ethernet voice traffic statistics using Wireshark / Korolev A.V., Mironov A.E., Oreshin A.N. // Telecommunications. – 2018. – № 2. – С. 45–48.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВЛЕНИЯ КАДРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МЕЖДУ АБОНЕНТСКИМИ СТАНЦИЯМИ В СИСТЕМЕ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

В. А. Цимбал¹, А. А. Парфентьев¹

¹Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого (ФВА РВСН), Серпухов, Российская Федерация

Аннотация. Исследуется процесс установления кадрового синхронизма между абонентскими станциями в системе декаметровой радиосвязи с вынесенным ретрансляционным пунктом. Подсистема кадровой синхронизации функционирует по способу временного многостанционного доступа. Для ввода абонентских станций в кадровый синхронизм используются шумоподобные сигналы.

Ключевые слова: система декаметровой радиосвязи, вынесенный ретрансляционный пункт, временной многостанционный доступ, подсистема кадровой синхронизации, шумоподобные сигналы, аналоговый согласованный фильтр.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF ESTABLISHING FRAME SYNCHRONIZATION BETWEEN SUBSCRIBER STATIONS IN THE DECAMETER RADIO COMMUNICATION SYSTEM

V. A. Tsymbal¹, A. A. Parfentev¹

¹ Branch of the military Academy of the Peter the Great RVSN (FVA RVSN), Serpukhov, Russian Federation

Abstract. The question of establishing personnel synchronism between subscriber stations in a decameter radio communication system with a remote relay station is investigated. The frame synchronization subsystem operates according to the method of temporary multi-station access. Noise-like signals are used to enter subscriber stations into frame synchronization.

Keywords: decameter radio communication system, remote relay station, temporary multi-station access, frame synchronization subsystem, noise-like signals, analog matched filter.

1. ВВЕДЕНИЕ

Декаметровый диапазон известен тем, что между зоной распространения земных волн и зоной, охватываемой распространением радиоволн, отражённых от ионосферы, ограниченной значениями критического угла, располагается зона, куда не доходят волны всех механизмов распространения (зона молчания). Радиосвязь между абонентскими станциями (AC), работающими в декаметровом диапазоне и расположенными в зоне на расстояниях 80...500 км друг от друга, осуществляется с большими трудностями. Низкие надёжность и помехоустойчивость радиоканала обусловлены известными свойствами распространения коротких волн [1, 2, 3]. Слоистая структура ионосферы, обеспечивающая отражение декаметровых радиоволн, приводит к различным видам многолучёвости, что существенно искажает импульсную характеристику декаметрового радиоканала. Кроме того, нестационарный характер ионосферы делает эту импульсную характеристику зависящей от времени. Оба данных фактора приводят к различным видам замираний сигналов на приёмной стороне и к изменению во времени параметров этих замираний [1, 2, 3]. На практике выделяют

общие замирания, замирания Релея, Райса, Накагами и др. Замирания существенно влияют на работоспособность декаметрового канала радиосвязи. В частности, они приводят к пакетам ошибок в передаваемом дискретном сообщении, а соответственно, и к перерывам связи. Учёт этого влияния осуществил Л.М. Финк путём введения коэффициента исправного действия (КИД) канала радиосвязи. Экспериментальные исследования эффективности на реальных трассах показали, что на трассе средней протяжённости 1500-2500 км присутствуют только медленные замирания (замирания Райса) [1, 2, 3]. Поэтому требование повышения надёжности декаметровой радиосвязи ведёт к необходимости АС связываться через вынесенный ретрансляционный пункт (ВРП) (с помощью ионосферной волны), расположенному на расстоянии, близком к оптимальному, и играющим роль центральной программно-управляющей, распределительной, регенерационной и контролирующей станции (рисунок 1).

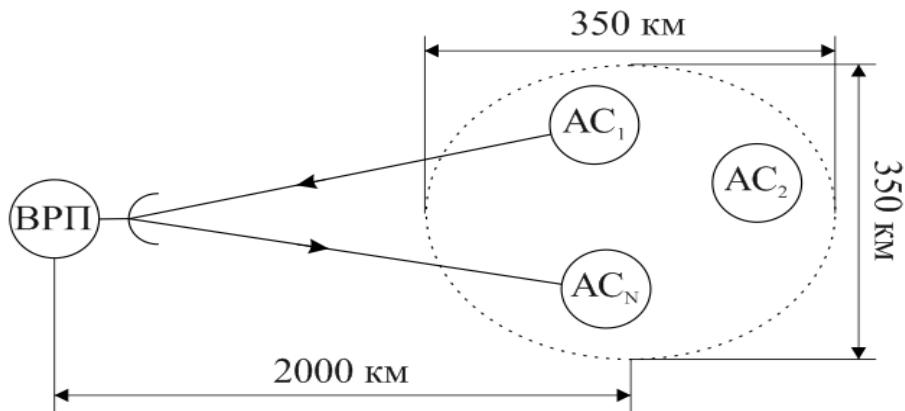


Рис. 1. Система декаметровой радиосвязи с ВРП

Однако, при использовании ВРП в зоне, в которой находятся несколько АС, необходимо обеспечить одновременный доступ всех АС к ВРП. Наиболее предпочтительным видом многостанционного доступа к ВРП в декаметровом диапазоне является временной многостанционный доступ (ВМСД), так как он требует использования всего лишь двух частот (одной на приём, одной на передачу). Организация ВМСД, в свою очередь, требует решения вопроса кадровой синхронизации. Ввод в кадровый синхронизм предлагается осуществлять с помощью выдачи с ВРП всем АС сигнала кадровой синхронизации (СКС), получив который каждая АС сможет сформировать кадровую последовательность по приёму, а кадровую последовательность по передаче – с помощью учёта времени задержки распространения сигнала о ВРП к АС.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

В качестве СКС системе декаметровой радиосвязи с ВРП предлагается использовать шумоподобные (широкополосные) фазоманипулированные сигналы (ШПС-ФМ). ШПС обеспечивают высокую временную точность выделения СКС, а следовательно, точность синхронизации АС с кадровой последовательностью ВРП; высокую вероятность выделения СКС на фоне шумов и помех; низкую вероятность ложного формирования СКС из шумов и помех [4, 5].

Следует отметить, что на приёмной стороне АС может произойти пропуск СКС, а также случай ложной синхронизации, вызванный случайными и преднамеренными помехами. На рисунке 2 представлена диаграмма состояний и переходов процесса приёма СКС на АС.

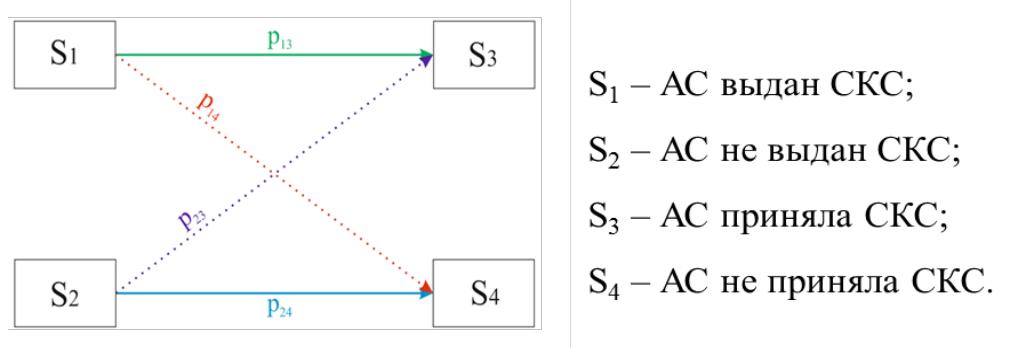


Рис. 2. Диаграмма состояний и вероятностей переходов процесса приёма СКС на АС

Вероятность несинхронизации согласно диаграмме (рисунок 2) равна

$$Q_{общ} = \frac{p_{14} + p_{23}}{n}, \quad (1)$$

где p_{14} - вероятность пропуска СКС (Q_{np}^{OL}), а p_{23} - вероятность ложного формирования (ЛФ) СКС, определяемая фактом ЛФ СКС от БГШ ($Q_{лф}^{БГШ}$) при отсутствии СКС и фактом ЛФ СКС от смеси боковых лепестков и БГШ ($Q_{лф}^G$) при наличии СКС, n - число событий ($n = 2$) [6].

Соответственно вероятность кадровой синхронизации (КС) рассчитывается по выражению

$$P_{KC} = 1 - Q_{общ}. \quad (2)$$

На рисунке 3 представлена ПКС, построенная на основе аналогового согласованного фильтра (АСФ). Данная ПКС содержит приёмное устройство (ПРМУ), анализатор отношения сигнал/шум (Анализатор h_0^2), АСФ, вычислитель порога (Вычислитель U_n), пороговое устройство (ПУ), генератор сигнала кадра (ГСК), временной распределитель.

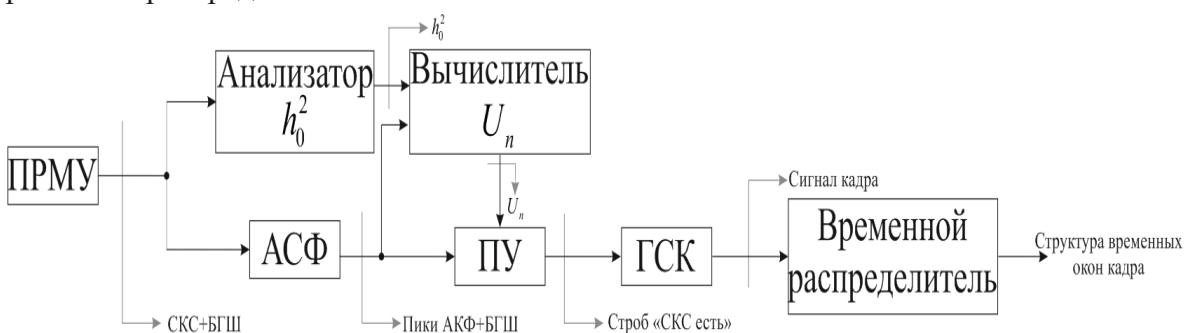


Рис. 3. Структура ПКС с АСФ

Анализатор отношения сигнал/шум на основе анализа смеси СКС+БГШ формирует величину h_0^2 , и выдаёт её в вычислитель порога для нахождения оптимального U_n^* . Если на вход ПРМУ поступает один повтор СКС на фоне БГШ, то на выходе АСФ имеются пики (G - боковых и основной) непериодической автокорреляционной функции (НАКФ) СКС на фоне БГШ. Вид ШПС-ФМ и его НАКФ показаны в виде временных диаграмм на рисунке 4.

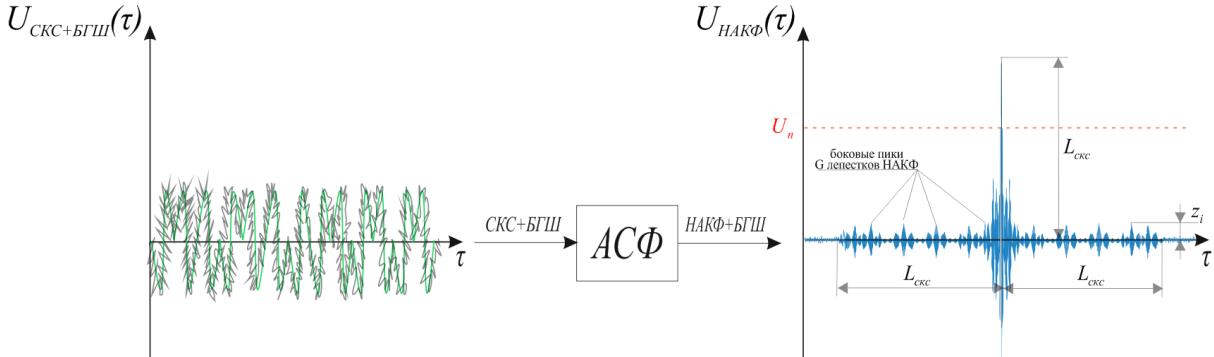


Рис. 4. - СКС и БГШ на входе/выходе АСФ
(000001101100110011101011111011010001000010110010101001001111)

В качестве СКС в данном случае используется 63-разрядная М-последовательность.

Ключевым параметром, определяющим факт наличия/отсутствия СКС по отклику на выходе АСФ, является порог срабатывания U_n ПУ. Так как на входе ПУ всегда имеется БГШ, вынесение решения о приёме СКС (а соответственно, кадровой синхронизации) должно осуществляться на основе теории случайных процессов [6]. Тогда, если смесь «лепестки НАКФ+БГШ» превысит порог U_n при наличии СКС, то будет принято решение о наличии СКС (ПУ в момент превышения порога выдаст сигнал-строб «СКС есть» - верная синхронизация). Данный строб запускает ГСК, который формирует кадровую последовательность «по приёму/передаче», при этом временной распределитель выдаёт структуру кадра в нужные блоки ПРМУ и ПРДУ.

Если смесь «лепестки НАКФ+БГШ» не превысит порог U_n , то ПУ не выдаст сигнал «СКС есть» (пропуск СКС). Если БГШ превысит порог U_n при отсутствии СКС, то будет принято решение о наличии СКС (ПУ выдаст сигнал «СКС есть» - ложная синхронизация).

Отметим, что в момент превышения порога U_n ПУ выдаёт сигнал (строб) «СКС есть», который поступает в ГСК. При этом ГСК формирует кадровую последовательность, начало которой определяется стробом. Кадровая последовательность поступает во временной распределитель, который формирует во временные окна (ВО) кадра, назначенные данной АС, синхросигналы, активизирующие блоки, обеспечивающие ведение информационного обмена данной АС.

Наиболее опасными случаями в работе ПКС являются случай ложной синхронизации и случай пропуска СКС. Общий результат проявления данных случаев будем называть несинхронизацией АС. Вероятность ложного формирования СКС

определяется ложным формированием СКС от БГШ ($Q_{\text{лф}}^{\text{БГШ}}$) в случае отсутствия СКС, или ложным формированием СКС от смеси боковых лепестков и БГШ ($Q_{\text{лф}}^G$) в случае наличия СКС.

Пусть на выходе АСФ имеется случайный процесс (НАКФ+БГШ). В ПУ устанавливается порог, превышение которого свидетельствует о приёме СКС или ложного СКС. Однако, в момент превышения порога в сечении «поперёк» случайного процесса имеется случайная величина, распределённая по закону смеси НАКФ+БГШ, при этом НАКФ есть детерминированная составляющая, определяющая математическое ожидание смеси в сечении. БГШ является случайным процессом, распределённым по нормальному закону с нулевым средним. Тогда вероятность непревышения сигналом КС установленного порогового значения в АСФ $Q(U < U_n)$ можно найти по табулированной функции Лапласа [6].

$$\Phi(U_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U_n} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \text{ где } t = \frac{U_n - m}{\sigma}, \quad (3)$$

где U_n - пороговое значение, выставляемое в ПУ, m - математическое ожидание смеси на выходе АСФ, σ - среднеквадратическое отклонение смеси НАКФ и БГШ.

Вероятность ввода АС в КС находится по выражению (2).

Вероятность несинхронизации находится по выражению (1), где $Q_{\text{лф}} = Q_{\text{лф}}^{\text{БГШ}}$ - в случае отсутствия СКС, $Q_{\text{лф}} = Q_{\text{лф}}^G$ - в случае наличия СКС.

Найдём вероятность ЛФ КС из БГШ ($Q_{\text{лф}}^{\text{БГШ}}$). Введём U_n как долю от максимума ОЛ в виде величины $k (0 \leq k \leq 1)$. Тогда:

$$Q_{\text{лф}}^{\text{БГШ}} = 1 - Q_{\text{непр.пор.}}^{\text{БГШ}} = 1 - \Phi[k \sqrt{2L_{\text{скс}} h_0^2}], \quad (4)$$

где $L_{\text{скс}}$ - длина СКС, h_0^2 - отношение сигнал/шум на входе АСФ.

Найдём вероятность пропуска КС ($Q_{\text{пр}}^{\text{ОЛ}}$):

$$Q_{\text{пр}}^{\text{ОЛ}} = \Phi[(k-1) \sqrt{2L_{\text{скс}} h_0^2}]. \quad (5)$$

Найдём вероятность ЛФ КС из одного лепестка НАКФ СКС ($Q_{\text{лф}}^g$):

$$Q_{\text{лф}}^g = 1 - Q_{\text{непр.пор.}}^g = 1 - \Phi[(k - \frac{z_i}{L_{\text{скс}}}) \sqrt{2L_{\text{скс}} h_0^2}], \quad (6)$$

где z_i - значение пика БЛ.

Определив вероятность ЛФ КС на каждом БЛ НАКФ, можно найти вероятность ЛФ КС на всех лепестках НАКФ ($Q_{\text{лф}}^G$) [6]:

$$Q_{\text{лф}}^G = 1 - \prod_{g=1}^G (1 - Q_{\text{лф}}^g), \quad (7)$$

где G - количество БЛ в НАКФ.

Следовательно, вычислив вероятность несинхронизации, можно найти вероятность ввода в КС АС (выражение 2). Изменяя уровень порога, можно

регулировать вероятность ЛФ КС и вероятность пропуска КС. Так, при увеличении порога вероятность ЛФ КС уменьшается, а вероятность пропуска увеличивается и, соответственно, при уменьшении порога вероятность ЛФ КС увеличивается, а вероятность пропуска уменьшается.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рисунке 5 представлен график зависимости вероятности КС ПКС от отношения сигнал/шум на входе ПРМУ при обработке СКС с помощью АСФ. Учтём, что минимально достаточное отношение сигнал/шум равно: 0,01...2 раза.

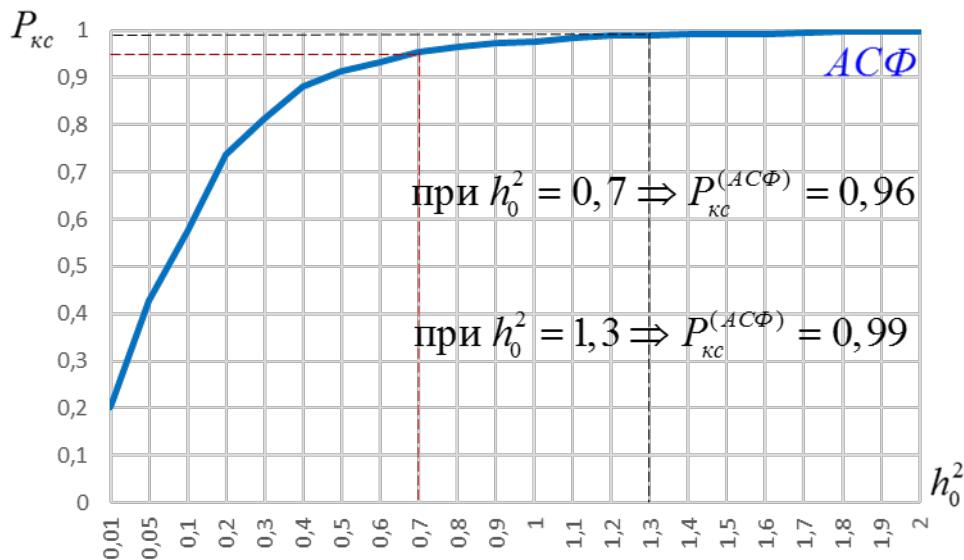


Рис. 5. График зависимости вероятности КС от отношения сигнал/шум при обработке СКС АСФ

Из графика следует, что при отношении сигнал/шум $h_0^2 = 0,7$ вероятность КС равна $P_{kc}^{AC\Phi} = 0,96$. Однако, для систем кадровой синхронизации приемлемым значением вероятности ввода в кадровый синхронизм является 0,99. В связи с этим на приёмной стороне необходимо обеспечить значение отношения сигнал/шум не менее 1,3 раза для достижения требуемой вероятности ввода в кадровый синхронизм АС.

Таким образом, на базе данного исследования можно сформулировать задачу по поиску оптимальных значений подсистемы кадровой синхронизации системы ДКМВ радиосвязи с ВРП и ВМСД.

ЛИТЕРАТУРА

- Головин, О.В. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / О. В. Головин, С. П. Простов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 598 с.
- Чернов Ю.А. Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 668 с.
- Березовский В.А., Дулькейт И.В. Современная декаметровая радиосвязь. М.: Радиотехника, 2011. – 441 с.
- Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестопалов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью. Для научных работников, аспирантов, инженеров и студентов вузов,

- специализирующихся в области исследований и разработки помехозащищенных систем радиосвязи. – М.: РадиоСофт, 2011. – 550 с.
5. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботырев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. – СПб.: Наука и техника, 2005. – 400 с.
 6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – Учеб. Пособие для втузов. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.

REFERENCES

1. Golovin, O. V. Systems and devices of short-wave radio communication / O. V. Golovin, S. P. Prostov. - M.: Hotline-Telecom, 2006. - 598 p.
2. Chernov Yu. A. Special issues of radio wave propagation in communication and radio broadcasting networks. Moscow: TECHNOSPHERE, 2018 – 668 p.
3. Berezovsky V. A., Dulkeit I. V. Modern decameter radio communication. Moscow: Radio Engineering, 2011 – 441 p.
4. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E., Shestopalov V. I. Noise immunity of radio communication systems with spectrum expansion by direct modulation by a pseudorandom sequence. For researchers, postgraduates, engineers and university students specializing in the research and development of noise-proof radio communication systems. - Moscow: RadioSoft, 2011. - 550 p.
5. Gantmacher V. E., Bystrov N. E., Chebotyrev D. V. Noise-like signals. Analysis, synthesis, processing. - St. Petersburg: Science and Technology, 2005. - 400 p.
6. Wentzel E. S., Ovcharov L. A. The theory of random processes and its engineering applications. - Study. Manual for vtuzov – 2nd ed., ster. - M.: Higher School, 2000 – 383 p.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВОЙСТВ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ И МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ВИТЕРБИ

Ю. Ю. Синицын, А. Б. Сизоненко

Краснодарское высшее военное училище, Краснодар, Россия

Аннотация. Система передачи данных цифровых систем радиосвязи требует обеспечения высоких показателей надежности и качества передачи информации. Тактовая рассинхронизация при передаче данных ведет к искажению и потере данных. Восстановление синхронизации предлагается при помощи свойств сверточных кодов и модифицированного алгоритма декодирования по Витерби.

Ключевые слова: система синхронизации, проскальзывания, сверточные коды, алгоритм Витерби, восстановление кадра данных.

MATHEMATICAL MODEL OF SYNCHRONIZATION RECOVERY BASED ON THE PROPERTIES OF CONVENTIONAL CODES AND THE MODIFIED VITERBIE ALGORITHM

Y. Y. Sinitsyn, A.B.Sizonenko

Krasnodar Higher Military School, Krasnodar, Russia

Abstract. The data transmission system of digital radio communication systems requires high reliability and quality of information transmission. Clock desynchronization during data transmission leads to distortion and loss of data. Synchronization recovery is proposed using the properties of convolutional codes and a modified Viterbi decoding algorithm.

Keywords: synchronization system, slippage, convolutional codes, Viterbi algorithm, data frame recovery.

1. ВВЕДЕНИЕ

Синхронизация цифровых систем радиосвязи – основа их нормальной работы. При восстановлении сигнала важна не только его форма, но и момент его детектирования приемником. Поэтому работа всех участников радиосвязи должны быть синхронной.

Если на передающем и принимающем узлах частоты источников тактовой синхронизации (хронирующих источников, или таймеров) не совпадают, за определенное время накапливается ошибка временного интервала, равная разности момента прихода импульса цифровой последовательности и момента генерации импульса источником тактовой синхронизации принимающего узла.

Частота местного источника тактовой синхронизации может быть выше или ниже частоты принимаемой последовательности. В зависимости от этого, когда ошибка временного интервала становится соизмеримой с длиной тактового интервала, происходит либо пропадание одного импульса, либо формирование лишнего – что приводит к срыву синхронизации. Данное явление называют проскальзыванием, при передаче данных они приводят к нарушению связи.

Для временной синхронизации цифровых систем радиосвязи используется служба единого скоординированного времени (UTC) или единый источник синхронизации, например, навигационные данные системы GPS/ ГЛОНАСС [1].

На рисунке 1 показана система синхронизации цифровых систем радиосвязи по сигналам спутниковых радионавигационных систем [2].

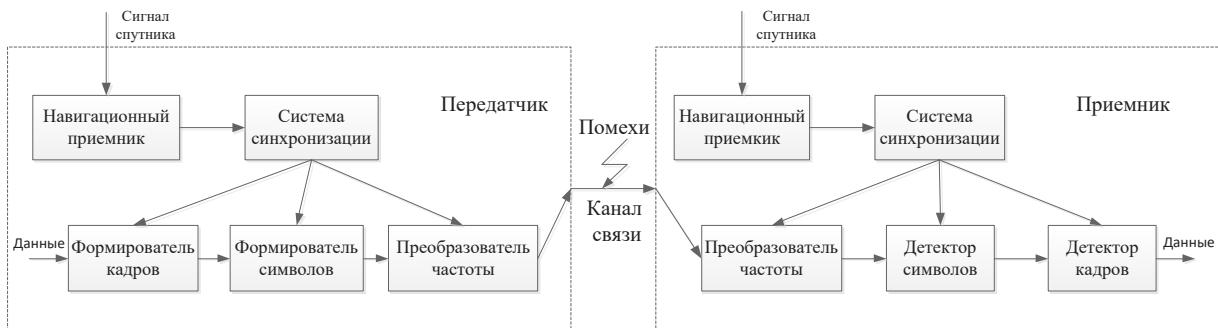


Рис. 1. Система синхронизации по сигналам спутниковых радионавигационных систем

При сбоях сигналов со спутниковых радионавигационных систем, работа системы синхронизации осуществляется от внутренних источников синхронизации цифровых систем радиосвязи. Точность поддержания частоты синхронизации от первичных эталонных генераторов спутниковых радионавигационных систем 10^{-11} . Точность поддержания частоты синхронизации от внутренних задающих генераторов 10^{-8} . Синхронизация от внутренних задающих генераторов увеличит частоту проскальзываний, что ухудшит качество передачи данных [1].

Влияние проскальзываний на передачу цифровых данных зависит от используемого протокола передачи данных. В протоколах, не предусматривающих возможности повторной передачи, возможны пропуски, повторения или искажения данных.

При цифровой передаче изображений проскальзывания обычно вызывают искажение части изображения или его «замораживание» на время до 6 секунд.

Наибольшее влияние проскальзывания оказывают при предоставлении услуг по передаче шифрованных данных. Проскальзывание приводит к потере ключа шифрования. Потеря ключа приводит к недоступности переданных данных до повторной передачи ключа и повторного осуществления связи. Поэтому вся связь останавливается. Необходимость в ретрансляции ключа значительно влияет на безопасность [3].

2. СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯМИ

Для решения проблемы синхронизации цифровых систем радиосвязи используются устройства с эластичной памятью, в которых по тактовой частоте осуществляется запись переданного сигнала, по тактовой частоте генератора приемника происходит его считывание. Устройство с эластичной памятью используется для долгого хранения сигналов цифровой системы связи, эластично изменяясь для компенсации задержек во времени прохождения цифрового сигнала. Кратковременные

отклонения тактовой частоты компенсируются с помощью эластичной памяти. Данный вид памяти становится малоэффективным при наличии пусть и небольших, но продолжительных отклонений в синхронизации устройств. Это связано с тем, что такая память переполняется или опустошается в зависимости от соотношения тактовых частот [5].

Также в цифровых системах радиосвязи используется способ частичного восстановления данных, после обнаружения проскальзывания при помощи бит синхронизации.

Кадр представляет собой матрицу из строк и столбцов. Полезные данные D обрамляются служебными С или Т. Порядок следования бит во времени: слева – направо, сверху – вниз.

Первым передается флаг начала кадра – уникальная комбинация, состоящая из нулей. Биты первого столбца называются битами синхронизации и состоят из единиц. Кадры последовательно передаются в канал связи. Получатель кадра распознает флаг начала и приступает к приему данных. Если ошибок нет, то полезные данные извлекаются из кадра, преобразуются в равномерный поток отсчетов, совпадающий с исходным.

В результате проскальзывания может появиться лишний бит или исчезнуть один из имевшихся бит, что искажает кадр не только по содержанию, но и по форме (рисунок 2). Большинство подобных ошибок проявляется в том, что по крайней мере один из бит синхронизации приобретает неправильное значение.

Рис. 2. Структура кадра с удаленным битом данных.

При обработке кадра устройство управления (процессор) пытается реконструировать кадр. Прежде чем перейти к процедуре реконструкции кадра, процессор оценивает шансы на успех. Вероятность правильного применения коррекции зависит от номера строки, в которой обнаружен первый ошибочный бит синхронизации. Возможен отказ выполнения процедуры реконструкции кадра, при малой вероятности правильного применения коррекции [6].

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ВИТЕРБИ

Для восстановления данных, искаженных проскальзываниями предлагается использовать сверточное кодирование и декодирование по алгоритму Витерби. Сверточные коды широко применяют среди кодов, исправляющих ошибки. Одним из методов декодирования сверточных кодов является алгоритм Витерби.

Данный алгоритм осуществляет поиск наиболее подходящего списка состояний, которые имеют наибольшую вероятность произошедших событий. Алгоритм Витерби основан на методе максимального правдоподобия. На каждом такте декодирования для каждой ветви решетки кода вычисляется метрика – число, характеризующее степень отличия бит, генерируемых данной ветвью от принятого кодового слова. Ошибка по каждой ветви служит метрикой расстояния Хэмминга и соответствует числу отличающихся от требуемых принятых символов. Суммарная метрика по каждому из возможных путей определяется как метрика путей. Алгоритм Витерби выбирает путь с наименьшей суммарной метрикой и отбрасывает остальные пути.

Для восстановления кадра с удаленным или добавленным битом данных после проскальзывания предлагается использовать модифицированный алгоритм декодирования Витерби представленный на рисунке 3.

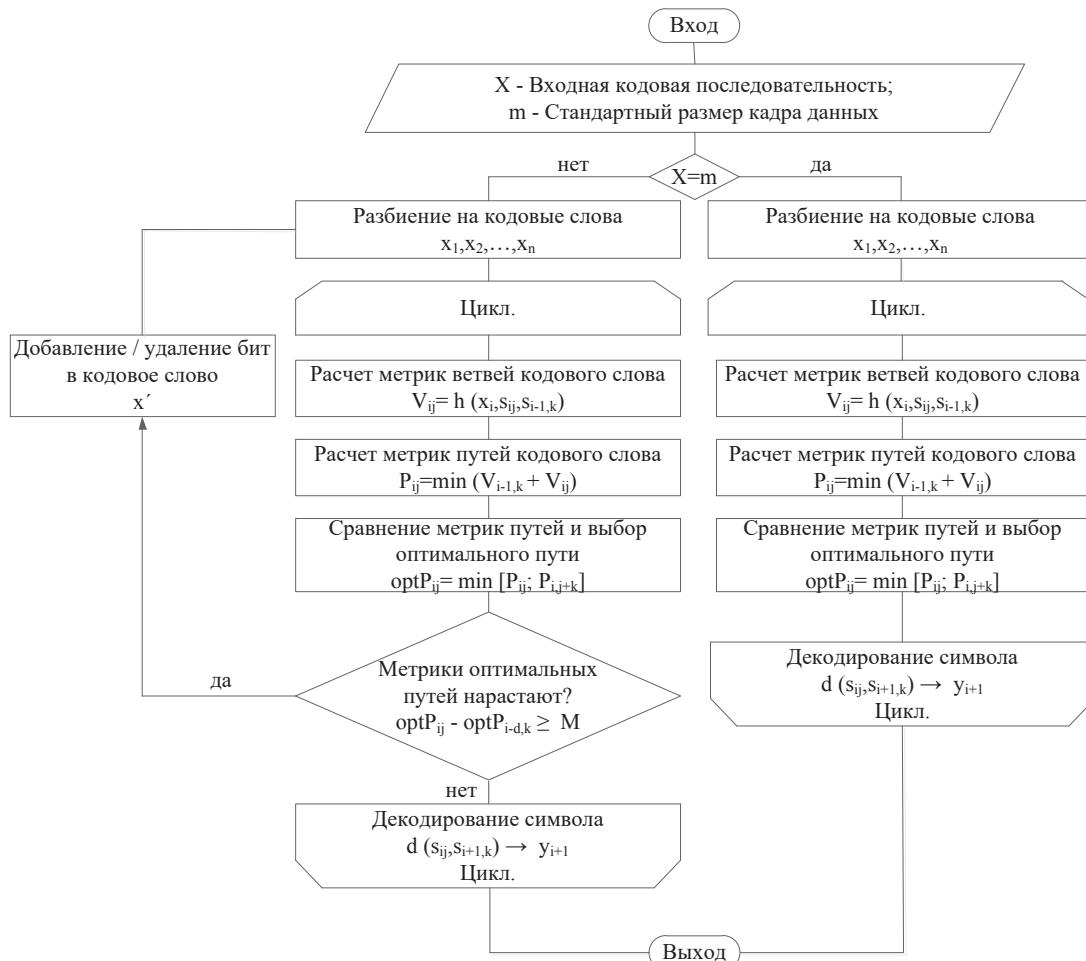


Рис. 3. Модифицированный алгоритм Витерби.

На вход приемника поступает входная кодовая последовательность X , состоящая из кодовых слов.

Количество бит поступившей кодовой последовательности сравнивается со стандартным размером кадра данных. При совпадении размеров происходит декодирование по классическому алгоритму Витерби.

При несовпадении кодовой последовательности со стандартным размером кадра данных декодирование происходит по модифицированному алгоритму.

Кодовая последовательность разбивается на кодовые слова x_1, x_2, \dots, x_n . За каждый такт декодирования t_1, t_2, \dots, t_n определяется наиболее вероятный путь перехода по решетчатой диаграмме на рисунке 4.

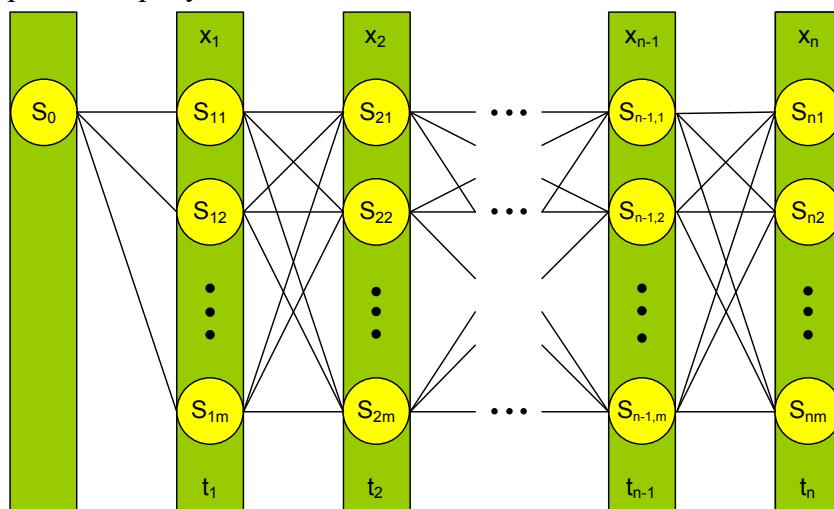


Рис. 4. Решетчатая диаграмма модифицированного алгоритма Витерби.

Расчет метрик ветвей кодового слова осуществляется как расстояние Хемминга – степень отличия бит двух кодовых слов одинаковой длины, по числу позиций, в которых соответствующие символы различны (1).

$$V_{ij} = h(x_i, s_{ij}, s_{i-1,l}) \quad (1)$$

Расчет метрик путей кодового слова определяется на основании наименьшего значения суммы метрик путей, входящих в состояние s_{ij} (2).

$$P_{ij} = \min (V_{i-1,k} + V_{ij}) \quad (2)$$

Сравнение метрик путей и выбор оптимального пути осуществляется на основании сравнения всех значений метрик путей P_{ij} для такта t_i (3).

$$\text{opt}P_{ij} = \min [P_{ij}; P_{ij+k}] \quad (3)$$

Оптимальный путь выбирает наиболее вероятный переход из состояния s_{ij} в состояние $s_{i+1,k}$ на решетчатой диаграмме, которое имеет однозначное отображение в декодированный символ y_{i+1} .

Для обнаружения места удаленного или добавленного бита информации введем коэффициент нарастания метрик пути M . Сравнение нарастания метрик оптимального пути с коэффициентом M будем производить с шагом длины d , равной длине кодового ограничения сверточного кода (4).

$$\text{opt}P_{ij} - \text{opt}P_{i-d,k} \geq M \quad (4)$$

Если нарастание метрик пути больше значения критерия M , то происходит остановка процесса декодирования, возвращение в состояние $s_{i-d,k}$ вставка

произвольного бита данных x' , возврат в состояние $s_{i-2d,j}$ и дальнейшее декодирование по классическому алгоритму Витерби.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сбои в работе систем синхронизации приводят к удалению или добавлению лишних символов кодовой последовательности. Способы устранения рассинхронизации, используемые в современных цифровых системах радиосвязи, не способны в полной мере определить место удаленного или добавленного бита информации. Уменьшить влияние проскальзываний в цифровых системах радиосвязи возможно, используя свойства сверточных кодов. Модификация алгоритма декодирования сверточных кодов по Витерби, на основе анализа интенсивности нарастания метрик путей позволит определить место удаленного или добавленного бита и осуществить восстановление кадра данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слепов Н.Н. Синхронизация цифровых сетей. Методы, терминология, аппаратура. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2002, №2. – С. 24-29.
2. Боев Н.М. Синхронизация цифровых систем связи по сигналам спутниковых радионавигационных систем. <https://uav-siberia.com/news/sinkhronizatsiya-tsifrivykh-sistem-svyazi-po-signalam-sputnikovykh-radionavigatsionnykh-sistem>, 17.08.2021.
3. Синхронизация телекоммуникационных сетей. <https://www.unitest.com>, 23.08.2021.
4. Никитин Г.И. Сверточные коды. СПбГУАП. СПб: 2001. – 80 с.
5. Синицын Ю.Ю., Сизоненко А.Б. Использование свойств сверточных кодов при проскальзываниях цифрового сигнала в системе передачи данных комплексов с беспилотными летательными аппаратами. // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения, 2020, – С. 23-26.
6. Сухман С.М., Бернов А.В., Шевкопляс Б.В. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений. – 260 с.
7. Синицын Ю.Ю., Сизоненко А.Б. Восстановление синхронизации при расшифровании сообщений с использованием модифицированного алгоритма декодирования по Витерби. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 3. – С. 36-43.

REFERENCES

1. Slepov N.N. Synchronization of digital networks. Methods, terminology, equipment. // Electronics: Science, Technology, Business, 2002, №2. - p. 24-29.
2. Boev N.M. Synchronization of digital communication systems using signals from satellite radio navigation systems. <https://uav-siberia.com/news/sinkhronizatsiya-tsifrivykh-sistem-svyazi-po-signalam-sputnikovykh-radionavigatsionnykh-sistem>, 17.08.2021.
3. Synchronization of telecommunication networks. <https://www.unitest.com>, 23.08.2021.
4. Nikitin G.I. Convolutional codes. SPbGUAP. SPb: 2001. - 80 p.
5. Sinitsyn Y.Y., Sizonenko A.B. Using the properties of convolutional codes for slippage of a digital signal in the data transmission system of complexes with unmanned aerial vehicles. // Science and innovation in the XXI century: topical issues, discoveries and achievements, 2020, - p. 23-26.
6. Sukhman S.M., Bernov A.V., Shevkoplyas B.V. Synchronization in telecommunication systems. Analysis of engineering solutions. - 260 p.
7. Sinitsyn Y.Y., Sizonenko A.B. Restoring synchronization when decrypting messages using a modified Viterbi decoding algorithm. // News of higher educational institutions. Volga region. Technical science. 2020. No. 3. - p. 36-43.

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ OFDM СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ РАДИОМОНИТОРИНГА

И. В. Житков, А. Н. Абакумов, Р. Р. Саньев

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13

Аннотация. Статья посвящена разработке метода оценивания параметров OFDM сигналов в современных системах связи и передачи данных в условиях априорной параметрической неопределенности сигналообразования. Разработанный метод учитывает особенности формирования и применения OFDM сигналов, проявляющиеся в формах абсолютного значения автокорреляционной функции сигнала и особенностях спектра OFDM сигналов. Применение разработанного метода, позволяет оценить такие параметры сигналов источников радиоизлучений (ИРИ) как: число поднесущих частот, частоту дискретизации формирования OFDM сигнала, длину OFDM слова и его префикса.

Ключевые слова: OFDM; сигналообразование; АКФ.

METHOD FOR ESTIMATING THE PARAMETERS OF OFDM SIGNALS IN RADIO MONITORING CONDITIONS

I.V. Zhitkov, A.N. Abakumov, R.R. Saniev

Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,
197198, St. Petersburg, st. Zhdanovskaya, 13

Abstract. The article is devoted to the development of a method for estimating the parameters of OFDM signals in modern communication and data transmission systems under conditions of a priori parametric uncertainty of signal formation. The developed method takes into account the features of the formation and application of OFDM signals, manifested in the forms of the absolute value of the autocorrelation function of the signal and the features of the spectrum of OFDM signals. The application of the developed method allows us to estimate such parameters of signals of radio emission sources (IRI) as: the number of subcarrier frequencies, the sampling frequency of the formation of the OFDM signal, the length of the OFDM word and its prefix.

Keywords: OFDM; signal generation; ACF.

1. ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития современных систем связи и передачи данных характеризуются внедрением принципов сигналообразования, позволяющих повысить эффективность использования частотно-временного ресурса каналов. Одним из них является использование OFDM-модуляции (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) [2,7].

Несмотря на то, что теоретические основы формирования OFDM сигналов выработаны в середине прошлого века, сложность реализации OFDM модемов на основе аналоговых преобразований не способствовала их внедрению. В настоящее время активное развитие вычислительных систем и методов цифровой обработки сигналов привело к широкому применению сигналов с OFDM в системах связи и передачи данных различного назначения. Например, такие сигналы широко

применяются для организации связи в условиях замираний и многолучевого распространения радиоволн [4], характерных для коротковолнового диапазона частот, а также городской и горной местностей. Стоит отметить, что сигналы с OFDM широко используются при организации радиосвязи и передачи данных с использованием стандартов DVB-T, LTE, Wi-Fi, WiMAX [10].

Современные условия радиомониторинга характеризуются многообразием вариантов сигналообразования с OFDM-модуляцией, использование которых, например для диапазонов частот Wi-Fi, WiMAX документально не регламентируется [8]. В данных условиях задача радиомониторинга по выявлению не легитивных пользователей ресурса требует контроля электромагнитной обстановки, которой должна предшествовать процедура устранения неопределенности относительно параметров сигналов.

Анализ публикаций отечественных и зарубежных авторов в данной предметной области свидетельствует о значительном числе работ посвященных вопросам оценивания различных параметров сигналов OFDM, их применение в задачах радиомониторинга требует обобщения [6,11].

Цель статьи состоит в обосновании функционального содержания процедур оценивания параметров OFDM сигналов в условиях априорной неопределенности сигналообразования.

2. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ OFDM СИГНАЛОВ

Процедура формирования сигналов с OFDM-модуляцией отличается от методов формирования сигналов с традиционными видами модуляции (ФМн, КАМ, АФМ и т.д.) [5] применением обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), позволяющего разделить поступающий цифровой поток на множество ортогональных каналов (рисунок 1).

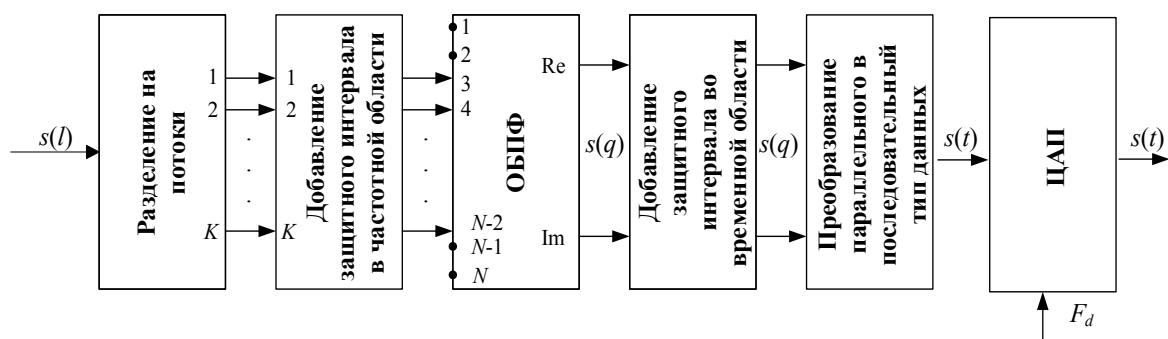


Рис. 1. Структурная схема формирователя OFDM сигналов

На вход формирователя сигналов поступает цифровой поток (информационная последовательность) $s(l)$, где l – номер элемента последовательности, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$; L – число элементов последовательности. На первом этапе входной поток накапливается и поступает на выход в параллельном виде по $K = N - 2k_{заш}$ элементов, ($K > N/2$), где

$N = 2^n$ – общее число каналов (поднесущих частот) OFDM сигнала, n – натуральное число, $k_{заш}$ – число защитных каналов (неиспользуемых поднесущих частот). Кратность общего числа ортогональных каналов N степени двойки обусловлена наличием этапа обработки, содержащего ОБПФ.

Заданные каналы представляют собой неиспользуемые каналы (поднесущие частоты) двух защитных интервалов, расположенных симметрично по краям спектра группового сигнала (рисунок 2). Их применение в частотной области обусловлено борьбой с возможными искажениями сигналов.

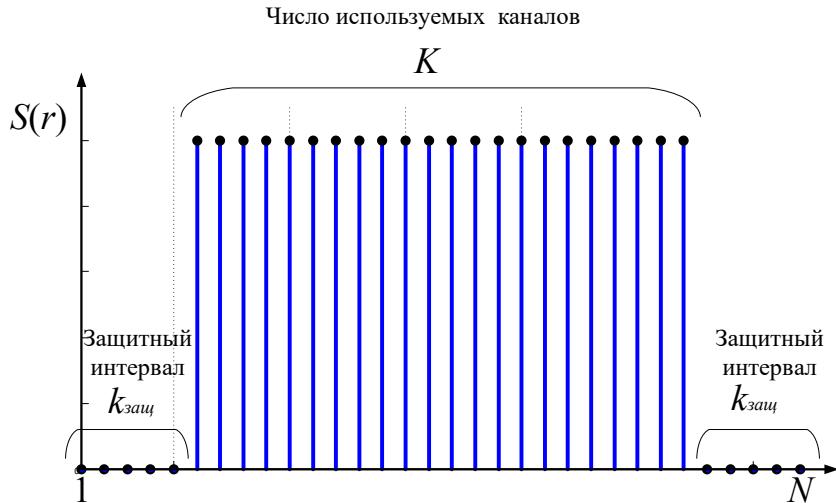


Рис. 2. Схема амплитудного спектра OFDM сигналов

Модуляционные символы по K каналам с выхода блока канального кодирования в сопровождении $2k_{заш}$ элементов защитных каналов формируют N элементов, которые поступают на вход блока ОБПФ, формирующего групповой сигнал во временной области. Сформированный групповой OFDM сигнал характеризуется сильным перекрытием спектров соседних поднесущих. Ортогональность цифровых данных, передаваемых на соседних поднесущих, обеспечиваемая процедурой ОБПФ, приводит к эффекту отсутствия взаимного влияния поднесущих друг на друга.

В целях снижения межсимвольной интерференции при формировании сигналов с OFDM защитные интервалы используются и во временной области. На практике наибольшее применение получил защитный интервал (циклический префикс), формируемый путем копирования конца OFDM слова. При этом длительность защитного интервала T_{up} определяется исходя условий распространения, но всегда длительности информационной части $T_{инф}$ кратна значению длительности защитного интервала T_{up} , что аналитически описывается следующим образом:

$$T_{up} = d_{up} \cdot T_{инф} \quad (1)$$

где d_{up} – коэффициент избыточности во временной области,
 $d_{up} \in \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \dots \right\}$.

Принцип формирования защитного интервала во временной области в OFDM-сигналах представлен на рисунке 3.

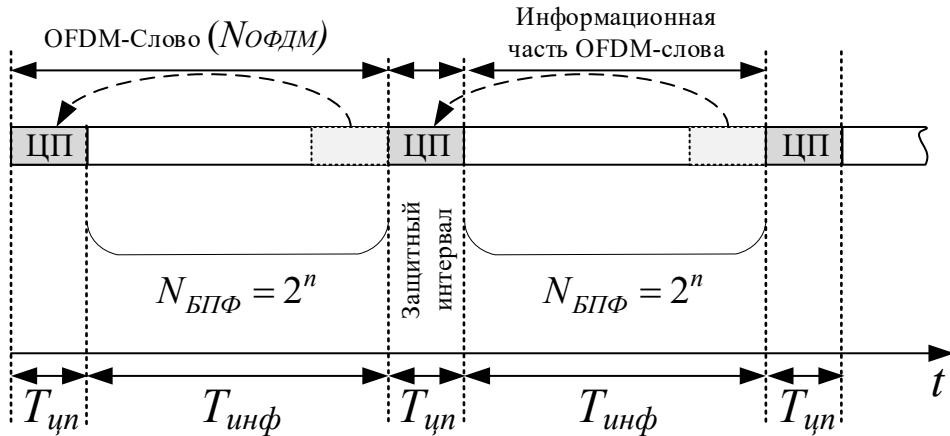


Рис. 3. Принцип формирования защитного интервала в OFDM сигналах

Последним этапом формирования OFDM сигнала является ЦАП, формирующее передаваемый аналоговый сигнал:

$$\dot{U}_0(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \bullet a_k e^{j2\pi f_k t} \quad (2)$$

Таким образом сформированный OFDM сигнал можно представить следующим выражением:

$$\dot{U}(t) = e^{j2\pi f_{nec} t} \sum_{k=0}^{N-1} \bullet a_k e^{j2\pi f_k t}; -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (3)$$

где $j = \sqrt{-1}$, f_k - несущая частота канала, a_k - комплексный информационный символ определяющий амплитуду и фазу k -ой поднесущей, T – длительность интервала наблюдения, ($T >> T_{инф}$).

Сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием широко применяются как в современных системах фиксированной связи [1], так и в системах связи с мобильными объектами [11]. Большое многообразие значений параметров процедур сигналообразования, используемых при синтезе OFDM сигналов, обуславливают высокую степень актуальности задач оценивания их параметров в условиях функционирования комплексов радиомониторинга. Например, в работах [3,6] рассмотрены вопросы оценивания длительности OFDM символов, числа ортогональных поднесущих колебаний в составе OFDM сигнала, размера циклического префикса, интервала дискретизации. Полученные авторами результаты составляют теоретические предпосылки для устранения априорной неопределенности относительно частотно-временной структуры сигналов.

3. МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ OFDM СИГНАЛОВ

На первоначальном этапе осуществляется построение усредненного спектра принимаемого сигнала $U(t)$ на интервале анализа.

По усредненному спектру оцениваются значения нижней \tilde{f}_{\min} и верхней \tilde{f}_{\max} частот в спектре сигнала OFDM, затем осуществляется оценивание несущей частоты $\tilde{f}_{\text{нec}}$ и ширины спектра $\Delta\tilde{F}$ (выражения 4), при использовании результатов работ [12,13,14] и в соответствии с теорией оценивания параметров [9]:

$$\tilde{f}_{\text{нec}} = \frac{\tilde{f}_{\max} + \tilde{f}_{\min}}{2}, \quad \Delta\tilde{F} = \tilde{f}_{\max} - \tilde{f}_{\min} \quad (4)$$

Полученное значение несущей частоты анализируемого сигнала используется для переноса на нулевую частоту:

$$\dot{U}_0(t) = \dot{U}(t)e^{-jw_0\tilde{f}_{\text{нec}}t} \quad (5)$$

Для оценивания временных параметров вычисляется автокорреляционная функция (АКФ) сигнала в соответствии с выражением:

$$\dot{B}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \dot{U}_0(t) \dot{U}_0^*(t - \tau) dt \quad (6)$$

Характерная особенность огибающей АКФ сигнала с OFDM-модуляцией состоит в наличии локальных максимумов, отстоящих от центрального пика на величину $T_{\text{инф}}$. (рисунок 4). Такие локальные максимумы вызваны повторением фрагмента сигнала при формировании защитного интервала во временной области (рисунок 3).

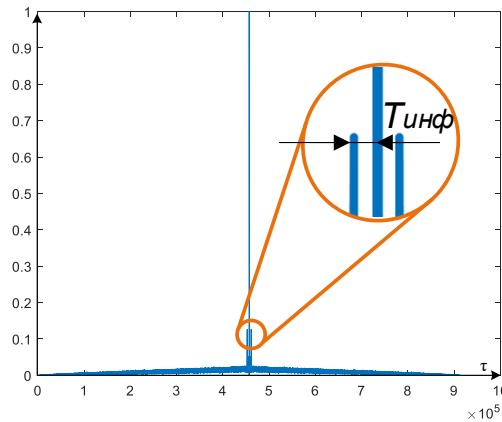


Рис. 4. Результат расчета АКФ OFDM сигнала

Для оценки числа используемых каналов K , необходимо определить значение интервала между частотами в спектре сигнала $\Delta f_{БПФ}$, в соответствии с выражением:

$$\Delta f_{БПФ} = \frac{1}{T_{\text{инф}}} \quad (7)$$

Затем по оцененной ширине спектра $\Delta\tilde{F}$ (4), вычисляется число используемых каналов:

$$K = \frac{\Delta\tilde{F}}{\Delta f_{БПФ}} \quad (8)$$

Оценка размера блока БПФ $N_{БПФ} = 2^n$ реализуется перебором значения n до порогового значения, удовлетворяющего условию:

$$2^{n-1} < K < 2^n \quad (9)$$

Округление в большую сторону, обозначенное в (9), во-первых, обусловлено наличием защитного интервала, а во-вторых, тем, что коэффициент использования спектра всегда меньше единицы ($0.5 < g < 1$).

Полученные оценки размера блока БПФ $N_{БПФ}$ и величины $T_{инф}$ используются для вычисления частоты дискретизации в соответствии с выражением:

$$\tilde{F}_d = \frac{N_{БПФ}}{T_{инф}} \quad (10)$$

Для оценивания $T_{инф}$ используется взаимно корреляционная функция сегмента сигнала варьируемой длительности. В качестве оценки $T_{инф}$ выступает длительность сегмента, обеспечивающая максимальный коэффициент корреляции [3].

Длина OFDM слова $N_{ОФДМ}$ (рисунок 3) определяется следующим выражением:

$$N_{ОФДМ} = N_{БПФ} + T_{инф} \quad (11)$$

Таким образом, основные параметры OFDM сигнала к которым относятся ширина спектра, число поднесущих частот, частота дискретизации при формировании сигнала, длина слова OFDM и длина циклического префикса, оказываются оцененными. Знание указанных параметров позволяет осуществлять дальнейшую корректную обработку сигналов рассматриваемого класса.

Для проверки работоспособности разработанного метода рассмотрим его применение при обработке сигнала канала сброса информации беспилотного летательного аппарата DJI Fantom 3.

Частотно-временная структура сигнала представлена на рисунке 5.

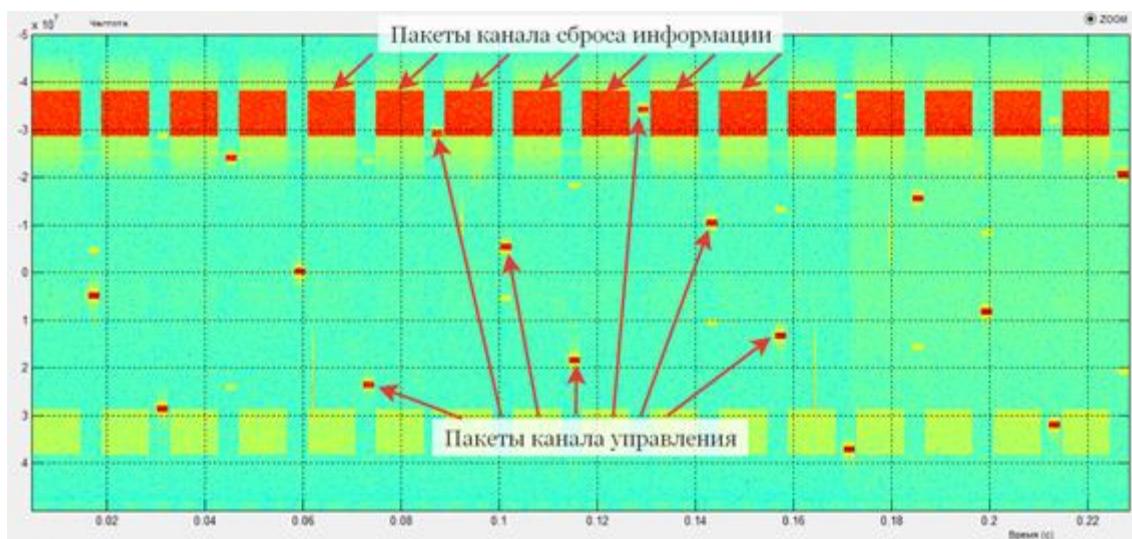


Рис. 5. Частотно-временная структура исходного OFDM сигнала

Применение разработанной последовательности этапов оценивания основных параметров позволило получить следующие результаты:

оценку ширины спектра – $\Delta\tilde{F} = 9,458 \text{ МГц}$;

число поднесущих частот – $K = 1018$;

частоту дискретизации – $\tilde{F}_d = 11,2 \text{ МГц}$;

длину OFDM слова – $N_{\text{OFDM}} = 1152$;

длину циклического префикса – $T_{\text{cp}} = 128$.

Что подтверждается технической документацией средств приема данных сигналов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод оценивания наиболее важных параметров OFDM сигналов, а именно: числа поднесущих частот, частоты дискретизации формирования OFDM-сигнала, длины OFDM слова и его префикса. Наличие этих данных позволяет осуществлять распознавание радиоэлектронных средств различного назначения при решении задач радиомониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.С., Волков А.С., Соковиков С.А. Исследование сигналов OFDM с первичной амплитудной фазовой – амплитудной импульсной модуляцией // Труды МАИ. 2018. № 101.
2. Макаров С.Б., Рашич А.В. Формирование и прием спектрально-эффективных сигналов с OFDM // Научно-технические ведомости СПбГПУ 2011
3. Мешкова А.Г. Использование оконных функций для повышения эффективности функционирования технологии OFDM / И.К. Мешков, А.Г. Мешкова, В.В. Иванов // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций – XVIII Международная научно-техническая конференция. – 2017. – С. 178-179.
4. Пукса А.О., Шевченко А.А. Перспективы развития и проблемы OFDM технологии / сб. ст. победителей IX Международной науч.-практ. конф. World science: problems and innovations. 2017. С. 99-101.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751с.
6. Старицин С.С., Абакумов А.Н., Передний А.В., Павлов А.В. Методика оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 6.
7. Приступа В.В., Зайцев С.В. Исследование характеристик помехозащищенности беспроводных сетей с сигналами OFDM с внутрибитовой псевдослучайной перестройкой поднесущих частот в условиях установки оптимальных помех // Математические машины и системы. 2015. № 1. С. 84 - 95.
8. Постановление Правительства РФ от 2 июля 2004 г. N 336 «Об утверждении Положения о Государственной комиссии по радиочастотам» [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://base.garant.ru/187178/> – Консультант Плюс (дата обращения: 01.05.2021).
9. Юсупов Р.М., Дмитриев А.К. Идентификация и техническая диагностика. 1987. С. 222-226.
10. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX / K. Fazel, S. Kaiser. – 2nd ed., 2008
11. Samuel C Yang; OFDMA System Analysis and Design mobile communication series, Artech house, 2010.
12. Mohseni S. and Matin M. A., Study of the estimation techniques for the Carrier Frequency Offset (CFO) in OFDM systems // International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 12 No. 6, pp 73-80, 2012.

13. Mohseni S. and Matin M. A., Investigating the effect of the Carrier Frequency Offset (CFO) and Frequency synchronization on the performance of the OFDM Wireless systems // International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 12 No. 12, pp: 85-92, 2012.
14. Mohseni S. and Matin M. A., Study of the Sensitivity of the OFDM wireless systems to the Carrier Frequency OFFSET (CFO) // International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPS) Vol. 4, No. 1, pp 73-80, 2013.

REFERENCES

1. Kuznetsov V. S., Volkov A. S., Sokovikov S. A. Investigation of OFDM signals with primary amplitude phase-amplitude pulse modulation // Proceedings of MAI. 2018. No. 101.
2. Makarov S. B., Rashich A.V. Formation and reception of spectral-effective signals with OFDM // Scientific and Technical Bulletin of SPbGPU 2011
3. Meshkova A. G. The use of window functions to improve the efficiency of the OFDM technology / I. K. Meshkov, A. G. Meshkova, V. V. Ivanov // "Problems of technology and telecommunications technology" - XVIII International Scientific and Technical Conference. - 2017. - pp. 178-179.
4. Puks A. O., Shevchenko A. A. Prospects of development and problems of OFDM technology / collection of the winners of the IX International Scientific and Practical Conference. World science: problems and innovations. 2017. pp. 99-101.
5. Sergienko A. B. Digital signal processing: Textbook for universities. 2nd ed. - St. Petersburg: Piter, 2006. - 751s.
6. Staritsin S. S., Abakumov A. N., Peredriy A.V., Pavlov A.V. Methodology for estimating signal parameters with OFDM modulation // Journal of Radioelectronics. 2020. № 6.
7. Prystupa V. V., Zaitsev S. V. Investigation of the noise immunity characteristics of wireless networks with OFDM signals with intra-bit pseudorandom tuning of subcarrier frequencies in the conditions of optimal interference installation // Mathematical Machines and systems. 2015. No. 1. pp. 84-95.
8. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 336 of July 2, 2004 "On approval of the Regulations on the State Commission on Radio Frequencies" [Electronic resource] // Access mode: <https://base.garant.ru/187178/> - Consultant Plus (accessed: 01.05.2021).
9. Yusupov R. M., Dmitriev A. K. Identification and technical diagnostics. 1987. pp. 222-226.
10. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX / K. Fazel, S. Kaiser. – 2nd ed., 2008
11. Samuel C Yang; OFDMA System Analysis and Design mobile communication series, Artech house, 2010.
12. Mohseni S. and Matin M. A., Study of the estimation techniques for the Carrier Frequency Offset (CFO) in OFDM systems // International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 12 No. 6, pp 73-80, 2012.
13. Mohseni S. and Matin M. A., Investigating the effect of the Carrier Frequency Offset (CFO) and Frequency synchronization on the performance of the OFDM Wireless systems // International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 12 No. 12, pp: 85-92, 2012.
14. Mohseni S. and Matin M. A., Study of the Sensitivity of the OFDM wireless systems to the Carrier Frequency OFFSET (CFO) // International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPS) Vol. 4, No. 1, pp 73-80, 2013.

МЕТОДИКА КОНФИГУРИРОВАНИЯ ПОРТА I/O СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПРИМЕРЕ GDM-78341

М. В. Хорошайлова¹, А.В. Чернышов¹

¹Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), Воронеж, Россия

Аннотация. В данной статье представлена методика разработки программно-аппаратных средств фильтрации данных, позволяющая реализовывать, алгоритмы стабилизации напряжения и тока заряда аккумуляторной батареи и организовать устойчивые к негативному воздействию повышенного уровня импульсных коммутационных помех, излучаемых со стороны вторичных импульсных источников электропитания, каналы контроля состояния аккумуляторной батареи в отсутствии качественного заземления.

Ключевые слова: кроссплатформенный фреймворк, последовательный порт, графический интерфейс пользователя

METHOD OF CONFIGURING THE I/O PORT OF MODERN MEASURING DEVICES ON THE EXAMPLE OF GDM-78341

M. V. Khoroshailova¹, A.V. Chernyshov¹

¹ Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russia

Abstract. This article presents a method for developing software and hardware data filtering tools that allows implementing algorithms for stabilizing the voltage and current of the battery charge and organizing channels for monitoring the state of the battery in the absence of high-quality grounding that are resistant to the negative effects of increased level of pulse switching interference emitted from secondary pulse power sources.

Keywords: cross-platform framework, serial port, graphical user interface

1. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня практически невозможно вести постоянный контроль и мониторинг параметров систем электроснабжения (СЭС), не имея рабочего места оператора, которое бы включало в свой функционал как просмотр параметров СЭС в режиме реального времени, так и ведение базы данных (DB) с подробной хронологией событий и учетом флагов состояний.

Для обеспечения первого требования необходимо разработать соответствующий программный продукт (Software), приложение (App) и графический интерфейс пользователя (GUI). Стоит отметить, что каждая операционная система (ОС) обладает всем необходимым для создания GUI, использование этих доступных инструментов требует больших затрат времени и практического опыта. Самой большой проблемой, связанной с применением таких инструментов – платформозависимость. Поэтому проблема реализация GUI актуальна на данный момент.

Кроссплатформенная реализация App – будущее информационной промышленности.

Qt предоставляет поддержку большого числа ОС: Microsoft Windows, Mac OS X, Linux, FreeBSD и других клонов UNIX. Также имеется поддержка мобильных ОС: iOS,

Android, Windows Phone, Windows RT и BlackBerry. Пакет Qt Embedded предоставляет все возможности Qt и в интегрированных системах. Qt использует интерфейс API низкого уровня [1, 2].

Основной функционал Qt:

- поддержка двух- и трехмерной графики (OpenGL);
- возможность интернационализации программ;
- использование форматов JSON и XML;
- STL-совместимая библиотека контейнеров;
- поддержка стандартных протоколов ввода/вывода;
- классы для работы с сетью;
- поддержка программирования DB, включая Oracle, Microsoft SQL Server, IBM DB2, MySQL, SQLite, Sybase;
- возможность использовать язык сценариев JavaScript.

Применяемая в Qt концепция ведения межобъектных коммуникаций «сигналы и слоты», заменяет применявшуюся ранее не вполне надежную модель обратных вызовов.

Цель работы. Разработка методики использования модулей QSerialPort и QThread для реализации работы по стандарту RS232 с универсальным прецизионным мультиметром GDM-78341 производства GW Instek и создания процесса с одним потоком.

2. ОБЗОР СИНТАКСИСА КОМАНД GDM-78341

Связь с данным мультиметром осуществлена по спецификации, описывающему интерфейс подключения к шине цифровых измерительных приборов — IEEE-488. В свою очередь в соответствии с данной спецификацией используется стандарт команд программируемого инструмента (SCPI).

На рис. 1 рассмотрен пример построения «строки»-команды запроса режима измерения постоянного напряжения «CONF:VOLT:DC».

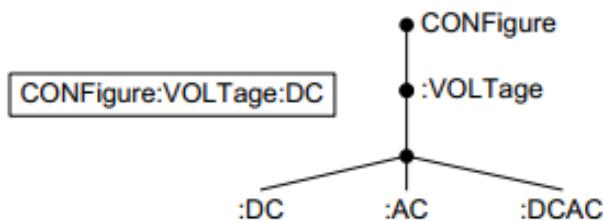


Рис. 1. Пример построения «строки»-команды запроса

В соответствии с рис. 1 необходимо отправить «строку»-команду, что эквивалентно массиву строк типа QByteArray:

```
d = ui->cEnterText->text().toLocal8Bit();
```

3. НАСТРОЙКА ПРОЕКТА

При создании проекта в его дереве создается файл .pro, включающий pre- и post настройки проекта:

- используемые в проекте модули Qt;

- пути до используемых файлов объявлений и файлов реализаций;
- версия C++;
- цели и шаблоны проекта.

Необходимо указать:

```
QT += core gui
QT += serialport
CONFIG += c++11 //после greaterThan
TARGET = terminal //цель .exe
TEMPLATE = app
```

a. Драйвер для GDM-78341

Драйвер и документация по удаленному контролю мультиметра находится в свободном доступе [3].

При корректной установке драйвера, мультиметр определится как COM-порт согласно рис. 2.

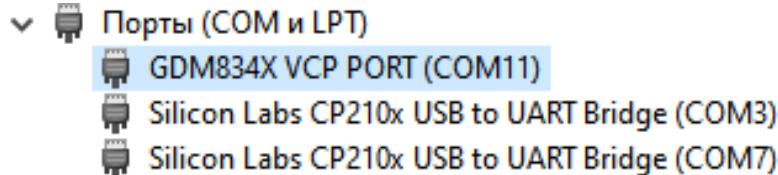


Рис. 2. Определение устройства в системе

6. Реализация COM-порта

Последовательное проектирование класса COM-порта:

1. Определение структуры настроек COM-порта (скорость передачи в бодах, стартовый и стоповый биты, контроль потока, размер посылки, имя COM-порта).

2. Определение класса Port, наследника класса QObject (базовый класс Qt).

2.1 Определение слотов. Пользовательские слоты полностью построены на методах модуля QserialPort.

```
public slots:
void DisconnectPort();
void ConnectPort(void);
void Write_Settings_Port(QString name, int baudrate, int DataBits, int
Parity, int StopBits, int FlowControl);
void process_Port();
void WriteToPort(QByteArray data);
void ReadInPort();
private slots:
void handleError
(QSerialPort::SerialPortError error);
```

2.1.1 Отключение COM-порта

Если COM-порт открыт, то его необходимо закрыть и вывести сообщение о закрытии.

2.1.2 Подключение СОМ-порта

Установить имя СОМ-порта. Если СОМ-порт открыт режимом OpenMode, то проверить установлены ли его параметры корректно. В случае корректности открыть СОМ-порт и вывести сообщение об открытии. В противном случае закрыть СОМ-порт.

2.1.3 Запись настроек СОМ-порта.

Связать пользовательские настройки СОМ-порта с перечислениями в QserialPort.

2.1.4 Создание процесса СОМ-порта.

Связать сигналы ошибки и чтения из СОМ-порта с соответствующими слотами.

2.1.5 Методы чтения и записи.

Дублирование методов QserialPort с предварительной проверкой состояния СОМ-порта.

2.1.6 Проверка наличия ошибок во время работы СОМ-порта.

Проверить базовым методом QserialPort наличие ошибок. При наличии таковых – отключить СОМ-порт и вывести соответствующее сообщение.

2.2 Соединить сигналы и слоты.

в. Реализация потока

Поток – это независимая задача, которая выполняется внутри процесса и разделяет с ним общее адресное пространство, код и глобальные данные.

Объявление потока и подключение класса СОМ-порта к нему:

```
QThread *thread_New = new QThread; //создание потока для СОМ-порта
Port *PortNew = new Port(); //создание объекта класса
PortNew->moveToThread(thread_New); //подключение класса к потоку
PortNew->thisPort.moveToThread(thread_New); //подключение СОМ-порт к
потоку
thread_New->start(); //запуск потока
```

г. Реализация GUI

На данном этапе разработки приложения реализован прием посылок по СОМ-порту от ЭВМ к GDM-78341. Чтение и запись от GDM-78341 к ЭВМ не реализованы. Согласно рис. 3 пользователю в данном GUI доступны:

- поиск СОМ-порта;
- подключение и отключение СОМ-порта;
- чтение с сохранением настроек СОМ-порта;
- отправление «строки»-команды от ЭВМ к GDM-78341;
- визуальный контроль последних доступных операций с СОМ-портом через консоль.

После отправление «строки»-команды стандарта SCPI от ЭВМ к GDM-78341 «CONF:VOLT:AC», мультиметр переходит с default-режима на режим измерения

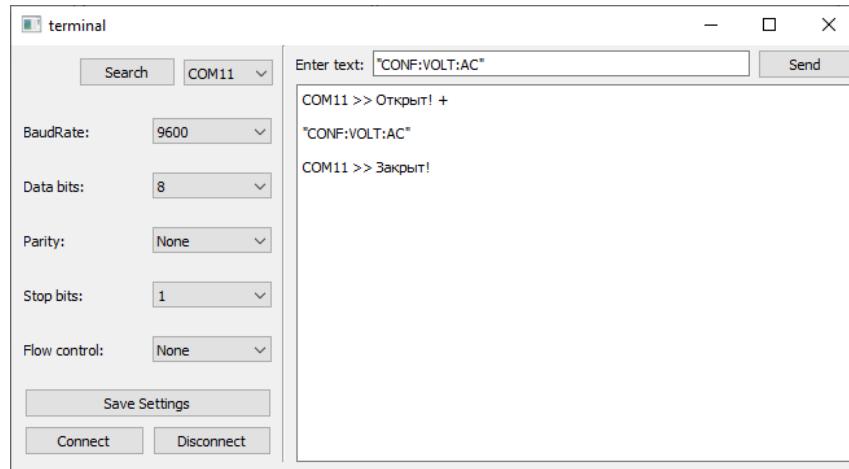


Рис. 3. Вид GUI приложения terminal.exe

д. Обработка сигналов GDM-78341 от App

переменного тока. На дисплее мультиметра отображаются следующие указатели, согласно рис. 4:

- переход в режим удаленного контроля (RMT);
- переход в режим измерения переменного тока (AC);
- переход во временную область измерений (S);
- ошибка при попытке парсинга COM-порта (ERR).



RMT – Remote Control; AC – Alternating Current; S – Seconds; V – Voltage;

DC – Direct Current; ERR – Error

Рис. 4. Дисплей GDM-78341

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная методика разработки программно-аппаратных средств фильтрации данных позволяет вести логирование данных работы какого-либо изделия по последовательному порту. Современные ЭВМ включают в себе такой стандарт связи, также, учитывая специфику RS232, всегда есть возможность использовать hub для подключения большего количества приборов.

Контрольно-измерительная техника в основном включает в себя RS232/RS485 для контроля и сбора данных на ЭВМ пользователя.

При разработке интегрированной системы контроля и мониторинга возникает необходимость использовать внешние прецизионные контрольно-измерительные приборы для последующей калибровки каналов измерений системы. Обычно контроллер универсален и соответственно заранее не знает, какой процесс будет контролировать, что значит неизвестна его нагрузка [4, 5]. На российском рынке приборов контроля и сбора информации не часто встретишь изделие, которое может

автоматически настроить свою внутреннюю программу под разный спектр нагрузок, т. е. изделие должно быть автономным в плане калибровки, но даже в таком случае ему потребуются минимальные входные данные (тип нагрузки).

Также сбор информации с внешних приборов позволяет отследить артефакты процесса, т. к. де-факто встроенные системы имеют меньшую частоту дискретизации измерений относительно прецизионной измерительной техники. Для примера приведен рис. 5, где на графике приведен заряд аккумуляторной батареи. На данном графике как артефакт выступает перекоммутация электронной нагрузки. Встроенная система вполне могла бы зафиксировать данный артефакт, но всегда есть вероятность, что измерение будет «обрезано», т. е. во внимание может не попасть скачок тока в экстремумах.

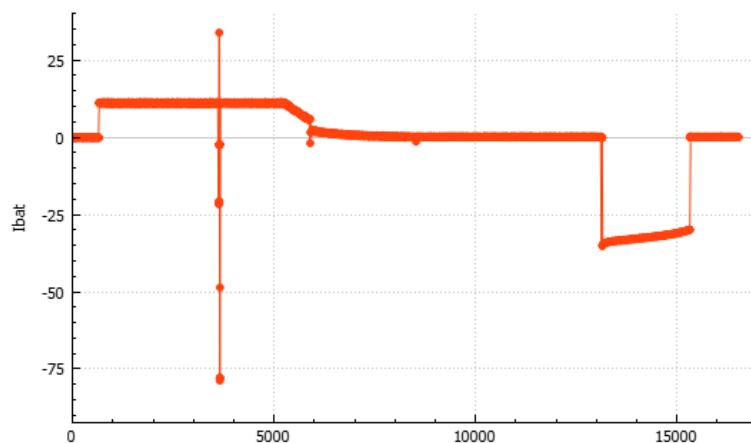


Рис. 5. Пример артефакта в процессе заряда аккумуляторной батареи

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлее М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. - Спб.: БХВ-Петербург, 2018.
2. IEEE Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands for Use With IEEE Std 488.1-1987, IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation.
3. John A. O'Connor. U-131. Simple Switchmode Lead-Acid Battery Charger.
4. Хорошайлова М.В. Чернышов А.В. Леденев Д.А. Метод повышения точности измерения входных сигналов в микроконтроллерном блоке управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. № 2. – С. 76-82.
5. Хорошайлова М.В., Балашов Ю.С., Мушта А.И. Контроль эффективности методов обеспечения целостности сигналов при проектировании современных высокопроизводительных вычислительных устройств // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6-1. С. 108-111.

REFERENCES

1. Schlee M. Qt 5.10. Professional programming in C ++. - SPb : BHV-Petersburg, 2018.
2. IEEE Standard Codes, Formats, Protocols, and Com-mon Commands for Use With IEEE Std 488.1-1987, IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation.
3. John A. O'Connor. U-131. Simple Switchmode Lead-Acid Battery Charger.
4. Khoroshaylova M.V. Chernyshov A.V. D.A. Ledenev Method of increasing the accuracy of measuring input signals in a microcontroller control unit // Bulletin of the Voronezh State Technical University. - 2021. - T. 17.No. 2. - S. 76-82.
5. Khoroshaylova MV, Balashov Yu.S., Mushta AI. Monitoring the effectiveness of methods for ensuring the integrity of signals in the design of modern high-performance computing devices // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2013. T. 9.No. 6-1. S. 108-111.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИКС КРИТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

О.А. Кудрявцев

АО «Концерн «Созвездие»

Аннотация. Рассматривается решение задачи адаптивного управления в условиях функциональной неопределенности и нелинейной параметризации ИКС в условиях внешних воздействий. Определена структурная схема взаимодействия элементов при функционировании ИКС в условиях внешних воздействий. Выработана стратегия адаптивного управления ИКС в условиях внешнего воздействия.

Ключевые слова: ИКС, информационная устойчивость, адаптивное управление.

MODEL FOR ASSESSING THE INFORMATION STABILITY OF ICS CRITICAL APPLICATIONS

O. A. Kudryavtsev

JSC «Concern «Svezdie»

Abstract. The solution of the problem of adaptive control under conditions of functional uncertainty and nonlinear parametrization of the ICS under external influences is considered. The structural scheme of interaction of elements at functioning of ICS in the conditions of external influences is defined. The strategy of adaptive management of ICS in the conditions of external influence is developed.

Keywords: ICS, information stability, adaptive control.

1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

ИКС не могут быть сведены к хорошо изученным системам связи или автоматизированного управления, а скорее представляют собой новый класс распределенных автоматизированных систем управления с интегрированной системой связи (СС) и применяемых для связи и управления удаленными объектами.

Повышение уровня автоматизации инфокоммуникационных систем (ИКС) критических технологий и информационной «мощности» используемых в них компьютерных устройств и элементов, привело к повышению номенклатуры и уровня самостоятельно принимающих автоматизированной системой решений, к переходу процесса взаимодействия, в том числе и конфликтного, на уровень автоматической системы. В современных условиях обозначилась и интенсивно развивается концепция «система против системы», которая на уровне функционального структурирования выражается взаимодействующими уровнями самоорганизации, принятия решения и его реализации. Это является одной из основных особенностей при решении проблемы кибербезопасности для систем критических технологий [1].

В отличие от традиционного рассмотрения взаимодействия объектов при взаимодействии систем, особенно сложных, появляются неизвестные для каждой из взаимодействующих сторон элементы и процессы, реакция на которые в принципе не может быть предусмотрена и, в зависимости от уровня их неопределенности и располагаемого для их анализа информационного ресурса, синтезируется на верхних

уровнях. Именно этот неопределенный и неизвестный компонент и его доля в общем объеме информационного обмена определяет характер (конфликтный или бесконфликтный) взаимодействия систем, эффективность реализации ими своих целевых функций.

В качестве базиса конфликта в ИКС выделяется информационная и аппаратурная избыточность информационных технологий, а в качестве источников конфликта обычно рассматриваются как естественные, так и преднамеренные информационные воздействия, порожденные нераспределенными ресурсами, различием и/или принудительным изменением протоколов и форматов обмена между элементами, снятием ограничений функционирования, различием в уровне и способе структуризации информации, обусловленные, главным образом, функцией управления.

При конфликтном взаимодействии систем управления, критических технологий, основная состоит в синтезе и реализации процедуры снятия неопределенности взаимодействующих элементов, поскольку на остальные элементы найдена (синтезирована ранее) адекватная функция управления. В этом случае взаимодействие систем можно формализовано представить уравнением баланса, нарушение которого приводит к доминированию одной из взаимодействующих сторон

$$S_{A,i,j}^k(T_k, W_k) \times P_A(b_{i,j}^k) \leftrightarrow S_{V,i,j}^k(T_k, W_k) \times P_V(a_{i,j}^k)$$

где $\{A, B\}_{i,j}^k$ – функционал выработки системами S_A и S_V решающей функции на k -ом уровне управления i -го объекта j -ым процессом, T_k, W_k – располагаемые временной и информационный ресурсы уровня, P_A, P_V – вероятности выработки адекватного алгоритма управления системой A в отношении неизвестного (противоборствующего) компонента системы b_{ij}^k и системой B в отношении неизвестного (противоборствующего) компонента a_{ij}^k , соответственно.

При этом величина $P_{A,B}$ будет определяться произведением соответствующим каждому уровню событий, формируемым в ИКС и действующим элементом и направленных на снятие неопределенности взаимодействующего компонента. Так на нижнем уровне это будет представляться в виде вероятности обнаружения неизвестного компонента, на уровне принятия решения – вероятностью правильного отнесения его к неизвестным (неопределенным), а на уровне самоорганизации – вероятностью снятия неопределенности с этого компонента.

Подсистема безопасности и защиты информации в ИКС, должна рассматриваться в составе всей системы и ее эффективность должна определяться только вероятностью реализации своих целевых функций всей системой.

При функционировании такой ИКС образуется множество вложенных контуров управления, которые должны обеспечивать взаимное согласование, синхронизацию всех элементов системы [1]. И в этом смысле все элементы системы, должны быть взаимно согласованы, что обеспечивает решение задачи, которую каждый из элементов отдельно решить не в состоянии. В зависимости от уровня дублирования и резервирования

управления, требуемой степени согласованности состояний элементов системы несанкционированное нарушение состояния любого из элементов может привести к заметному уменьшению вероятности реализации целевой функции.

В настоящее время эффективность любой системы управления определяется алгоритмом реализации управления при этом наряду с рассмотренными ранее мешающими факторами в настоящее время оказывают влияние информационные воздействия. В данной работе одним из основных факторов является влияние этих информационных воздействий на результат реализации целевой функции.

Поэтому целями данной статьи являются:

Построение модели для оценки информационной устойчивости ИКС критических приложений;

Выработка стратегии адаптивного управления ИКС в условиях внешнего воздействия с использованием структурной схемы взаимодействия элементов при функционировании ИКС в условиях внешних воздействий;

Для достижения поставленных целей в работе решаются следующие задачи:

На основе решения дифференциальных уравнений необходимо решить задачи адаптивного управления в условиях функциональной неопределенности и нелинейной параметризации ИКС в условиях внешних воздействий.

Необходимо графически показать траектории движения рабочей точки в системе координат целевых функций ИКС с внешними воздействиями.

2. ЗАДАЧИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИКС В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И НЕЛИНЕЙНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.

Уязвимость ИКС выражается, прежде всего, в возможности влияния с удаленного терминала (используя имеющиеся в ней штатные телекоммуникационные средства) не только на передаваемые данные, но и на сам алгоритм функционирования системы, определяющий процессы обработки (в наиболее широком смысле этого понятия) данных и управления подчиненными объектами. Объединение технологий связи и обработки информации в единой ИКС приводит также к появлению новых уязвимых элементов, обусловленных «чувствительностью» системы к воздействиям на любом из трех уровней представления информации [1].

Сигналы, передаваемые в такой системе, не только обрабатываются с целью наилучшего восстановления передаваемой информации на сигнальном уровне, но и интерпретируются на семантическом и прагматическом уровне. При этом если ранее потребителем и интерпретатором информации выступал конечный пользователь (человек), то теперь часть передаваемой информации носит служебный (внутрисистемный) характер и используется для управления самой системой. Это означает, что даже в случае корректного (с точки зрения радиотехники) приема сигнала работа системы может быть нарушена или дестабилизирована за счет случайного или преднамеренного включения или модификации существующих в сообщении управляющих кодов [1].

Другая угроза устойчивости функционирования ИКС заключается в возможности раскрытия структуры внутреннего и внешнего управления за счет анализа радиообмена в ней. Можно представить радиообмен внутри такой системы в виде матрицы $\|x_{ij}^k\| = \|\{p_{ij}, c^k\}\|$, где индексы i и j обозначают два взаимодействующих компонента ИКС или пару «компонент системы – объект управления», индекс k идентифицирует последовательность кодов, передаваемых при взаимодействии (радиообмене), в конечном наборе всех используемых последовательностей.

Каждый элемент матрицы x_{ij}^k может быть представлен как совокупность преамбулы p_{ij} идентифицирующей отправителя и получателя сообщения, его параметры и другие характеристики и собственно последовательности унитарных кодов, формирующей тело сообщения c^k . Как правило, в преамбуле указывается тип сообщения (информационное или управляющее, то есть данные или команда), причем полная совокупность допустимых последовательностей кодов, формирующих данные или команду, ограничена некоторым допустимым диапазоном.

Весьма существенно, что, в отличие от тела сообщения, преамбула «по определению» не может быть подвергнута при передаче каким либо преобразованиям маскировки или шифрации, ее структура всегда определяется используемым протоколом, то есть жестко фиксирована на весь цикл радиообмена. Эта неотъемлемая особенность ИКС позволяет конкуренту проанализировать и вскрыть иерархическую структуру управления в системе с последующим выделением приоритетных целей для подавления или воздействия.

При этом одной из основных задач становится определение отношения частных показателей устойчивости элементов ИКС и всей системы в целом.

Для реализации целей информационного воздействия в ИКС могут послужить организованные возмущения с внедрением программного воздействия, которые могут изменять структуру сигнала, повлиять на работу основных процессорных устройств по сети.

В связи с этим чрезвычайно важно провести операторное описание динамической системы связи. Сформированные каналы элементов ИКС необходимо представить к системе уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x, t) + g_1(x_1, t) u \\ \dot{x}_2 &= f_2(x, \theta, t) + g_2(x_1, t) u\end{aligned}\tag{1}$$

где \dot{x}_1 , \dot{x}_2 - совокупность канальных групп, сформированных по признаку единого канала управления.

$$\begin{aligned}x_1 &= (x_{11}, \dots, x_{1q})^T \in R^q; \\ x_2 &= (x_{21}, \dots, x_{2p})^T \in R^p; \\ x &= (x_{11}, \dots, x_{1q}, x_{21}, \dots, x_{2p})^T \in R^n\end{aligned}\tag{2}$$

где x_1 , x_2 , x - векторы состояний каналов абонентов ИКС участвующих во взаимодействии в выделенной полосе частот для приемопередающих элементов ИКС.

Значение границ области Ω_0 по умолчанию не требуется, если это не оговорено заранее или не вытекает автоматически из формул результатов.

Символами $U \in R$ и x - обозначаются управляющий вход системы (1) и вектор состояния.

Функции:

$$\begin{aligned} f_1 : R^n \times R_+ &\rightarrow R^q, f_2 : R^n \times R^d \times R_+ \rightarrow R^p, \\ q_1 : R^n \times R_+ &\rightarrow R^q, q_2 : R^n \times R_+ \rightarrow R_+ \rightarrow R^p. \end{aligned} \quad (3)$$

В модели (2) предполагают локально ограниченные по x и глобально ограниченные по t функции.

При этом их зависимость от времени ограничивается стандартными уравнениями локального существования решений системы (1).

Предположим $f_1(x, t)$ и $q_1(x, t)$ известны и доступны для измерения параметров сигнал/шум в работе приемопередающих устройств для формирования элементами ИКС канальных групп и дальнейшей демодуляции в полосе частот заданной абонентами сети.

Однако могут быть неизвестны и недоступны $f_2(x, \theta, t)$ и $q_2(x, t)$. В соответствии с этим вектором x_1 и x_2 показывают как независимые от неопределенности и соответственно зависимое от неопределенности разбиение состояния x , которое необходимо представить в соответствии (1) как:

$$\dot{x} = f_2(x, \theta, t) + g(x, t) u \quad (4)$$

где: $g(x, t) = (g_{11}(x, t), \dots, g_{1q}(x, t), g_{21}(x, t), \dots, g_{2p}(x, t))^T$, функции измерения совокупности протоколов элементов ИКС;

$f(x, \theta, t) = (f_{11}(x, t), \dots, f_{1q}(x, t), f_{21}(x, \theta, t), \dots, f_{2p}(x, \theta, t))^T$, функции измерения совокупности сигналов на приемопередающих устройствах ИКС.

Все введенные выше ограничения на классы рассматриваемых функций в (1) индуцируются на функции $f(x, \theta, t)$.

Использование мажорирующего отображения позволяет более гибко применить результаты операторного анализа систем, полученные в [4].

$$\begin{aligned} S_\tau : \{U(t), e(t)\} \subseteq U \times E &\rightarrow \{x(t)\} \subseteq x \\ U_x(x, t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_\tau : \{U(t), e(t), x(t)\} \subseteq U \times E \times X &\rightarrow \{y(t)\} \subseteq y \\ \tau = [t_0, T] \subseteq \tau^* \end{aligned} \quad (6)$$

Отображение S_τ в (11) формально определяет взаимодействие "вход-состояние", а отображение H_τ в (6) формализует взаимодействие "вход, состояние-выход" $U \times X \times Y$.

Из обширного множества возможных нормированных пространств использованы функциональные пространства $L_{p^n}[t_0, T], p \in \mathbb{R}, p \geq 1, \mathbb{R} \geq 1 = \{x \in \mathbb{R} | x \geq 1\} \cup \infty, n \in \mathbb{N}$.

Подобный выбор обусловлен тем, что многие физически значимые свойства функций $U(t), e(t), y(t)$ (амплитуда, частота сигнала) могут быть установлены непосредственно из значений функциональных норм $\Pi \times \Pi L_c \subset \Pi_p[t_0, T]$. Ряд стандартных показателей качества и целевых критериев так же могут быть сформулированы на языке функциональных норм в $L_{1^n}[t_0, T], L_{2^n}[t_0, T]$ и $L_{\infty^n}[t_0, T]$.

Условия реализуемости, полноты и ограниченности целевых функций определены в [3] с учетом мажорирующих отображений $\psi(x, e_\psi)$. $\psi : R^n \rightarrow R$ - скалярная функция состояния и не зависит от e_ψ . Множество $\Omega_\psi = \{x \in R^n | \psi(x) = 0\}$ задает поверхность в R^n . В методах адаптивного управления требуется явное задание целевого множества в виде нулей положительно определенной и неограниченно возрастающей по $\|x\|$ функции управления $V : R^n \rightarrow R$ как показано в [3].

Для функции $\psi(x, t) \subset \ell^1$ справедлива оценка

$$\|x(t)\|_{\infty, [t_0, T]}, [t_0, T] \leq \bar{\gamma}(x_0, \theta, \psi(x(t), t) \Pi_\infty[t_0, T]) \quad (7)$$

где $\bar{\gamma}(x_0, \theta, \psi(x(t), t) \Pi_\infty[t_0, T])$ - локально ограниченная и неотрицательная функция своих аргументов. Функция $\psi(x, t)$ мажорирует состояние системы и есть близость к множеству и определяет ограничение области для внешнего воздействия, которая может служить естественной оценкой качества поведения системы.

$$\Omega_0 = \{x(t) \in R^n | \psi(x(t), t) = 0\} \quad (8)$$

В системе управления элементами в ИКС множество Ω_0 удобно выбрать в качестве “минимального” целевого множества в том смысле, что попадание в его окрестность влечет, по меньшей мере, ограниченность вектора состояния элемента.

В задаче адаптивного управления целевые критерии обычного удовлетворения метрическим ограничением в пространстве состояния R^n :

$$\nu_1(\|x - \xi(t)\|) \leq \psi(x(t)) \leq \nu_2(\|x - \xi(t)\|), \nu_1, \nu_2 \in k_\infty \quad (9)$$

где функция $\xi : R_+ \rightarrow R^n$, $\xi \in \ell^0$ является, например эталонной траекторией.

Функция $\psi(x, t)$ в этом случае выступает в качестве регулятора основного контура. Допустимые целевые множества [3] оказываются существенно шире в силу отсутствия изначальной привязки от функций методов синтеза адаптивных динамических систем управления нелинейными объектами, т.к. нет необходимости одновременного разрешения (8), (9). Причина этого состоит в том, что вместо стандартных евклидовых норм $\|\cdot\|$ в пространстве состояния R^n и явного задания цели управления (5) в предположении (1) используются функциональные нормы $\|x(t)\|_p, [t_0, T]$, $T \geq t_0$ в функциональных пространствах $L_p[t_0, T]$, $T \geq t_0$ $p \in R \geq 1 \cup \infty$.

Замена стандартных метрических ограничений (9) в R^n на операторные отношения позволяют с одной стороны, использовать измерение функции $\psi(x(t))$ в

качестве меры близости состояния $x(t)$ к целевому Ω_0 не вводя при этом ограничения вида (9) на функцию $\psi(x(t))$. С другой стороны, ограниченность $x(t)$, как минимально допустимый критерий качества, вытекает из ограниченности $L_p^1[t_0, T]$ норм функции $\psi(x(t), t)$ [3]. В зависимости от задачи и свойств исходного управления, (13) может быть интерпретировано как свойство наблюдаемости неограниченного роста состояния системы (13) по выходу $\psi(x(t))$.

Далее приведены два математических представления S_A, S_V каждое из которых имеет управляющие входы и соответственно целевые функции. Структурная схема взаимодействия элементов при функционирования ИКС в условиях внешних воздействий представлена на рисунке 1.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x, t) + g_1(x_1, t) u \\ \dot{x}_2 &= f_2(x, \theta) + z(x, g_1(x_1, t)) + g_2(x_1, t) u, x(t_0) = x_0\end{aligned}\quad (10)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x) + g_1(x) u_x \\ S_A: \quad \dot{x}_2 &= f_2(x, \theta_x) + Y_y(y, t) + g_2(x_1, t) u_x\end{aligned}\quad (11)$$

$$\begin{aligned}S_V: \quad \dot{y}_1 &= q_1(y) + z_1(x) u_x \\ \dot{y}_2 &= q_2(y, \theta_y) + Y_x(x, t) + z(y) u_y\end{aligned}\quad (12)$$

где $x \in R^{nx}$, $y \in R^{ny}$ - вектора состояния для S_A, S_V , $\theta_x \in R^{n\theta_x}$, $\theta_y \in R^{n\theta_y}$ - вектора неизвестных параметров функций:

$$f = f_1(x) \oplus f_2(x, \theta_x) : R^{nx} \in R^{n\theta_x} \rightarrow R^{nx} \quad (13)$$

где

$$q = q_1(y) \oplus q_2(y, \theta_y) : R^{ny} \in R^{n\theta_y} \rightarrow R^{ny} \quad (14)$$

$$q = q_1(x) \oplus q_2(x) : R^{nx} \in R^{nx}, z = z_1(y) + z_2(x) \quad (15)$$

Функции $Y_y : R^{ny} \times R_+ \rightarrow R_n$, $Y_x : R^{nx} \times R_+ \rightarrow R^{ny}$ задают непрерывные, нелинейные и нестандартные в общем случае неизвестные связи между системами S_A, S_V , $U_x \in R, U_y \in R$ -управляющие входы. Функции $\psi_x : R^{nx} \times R_+ \rightarrow R$, $\psi_y : R^{ny} \times R_+ \rightarrow R$, задают целевые ограничения для S_A, S_V соответственно.

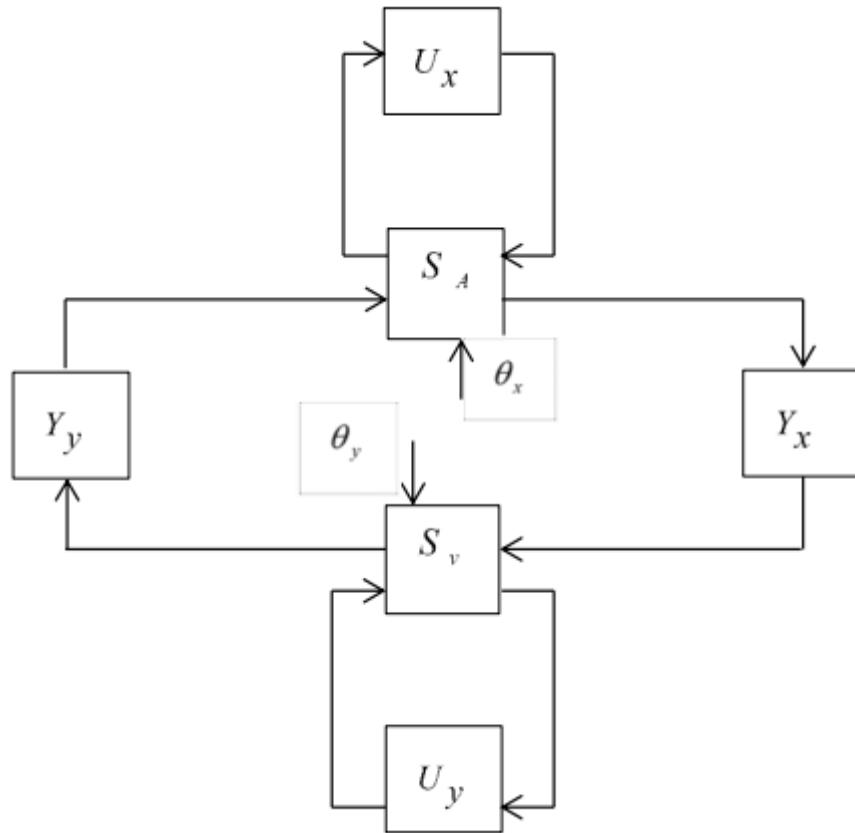


Рис.1 схема взаимодействия элементов при функционировании ИКС в условиях внешних воздействий.

Для некоторых $E_x \in R_+$, $E_y \in R_+$ и момента времени $t^* \in R_+$, неравенства[3]:

$$\|\psi_x(x(t), t) \Pi_\infty[t_0, T]\| \leq E_x, \quad \|\psi_y(y(t), t) \Pi_\infty[t_0, T]\| \leq E_y \quad (16)$$

Определяет желаемое состояние соединения S_A, S_V .

Целью синтеза адаптивного управления является определение функций $U_x(x, t)$, $U_y(y, t)$, обеспечивающих решение части задач (13) и гарантирующих для всех $\theta_x \in R^{n\theta_x}$, $\theta_y \in R^{n\theta_y}$.

Соединение S_A, S_V (11), (12) полно;

Траектории $x(t)$, $y(t)$ ограничены;

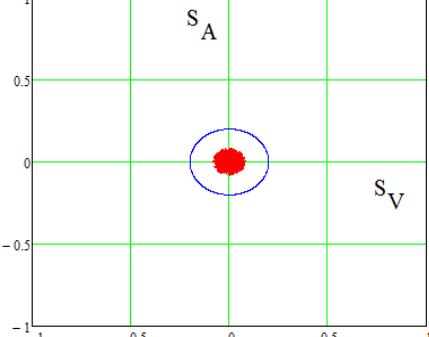
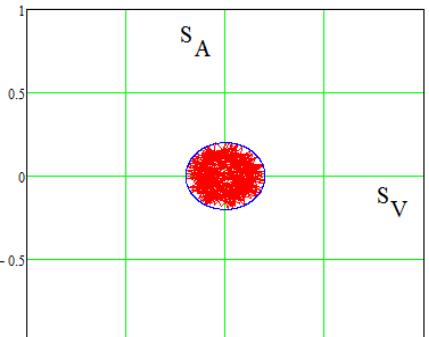
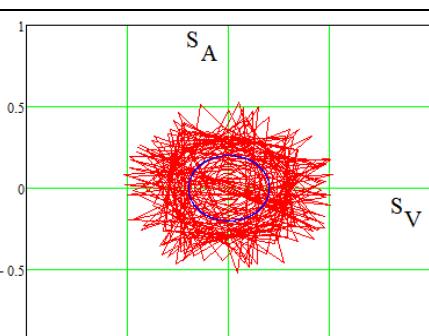
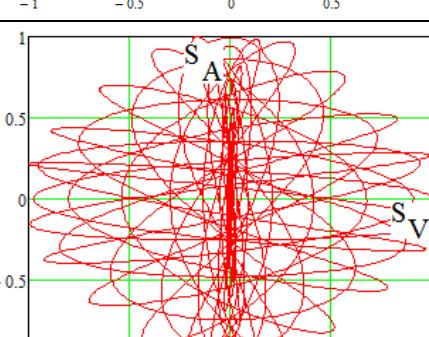
Для заданного значений E_x , E_y и некоторого $t^* \in R_+$ выполняются неравенства (16) и возможно функция $\psi_x(x(t), t)$, $\psi_y(y(t), t)$ стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$.

Функция $U_x(\cdot)$ не должна в явном виде зависеть от состояния "y" для S_V и аналогично функция $U_y(\cdot)$ не должна зависеть от состояния "x" для S_A .

Такой подход в отношении ИКС был предложен сравнительно недавно в [1] и был проверен при его использовании в практических приложениях. Структурная схема движения рабочей точки в системе координат целевых функций управления ИКС и

внешнего воздействия [4] в соответствии со стратегией адаптивного управления ИКС приведена в таблице 1.

Таблица.1 Траектории движения рабочей точки в системе координат целевых функций ИКС с внешними воздействиями

| Траектория движения рабочей точки | Комментарий |
|---|--|
|  | Нормальное функционирование, рабочая точка не выходит за границы устойчивой области. |
|  | Функционирование нормальное, но рабочая точка затрагивает границы устойчивости |
|  | Система не реализует с заданной вероятностью свои целевые функции. Функционирование хаотическое. |
|  | Перехват управления. Система перешла на «новую» рабочую точку и функционирует по реализации «новой» целевой функции. |

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена модель для оценки информационной устойчивости ИКС критических приложений. Решены задачи адаптивного управления в условиях функциональной неопределенности и нелинейной параметризации ИКС в условиях внешних воздействий. Построена структурная схема взаимодействия элементов при функционировании ИКС в условиях внешних воздействий. Определены ограничения для реализации цели управления. В результате получено графическое изображение в виде траектории движения рабочей точки в системе координат целевых функций двух взаимодействующих систем ИКС с внешним воздействием.

Выработаны рекомендации для возможности реализации выполнения целевой функции ИКС, рассчитанные значение которых должны находиться в пределах не ниже заданного порогового значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстых Н.Н. Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности : учеб. пособие [Http:rsl.ru]. – Электрон. текстовые, граф. данные (1,95 Мб);
2. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах, Санкт-Петербург 2006г. С1-376
3. Кудрявцев О.А. Оценка реализации вероятности выполнения целевой функции телекоммуникационной системы в условиях внешних воздействий // Труды 27-й Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" 18-20 апреля 2021, Воронеж №1. С236-237;
4. Кудрявцев О.А. Модельное представление целевой функции телекоммуникационной системы // Труды 27-й Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" 18-20 апреля 2021, Воронеж №1. С236-237;

REFERENCES

1. Tolstykh N.N. Information security software and hardware: textbook. manual [http: rsl.ru]. - Electron. text, graph. data (1.95 MB);
2. Tyukin I.Yu., Terekhov V.A. Adaptation in nonlinear dynamic systems, St. Petersburg 2006. C1-376
3. Kudryavtsev O.A. Assessment of the likelihood of the implementation of the functions of a telecommunication system in conditions of external influences // Proceedings of the 27th International Scientific and Technical Conference "Radar, Navigation, Communication" April 18-20, 2021, Voronezh No. 1. S236-237;
4. Kudryavtsev O.A. Model representation of the function of a telecommunication system // Proceedings of the 27th International Scientific and Technical Conference "Radar, Navigation, Communication" April 18–20, 2021, Voronezh No. 1. S236-237;

МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

О. А. Кудрявцев

АО «Концерн «Созвездие»

Аннотация. Рассмотрен процесс функционирования телекоммуникационной системы (ТКС), определена ее целевая функция в условиях внешних воздействий. На основе метода виртуального алгоритма адаптации, решена задача управления для телекоммуникационной связи критических приложений с использованием синтеза функционального адаптивного регулятора. Решена задача управления в условиях неопределенности о воздействиях среды и в отсутствие точной информации о состоянии устройства коммутации и управления ТКС. Определены оценки верхних границ, как условие необходимое для качественного управления ТКС в процессе ее функционирования. Построена структурная схема компонента выработки управляющих воздействий (адаптивное управление) ТКС.

Ключевые слова: телекоммуникационные системы, метод виртуального алгоритма адаптации, целевая функция.

MODEL REPRESENTATION OF THE TARGET FUNCTION OF A TELECOMMUNICATIONS SYSTEM

O. A. Kudryavtsev

JSC «Concern «Sozvezdie»

Abstract. The process of functioning of the telecommunication system (TCS) is considered, its target function in the conditions of external influences is determined. Based on the method of virtual adaptation algorithm, the control problem for telecommunications communication of critical applications is solved using the synthesis of a functional adaptive controller. The problem of control under conditions of uncertainty about the effects of the environment and in the absence of accurate information about the state of the switching device and control of the TCS is solved. Estimates of the upper limits are determined as a condition necessary for the qualitative management of the TCS in the process of its functioning. A block diagram of the component of generating control actions (adaptive control) of the TCS is constructed.

Keywords: telecommunication systems, method of virtual adaptation algorithm, objective function.

1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Повышению эффективности работы перспективных средств связи с использованием автоматизированной системы в [1] предусматривается автоматизация процессов контроля и управления связью на всех взаимодействующих между собой пунктах управления и элементах системы связи. Однако в данной статье не были рассмотрены вопросы эффективности функционирования ТКС, которые бы затрагивали критерии устойчивости управления, необходимые для выполнения целевых функций её элементов. А также несмотря на интенсивное развитие и усложнение структурно-функциональных принципов ТКС информационного обмена, не проведено оценок качества управления данных сетей, особенно критических приложений (КрП).

Поэтому актуальность выполнения исследования состоит в том, что в настоящее время процесс функционирования ТКС протекает в условиях конфликтного функционирования, при котором существенно изменяются целевые функции системы вплоть с изменением их на противоположные. В этом аспекте целесообразно отметить, что критические приложения – это технологии, влияющие на стратегические вопросы, в частности выделяют:

- атомная энергетика;
- управление войсками и оружием;
- стратегическое планирование и управление;
- связь.

Возрастание роли КрП и их внедрение в различные комплексы делает необходимым определение этих частных целевых функций и их динамическую коррекцию в процессе их функционирования.

ТКС все более переходит в класс критически значимых технологий, что обуславливает интенсификацию процесса разработки и применения против них различных конфликтных компонентов и организованных мероприятий. В связи с этим в составе реализуемых функций появляется составляющая с конфликтным компонентом, оценить влияние которых на всю систему во многих случаях становиться весьма затруднительно, а в некоторых случаях и невозможным. В этих случаях целесообразно использовать частные целевые функции, которые в той или иной степени позволили бы оценить не сколько количественные оценки воздействий, сколько направление этого воздействия в том числе на систему в целом.

Эффективность функционирования любых систем управления в значительной мере определяется уровнем и качеством автоматизации управления. ТКС не является исключением, т.к. подавляющее большинство современных средств связи предполагают дистанционное автоматизированное управление и контроль.

Целью данной работы является модельное представление целевой функции ТКС. На основе метода виртуального алгоритма адаптации, для реализации выполнения целевой задачи управления, а так же с использованием синтеза свойств взаимодействующих приемо-передающих устройств и алгоритма выработки управляющих воздействий, необходимо спрогнозировать изменения свойств изделий, как математических объектов внутри системы, при возникновении внешних воздействий, необходимых для реализации целевых функций элементов телекоммуникационной системы, для качественного предоставления связи между взаимодействующими абонентами сети.

Основные задачи решаемые в данной работе:

- построение структурной схемы функционирования ТКС;
- анализ функционирования ТКС с использованием метода виртуального алгоритма адаптации для изделий как математических объектов внутри телекоммуникационной систем
- выработка стратегий адаптивного управления и построение структурной схемы компонента выработки управляющих воздействий (адаптивное управление) телекоммуникационной системы в условиях внешних возмущающих воздействий.

2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

ТКС двойного назначения не могут быть сведены к хорошо изученным системам связи или автоматизированного управления, а скорее представляют собой новый класс автоматизированных ТКС управления или распределенных автоматизированных систем управления, интегрированных с системой связи и применяемых для связи и управления объектами или системой объектов.

В настоящее время большую значимость приобретают ТКС подвижных объектов и стационарных объектов, способные устойчиво функционировать между подвижными пунктами связи, а также стационарными пунктами управления. На базе существующих радиосредств, и перспективных радиосредств осуществляется взаимодействие должностных лиц различных уровней по условно-закрытым и закрытым каналам связи.

Данные ТКС подвижных объектов и стационарных объектов подвержены деградации в ходе своего функционирования и адаптируются к поддержанию надежности и живучести сети связи посредством самоорганизации направлений связей между объектами. Типовая структурно-функциональная схема ТКС, с учетом положений, при учете внутренних и внешних связей и возможных взаимодействий (рис.1) позволяет достаточно полно рассмотреть процесс формирования конфликтного взаимодействия типа «элемент телекоммуникационной системы – конкурент».

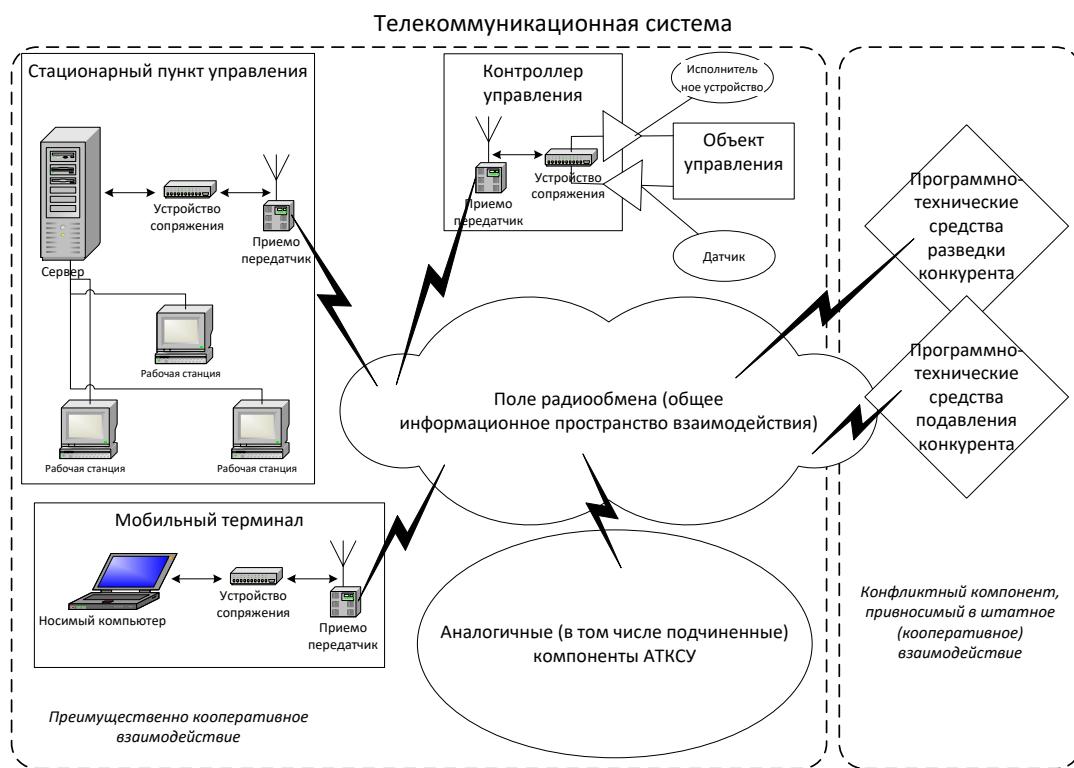


Рис. 1. Телекоммуникационная система (система управления)

В [2] показано, что базовыми составляющими телекоммуникационной системы являются: стационарный компонент управления соответствующего уровня иерархии управления, контроллер (непосредственно соединенный с объектом управления или конструктивно интегрированный в объект) и удаленный терминал (мобильный

терминал). Все перечисленные компоненты содержат приемопередатчики, формирующие общее поле радиообмена, и устройства сопряжения, преобразующие принятые радиосигналы сигналы в установленный цифровой формат (устройство сопряжения также может входить в состав приемопередатчика, например, так устроены радиомодемы). В общем смысле под устройством сопряжения в работе понимается некоторое устройство, обеспечивающее интерфейс между компьютером и приемопередатчиком путем преобразования потоков сигналов, команд и данных к требуемому формату, протоколу. Следует отметить, что описываемое устройство обрабатывает их преимущественно на сигнальном уровне.

Функции управления реализуются в подобных системах сразу в двух аспектах: управление внутрисистемными ресурсами (реализуется в отношении собственных подсистем, например, внутри подсистемы связи с целью оптимального использования радиоканала, распределения информационных ресурсов в процессе решения центральной задачи), а также управление внешними по отношению к ней системами и объектами в рамках своей центральной задачи. Под центральной задачей системы (компоненты) здесь понимается ее проблемная ориентация, то есть некоторая общая или частная задача, решение которой и есть цель создания и функционирования данной системы (компонента). Конкретный способ (алгоритм, программа, блок кодов) решения центральной задачи можно тогда сопоставить целевой функции системы.

Решение центральной задачи целесообразно начинать с построения удобной для изучения модели функционирования элементов телекоммуникационной системы с максимальным охватом их свойств, то есть математической модели, отражающей зависимость некоторой характеристики (показателя) эффективности функционирования системы от некоторых существенных параметров ее элементов, их текущего состояния и изменения во времени. Задача исследования информационной устойчивости комплекса элементов телекоммуникационной системы при подобном подходе будет сведена к анализу изменения эффективности функционирования системы в заданном интервале времени при прохождении системой элементов определенной последовательности состояний с заданными параметрами в невозмущенном состоянии и при малых вариациях начального состояния и/или параметров.

3. ЗАДАЧА СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Базовыми составляющими ТКС являются: стационарный компонент управления соответствующего уровня иерархии управления, контроллер – понимается устройство формирования сигналов общего канала (ОК) и служебного канала (непосредственно соединенный с объектом управления или конструктивно интегрированный в объект) и удаленный терминал. Все перечисленные компоненты содержат приемопередатчики формирующие общее поле радиообмена, и устройства сопряжения, преобразующие принятые радиосигналы в установленный цифровой формат для приемников и передатчиков (устройство сопряжения также может входить в состав приемопередатчика). В общем смысле под устройством сопряжения может выступать блок сопряжения, обеспечивающее интерфейс между компьютером и приемопередатчиком путем преобразования потоков сигналов, команд и данных к

требуемому формату, протоколу. Следует отметить, что описываемое устройство обрабатывает преимущественно на сигнальном уровне [2].

В данном случае объектом управления являются, приемники и передатчики, формирующие широкополосный канал, необходимый для управления распределенными приемниками, которые осуществляют целенаправленное воздействие на подсистемы и элементы телекоммуникационной сети для выполнения возложенных на нее задач и обеспечения требований, предъявляемых к ней. В свою очередь данные элементы сети должны обеспечивать своевременную передачу, прием, обработку, хранение и предоставление информации, образование необходимого количества каналов (трактов) связи для удовлетворения инфокоммуникационных потребностей абонентов (пользователей) в услугах связи с требуемым качеством.

В результате математическим объектом является система управления – стационарный компонент управления соответствующего уровня иерархии управления приемники и передатчики, который обозначается как система S_p [3].

Система S_p :

$$\begin{aligned} S_{p,\tau} : L_u[t_o, T] \times E_p &\rightarrow L_{xp}[t_o, T], \\ H_{p\tau} : L_u[t_o, T] \times E_p &\rightarrow L_{yp}[t_o, T], \\ P_{p\tau} : L_{xp}[t_o, T] \times E_p \times E_\psi &\rightarrow L_{\psi p}[t_o, T]. \end{aligned} \quad (1)$$

В качестве допустимых управлений входов выберем функции $U^*(t) \in U^* \subseteq L_u[t_o, T]$, где U^* – множество допустимых управлений.

Функция $U^*(t)$ может зависеть от состояния $X_p(t)$ и воздействий e_p среды E_p :

$$U^*(t) = U^*(e_p, x_p(t), t), \quad (2)$$

Отметим, что в силу того, что $U(t) \in L_u[t_o, T]$ обладает структурой линейного пространства, любой элемент $U^*(t) \in L_u[t_o, T]$ может быть представлен суммой:

$$U^*(t) = U^*(e_p, x_p(t), t), \quad (3)$$

Отметим, что в силу того, что $L_u[t_o, T]$ обладает структурой линейного пространства, любой элемент $U(t) \in L_u[t_o, T]$ может быть представлен суммой вида

$$U(t) = U^*(e_p, x_p(t), t) + \delta(t), \text{ где } \delta(t) \in L_\delta[t_o, T] \subseteq L_u[t_o, T], \quad (4)$$

Для некоторого $U^*(t) = U$ и подпространства $L_\delta[t_o, T]$ пространства $L_u[t_o, T]$.

Таким образом, можно сказать, что управление $U^*(t)$ преобразует исходную систему (1) с множеством входов $L_u[t_o, T]$ в новую “управляемую систему S_p^* с множеством входов из $L_\delta[t_o, T] \in L_u[t_o, T]$ ”. Изменение оператора системы (1) формально

могут быть получены заменой $U(t)$ в (1) на $U^*(t)=U^*(e_p, x_p(t), t)+\delta(t)$, $\delta(t)\in L_\delta[t_o, T]\subseteq L_u[t_o, T]$ и определены в виде:

$$\begin{aligned} S_{p,\tau}^*(\delta, e) &= S_{p,\tau}(U^* + \delta, e_p), \\ H_{p,\tau}^*(\delta, e) &= H_{p,\tau}(U^* + \delta, e_p), \\ P_{p,\tau}^*(\delta, e) &= P_{p,\tau}(U^* + \delta, e_p, e_\psi). \end{aligned} \quad (5)$$

В зависимости от конкретной задачи вход $\delta(t)$ в уравнение 2 управляемой системы S_p^* может играть роль возмущения, ошибки по управлению.

Для реализации целей информационного воздействия в данной ТКС могут послужить организованные возмущения. С внедрением программного воздействия, которые могут изменять структуру сигнала, повлиять на работу основных процессорных устройств по сети.

Основной причиной изменения параметров управляющих воздействий U^* во времени, вызванных изменением входов $\delta(t)$, по причине изменения внешних воздействий, связано с отказами приемо-передающей аппаратуры (приемники, передатчики), которые могут являться основанием отключения каналов связи, что может повлиять на качество связи.

Минимально допустимой целью управления является ограниченность состояния $x_p(t)$ и выхода $y_p(t)$ объекта. Ограниченность состояния и выхода в случае с реализуемых (полных) систем лишь на ограниченном интервале времени $[t_o, T]$, безусловно, не является конечной целью синтеза.

Однако это требование в силу того, что точные количественные характеристики операторов управляемого объекта не используются на данном этапе синтеза, оказывается адекватным уровню доступной информации об объекте. В данном случае регулятором будет выступать устройство формирования сигналов ОК и служебного канала и широкополосный приемник.

Регулятором называется система S_c :

$$\begin{aligned} S_{c\tau} : L_{yp}[t_o, T] \times E_c &\rightarrow L_{xc}[t_o, T], \\ H_{c\tau} : L_{yp}[t_o, T] \times E_c &\rightarrow L_{yc}[t_o, T] \subseteq L_u[t_o, T], \end{aligned} \quad (6)$$

которая по измерениям выходов – необходимом количестве каналов для приема и передачи, находящихся на всем участке спектра рабочих каналов $y_p[t_o]\in L_{yp}[t_o, T]$ объекта S_p вырабатывает оценки $y_c[t_o]\in L_{yc}[t_o, T]\subseteq L_{uc}[t_o, T]$ функций $U^*(e_p, x_p(t), t)\in U^*$ отражающих на дисплее ЭВМ, исправность и надежность каналов связи, численное значение уровня сигнала (сигнал/помеха).

В силу того, что управление $U^*(e_p, x_p(t), t)\in U^*$, обеспечивающее достижение целевой функции, для телекоммуникационной системы и использующей централизованное управление, по средствам устройства коммутации и управления ТКС,

по сути сводится к формированию общего канала сигнализации и служебного канала находящиеся в постоянном включенном состоянии на изделиях формирования сигналов ОК и служебного канала и широкополосного приемника, в этом случае зависит от состояния $x_p(t)$, т.е. количества каналов связи одновременно находящиеся в работоспособном состоянии, на которые воздействует среда $e_p \in E_p$. В случае выхода из строя данных изделий, становится критично управление всей системы связи.

В результате естественным образом возникают задачи восстановления значений свойств управляемых объектов – мобильных (удаленных) терминалов, необходимых для управления информации о состоянии $x_p(t)$ и о воздействиях среды e_p .

В соответствии с этим процесс воздействия на управление приемников, и передатчиков будет описано подсистемой наблюдения, адаптации и функции которые необходимо представить в следующем виде:

система наблюдения S_0 :

$$\begin{aligned} S_{o\tau} : L_{yp}[t_o, T] \times E_o &\rightarrow L_{xo}[t_o, T], \\ H_{o\tau} : L_{yp}[t_o, T] \times E_o &\rightarrow L_{yo}[t_o, T], \end{aligned} \quad (7)$$

система адаптации S_a :

$$\begin{aligned} S_{at} : L_{yp}[t_o, T] \oplus L_{yo}[t_o, T] \times E_a &\rightarrow L_{xa}[t_o, T], \\ H_{at} : L_{yp}[t_o, T] \oplus L_{yo}[t_o, T] \times E_a &\rightarrow L_{ya}[t_o, T], \end{aligned} \quad (8)$$

и функции

$$\begin{aligned} U_o : E_p \times L_{y_o}[t_o, T] \times R_+ &\rightarrow L_u[t_o, T], \\ U_a : L_{y_a}[t_o, T] \times L_{y_o}[t_o, T] \times R_+ &\rightarrow L_u[t_o, T], \end{aligned} \quad (9)$$

где $y_o(t)$ - оценка информации о состоянии $x_p(t)$ при воздействиях среды e_p по измерениям $y_p(t)$, а $y_a(t)$ - оценка информации о воздействиях среды e_p по измерениям $y_o(t)$ с использованием оценок $y_o(t)$.

При этом функция $U_o(e_p, y_o(t), t)$ является оценкой управления $U^*(e_p, x_p(t), t)$ по измерениям $y_p(t)$ при условии, что e_p известно.

Функция $U_a(y_a(t), y_o(t), t)$ в свою очередь является оценкой функции $U_o(e_p, y_o(t), t)$ по измерениям $y_p(t)$, $y_o(t)$.

Таким образом, через функцию $U_o(e_p, y_o(t), t)$ и отображения 7,8, функция $U_a(y_a(t), y_o(t), t)$ является оценкой функции $U^*(e_p, x_p(t), t)$ по измерениям $y_p(t)$. В этой связи функция $U_a(y_a(t), y_o(t), t)$ является выходом $y_c(t)$ регулятора S_c .

В данной статье, при условии, что желаемое поведение обусловлено лишь ограниченностью состояния и выходов объектов управления, логично рассматривать не качество системы в целом, а качество собственно управления.

В силу того, что объект S_p под действием управления $U^*(e_p, x_p(t), t)$ представляет собой систему 7, для которой пространство входов ограничено линейным нормированным пространством $L_o[t_o, T]$, то в роли критерия качества управления выбрать отклонение функций, $U_a(y_a(t), y_o(t), t)$ по норме в $L_o[t_o, T]$ от неизвестного $U^*(e_p, x_p(t), t)$

$$L_x[t_o, T] = [U^*(e_p, x_p(t), t) - U_o(e_p, y_o(t), t)] L_\delta[t_o, T], \quad (10)$$

$$L_e[t_o, T] = [U_o(e_p, x_p(t), t) - U_a(y_a, y_o(t), t)] L_\delta[t_o, T]. \quad (11)$$

Таким образом, задача синтеза функционального адаптивного регулятора в широком смысле этого слова, как задача управления в условиях неопределенности информации о воздействиях $(e_p, e_o, e_a) \in E_p \times E_o \times E_a$ среды и в отсутствие точной информации о состоянии $x(t) \in L_x[t_o, T]$ объекта S_p , может быть сформулирована следующим образом.

Для класса реализуемых (полных) объектов S_p найти функцию $U^*(e_p, x_p(t), t)$ и определить классы систем S_0, S_a такие, что для всех $e_p \in E_p$;

1. Замыкание системы S_p^* с регулятором S_0, S_a реализуемо (полно);

Состояние $x_p(t)$ и выход $\sup_{T \geq t_o} p_{l\psi(\cdot)}(e_p, e_\psi, d, T) = \Delta_P(e_p, e_\psi, d)$ объекта S_p и регулятора

ограничены;

2. Оценки верхних границ $\tau_x, \tau_e[t_o, T]$

$\left[\|x_p(t)\|_\infty[t_o, T] \leq \mu S_{P,\infty}(e_p, \Delta p(e_p, e_\psi, \Delta j_x + \Delta j_c \| \delta(t) \| L_\delta[t_o, T])) \right]$ могут быть получены

как функции аргументов e_p, e_o, e_a .

Стоит сказать, что данное требование обусловлено необходимостью сравнения свойств систем управления, находящиеся в зависимости от условий функционирования и состояния среды E_p, E_o, E_a . Исходя из полученных математических преобразований, для решения задачи устойчивости обеспечения управления в максимальном диапазоне условий функционирования системы связи, необходимо построить структурную схему компонента выработки управляющих воздействий (адаптивное управление).

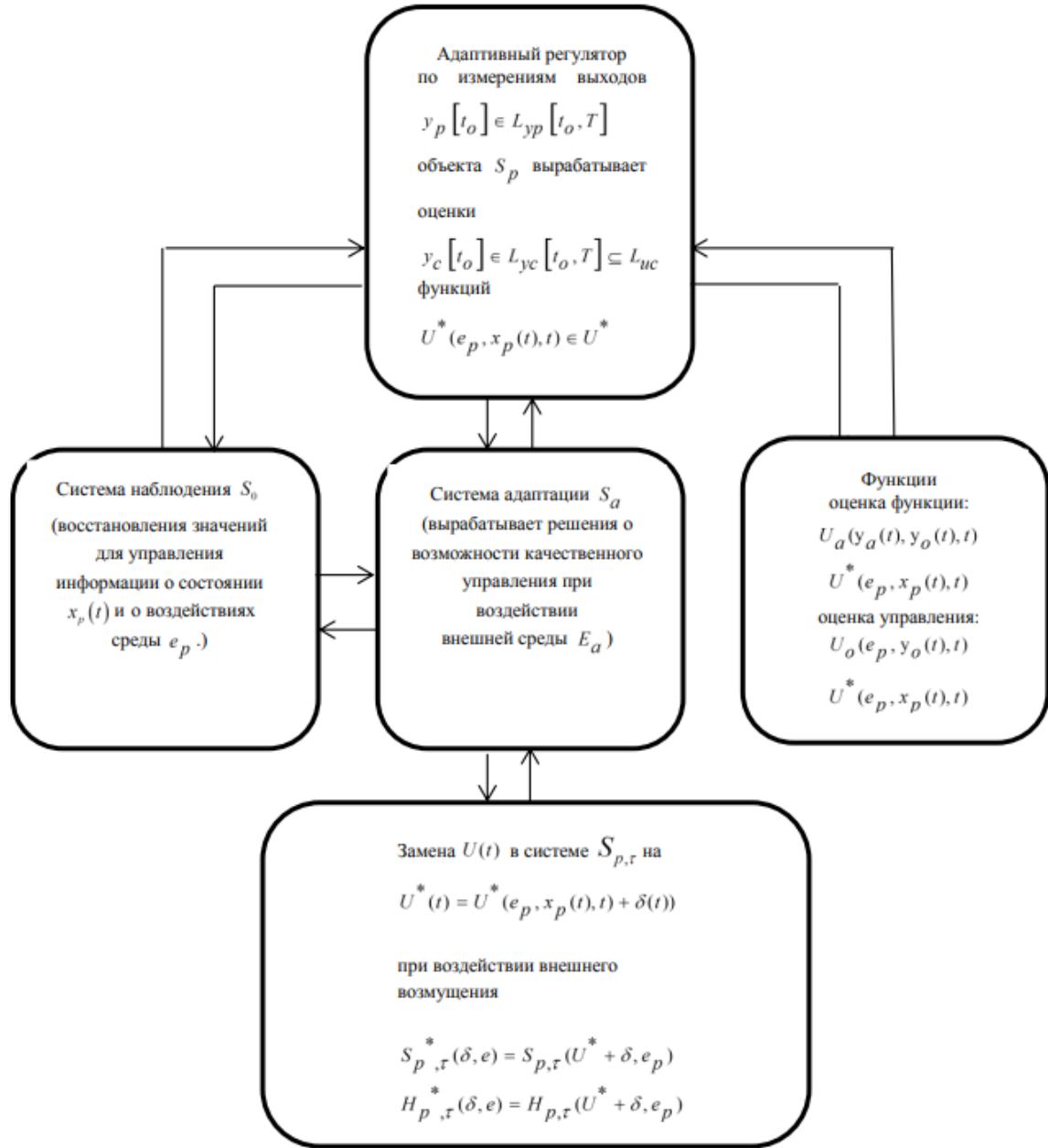


Рис. 2. Компонент выработки управляемых воздействий: адаптивное управление

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе построено модельное представление выполнения решения целевой функции телекоммуникационной системы, с использованием метода виртуального алгоритма адаптации.

На основе выработки управляемых воздействий, с использованием адаптивного управления внутри ТКС реализована схема компонента выработки управляемых воздействий. Описана система наблюдения, система адаптации, функции управления телекоммуникационной системы. В результате были решены задачи: построена структурная схема функционирования телекоммуникационной системы, проведен анализ функционирования ТКС с использованием метода виртуального алгоритма адаптации для изделий как математических объектов внутри ТКС, выработка стратегий адаптивного

управления, и построение структурной схемы компонента выработки управляющих воздействий (адаптивное управление) ТКС в условиях внешних возмущающих воздействий.

На основе определения оценок верхних границ, были спрогнозированы изменения параметров (элементов ТКС), представляющих каналы для приема и передачи информации между абонентами сети и изделий вырабатывающие сигналы управления для успешного взаимодействия всех абонентов ТКС связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.А. Пшеничных, П.С. Ференец «Автоматизированная система управления связью как инструмент для повышения эффективности управления автоматизированной системой связи стратегического звена» 23 международная научно-техническая конференция: Радиолокация, навигация, связь, Воронеж, 2017г;
2. Толстых Н.Н. Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности : учеб. пособие [Http:rsl.ru]. – Электрон. текстовые, граф. данные (1,95 МБ);
3. Тюкин И.Ю., Терехов В.А., Адаптация в нелинейных динамических системах, Санкт-Петербург 2006г.

REFERENCES

1. L.A. Pshenichnykh, P.S. Ferenets "Automated communication control system as a tool to improve the efficiency of management of an automated communication system of a strategic link" 23 international scientific and technical conference: Radar, navigation, communication, Voronezh, 2017;
2. Tolstykh N.N. Software and hardware for information security: textbook. manual [Http: rsl.ru]. - Electron. text, graph. data (1.95 MB);
3. Tyukin I.Yu. , Terekhov V.A., Adaptation in nonlinear dynamic systems, St. Petersburg 2006.

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ МЯГКИХ РЕШЕНИЙ СИМВОЛОВ В ГАУССОВСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

С.В. Шахтанов

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет (НГИЭУ),
город Княгинино Нижегородской области, Россия

Аннотация. Системы повышения достоверности данных в транспортных системах носят специфический характер. В таких системах выбор методов кодирования связывается с возможностью достижения границы К. Шеннона [8]. Для таких систем активно изучаются и используются коды LDPC, последовательное и параллельное турбокодирование, методы многопороговой обработки данных. Разнообразие направляющих систем сетей передачи данных требует несколько иных подходов к решению задачи повышения достоверности. В таких системах целесообразно использовать методы избыточного кодирования, позволяющие максимально использовать введённую в код избыточность, обладающие обусловленной универсальностью и относительной простотой реализации кодеков. В определённой степени этим условиям отвечают относительно короткие блоковые коды, которые в отличие от свёрточных кодов более приспособлены к проблемам синхронизации кодеков при обработке коротких кортежей данных в системе сетей передачи данных. С учётом этого возникает необходимость изучения различных методов формирования мягких решений символов, пригодных для реализации в широком спектре средств каналаобразования.

Ключевые слова: мягкие решения, жёсткие решения, перестановочное декодирование, стирающий канал связи, декодер, дисперсия, плотность распределения вероятности.

MODIFICATION OF THE METHOD OF FORMATION OF SOFT SOLUTIONS OF SYMBOLS IN A GAUSSIAN COMMUNICATION CHANNEL

S.V. Shakhtanov

Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University (NGIEU), Knyaginino town, Nizhny Novgorod region, Russia

Abstract. Systems for increasing the reliability of data in transport systems are of a specific nature. In such systems, the choice of coding methods is associated with the possibility of reaching the Shannon boundary [8]. For such systems, LDPC codes, sequential and parallel turbo coding, and multi-threshold data processing methods are being actively studied and used. The variety of guiding systems of data transmission networks requires slightly different approaches to solving the problem of increasing reliability. In such systems, it is advisable to use redundant coding methods that make it possible to use the redundancy introduced into the code to the maximum, possessing the stipulated universality and relative simplicity of the codec implementation. To a certain extent, these conditions are met by relatively short block codes, which, unlike convolutional codes, are more adapted to the problems of codec synchronization when processing short data tuples in a data transmission network system. Taking this into account, it becomes necessary to study various methods for the formation of soft decisions of symbols, suitable for implementation in a wide range of channeling means.

Keywords: soft decisions, hard decisions, permutation decoding, erasing communication channel, decoder, variance, probability distribution density.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение средств перестановочного декодирования (ПД) за счёт использования детерминированной составляющей является одним из приоритетных направлений в системе повышения достоверности данных перспективных оптических систем, поскольку методы нейросетевого декодирования избыточных кодов в настоящее время недостаточно изучены и ограничиваются слишком краткими кодами [6]. Для реализации ПД необходимы мягкие решения символов (МРС), выработка которых в оптико-волоконных линиях (ОВЛ) не рассматривалась.

Применение метода мягкого декодирования избыточных кодов обосновано главным образом для непрерывных каналов связи с высоким уровнем помех. Для двоичного канала связи с независимым потоком ошибок по асимптотическим оценкам декодирование избыточных кодов с применением МРС обеспечивает заметный энергетический выигрыш (до 3 дБ) относительно использования банальной обработки данных с системой жёстких решений [2, 3, 5, 7, 9]. Это объясняется тем, что МРС, являясь количественной мерой достоверности принятого жёсткого решения, выполняют с определённой долей вероятности p_λ роль локаторов ошибок, на поиск которых не требуется использования ресурсов введенной в код избыточности. Модель канала связи, в которой считается, что $p_\lambda \equiv p_e$, где p_e – вероятность ошибочного приёма символа, получила название стирающего канала связи. Модель в реальных системах носит гипотетический характер [3, 10]. По этой причине известные способы формирования МРС для реализации мягких декодеров необходимо подвергнуть критическому анализу на предмет возможности их применения в системе ОВЛ.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стирающий канал связи является грубым приближением к методу мягкой оценки принятого двоичного символа. Принцип формирования стираний в двоичных каналах связи с широким интервалом стирания в соответствии с аналитическим выражением вида описан в [3]. Исходя из этого, значения МРС целесообразно вырабатывать на базе стирающего канала связи с широким интервалом стирания в соответствии с аналитическим выражением вида:

$$\lambda_i(z) = \left\lfloor \frac{\lambda_{\max}}{\mu\sqrt{E_b}} \times z_i \right\rfloor, \text{ при } 0 \leq z_i \leq \mu\sqrt{E_b}, \quad (1)$$

где λ_{\max} – максимальное значение мягкого решения (задаётся конструктором); μ – значение интервала стирания (обычно $0 \leq \mu < 1$); E_b – энергия сигнала на бит; z_i – реально зафиксированное значение сигнала (как правило, из-за воздействия деструктивных факторов отличается от номинального) [3, 4]. Условный оператор выработки МРС представляется выражением:

$$\lambda_i(z) = \begin{cases} \lfloor (\lambda_{\max} / \mu \sqrt{E_b}) \times z_i \rfloor, & \text{при } 0 \leq z_i < \mu \sqrt{E_b}; \\ \lambda_{\max}, & \text{при } \mu \sqrt{E_b} \leq z_i < (2 - \mu) \sqrt{E_b}; \\ -\lfloor (\lambda_{\max} / \mu \sqrt{E_b}) \times z_i \rfloor, & \text{при } (2 - \mu) \sqrt{E_b} \leq z_i < 3\sigma. \end{cases} \quad (2)$$

Наличие двух рабочих порогов $-\mu \sqrt{E_b}$ и $+\mu \sqrt{E_b}$ несколько усложняет аналитический анализ такой системы, но благодаря движению порога $-\mu \sqrt{E_b}$ с ростом параметра μ в сторону $-\infty$ в модели двоичного симметричного канала (ДСК) с АБГШ от нулевого порога, вероятность ошибки на бит становится меньше, т.е.:

$$p_b \text{ при } (-\mu \sqrt{E_b}) \text{ и } \mu > 0 < p_b \text{ при } \mu = 0 \quad (3)$$

Именно этим объясняется практическая востребованность подобных технических решений и их широкое применение на низкоэнергетических каналах связи. Отрицательным фактором в рассматриваемой модели является неоправданный рост числа ошибочно стёртых символов, получивших своё название как «ложные стирания». Действительно для ДСК имеем:

$$\int_{-\mu \sqrt{E_b}}^0 P(x|1)dx < \int_0^{\mu \sqrt{E_b}} P(x|1)dx, \quad (4)$$

где $P(x|1)dx$ – условная плотность распределения вероятностей (ПРВ) приёма сигнала при передаче логической единицы. При соответствующем изменении пределов интегрирования, тоже самое можно утверждать для $P(x|0)dx$. В работе [7] показано, что при $\mu=1$ модель стирающего канала связи теряет смысл (все сигналы будут регистрироваться приёмником в виде стираний), а оптимальным значением интервала стирания при приемлемых отношениях сигнал/шум является значение $\mu \approx 0,3$.

3. МЕТОДЫ

Способ квантования уровней сигнала (метод Витерби), в котором параметр μ имеет несколько дискретных значений. При этом сигнал не стирается, а фиксированному жёсткому решению 0 или 1 дополнительно присваивается некоторый индекс надёжности в виде MPC. Было доказано, что достаточно изменять MPC от значения 0 до значения 7, что соответствует последовательности выражений (5). Пределы интегрирования изменяются с шагом $1/8=0,125$:

$$\begin{aligned} & \int_0^{0,125 \sqrt{E_b}} P(x|1)dx \rightarrow \lambda_{MPC} = 0; \\ & \int_{0,125}^{0,25 \sqrt{E_b}} P(x|1)dx \rightarrow \lambda_{MPC} = 1; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\int_{0,25}^{0,375\sqrt{E_b}} P(x|1)dx \rightarrow \lambda_{\text{MPC}} = 2;$$

$$\int_{0,875}^{\sqrt{E_b}} P(x|1)dx \rightarrow \lambda_{\text{MPC}} = 7.$$

Таким образом, MPC, формируемые по данному принципу, носят целочисленный характер. В работе [1] показано, что переход на множество действительных показателей асимптотически даёт выигрыш всего в 0,2 дБ, но обрабатывать такие сигналы в процессоре приёмника значительно сложнее, по этим причинам применение дробных значений MPC в оптических системах связи становится нецелесообразным. Классические модели формирования мягких решений показаны в таблице 1.

Таблица 1. Модели формирования мягких решений

| Способ формирования MPC | Числовой формат представления MPC | Основные недостатки способа | Учёт свойств модели в новом способе формирования MPC |
|--|---|---|--|
| Метод квантования уровней принятого сигнала | Целочисленные значения $\lambda_i \in \mathbb{N}$ | Наличие до 18 порогов принятия решения о MPC, сложно использовать в многоуровневых системах модуляции | В отличие от способа Витерби используются только четыре порога для оценки MPC |
| Метод скользящих окон в стирающем канале связи | Целочисленные значения $\lambda_i \in \mathbb{N}$ | Существенное влияние на оценку MPC ложных стираний | Метод нейтрален к ложным стираниям |
| Метод логарифма отношения правдоподобия | Действительные числа $K_{\text{пр}} \in \mathbb{R}$ | Необходимо знание дисперсии мешающих факторов | Нет необходимости измерять параметры канала связи. Используются только целочисленных значений $\lambda_i(z) \in \mathbb{N}$ |

В работе [3] показано, что для получения MPC возможно использование широкого интервала стирания μ , при этом проблема формирования ложных стираний совершенно теряет смысл, поскольку интервал стирания задаётся исключительно для формирования углового коэффициента линейной функции.

Подобная характеристика позволяет достаточно просто определить значение MPC по замыслу конструктора либо в формате $K_{\text{пр}} \in \mathbb{R}$ или в формате $\lambda_i(z) \in \mathbb{N}$. Подобная техническая задача имеет простое решение, при этом оценки надёжности в

максимальной степени соответствуют своим показателям, а процесс формирования МРС в основном зависит от параметра сигнал/шум. Более того, данное решение в максимальной степени адаптировано к адекватным изменениям состояния канала связи и позволяет гибко изменять угловой коэффициент линейной функции в зависимости от тенденции следования текущих значений МРС. Рассматриваемая модель формирования МРС на базе стирающего канала связи может быть модифицирована с целью отказа от символики стирающего канала связи, что позволяет без потери положительных свойств способа формирования МРС и их статистических характеристик, использовать всего два порога для выработки мягких решений.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возникает вопрос о необходимости использования понятия стирающего канала связи в системе формирования МРС. Это понятие позволяет сформировать линейную функцию, на основе которой в ходе обработки принятого сигнала z формируется мягкое решение и показатель $\lambda_{max}/\mu\sqrt{E_b}$ является угловым коэффициентом такой линейной функции. Введение порогов стираний для оптических каналов контрпродуктивно из-за сложностей технической реализации процессора приёма. С целью снижения сложности реализации процессора приёма за счёт уменьшения числа порогов принятия решений предлагается модифицировать правило о значении МРС за счёт введения коэффициента $0 < \xi < 1$ и одновременного аннулирования коэффициента μ . В этом случае выражение (1) принимает вид:

$$\lambda_i^* = \left| \left| \frac{\lambda_{max} + \xi}{E_b} \times z_i \right| \right| \quad (6)$$

где ξ – точка пересечения линейных функций

Следовательно, введение поправочного коэффициента ξ позволяет избавиться в условном операторе процессора приёма сразу от двух порогов, что позволит существенно упростить решающие схемы для традиционных видов модуляции сигналов, используемых в большинстве сетей передачи данных. Модифицированное правило (6) особенно важно для использования в оптических системах связи. Статистические свойства формируемых МРС при этом не меняются, поскольку значение параметра $0 < \xi < 1$, а округление выполняется по правилу (6). Это означает, что максимальная оценка МРС остаётся на уровне $\lambda_{max} = 7$. В этом случае для условной вероятности $p(z|1)$ имеем модифицированное правило:

$$\lambda_i(z) = \begin{cases} \lfloor ((\lambda_{max} + \xi)/\sqrt{E_b}) \times z_i \rfloor & \text{при } 0 \leq z_i < \sqrt{E_b}; \\ -\lfloor ((\lambda_{max} + \xi)/\sqrt{E_b}) \times z_i \rfloor & \text{при } \sqrt{E_b} \leq z_i < 3\sigma. \end{cases} \quad (7)$$

Введение модуля в выражение (7) описывает получение МРС и для условной вероятности $p(z|0)$. Очевидно, что статистические свойства значений МРС будут подчиняться плотности распределения вероятности (ПРВ) принятого в модели закона распределения.

Большое число порогов приводит к усложнению процессора приёма при формировании MPC. Предлагается перейти от концепции стирающего канала связи к системе всего с 3 порогами, поскольку все значения MPC больше 7 округляются до этой оценки. В этом случае в выражении 1 исключается параметр μ . Выражение принимает форму (6), в которой параметр ξ (кси) условно показывает точку пересечения линейных функций слева и справа от мат. ожидания. Красная зона на рисунке показывает на окружление оценок до значения λ_{\max} (в данном примере = 7). Подобный подход не изменяет статистику решений о MPC, характерных для стирающего канала связи, но увеличивая или уменьшая ξ , позволяет в адаптивном приёме увеличить или уменьшить зону максимальных оценок. Принципы формирования MPC при различных подходах к решению задачи и адаптивное расширение зоны надёжных MPC показаны на рисунках 1-4.

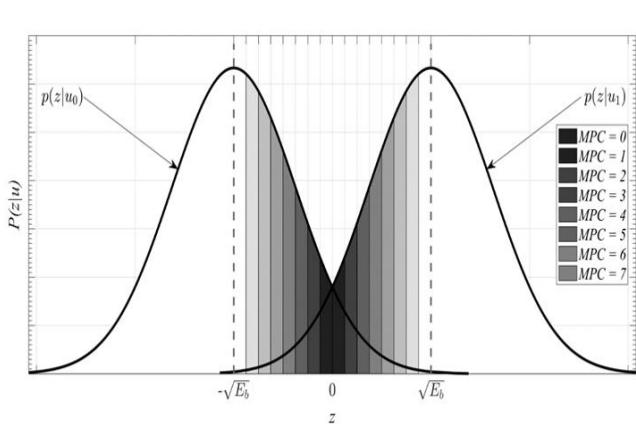


Рис. 1. Принцип формирования MPC по Витерби (19 порогов)

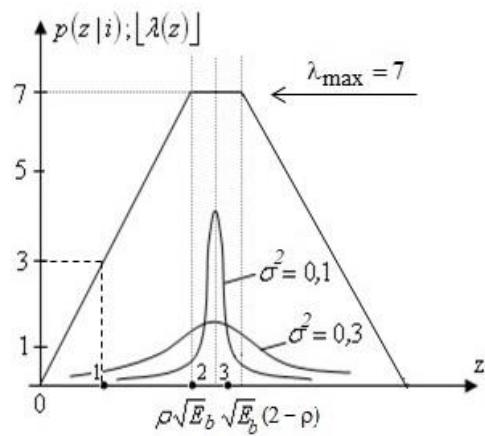


Рис. 2. Схема формирования MPC на базе стирающего канала связи (5 порогов)

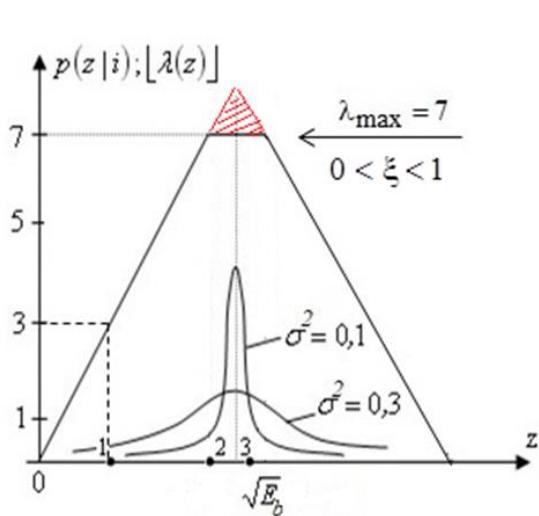


Рис. 3. Схема формирования MPC с тремя порогами

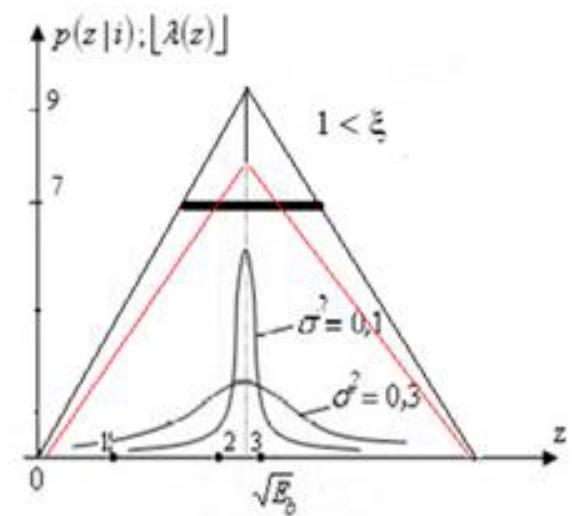


Рис. 4. Адаптивное расширение зоны надёжных MPC

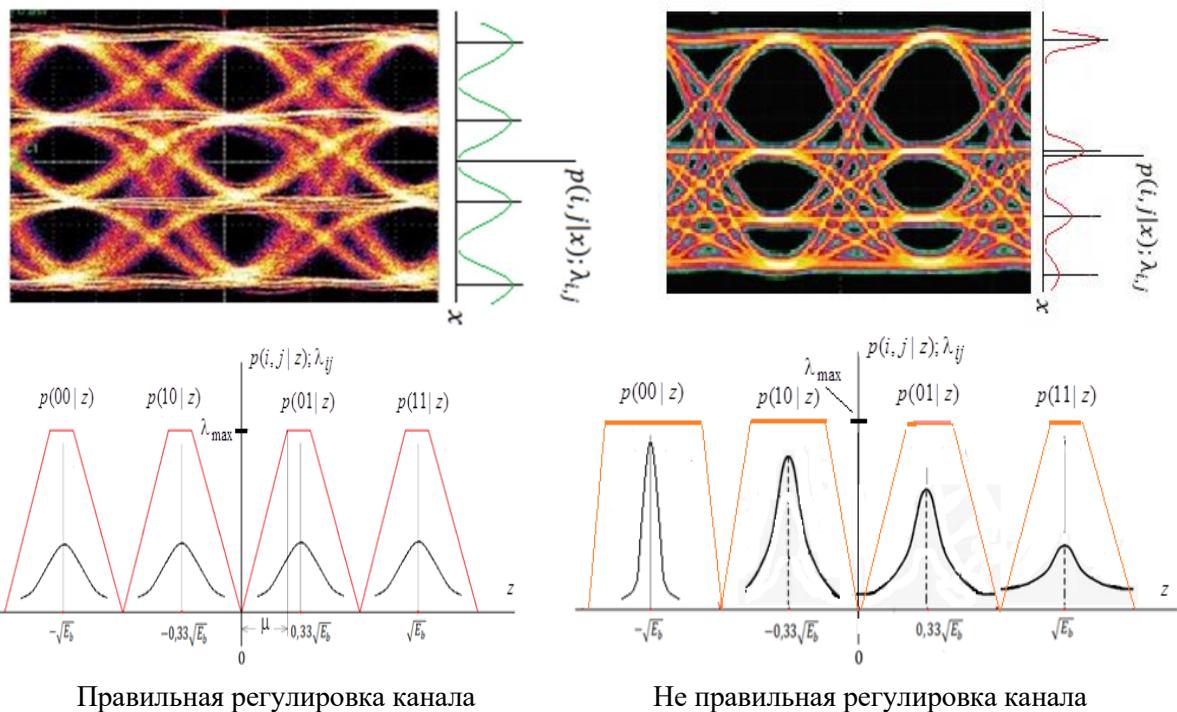


Рис. 5. Варианты формирования мягких решений символов в системе с РАМ-4

На рисунке 5 представлены 2 типа глазковых диаграмм с правильной регулировкой оптического канала (слева) и не правильной регулировкой (справа) при использовании ОВЛ и модуляции РАМ-4. Предложенный метод формирования МРС позволяет адаптивно изменять зону максимальной оценки в зависимости от дисперсии в подканале. При этом снижение доли максимальных оценок может явиться индикатором разрегулировки оптического канала связи.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ моделей формирования мягких решений позволяет сделать вывод о необходимости уменьшения числа порогов МРС в целях упрощения конструкций кодеков, повышения их скоростных характеристик и надёжности работы.

Модификация решающего правила выработки МРС позволяет вдвое снизить число порогов в процедуре выработки целочисленных оценок надёжности, что способствует снижению сложности построения процессора приёмника. Показана универсальность модифицированной процедуры формирования МРС на основе линейной функции и целесообразность её использования в перспективных оптических каналах связи для высокоскоростных систем обмена данными при применении сложных видов модуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Склар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение – 2-е изд., испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь / пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.

3. Гладких А. А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 379 с.
4. Гладких А. А., Пчелин Н. А., Шахтанов С. В. Минимизация объёма памяти когнитивной карты декодера в системе поиска эквивалентных кодов // Радиотехника. – 2018. – № 6. – С. 38–41.
5. Васильев К. К., Служивый М. Н. Математическое моделирование систем связи. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 128 с.
6. Драко А. М., Романенко Д. М. Особенности нейросетевого декодирования линейных блочных кодов // Труды БГТУ. – 2015. – № 6.– Физико-математические науки и информатика. – С. 166-170 .
7. Шувалов В.П. Приём сигналов с оценкой их качества. – М. : Связь, 1979. – 240 с.
8. Овечкин Г.В., Зубарев Ю.Б Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь. – 2008. – № 12. – С. 58–61.
9. Золотарев В.В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования. — М.: Горячая линия — Телеком. 2006. 282 с.
10. Kuijper M., Nepp D. Erasure codes with simplex locality // IEEE Transactions on Information Theory (under revision), arXiv:1209.3977[cs.IT], 2013.

REFERENCES

1. Sklyar B. Digital communication. Theoretical foundations and practical application - 2nd ed., Rev. - M.: Publishing House "Williams", 2003. - 1104 p.
2. Prokis J. Digital communication / per. from English ed. D.D. Klovsky. - M.: Radio and communication, 2000 .- 800 p.
3. Gladkikh A.A. Fundamentals of the theory of soft decoding of redundant codes in the washing communication channel. - Ulyanovsk: UlSTU, 2010 .- 379 p.
4. Gladkikh A.A., Pchelin N.A., Shakhtanov S.V. Memory minimization of the cognitive map of the decoder in the search system for equivalent codes // Radiotekhnika. - 2018. - No. 6. - P. 38–41.
5. Vasiliev K.K., Sluzhivyi MN Mathematical modeling of communication systems. - Ulyanovsk: UlSTU, 2010 .- 128 p.
6. Drako A.M., Romanenko D.M. Features of neural network decoding of linear block codes // Proceedings of BSTU. - 2015. - № 6. - Physical and mathematical sciences and informatics. - S. 166-170.
7. Shuvalov V.P. Reception of signals with an assessment of their quality. - M.: Communication, 1979 .- 240 p.
8. Ovechkin G.V., Zubarev Yu.B. Noise-resistant coding in digital data transmission systems // Electrosvyaz. - 2008. - No. 12. - P. 58–61.
9. Zolotarev V.V. Theory and algorithms for multi-threshold decoding. - M .: Hotline - Telecom. 2006.282 s.
10. Kuijper M., Nepp D. Erasure Codes with Simplex Locality // IEEE Transactions in Information Theory (under revision), arXiv: 1209.3977 [cs.IT], 2013.

НОВЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Ю. С. Ионенков

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН), Москва, Россия, Uionenkov@ipiran.ru

Аннотация. Настоящая статья посвящена вопросам развития и совершенствования методического аппарата оценки эффективности информационных систем (ИС). Рассмотрен общий методический подход к выбору показателей эффективности ИС. Представлены перечни показателей эффективности для различных типов ИС. Сформулированы подходы к оценке вклада ИС в эффективность организационных систем. Представлены обобщенные и частные показатели, характеризующие влияние ИС на эффективность организационной системы.

Ключевые слова: эффективность; информационная система; показатель; метод; организационная система.

NEW ASPECTS OF EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF INFORMATION SYSTEMS

Y.S. Ionenkov

Federal Research Center «Computer and Control» of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS),
Moscow, Russian Federation, Uionenkov@ipiran.ru

Abstract. This article is devoted to the development and improvement of the methodological apparatus for evaluating the effectiveness of information systems (IS). A general methodological approach to the selection of IS performance indicators is considered. Lists of performance indicators for different types of IS are presented. Approaches to assessing the contribution of IS to the effectiveness of organizational systems are formulated. Generalized and partial indicators describing the impact of IS on the effectiveness of the organizational system are presented.

Keywords: efficiency; information system; performance; method; organizational system.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эффективность применения информационных систем (ИС) во многом зависит от качества реализованных в них системотехнических решений, а также организационно-технических мероприятий по обеспечению функционирования этих систем. Все это определяется научной обоснованностью предъявляемых к ним требований и их точной реализацией на всех стадиях жизненного цикла систем, что предполагает развитие соответствующего методического аппарата. Поэтому оценка качества ИС является актуальной на всех стадиях их жизненного цикла – от формирования замысла их создания до обеспечения эксплуатации. При проектировании ИС, то есть на стадиях замысла и их разработки возникает необходимость анализа нескольких возможных вариантов системотехнических решений и выбора наилучшего из них с учетом имеющихся ограничений и условий функционирования. На стадиях производства и эксплуатации возникает задача оценки достигнутого уровня характеристик ИС и их

соответствия заданным требованиям с целью выработки рекомендаций по совершенствованию и модернизации системы. Поэтому существует необходимость совершенствования существующего нормативно-методического аппарата оценки эффективности и качества ИС. Вопросу разработки методического аппарата оценки эффективности ИС посвящен ряд статей [1-5], опубликованных в предыдущие годы. Вместе с тем, опыт применения разработанного методического аппарата в ходе работ по созданию и сопровождению ИС свидетельствует о необходимости его совершенствования.

В настоящей статье рассмотрены вопросы совершенствования методического аппарата оценки эффективности информационных систем по следующим направлениям:

- совершенствование подходов к выбору показателей эффективности ИС [6];
- разработка методических подходов к оценке вклада ИС в эффективность соответствующих организационных систем [7].

2. ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИС

Методический аппарат оценки эффективности ИС в значительной степени базируется на выборе и обосновании перечня показателей их эффективности.

Следует отметить, что нормативная база, устанавливающая перечень требований и показателей качества функционирования ИС, к настоящему времени является весьма неразвитой. К числу имеющихся документов, можно отнести, например, [8-13]. Однако анализ показывает, что перечень представленных в них показателей является недостаточным и не учитывает всей номенклатуры и специфики имеющихся ИС.

В частности, стандарты [8,9] содержат достаточно общие требования к характеристикам системы и не содержат конкретных показателей качества разрабатываемых систем. Конкретные показатели определяются разработчиком ТТЗ на систему. Стандарт [10] рассматривает только служебную информацию (данные), кроме того, он содержит весьма ограниченную номенклатуру показателей качества. Достаточно полный перечень требований и показателей качества функционирования ИС содержит стандарт [11]. Положения этого стандарта могут применяться при формировании требований технического задания, при сравнительном анализе, оценке и обосновании технических решений, при проведении испытаний (в том числе сертификационных), при контроле качества функционирования создаваемых, модернизируемых и эксплуатируемых информационных систем, то есть практически на всех этапах жизненного цикла современных систем. Стандарт содержит порядка 10 характеристик качества функционирования информационных систем (надежность, своевременность, полнота, актуальность, безошибочность, конфиденциальность и др.) и около 15 основных показателей качества функционирования ИС, для которых задаются конкретные значения. Вместе с тем, по большинству обобщенных показателей качества данный стандарт предлагает всего один-два частных показателей качества, что недостаточно для объективной и всесторонней оценки системы.

Более развитой является нормативная база в области задания требований и оценки качества программных средств [12,13]. Данные стандарты содержат достаточно

подробный перечень показателей, позволяющих оценивать качество программного обеспечения для ИС, и широко используются на практике.

Таким образом, существует необходимость совершенствования существующей нормативной базы в области требований и показателей качества функционирования ИС. Следует отметить, что разработка стандартов связана с длительными сроками и сложностью их разработки стандартов. Для организации разработки стандарта необходимо провести соответствующие исследования и обосновать заявку на разработку стандарта, что требует участия подготовленных специалистов в соответствующей предметной области. В этом плане у отечественных предприятий и НИО существуют определенные трудности. Разработка стандартов также включает ряд стадий и занимает длительное время. В связи с этим, до появления новых стандартов в данной области целесообразны разработка и обоснование перечня показателей эффективности для конкретных типов ИС, подлежащих оценке в рамках соответствующих работ и проектов.

Выбор показателей эффективности целесообразно осуществлять исходя из следующих соображений:

- соответствие показателей целям разработки и назначению системы;
- измеримость с помощью существующих физических величин. Желательно выбирать показатели, которые могут быть выражены количественно;
- выбор оптимального числа показателей, так как при их малом числе не в полной мере учитываются целевые функции системы, а с ростом числа показателей возрастает трудоемкость оценки;
- показатели эффективности по возможности должны учитывать требования, регламентируемые действующими нормативно-техническими документами в области ИС.

Конкретный перечень показателей эффективности зависит от типа и задач ИУТС. При этом выделяются: интегральный показатель эффективности системы; обобщенные и частные показатели эффективности. Интегральный показатель характеризует эффективность системы в целом, обобщенные показатели эффективности отражают различные стороны функционирования системы: техническую; технологическую; экономическую; организационную и др., частные показатели эффективности включают конкретные характеристики системы по каждой из групп обобщенных показателей.

В ряде публикаций были разработаны предложения по перечню показателей эффективности для типовой ИУТС на основе доработанных и расширенных требований ГОСТ Р В 51987-2002, обоснованные в [14], для ИС на основе применения облачных технологий [4], для системы распределенных ситуационных центров органов государственной власти (СРСЦ) [2], а также для ведомственной системы ситуационных центров [1], представленные на рисунке 1. Здесь же отмечены и особенности выбора показателей для конкретных систем.

| | |
|---|--|
| <p>Типовая ИС (доработка требований ГОСТ Р В 51987-2002)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Надежность • Своевременность • Полнота • Достоверность • Конфиденциальность • Защищенность от НСД <p><u>Особенность:</u> доработка в части расширения числа требований (показателей)</p> | <p>ИС на основе облачных технологий</p> <ul style="list-style-type: none"> • Технический фактор • Технологический фактор • Экономичность • Степень риска • Информационная безопасность • Человеческий фактор <p><u>Особенности:</u> сложность обеспечения ИБ; технология в стадии освоения; высокая степень типизации и унификации аппаратно-программных средств.</p> |
| <p>СРСЦ органов государственной власти</p> <ul style="list-style-type: none"> • Развитие системы • Своевременность • Полнота • Достоверность • Организация <p><u>Особенность:</u> высокая степень типизации и унификации технических средств и технологий.</p> | <p>Ситуационные центры</p> <ul style="list-style-type: none"> • Функциональные задачи • Технический фактор • Технологический фактор • Эксплуатационный фактор • Организационный фактор <p><u>Особенности:</u> большое значение организационного фактора; высокая степень типизации и унификации технических средств и технологий.</p> |

Рис. 1. Показатели эффективности для различных типов ИС

В таблице 1 в качестве примера более подробно представлены обобщенные и частные показатели эффективности для типовой ИС на основе доработанных и расширенных требований ГОСТ Р В 51987-2002, а также для ИС на основе применения облачных технологий.

Для вычисления обобщенных показателей эффективности и интегрального показателя эффективности систем используются существующие методы решения многокритериальных задач, которые можно разделить на две группы. Одна из групп использует свертку критериев для сведения многокритериальной задачи оптимизации к соответствующей скалярной, другая опирается на непосредственное исследование множества оптимальных решений с введением некоторых дополнительных критериев выбора. К первой группе относятся методы среднего взвешенного и анализа иерархий, ко второй - методы Парето, последовательных уступок и анализа среди функционирования.

Применительно к ИС методы оценки эффективности должны, с одной стороны, позволять производить оценку эффективности как вариантов реализации ИС относительно друг друга (на стадиях замысла и разработки), так и отдельных систем (на стадиях производства и эксплуатации), а с другой стороны, быть пригодными для практического использования и понятными для лиц, производящих такую оценку. Исходя из этого для оценки эффективности ИС наиболее широко используются методы и методики, основанные на применении методов среднего взвешенного и анализа иерархий [1-4].

Таблица 1. Варианты показателей эффективности для различных типов ИС

| Вид ИС | Обобщенные показатели | Частные показатели |
|---|-----------------------------|--|
| Типовая ИС (требования по ГОСТ Р В 51987-2002) | Надежность | <ul style="list-style-type: none"> • Коэффициент готовности • Среднее время наработки на отказ • Среднее время восстановления • Вероятность безотказной работы • Вероятность представления/доведения информации |
| | Своевременность | <ul style="list-style-type: none"> • Среднее время доведения информации • Среднее время доступа к данным • Среднее время обработки информации • Вероятность обработки информации за Тзад. • Среднее время выполнения технологических операций |
| | Полнота | <ul style="list-style-type: none"> • Доля информации, представленной в требуемом объеме • Доля реализованных решений • Полнота контроля • Вероятность оперативного отражения объектов и явлений |
| | Достоверность | <ul style="list-style-type: none"> • Вероятность безошибочной обработки • Средняя наработка на ошибку • Среднее время коррекции информации • Коэффициент информационного технического использования |
| | Конфиденциальность | <ul style="list-style-type: none"> • Вероятность сохранения конфиденциальности информации в течение заданного периода • Время вскрытия информации • Вероятность навязывания ложного сообщения |
| | Защищенность от НСД | <ul style="list-style-type: none"> • Вероятность сохранения защищенности от НСД • Время успешной попытки НСД • Вероятность преодоления механизмов защиты |
| ИС с применением облачных технологий | Технический | <ul style="list-style-type: none"> • Уровень надежности • Скорость обмена информацией • Масштабируемость ресурсов • Дополнительное пространство хранения • Резервное копирование информации |
| | Технологический | <ul style="list-style-type: none"> • Возможности интеграции приложений • Развитие среды работы приложений • Развитие системы мониторинга • Удобство пользовательского интерфейса |
| | Экономичность | <ul style="list-style-type: none"> • Расходы на внедрение • Экономия средств • Выгодность использования облачных технологий |
| | Степень риска | <ul style="list-style-type: none"> • Нормативно-правовые вопросы • Реагирование провайдера на инциденты • Совместимость • Восстановление данных и их конфиденциальности |
| | Информационная безопасность | <ul style="list-style-type: none"> • Криптографическая защита данных • Аутентификация пользователей • Разграничение прав пользователей • Антивирусная защита |
| | Организационный | <ul style="list-style-type: none"> • Готовность сотрудников к внедрению новых технологий • Уровень подготовки сотрудников • Способность сотрудников к обучению • Уровень мотивации сотрудников |

3. Подходы к оценке вклада ИС в эффективность организационных систем

Роль современных ИС заключается в повышении эффективности функционирования соответствующей организационной системы за счет улучшения качества и своевременности принятия управленческих решений, повышения уровня доступности информации, сокращения сроков обработки различных документов, расширения внутриведомственного и межведомственного взаимодействия, внедрения систем электронного документооборота.

При оценке вклада ИС в эффективность организационных систем (министерств, ведомств, организаций) необходимо учитывать особенности, условия и ограничения, характеризующие соответствующую организационную систему, ее функции, структуру и состав, связи между объектами системы и с взаимодействующими системами, потребности в автоматизации функций, применении современных информационно-аналитических технологий. При этом целесообразно оценить прирост эффективности организационной системы за счет внедрения новых ИС либо модернизации существующих для различных вариантов реализации ИС.

Оценка вклада ИС в эффективность организационной системы представляет собой процесс, состоящий из нескольких этапов:

- анализ особенностей, целей развития и задач организационной системы;
- обоснование и выбор групп показателей (обобщенных показателей) эффективности ИС, учитывающих различные аспекты деятельности организационной системы и ее особенности;
- определение частных показателей эффективности для каждой из групп;
- разработка методов расчета частных и обобщенных показателей эффективности, а также интегрального показателя эффективности системы;
- оценка влияния ИС на эффективность функционирования организационной системы, изменение целевых показателей системы.

Необходимо отметить, что некоторые из указанных показателей могут быть комплексными, то есть включать несколько частных показателей, что увеличивает число уровней иерархии показателей в системе. Например, уровень экономичности структуры управления зависит от удельного веса численности руководителей в общей численности персонала, удельного веса затрат на содержание руководителей, а также соотношения управленческих расходов и объема выпускаемой продукции. Уровень надежности управления характеризуется степенью контроля функций и операций, удельным временем ожидания документа либо решения и уровнем надежности принятых решений.

Порядок выбора показателей эффективности ИС применительно к различным типам систем и стадиям их жизненного цикла достаточно подробно рассмотрен в [6].

Представляется, что предлагаемый набор показателей достаточно универсален. Естественно, что для каждой конкретной организационной системы этот набор показателей должен уточняться с учетом специфики ее построения и функционирования.

Таблица 2. Показатели, характеризующие влияние ИС на эффективность организационной системы

| Обобщенные показатели | Частные показатели |
|--|---|
| Показатели рациональности организационной структуры ИС | <ul style="list-style-type: none"> Соответствие числа и организационной структуры ИС задачам организационной системы и перспективам ее развития. Соответствие численности обслуживающего персонала объему задач системы. Уровень использования современных инфокоммуникационных технологий в ИС. Полнота обеспечения ИС требуемой информацией. Стоймостные показатели действующих и внедряемых ИС. Экономичность структуры управления |
| Показатели эффективности функционирования ИС | <ul style="list-style-type: none"> Уровень автоматизации функций (процессов) организационной системы. Уровень реализации задач (услуг, проектов) организационной системы с помощью ИС. Сокращение времени на принятие управленческих решений. Сокращение времени на сбор, обработку и доступ к информации. Повышение доступности информации. Повышение надежности управления. Сокращение времени представления отчетности и трудозатрат на ее подготовку. Прямые доходы либо экономический эффект, получаемые при внедрении системы |
| Показатели организационно-технического уровня ИС | <ul style="list-style-type: none"> Наличие и укомплектованность подразделений эксплуатации ИС. Уровень организации рабочих мест. Уровень профессиональной подготовки персонала. Уровень готовности сотрудников организации к внедрению и применению новых технологий. Способность сотрудников к обучению |

В качестве источников информации для расчета показателей могут использоваться: принятая структура организационной системы; положение о соответствующей организационной системе; штатное расписание; нормативы и стандарты, принятые в системе; различные виды отчетности; показатели деятельности за соответствующие периоды и т. п.

Методический аппарат для оценки вклада ИС в эффективность организационных систем должен, с одной стороны, позволять производить оценку эффективности с достаточной точностью, а с другой – быть пригодным для практического использования и понятным для лиц, производящих такую оценку. Исходя из этого, представляется целесообразным использовать методы, обеспечивающие получение необходимых количественных оценок в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации.

Одним из наиболее апробированных и широко используемых в практике методов такого рода является метод анализа иерархий, разработанный Т. Саати [15, 16]. Для этого метода характерны простота, апробированность, возможность работы с большой размерностью данных. Кроме того, он ориентирован на нечеткие оценки, что более просто для экспертов, чем точные количественные оценки. Основное содержание данного метода и его применение для оценки эффективности информационно-телекоммуникационных систем достаточно подробно представлены в [2].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ИС создаются и эксплуатируются в течение длительных промежутков времени, при этом на всех стадиях жизненного цикла требуется оценка их соответствия предъявляемым требованиям. Несмотря на то, что в научно-технической литературе описаны ряд подходов к оценке эффективности ИС, на сегодняшний момент эти вопросы недостаточно formalизованы и, в основном, основаны на интуиции и опыте разработчиков систем. Это обуславливает необходимость разработки методического аппарата оценки эффективности систем.

Предложен подход к выбору показателей эффективности ИС, наиболее полно учитывающих всю совокупность характеристик систем. Данный перечень показателей может быть использован при формировании ТТЗ на ОКР, оценке качества разрабатываемых и действующих ИС, а также как база для разработки нормативно-технической документации в данной области.

Рассмотрены требования и общие подходы к формированию перечня показателей, характеризующих влияние ИС на эффективность организационных систем, а также представлен перечень обобщенных и частных показателей эффективности ИС, позволяющий оценить вклад информационных систем в эффективность соответствующей организационной системы, что имеет большое практическое значение в совершенствовании механизма управления соответствующими системами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С., Шабанов А.П. К вопросу о сравнительной оценке эффективности ситуационных центров // Системы и средства информатики, 2013. Т. 23. № 2. С. 155–171.
2. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. К вопросу оценки эффективности автоматизированных систем с использованием метода анализа иерархий // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 162–179.
3. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. Некоторые аспекты оценки эффективности автоматизированных информационных систем на различных стадиях их жизненного цикла// Системы и средства информатики – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2016, Том 26, № 3. с.123-136.
4. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С., Сучков А.П. Некоторые аспекты оценки эффективности облачных технологий // Системы и средства информатики – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2018, Том 28, № 3. с.104-117.
5. А. А. Зацаринный, Ю. С. Ионенков Метод выбора варианта построения информационно-телекоммуникационной системы // Системы и средства информатики – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2019, Том 29, № 3. с. 114-126.
6. А.А. Зацаринный, Ю.С. Ионенков. Некоторые методические аспекты выбора показателей эффективности информационных систем// Системы высокой доступности. М.: Радиотехника, 2019, № 4. с. 19-26.
7. А.А. Зацаринный, Ю.С. Ионенков. Методический подход к оценке вклада информационных систем в эффективность организационных систем// Системы и средства информатики – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2020, Том 30, № 2. с.137-145.
8. ГОСТ РВ 15.201-2003 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Тактико-техническое (техническое) задание на выполнение опытно-конструкторских работ. М.: Госстандарт России. 2004. 36 с.
9. ГОСТ 34.602-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. М.: Стандартинформ. 2009. 15 с.

10. ГОСТ Р 51170-98 Качество служебной информации. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 2001. 11 с.
11. ГОСТ РВ 51987-2002 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Требования и показатели качества функционирования информационных систем. – М.: Стандартинформ, 2003. 52 с.
12. ГОСТ 28195-89 Оценка качества программных средств. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2001. 31 с.
13. ГОСТ ИСО/МЭК 9126-2001 Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. М.: Стандартинформ, 2013. 13 с.
14. Ионенков Ю.С. Научно-практические аспекты оценки эффективности информационно-телекоммуникационных систем// Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (17-19 апреля 2018 г.). Том 1. – Воронеж: ООО «Вэлберн», 2018, с. 140-149.
15. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
16. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. – М.: ЛКИ, 2008. 360 с.

REFERENCES

1. Zatsarinny, A.A., Y.S. Ionenkov, and A.P. Shabanov. 2013. Regarding comparative evaluation of situational centers efficiency. Systems and Means of informatics. 23(2): 155-171.
2. Zatsarinnyy, A.A., and Yu.S. Ionenkov. 2015. Regarding automated systems efficiency evaluation using Analytic Hierarchy Process. Systems and Means of informatics. 25 (3):161-178.
3. Zatsarinnyy, A.A., and Y.S. Ionenkov. 2016. On aspects of automated information system efficiency evaluation at different stages of lifecycle. Systems and Means of informatics. 26(3):122-132.
4. Zatsarinny, A. A., Yu. S. Ionenkov and A.P. Suchkov. 2018. Some Aspects of cloud computing efficiency estimation. Systems and Means of informatics. 28 (3):106-119.
5. Zatsarinnyy, A.A., and Y.S. Ionenkov. 2019. The method of selecting a variant of the construction of information and telecommunication systems. Systems and Means of informatics. 29 (3): 114-126.
6. Zatsarinnyy, A.A., and Yu.S. Ionenkov. 2019. Some methodological of the choice of performance indicators of information systems. Highly available systems. Vol.15 №4: 19-26.
7. Zatsarinnyy, A.A., and Y.S. Ionenkov. 2020. Methodological approach to assessing the contribution of information systems to the effectiveness of organizational systems. Systems and Means of informatics. 30(2):136-134.
8. GOST RW 15.201-2003. 2004. System of product development and production. Military equipment. Tactical and technical (technical) task to perform experimental design work. Moscow: Gosstandart of Russia. 36 p.
9. GOST 34.602-89. 2009. Information technology. Set of standards for automated system. Technical directions for automated system making. Moscow: Standardinform Publs. 15 p.
10. GOST R 51170-98. 2001. Quality of technological and official information. Terms and definitions. Moscow: Gosstandart of Russia. 11 p.
11. GOST RW 51987-2002. 2003. Information technology. Set of standards for automated system. Requirements and quality indicators of information systems functioning. Moscow: Standardinform Publs. 52 p.
12. GOST 28195-89. 2001. Quality control of software systems. General principles. Moscow: Standardinform Publs. 31 p.
13. GOST ISO/IEC 9126-2001. 2013. Information technology. Software product evaluation. Quality characteristics and guidelines for their use. Moscow: Standardinform Publs. 13 p.
14. Ionenkov Yu.S. 2018. Scientific and practical aspects of evaluating the effectiveness of information and telecommunication systems. Radar, navigation, communication: proceedings of the XXIV International scientific and technical conference. Voronezh. "Walburn", 140-149.
15. Saati, T. 1993. Decision making. Analytic hierarchy process. Moscow: Radio and communications. 278p.
16. Saati, T. 2008. Decision making in dependences and feedbacks. Analytic networks. Moscow: LKI Publ. 360p.

ОДНОКАНАЛЬНЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА

И.И. Малышев¹, В.И. Шестопалов¹, А.И. Мордовин¹

¹АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, РФ

Аннотация. Рассмотрен режим обнаружения шумоподобного сигнала в одноканальном приемнике. Проведена оценка помехоустойчивости обнаружения одноканальным приемником шумоподобного сигнала с учетом алгоритма контрольных проверок.

Ключевые слова: обнаружение шумоподобного сигнала, алгоритм контрольных проверок, распределения Релея, Райса.

SINGLE CHANNEL NOISE-LIKE SIGNAL DETECTOR

I.I. Malyshev¹, V.I. Shestopalov¹, A.I. Mordovin¹

¹JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation

Abstract. Noise-shaped signal detection mode in a single-channel receiver is considered. Evaluation of noise immunity of noise-shaped signal detection using a single-channel receiver with account of control checks algorithm is implemented.

Keywords: noise-shaped signal detection, control checks algorithm, Raileigh distribution, Rice distribution.

Для обеспечения высокой помехозащищенности в радиолиниях широкое распространение получили шумоподобные сигналы (ШПС) [1,2,3,4]. Работа радиолинии с ШПС сигналами, требует обеспечение взаимной синхронизации передающей и приемной аппаратуры [5]. Для этого используется специально передаваемый синхросигнал в суммарном ШПС сигнале, который согласован с моментом передачи информационного сигнала, несущего передаваемую информацию. Процесс обнаружения ШПС сигнала начинается с устранения временной неопределенности проходящего сигнала с опорным сигналом приемника, после этого проводится синхронизация фазы приходящего сигнала, что и позволяет осуществить когерентное выделение приходящей информации. Следовательно, устранение временной неопределенности проводится в режиме некогерентного обнаружения приходящего ШПС сигнала. Простейшая схема такого обнаружителя представлена на рисунке 1.

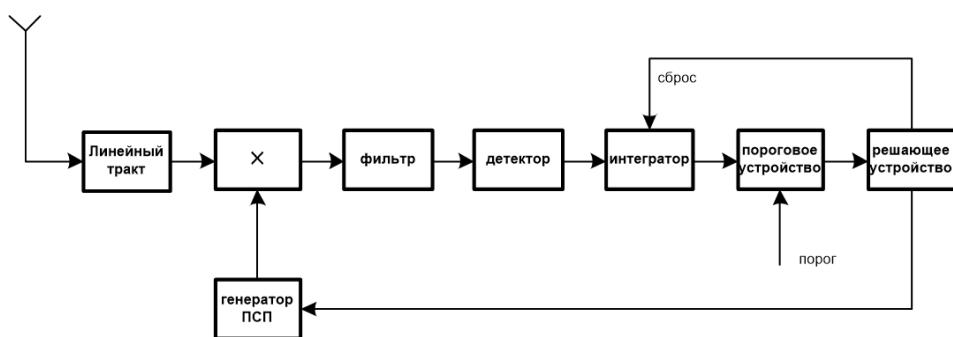


Рис.1 Схема одноканального обнаружителя ШПС сигнала

Принимаемый ШПС сигнал характеризуется следующими параметрами: T - период длительности псевдослучайной последовательности (ПСП); τ - длительность элементарного импульса ПСП; $T/\tau = N$ - число элементарных импульсов в периоде ПСП, которые характеризуются как база сигнала ШПС. Для устранения временной неопределенности устройство обнаружения, представленное на рис.1, работает следующим образом. Результат перемножения входного сигнала на опорную копию ПСП поступает на фильтр с полосой $\Delta f = 1/2T$ и далее через детектор на интегратор со сбросом, с временем интегрирования T . Сигнал с выхода интегратора поступает на пороговое устройство и далее на решающую схему. Решающая схема в конце периода T принимает решение о сдвиге опорной копии генератора ПСП на один период τ в случае отсутствия сигнала на выходе порогового устройства. При наличии сигнала на выходе порогового устройства, решающая схема останавливает перестройку опорной копии генератора ПСП и проводит дополнительные проверки в течение контрольного времени, длительность которого определяется выбранным алгоритмом.

На основании дополнительных проверок, по выбранному алгоритму, принимается окончательное решение об устранения временной неопределенности между приходящим сигналом и опорной копией генератора ПСП или продолжение перестройки с шагом τ опорной копией генератора ПСП. После устранения временной неопределенности, проводится процесс точной подстройки опорной копии генератора ПСП, синхронизация фазы приходящего сигнала и когерентное выделение принимаемой информации.

За весь полный цикл проверки всех точек неопределенности ШПС сигнала вероятность ложной тревоги можно представить через вероятность ложной тревоги ($P_{ЛТ}$) в каждой точке неопределенности ШПС сигнала в виде

$$P_{ЛТЦ} = 1 - (1 - P_{ЛТ})^N \quad (1)$$

С учетом разложения по формуле Ньютона [5]

$$(1 - b)^N = \sum_{\gamma=0}^N (-1)^\gamma C_N^\gamma b^\gamma \approx 1 - Nb \quad (2)$$

вероятность ложной тревоги за полный цикл можно представить в следующем виде

$$P_{ЛТЦ} = 1 - (1 - P_{ЛТ})^N \approx NP_{ЛТ} \quad (3)$$

В качестве алгоритма контрольной проверки можно использовать факт превышения порога в g из m интервалах T на длительности этапа контрольной проверки mT . Тогда вероятность ложного ($P_{ЛТ}^{g \rightarrow m}$) и правильного обнаружения ($P_{OB}^{g \rightarrow m}$) за этапе контрольной проверки длительностью mT определяется формулой Бернули и имеет вид [6]

$$P_{ЛТ}^{g \rightarrow m} = \sum_{i=g}^m C_m^i P_{ЛТ}^i (1 - P_{ЛТ})^{m-i} \quad (4)$$

$$P_{OB}^{g \rightarrow m} = \sum_{i=g}^m C_m^i P_{OB}^i (1 - P_{OB})^{m-i} = \sum_{i=g}^m C_m^i (1 - P_{PP})^i P_{PP}^{m-i} \quad (5)$$

где C_m^i - число сочетаний из m по i , P_{PP} - вероятность пропуска сигнала.

Вероятность ложной тревоги $(P_{ЛПЦК}^{g \rightarrow m})$ за полный цикл всех N точек неопределенности ШПС сигнала, с учетом рассматриваемого алгоритма контрольной проверки, можно представить в виде

$$P_{ЛПЦК}^{g \rightarrow m} = P_{ЛПЦ} P_{ЛПД}^{g \rightarrow m} = NP_{ЛП} \left(\sum_{i=g}^m C_m^i P_{ЛП}^i [1 - P_{ЛП}]^{m-i} \right) \quad (6)$$

Вероятность пропуска сигнала $(P_{ПРК}^{g \rightarrow m})$, с учетом рассматриваемого алгоритма контрольной проверки, при совпадении приходящего сигнала и опорной копии, можно представить в виде

$$P_{ПРК}^{g \rightarrow m} = 1 - P_{OB} P_{OB}^{g \rightarrow m} = 1 - [1 - P_{PP}] \left[\sum_{i=g}^m C_m^i (1 - P_{PP})^i P_{PP}^{m-i} \right] \quad (7)$$

При отсутствии на входе полезного сигнала полный цикл времени проверки всех точек неопределенности ШПС можно представить в виде

$$T_{Ц} = NT + \Delta \quad (8)$$

где Δ - время контрольных проверок.

Так как время контрольных проверок можно представить в виде $\Delta = NP_{ЛП} kT$,

тогда полный цикл времени проверок всех точек неопределенности имеет виде

$$T_{Ц} = NT + NP_{ЛП} kT \quad (9)$$

Вероятность ложной тревоги для приемного устройства задается в виде вероятность ложной тревоги за час работы ($P_{ЛПЧ}$) приемного устройства в режиме обнаружения сигнала. Вероятность ложной тревоги за час работы можно представить в виде

$$P_{ЛПЧ} = 1 - (1 - P_{ЛПЦК}^{g \rightarrow m})^M \approx MP_{ЛПЦК}^{g \rightarrow m} \quad (10)$$

$$M = \frac{3600}{T_{Ц}}$$

где

Учитывая малое значение величины $NP_{ЛП}$ выражение (9) можно представить в виде

$$T_{Ц} = NT + NP_{ЛП} kT \approx NT \quad (11)$$

Тогда с учетом (10) и (11) величину $P_{ЛПЦК}$ можно представить в виде

$$P_{ЛПЦК}^{g \rightarrow m} = \frac{P_{ЛПЧ} TN}{3600} \quad (12)$$

На выходе амплитудного детектора при наличии только шума плотность распределения определяется законом Релея [7].

$$W_1(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

где σ^2 - дисперсия шума

Вероятность ложной тревоги в каждой точке (P_{LT}) можно представить в виде[7]

$$P_{LT} = \int_{\eta}^{\infty} W_1(x) dx = \int_{\eta}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (14)$$

где η - порог, который обеспечивает требуемую вероятность ложной тревоги на каждой точке.

Проведем замену $y = \frac{x}{\sigma}$ $\sigma dy = dx$ $\eta_n = \frac{\eta}{\sigma}$ (нормированный порог) тогда

$$P_{LT} = \int_{\eta_n}^{\infty} y \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy = \exp\left(-\frac{\eta_n^2}{2}\right) \quad (15)$$

Из выражения (15) получаем величину нормированного порога η_n в виде.

$$\eta_n = \sqrt{-2 \ln(P_{LT})} \quad (16)$$

При контрольной проверки по алгоритму наличия превышения порога в 2-х из 3-х интервалах Т на длительности этапа контрольной проверки 3Т, вероятность ложной тревоги ($P_{LTCK}^{2 \rightarrow 3}$) за полный цикл всех N точек неопределенности ШПС сигнала с учетом (6) можно представить в виде

$$P_{LTCK}^{2 \rightarrow 3} = NP_{LT} \left(\sum_{i=2}^3 C_3^i P_{LT}^i [1 - P_{LT}]^{3-i} \right) \approx 3NP_{LT}^3 \quad (17)$$

Из (17) получаем

$$P_{LT} = \left(\frac{P_{LTCK}^{2 \rightarrow 3}}{3N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

С учетом (12) величину P_{LT} можно представить в виде

$$P_{LT} = \left(\frac{P_{LTQ} T}{3 \times 3600} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

При этом с учетом (19) величина нормированного порога $\eta_n^{2 \rightarrow 3}$ будет иметь вид

$$\eta_n^{2 \rightarrow 3} = \sqrt{-2 \ln(P_{LT})} = \sqrt{\frac{2}{3} (\ln 3 + \ln 3600 - \ln P_{LTQ} - \ln T)} \quad (20)$$

При контрольной проверки по алгоритму наличия превышения порога в 3-х из 3-х интервалах Т на длительности этапа контрольной проверки 3Т, вероятность ложной тревоги $(P_{ЛПК}^{3 \rightarrow 3})$ за полный цикл всех N точек неопределенности ШПС сигнала с учетом (6) можно представить в виде

$$P_{ЛПК}^{3 \rightarrow 3} = NP_{ЛT} \left(\sum_{i=3}^3 C_3^i P_{ЛT}^i [1 - P_{ЛT}]^{3-i} \right) = NP_{ЛT}^4 \quad (21)$$

Из (21) получаем

$$P_{ЛT} = \left(\frac{P_{ЛПК}^{3 \rightarrow 3}}{N} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (22)$$

С учетом (12) величину $P_{ЛT}$ можно представить в виде

$$P_{ЛT} = \left(\frac{P_{ЛПЧ} T}{3600} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (23)$$

При этом с учетом (23) величина нормированного порога $\eta_{h}^{3 \rightarrow 3}$ будет иметь вид

$$\eta_{h}^{3 \rightarrow 3} = \sqrt{-2 \ln(P_{ЛT})} = \sqrt{\frac{1}{2} (\ln 3600 - \ln P_{ЛПЧ} - \ln T)} \quad (24)$$

При контрольной проверки по алгоритму наличия превышения порога в 3-х из 5 интервалов Т на длительности этапа контрольной проверки 5Т, вероятность ложной тревоги $(P_{ЛПК}^{3 \rightarrow 5})$ за полный цикл всех N точек неопределенности ШПС сигнала с учетом (6) можно представить в виде

$$P_{ЛПК}^{3 \rightarrow 5} = NP_{ЛT} \left(\sum_{i=3}^5 C_5^i P_{ЛT}^i [1 - P_{ЛT}]^{5-i} \right) \approx 10NP_{ЛT}^4 \quad (25)$$

Из (25) с учетом (12) получаем

$$P_{ЛT} = \left(\frac{P_{ЛПЧ} T}{10 \times 3600} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (26)$$

При этом с учетом (26) величина нормированного порога $\eta_{h}^{3 \rightarrow 5}$ будет иметь вид

$$\eta_{h}^{3 \rightarrow 5} = \sqrt{-2 \ln(P_{ЛT})} = \sqrt{\frac{1}{2} (\ln 10 + \ln 3600 - \ln P_{ЛПЧ} - \ln T)} \quad (27)$$

При контрольной проверки по алгоритму наличия превышения порога в 5-х из 5 интервалов Т на длительности этапа контрольной проверки 5Т, вероятность ложной тревоги $(P_{ЛПК}^{5 \rightarrow 5})$ за полный цикл всех N точек неопределенности ШПС сигнала с учетом (6) можно представить в виде

$$P_{\text{ПЦК}}^{5 \rightarrow 5} = NP_{\text{ПТ}} \left(\sum_{i=5}^5 C_5^i P_{\text{ПТ}}^i [1 - P_{\text{ПТ}}]^{5-i} \right) = NP_{\text{ПТ}}^6 \quad (28)$$

Из (28) с учетом (12) получаем

$$P_{\text{ПТ}} = \left(\frac{P_{\text{ПТ}} T}{3600} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (29)$$

При этом с учетом (29) величина нормированного порога $\eta_n^{5 \rightarrow 5}$ будет иметь вид

$$\eta_n^{5 \rightarrow 5} = \sqrt{-2 \ln(P_{\text{ПТ}})} = \sqrt{\frac{1}{3} (\ln 3600 - \ln P_{\text{ПТ}} - \ln T)} \quad (30)$$

На выходе амплитудного детектора при наличии сигнала и шума плотность распределения определяется законом Райса [7]

$$W_2(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xA}{\sigma^2}\right) \quad (31)$$

где σ^2 и A - соответственно дисперсия шума и амплитуда сигнала;

$I_0\left(\frac{xA}{\sigma^2}\right)$ модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Вероятность пропуска при совпадении приходящего сигнала и опорной копии можно представить в виде [7]

$$P_{\text{ПР}} = \int_0^{\eta_n} W_2(x) dx = \int_0^{\eta_n} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \quad (32)$$

где $y = \frac{x}{\sigma}$, $dy = \frac{dx}{\sigma}$, $\eta_n = \frac{\eta}{\sigma}$, а $h^2 = \frac{A^2}{2\sigma^2}$ отношение сигнал/шум.

С учетом величины нормированного порога $\eta_n^{2 \rightarrow 3}$ (20), $\eta_n^{3 \rightarrow 3}$ (24), $\eta_n^{3 \rightarrow 5}$ (27) и $\eta_n^{5 \rightarrow 5}$ (30) вероятность пропуска (32) можно представить в виде

$$P_{\text{ПР}}^{2 \rightarrow 3} = \int_0^{\sqrt{\frac{2}{3}(\ln 3 + \ln 3600 - \ln P_{\text{ПТ}} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \quad (33)$$

$$P_{\text{ПР}}^{3 \rightarrow 3} = \int_0^{\sqrt{\frac{1}{2}(\ln 3600 - \ln P_{\text{ПТ}} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \quad (34)$$

$$P_{\text{ПР}}^{3 \rightarrow 5} = \int_0^{\sqrt{\frac{1}{2}(\ln 10 + \ln 3600 - \ln P_{\text{ПТ}} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \quad (35)$$

$$P_{PP}^{5 \rightarrow 5} = \int_0^{\sqrt{\frac{1}{3}(\ln 3600 - \ln P_{PTY} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \quad (36)$$

При контрольной проверки по алгоритму наличия превышения порога в 2-х из 3-х интервалов Т на длительности этапа контрольной проверки 3Т, вероятность пропуска ($P_{PRK}^{2 \rightarrow 3}$), при совпадении приходящего сигнала и опорной копии, с учетом (7) можно представить в виде

$$P_{PRK}^{2 \rightarrow 3} = 1 - [1 - P_{PP}^{2 \rightarrow 3}] \left[\sum_{i=2}^3 C_3^i (1 - P_{PP}^{2 \rightarrow 3})^i (P_{PP}^{2 \rightarrow 3})^{3-i} \right] \approx P_{PP}^{2 \rightarrow 3} + 3 (P_{PP}^{2 \rightarrow 3})^2 \quad (37)$$

С учетом (33) выражение (37) имеет вид

$$P_{PRK}^{2 \rightarrow 3} = \int_0^{\sqrt{\frac{2}{3}(\ln 3 + \ln 3600 - \ln P_{PTY} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy + \\ + 3 \left\{ \int_0^{\sqrt{\frac{2}{3}(\ln 3 + \ln 3600 - \ln P_{PTY} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \right\}^2 \quad (38)$$

При контрольной проверки по алгоритму наличия превышения порога в 3-х из 3-х интервалов Т на длительности этапа контрольной проверки 3Т, вероятность пропуска ($P_{PRK}^{3 \rightarrow 3}$), при совпадении приходящего сигнала и опорной копии, с учетом (7) можно представить в виде

$$P_{PRK}^{3 \rightarrow 3} = 1 - [1 - P_{PP}^{3 \rightarrow 3}] \left[\sum_{i=3}^3 C_3^i (1 - P_{PP}^{3 \rightarrow 3})^i (P_{PP}^{3 \rightarrow 3})^{3-i} \right] = 4P_{PP}^{3 \rightarrow 3} \quad (39)$$

С учетом (34) выражение (39) имеет вид

$$P_{PRK}^{3 \rightarrow 3} = 4 \int_0^{\sqrt{\frac{1}{2}(\ln 3600 - \ln P_{PTY} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \quad (40)$$

При контрольной проверки по алгоритму наличия превышения порога в 3-х из 5 интервалов Т на длительности этапа контрольной проверки 5Т, вероятности пропуска ($P_{PRK}^{3 \rightarrow 5}$), при совпадении приходящего сигнала и опорной копии, с учетом (7) можно представить в виде

$$P_{PRK}^{3 \rightarrow 5} = 1 - [1 - P_{PP}^{3 \rightarrow 5}] \left[\sum_{i=3}^5 C_3^i (1 - P_{PP}^{3 \rightarrow 5})^i (P_{PP}^{3 \rightarrow 5})^{5-i} \right] \approx P_{PP}^{3 \rightarrow 5} + 10 (P_{PP}^{3 \rightarrow 5})^3 \quad (41)$$

С учетом (35) выражение (41) имеет вид

$$\begin{aligned}
P_{PP}^{3 \rightarrow 5} &= \int_0^{\sqrt{\frac{1}{2}(\ln 10 + \ln 3600 - \ln P_{PTQ} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy + \\
&+ 10 \left\{ \int_0^{\sqrt{\frac{1}{2}(\ln 10 + \ln 3600 - \ln P_{PTQ} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \right\}^3
\end{aligned} \tag{42}$$

При контрольной проверки по алгоритму наличия превышения порога в 5-х из 5 интервалов Т на длительности этапа контрольной проверки 5T, вероятности пропуска ($P_{PPK}^{5 \rightarrow 5}$) ,при совпадении приходящего сигнала и опорной копии, с учетом (7) можно представить в виде

$$P_{PPK}^{5 \rightarrow 5} = 1 - \left[1 - P_{PP}^{5 \rightarrow 5} \right] \left[\sum_{i=5}^5 C_3^i (1 - P_{PP}^{5 \rightarrow 5})^i (P_{PP}^{5 \rightarrow 5})^{5-i} \right] = 6P_{PP}^{5 \rightarrow 5} \tag{43}$$

С учетом (36) выражение (43) имеет вид

$$P_{PPK}^{5 \rightarrow 5} = 6 \int_0^{\sqrt{\frac{1}{3}(\ln 3600 - \ln P_{PTQ} - \ln T)}} y \exp\left(-\frac{y^2 + 2h^2}{2}\right) I_0(\sqrt{2}hy) dy \tag{44}$$

Будем считать, что скорость передачи равна $\frac{1}{T}$. Для наглядности полученного результата по выражениям (38), (40), (42) и (44) проведены расчеты, которые представлены в таблице 1 и на рисунках 2 и 3 при различных значениях параметров.

Таблица 1

| | $P_{PTQ} = 10^{-2}$ T=0,05 | | | | $P_{PTQ} = 10^{-2}$ T=0,001 | | | |
|--------------------|----------------------------|---------------|--------------|--------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | 2-3 | 3-3 | 3-5 | 5-5 | 2-3 | 3-3 | 3-5 | 5-5 |
| $P_{PK} = 10^{-1}$ | 2-3 | 3-3 | 3-5 | 5-5 | 2-3 | 3-3 | 3-5 | 5-5 |
| | $h^2 = 10,3$ | $h^2 = 10,3$ | $h^2 = 9,58$ | $h^2 = 9,04$ | $h^2 = 10,98$ | $h^2 = 10,91$ | $h^2 = 10,14$ | $h^2 = 10,08$ |
| $P_{PK} = 10^{-2}$ | 2-3 | 3-3 | 3-5 | 5-5 | 2-3 | 3-3 | 3-5 | 5-5 |
| | $h^2 = 11,9$ | $h^2 = 11,75$ | $h^2 = 11,3$ | $h^2 = 11,1$ | $h^2 = 12,47$ | $h^2 = 12,29$ | $h^2 = 11,8$ | $h^2 = 11,56$ |
| $P_{PK} = 10^{-3}$ | 2-3 | 3-3 | 3-5 | 5-5 | 2-3 | 3-3 | 3-5 | 5-5 |
| | $h^2 = 13,0$ | $h^2 = 12,76$ | $h^2 = 12,5$ | $h^2 = 12,1$ | $h^2 = 13,52$ | $h^2 = 13,24$ | $h^2 = 12,9$ | $h^2 = 12,57$ |

Зависимость вероятности пропуска сигнала с учетом алгоритма контрольных проверок 2-3; 3-3;3-5 и 5-5 при $P_{PTQ} = 10^{-2}$, $T = \frac{1}{20} = 0,05$ сек (при скорости передачи 20 бит/сек) и $T = \frac{1}{1000} = 10^{-3}$ сек (при скорости передачи 1000 бит/сек).

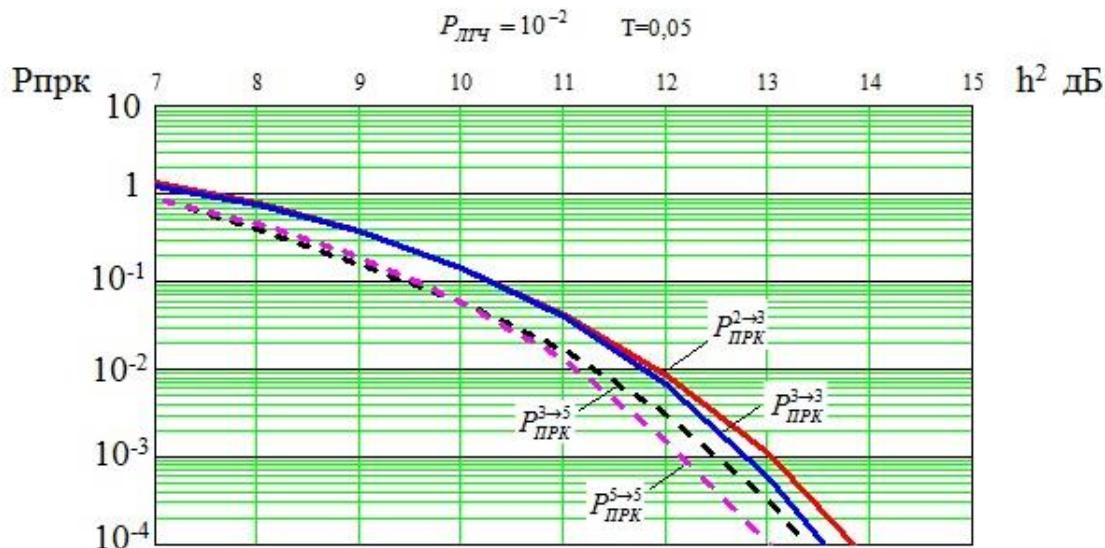


Рис.2 Графики зависимости вероятности пропуска сигнала с учетом алгоритма контрольных проверок 2-3; 3-3;3-5 и 5-5 при $P_{ПРЧ} = 10^{-2}$ и $T = \frac{1}{20} = 0,05$ сек (при скорости передачи 20 бит/сек)

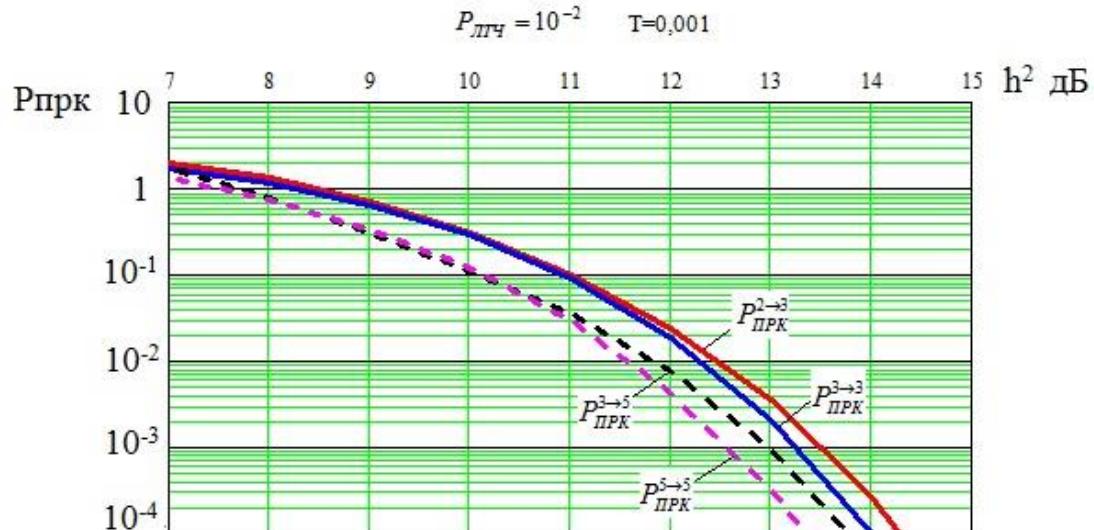


Рис.3 Графики зависимости вероятности пропуска сигнала с учетом алгоритма контрольных проверок 2-3; 3-3;3-5 и 5-5 при $P_{ПРЧ} = 10^{-2}$ и $T = \frac{1}{1000} = 0,001$ сек (при скорости передачи 1000 бит/сек)

При рассмотрении результатов расчета, представленных в таблице 1 и на рисунках 2 и 3, видно:

- введение контрольных проверок по рассмотренным алгоритмам повышает помехоустойчивость обнаружения;
- выигрыш по помехоустойчивости в режиме обнаружения, при алгоритме контрольной проверки 3-3 по отношению к алгоритму контрольной проверки 2-3, составляет до 0,28 дБ для скорости передачи информации 20 бит/сек и 1000 бит/сек;

- выигрыш по помехоустойчивости в режиме обнаружения, при алгоритме контрольной проверки 5-5 по отношению к алгоритму контрольной проверки 3-5, составляет до 0,4 дБ для скорости передачи информации 20 бит/сек и 1000 бит/сек;

- выигрыш по помехоустойчивости в режиме обнаружения, при алгоритме контрольной проверки 3-5 по отношению к алгоритму контрольной проверки 2-3 , составляет до 0,9 дБ при скорости передачи информации 20 бит/сек и 1000 бит/сек;

- выигрыш по помехоустойчивости в режиме обнаружения, при алгоритме контрольной проверки 5-5 по отношению к алгоритму контрольной проверки 3-3, составляет до 0,83 дБ при скорости передачи информации 20 бит/сек и 1000 бит/сек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритмы контрольных проверок 3-3и 5-5 являются предпочтительными по отношению алгоритмы контрольных проверок 2-3 и 3-5 , так как обеспечивают повышенную помехоустойчивость обнаружения сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тузов Г.И. Статистическая теория приема сложных сигналов. – М.: «Сов.Радио», 1977. 400с.
2. Тузов Г.И. Адресные системы управления и связи// Вопросы синхронизации// М. «Радио и связь», 1993 г., 378 с.
3. Пестряков В.Б. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. – М.: «Сов.Радио», 1973. 424с
4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: «Сов.Радио», 1985. 384с.
5. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимаерв А.Е., Шестопалов В.И. Помехоустойчивость систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательности./ Под. ред. В.И.Борисова. – М.: РадиоСофт, 2011, -550 с.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М., Сов. Радио,1966, -680 с.
7. Вентцель Е. С., Овчаров Л.Ф. Теория вероятностей .М., Наука. 1973.

REFERENCES

1. Tuzov G.I. Statistical theory of complex signal reception. - M.: "Sov.Radio", 1977.400s.
2. Tuzov G.I. Address systems of control and communication // Questions of synchronization // M. "Radio and communication", 1993, 378 p.
3. Pestyakov V.B. Noise-like signals in information transmission systems. - M.: "Sov.Radio", 1973.424s
4. Varakin L.Ye. Communication systems with noise-like signals. - M.: "Sov.Radio", 1985. 384s.
5. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limaerv A.E., Shestopalov V.I. Noise immunity of radio communication systems with spread spectrum by direct modulation of a pseudo-random sequence. / Pod. ed. V.I.Borisov. - M.: RadioSoft, 2011, -550 p.
6. Tikhonov VI Statistical radio engineering. M., Sov. Radio, 1966, -680 p.
7. Wentzel E.S., Ovcharov L.F. Probability Theory, Moscow, Nauka. 1973.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ВИДЕОИМПУЛЬСА

А. В. Зюльков

¹Воронежский государственный университет (ВГУ), Воронеж, Россия

Аннотация. Найдена форма видеоимпульса, обеспечивающая минимальную дисперсию оценки его задержки при фиксированной энергии сигнала и ограничении на амплитуду и длительность. Получено выражение для нижней границы дисперсий оценок при тех же ограничениях.

Ключевые слова: регулярная оценка задержки; белый гауссовский шум; граница Крамера-Рао.

OPTIMIZATION OF THE VIDEO PULSE SHAPE

A.V.Zulkov

Voronezh State University (VSU), Voronezh, RUSSIA

Abstract. The shape of the video pulse is found, which provides the minimum variance in the estimate of its delay at a fixed signal energy and limitation on the amplitude and duration. An expression is obtained for the lower bound of the variances of estimates under the same constraints.

Keywords: regularly assessing latency; white gaussian noise; Cramer-Rao border.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современной статистической радиотехнике при синтезе алгоритмов приема сигналов на фоне шумов и анализе их точностных характеристик широко используются различные модели сигналов. Это позволяет в некоторой степени учесть возросшие разнообразные возможности построения приемных устройств, характеристики канала распространения сигнала и особенности наблюдения.

Обычно используемые гладкая и разрывная [1, 2 и др.] модели одиночных импульсов в настоящее время дополняются новыми [3-6] (casp-модели). Последние демонстрируют промежуточный вид зависимости дисперсии надежной оценки от отношения сигнал-шум (ОСШ) $z^2(\sigma^2 \square \beta z^{-\kappa}, 2 < \kappa < 4)$, позволяют дополнительно учесть некоторые ограничения и учитывают влияние крутизны фронта импульса на скорость убывания дисперсии при росте ОСШ. Если для разрывного случая ($\kappa = 4$) коэффициент β определяется просто числом разрывов непрерывности сигнала 1 рода, для casp-модели он находится как вероятность превышения порога дробным броуновским движением (FBM) [4, 5], то для гладкого случая при оценке временного положения видеоимпульса на фоне белого гауссовского шума (БГШ) он зависит от длительности фронта сигнала. Таким образом потенциальные характеристики оценки параметров указанных моделей обобщают границу Крамера-Рао (ГКР) ($\kappa = 2$) на сигналы различной степени «гладкости».

Другое возможное обобщение ГКР должно ответить на вопрос о наилучшей форме сигнала (обеспечивающей минимальную дисперсию оценки, т.е. минимальный коэффициент β), например, в регулярном случае ($\kappa = 2$). Этот вопрос на примере

временного положения видеоимпульса на белого гауссовского шума (БГШ) рассмотрен в работе.

2. ФОРМА ОПТИМАЛЬНОГО СИГНАЛА

Найдем оптимальную форму сигнала и точность оценки его временного положения для видеоимпульса, наблюдаемого на фоне БГШ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Считаем, что сигнал $y(t)$ принимает значения, отличные от нуля на интервале $[0, \tau]$, имеет максимальное значение a и ограниченную энергию E_0 . Выберем его форму так, чтобы фишеровская информация (ФИ) [1, 3, 6 и др.]

$$J = \frac{2}{N_0} \int_0^\tau \dot{y}^2(t) dt \quad (1)$$

была максимальна (дисперсия оценки временного положения $\sigma^2 = J^{-1}$ - минимальна).

Оптимальный сигнал при ограниченной энергии не может иметь постоянной составляющей, т. к. ее наличие не приводит к увеличению ФИ (1). В дальнейшем будем считать, что импульс унимодален, так что a - амплитуда сигнала. Исходя из качественных соображений сигнал должен быть симметричен относительно положения максимума, т. к. только в этом случае суммарная кривизна переднего и заднего фронтов импульса, от которой зависит ФИ будет максимальна. Это соображение подтверждается строгим расчетом.

Таким образом, в соответствии с приведенными ограничениями для нахождения экстремали (1) необходимо решить изопериметрическую вариационную задачу с подвижными границами [7 и др.]. Уравнение Эйлера для функционала

$$J = \int_0^\tau \left\{ \frac{2}{N_0} \dot{y}^2(t) + \lambda [y^2(t) - \frac{E_0}{\tau}] \right\} dt,$$

который нужно максимизировать при фиксированной энергии E_0 имеет вид

$$\ddot{y}(t) - g^2 y^2(t) = 0, \quad y(0) = 0, \quad y(\tau/2) = a, \quad g^2 = \lambda N_0 / 2.$$

Здесь λ - неопределенный пока параметр, который после установления формы сигнала находится исходя из заданной величины E_0 .

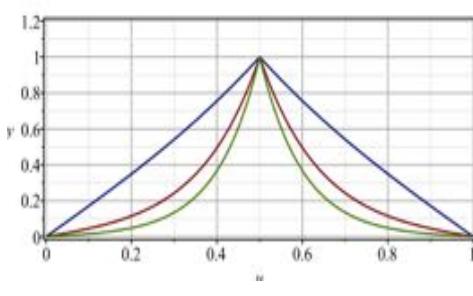


Рис.1

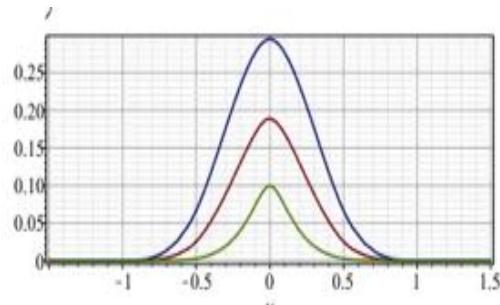


Рис.2

Решая приведенное дифференциальное уравнение и учитывая соображение о симметрии сигнала, получим соотношение, определяющее форму оптимального сигнала, которая задается цепной линией

$$y(t) = \frac{a}{sh(g\tau/2)} \begin{cases} sh(gt), & 0 \leq t \leq \tau/2, \\ sh(g(\tau-t)), & \tau/2 \leq t \leq \tau. \end{cases} \quad (2)$$

На рисунках приведены сигналы с одинаковой амплитудой (разной энергией) и различными параметрами g (рисунок 1) и их сигнальные функции (рисунок 2).

3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА

Энергия сигнала (2) в зависимости от параметра $h = g\tau/2$ задается соотношением

$$E(h) = \frac{a^2\tau}{2} f_e(h), \quad f_e(x) \equiv \frac{1}{x} \{cth(x) - x[cth^2(x) - 1]\} \quad (3)$$

и должна быть равной E_0 . Таким образом константа g находится из соотношения

$$g = \frac{2}{\tau} \tilde{f}_e \left(\frac{2E_0}{a^2\tau} \right), \quad \tilde{f}_e(\cdot) \equiv f_e^{-1}(\cdot) \quad (4)$$

Вид прямой $f_e(x)$ и обратной $\tilde{f}_e(x)$ функций приведен на рисунках 3, 4. Теперь, когда

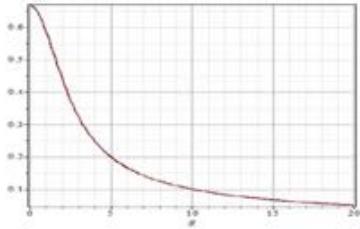


Рис.3

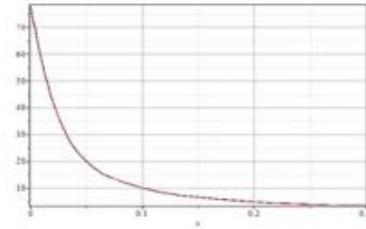


Рис.4

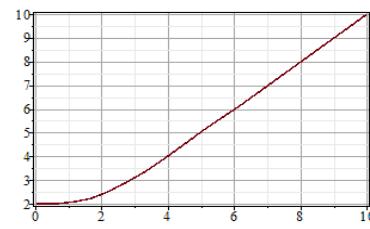


Рис.5

вид сигнала окончательно определен, можно рассчитать соответствующую ФИ

$$J = \frac{4a^2}{\tau N_0} f_i(g), \quad f_i(x) \equiv x \{cth(x) + x[cth^2(x) - 1]\} \quad (5)$$

Вид функции $f_i(x)$ приведен на рисунке 5.

4. ПРИМЕРЫ

Выясним, насколько существенным может быть выигрыш в дисперсии надежной оценки для оптимального сигнала по сравнению с другими моделями при равенстве энергий сигналов. Сравним отношение дисперсий оценок оптимальных сигналов при различных длительностях и амплитудах и колокольного сигнала $s(t) = a_0 \exp[-t^2/(2\beta_0^2)]$ с энергией $E_0 = a_0^2 \beta_0 \sqrt{\pi}$ и ФИ $J_0 = a_0^2 \sqrt{\pi}/(2\beta_0)$.

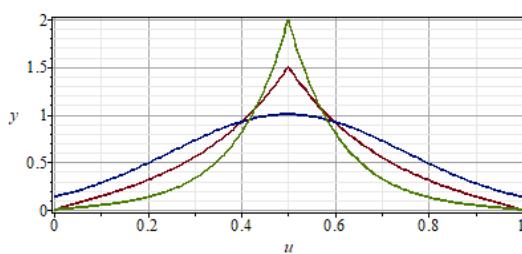


Рис.6

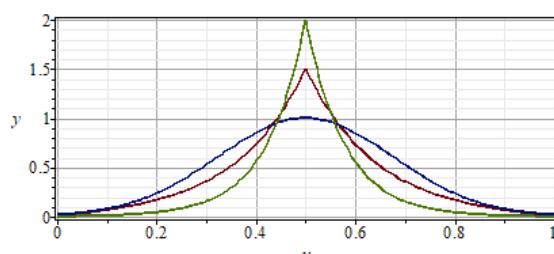


Рис.7

При $\tau = 4\beta_0$ (длительность колокольного сигнала по уровню 0,1 от максимума) и превышении амплитуды в $k = 1,5$ раза, отношение дисперсий $\chi = 3,3$; при $k = 2 \chi = 10,2$. Вид соответствующих сигналов приведен на рисунке 6.

При $\tau = 4\sqrt{2}\beta_0$ (длительность колокольного сигнала по уровню $\exp(-4)$ от максимума) и превышении амплитуды в $k = 1,5$ раза, отношение дисперсий $\chi = 3,23$; при $k = 2 \chi = 20,4$. Вид соответствующих сигналов приведен на рисунке 7.

Таким образом, даже для одиночного сигнала выигрыш в точности оценки временного положения видеоимпульса в условиях регулярности оценки может достигать заметных значений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы

- 1) В рассматриваемой постановке задачи в условиях регулярности оценки существует сигнал оптимальной формы минимизирующий дисперсию оценки его временного положения на фоне БГШ при заданных энергии и ограничениях на его длительность и амплитуду. Форма сигнала определяется соотношениями (2) и (4).
- 2) При тех же ограничениях нижняя граница дисперсии оценки имеет вид $\sigma^2 \geq J^{-1}$, где ФИ J задается формулой (5). Это соотношение модифицирует ГКР на случай сигнала любой формы, удовлетворяющего лишь ограничениям на длительность и амплитуду.
- 3) Форма оптимального видеоимпульса
 - не зависит от спектральной плотности БГШ;
 - задается унимодальной функцией;
 - задается четной относительно положения максимума функцией.
- 4) Оптимизация формы видеоимпульса может приводить к заметным выигрышам в точности оценки.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и НЦНИ в рамках научного проекта № 20-51-15001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ибрагимов И.А., Хасьминский Р.З. Асимптотическая теория оценивания. М.: Наука, 1979 – 528 с.
2. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.:Сов.радио, 1978 – 296 с.
3. Chernoyarov O.V., Kutoyants Y.A, Zyulkov A.V. On estimation errors when dealing with the problems of optical telecommunications // The European Modeling and Simulation Symposium (EMSS): proceedings. Lisbon, Portugal, September 18-20, 2019, 75-79 pp.
4. Dachian S.Yu. On limit likelihood ratio processes of some changepoint type statistical models. //J Stat. Plan. Inference. 2010,v.140, 2682–2692 pp.

5. Novikov A, Kordzakhia N, Ling T (2014) On moments of Pitman estimators: the case of fractional Brownian motion. *Theory Prob Appl* 58(4):601–614
6. Зюльков А.В., Далян С. Ю., Кутоянц Ю. А., Чернояров О. В. Модели импульсных сигналов в оптической связи и локации.// Труды XXVI Междунар. н.-т. конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2020г. Т.1 С. 237-242.
7. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1969 – 424с.

REFERENCES

1. Ibragimov I.A., Khasminsky R.Z. Asymptotic estimation theory. Moscow: Nauka, 1979 - 528 p.
2. Kulikov E.I., Trifonov A.P. Estimation of signal parameters against the background of noise. M.: Sov.radio, 1978 - 296 p.
3. Chernoyarov O.V., Kutoyants Y.A, Zyulkov A.V. On estimation errors when dealing with the problems of optical telecommunications // The European Modeling and Simulation Symposium (EMSS): proceedings. Lisbon, Portugal, September 18-20, 2019, 75-79 pp.
4. Dachian S.Yu. On limit likelihood ratio processes of some changepoint type statistical models. //J Stat. Plan. Inference. 2010,v.140, 2682–2692 pp.
5. Novikov A, Kordzakhia N, Ling T (2014) On moments of Pitman estimators: the case of fractional Brownian motion. *Theory Prob Appl* 58(4):601–614
6. Zyulkov, A.V. Pulse signals models in optical communication and location / A.V.Zulkov, S.Yu. Dachian, Yu.A. Kutoyants, O.V. Chernoyarov // Proceedings of the XXVI Intern. n.-t. Conference 'Radar, navigation, communication', Voronezh, 2020 Vol. 1 p. 237-242.
7. Elsgolts L.E. Differential equations and calculus of variations. Moscow: Nauka, 1969 - 424p.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕРМИНАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ

В. В. Самойлов, А. З. Пономарев

«Научно-промышленная компания «Высокие технологии и стратегические системы» («НПК «ВТиСС»),
Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается алгоритм работы абонентских станций в одноранговой сети произвольной структуры. Предлагается технология обеспечения связности сети, а также процедуры установления и поддержания вызовов.

Ключевые слова: связность; топология сети; установление вызова; терминалная станция, транзитная станция.

THE INTERACTION IN THE DISTRIBUTED NETWORK

V. V. Samoylov, A. Z. Ponomarev

«High Technologies and Strategic Systems» Research and Manufacturing Company (HTSTS), Moscow, Russia

Abstract. The article offers the algorithm of the terminal stations interaction in a single layer distributed network. There are also submitted the technologies of keeping the network connectivity, as well as the calls origination and continuity.

Keywords: connectivity; network structure; call origination; terminal station; routing station.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ключевым элементом предлагаемой распределенной сети связи и управления, является механизм самоорганизации терминальных станций. Их взаимодействие должно быть построено таким образом, чтобы динамически, как показано в [1 – 4], адаптировать структуру сети в соответствии с текущими потребностями, и в первую очередь – с перемещениями абонентов по зоне обслуживания. Для однородности сети нужно, чтобы все терминальные станции были одинаковыми, с возможностью временно исполнять функции маршрутизации и коммутации, становясь, таким образом, на время транзитными станциями. Предлагаемый подход призван обеспечить максимальное масштабирование сети – фактически без ограничений по количеству абонентов.

Описываемые подходы имеют широкую область применения, в том числе:

- различные (наземные, воздушные и морские) дополнения спутниковых систем связи [5 – 8];
- компоненты систем связи 5G [9, 10] и 6G [11 – 13];
- группы [14 – 17] и рои беспилотных летательных аппаратов [18 – 21];
- беспилотные автомобили [22];
- программно-аппаратные средства «Интернета вещей» (IoT) [23].

2. СТРУКТУРА ПРЕДЛАГАЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ

Одной из особенностей предлагаемой сети является то, ее структура – произвольна в каждый отдельно взятый момент времени. В такой сети присутствуют все основные

виды структур, начиная с идеальной однородной сети по схеме «каждый с каждым», показанной на рисунке 1.

Поскольку расположение терминальных станций на территории обслуживания сети – произвольно, нередкими будут случаи, когда на краях зоны обслуживания (при значительном удалении терминальных станций друг от друга) сеть будет временно

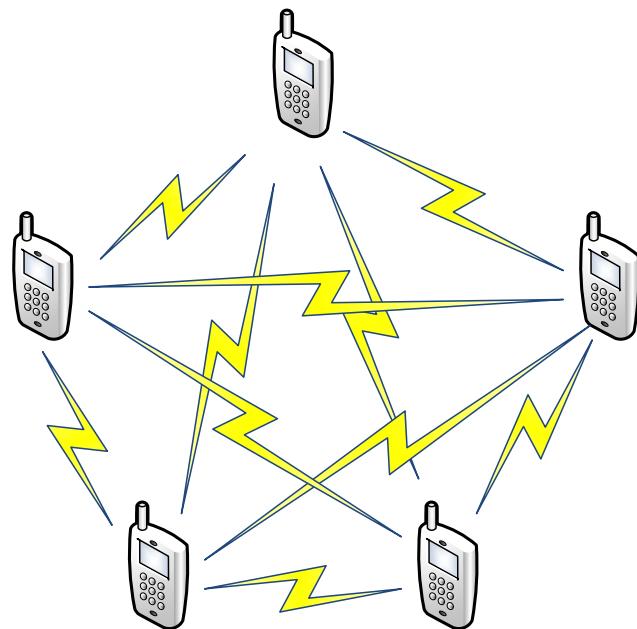


Рис. 1. Однородный неструктурированный участок сети (схема «каждый с каждым»)

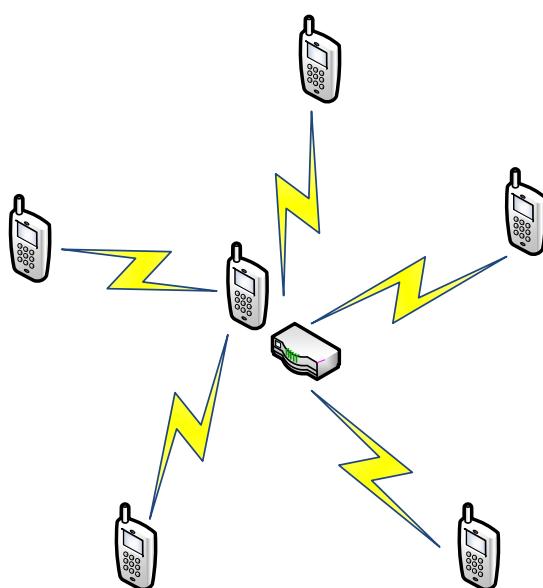


Рис. 2. Участок сети, построенный по схеме «звезда»

принимать схему «звезда», как показано на рисунке 2. В таком случае, одна (или несколько) станций, имеющих уверенный контакт с остальной сетью временно примут статус транзитных.

В целом, структура реальной распределенной сети – гибридная: ближайшие станции соединяются по схеме «каждый с каждым», а по мере удаления к краям зоны обслуживания, некоторые участки сети принимают схему «звезды» временно транзитных станций на краях однородных участков сети (соединенных по схеме «каждый с каждым»). Структура фрагмента гибридной сети для наилучшего случая (уверенное радио-покрытие на сети, при незначительном удалении станций друг от друга) показана на рисунке 3; назначенные транзитные станции на границах однородных зон между собой также связаны по схеме «каждый с каждым».

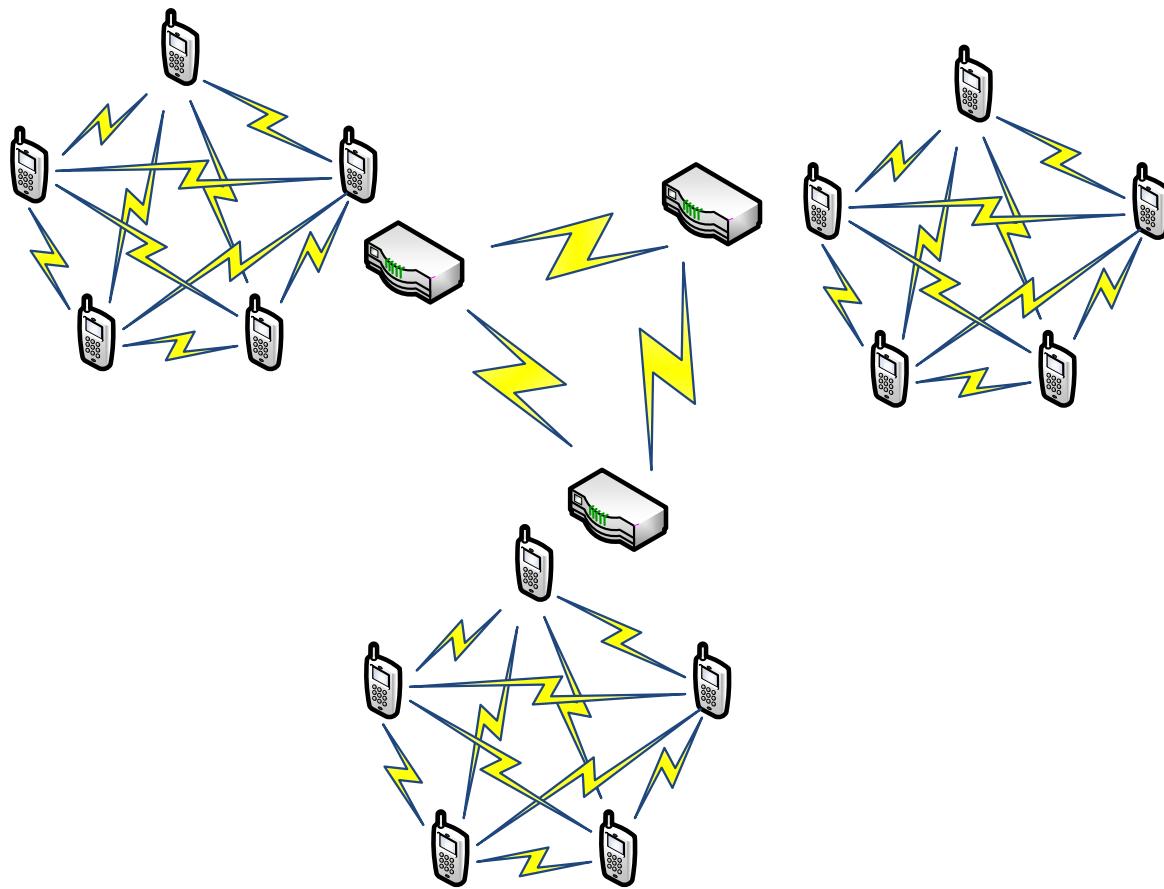


Рис. 3. Структура участка гибридной сети для наилучшего случая

В реальных условиях на сети будут присутствовать все типы схем (структур) построения – в зависимости от текущего положения станций на территории зоны обслуживания. На рисунке 4 представлена структура произвольного реального участка гибридной распределенной сети, включающей участки, построенные как по схеме «звезда» (для терминальных и транзитных станций), так и по схеме «каждый с каждым».

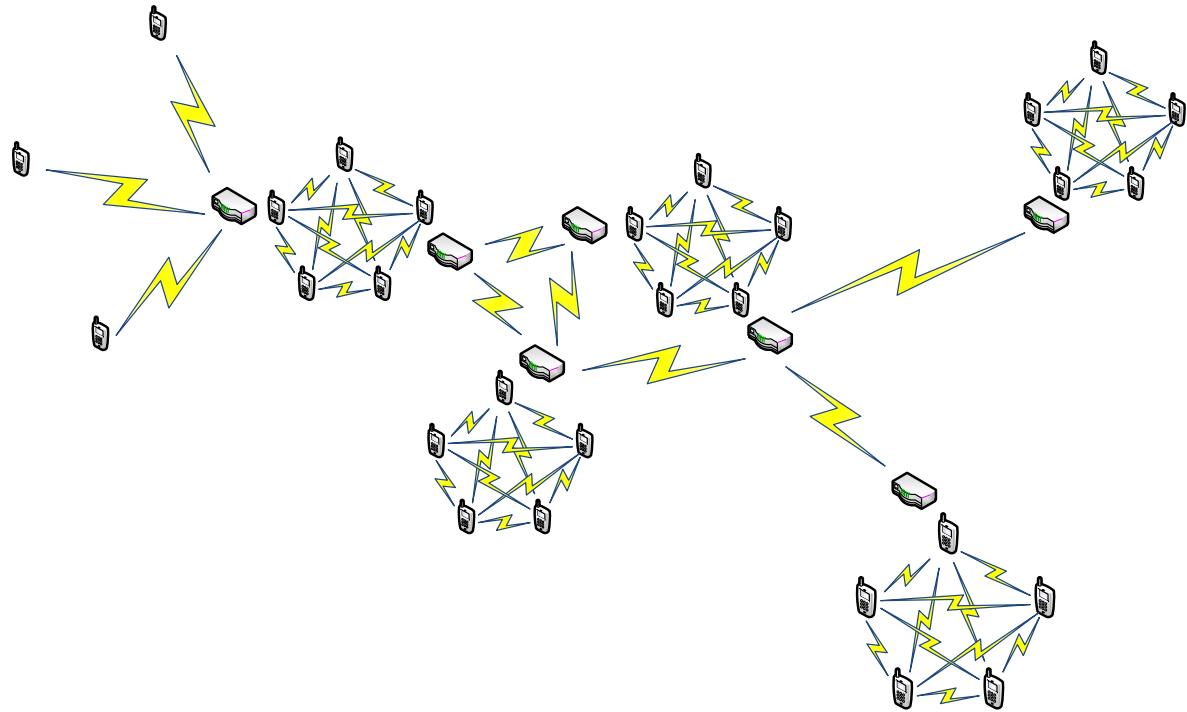


Рис. 4. Реальный участок гибридной распределенной сети

3. СВЯЗНОСТЬ В ПРЕДЛАГАЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ

Очевидно, что однородные участки распределенной сети, в которых терминальные станции взаимодействуют напрямую между собой, могут существовать лишь на ограниченных пространствах зоны обслуживания, где это обеспечивается условиями приема и передачи [24, 25].

Для связности сети часть терминальных станций временно назначается транзитными. Транзитные станции обеспечивают связь с остальной сетью для своих групп терминальных станций (транзитных групп), с которыми они состоят в едином участке сети, построенном по схеме «каждый с каждым», или – в областях с недостаточным радио-покрытием – по схеме «звезда». В каждой временно транзитной станции должны храниться и постоянно обновляться сведения о составе всех транзитных групп сети.

В приведенных ниже сценариях 1 – 6 предлагаются общие алгоритмы взаимодействия станций с сетью:

- в сценарии 1 – для случая попытки подключения при нахождении станции вне сети;
- в сценарии 2 рассматривается работа терминальной стации при подключении к сети, а также поддержание состояния нахождения в сети вне информационного обмена;
- в сценарии 3 показано взаимодействие транзитной станции с сетью вне информационного обмена;
- в сценарии 4 предложен алгоритм назначения станции транзитной;

- в сценарии 5 показана процедура установления вызова с терминальной станции;
- в сценарии 6 проиллюстрирована процедура установления вызова с транзитной станции.

Сценарий 1. Попытка подключения при нахождении станции вне сети

При попытке подключения вне сети

| |
|---|
| Передача <i>ID</i> своей станции с минимальной мощностью |
| Ожидание ответа/ответов в течение <i>N</i> мс |
| Передача <i>ID</i> своей станции со средней мощностью |
| Ожидание ответа/ответов в течение <i>N</i> мс |
| Передача <i>ID</i> своей станции с максимальной мощностью |
| Ожидание ответа/ответов в течение <i>N</i> мс |
| Трансляция абоненту сигнала: «Станция вне сети» |

Сценарий 2. Подключение терминальной станции к сети и поддержание связности

При подключении к сети или периодически, но вне информационного обмена

Передача *ID* своей станции и получение ответа/ответов. Каждый ответ содержит: *ID* отвечающей станции и её статус – терминальная или транзитная. В ответе терминальной станции также указывается *ID* транзитной станции, в группе которой она в данный момент состоит

Ожидание получения всех ответов в течение *M* мс

Анализ мощностей принимаемых сигналов и *BER* в пакетах от всех станций

Если обнаружена только одна транзитная станция, или в ответах нескольких транзитных станций есть одна с максимальным уровнем сигнала и наилучшим *BER*, как показано в формулах (1) и (2):

$$(1) \quad P_{mc} = \max (P_0, P_1, P_2, \dots, P_n),$$

где *P_{mc}* – мощность сигнала выбираваемой транзитной станции,
P₀...P_n – уровни всех принятых сигналов транзитных станций;

$$(2) \quad BER_{mc} = \min (BER_0, BER_1, BER_2, \dots, BER_n),$$

где *BER_{mc}* – частота возникновения ошибок в сигнале выбираваемой транзитной станции;
BER₀...BER_n – частоты возникновения ошибок в сигналах всех принятых транзитных станций;
а также если мощности сигналов и *BER* терминальных станций, находящихся в группе такой транзитной станции (и составляющих транзитную группу) – приемлемы, то:

Передается *ID* своей станции и *ID* выбранной транзитной станции – как подтверждение вхождения в данную группу сети

Если уровни сигнала и *BER* нескольких транзитных станций приблизительно равны и допустимы, то:

Выбирается транзитная группа терминальных станций с наилучшими мощностями сигнала и BER (и относящаяся к группам сравниваемых транзитных станций)

Передается ID своей станции и ID выбранной транзитной группы (транзитной станции, с которой работает данная группа терминальных станций) – как подтверждение вхождения в данную группу сети

Если уровни сигналов и BER всех ответов транзитных станций ниже приемлемого уровня, но сигналы от терминальных станций – в допустимых пределах:

Выбирается терминальная станция с наилучшими уровнем сигнала и BER , и ей направляется запрос на транзитное Соединение

Если уровни сигналов и BER всех ответов транзитных и терминальных станций ниже приемлемого уровня:

Абоненту транслируется сигнал: «Вы покидаете сеть»

Сценарий 3. Поддержание связности транзитной станцией

При нахождении в сети – периодически, но вне информационного обмена

Передача ID своей станции и получение ответа/ответов. Каждый ответ содержит: ID отвечающей станции и её статус – терминальная или транзитная. В ответе терминальной станции также указывается ID транзитной станции, в группе которой она в данный момент состоит

Ожидание получения всех ответов в течение M мс

Анализ мощностей принимаемых сигналов и BER в пакетах от транзитных станций

Если уровень сигнала и BER хотя бы одной транзитной станции - в допустимых пределах:

Никаких действий не производится

Если уровни сигналов и BER всех ответов транзитных станций ниже приемлемого уровня, но сигналы от терминальных станций – в допустимых пределах:

Выбирается терминальная станция с наилучшими уровнем сигнала и BER , и ей направляется запрос на транзитное соединение

Передается сигнал на смену транзитной станции со своим ID

Если уровни сигналов и BER всех ответов транзитных и терминальных станций ниже приемлемого уровня:

Абоненту транслируется сигнал: «Вы покидаете сеть»

Сценарий 4. Процедура назначения станции транзитной

При нахождении в сети – периодически

Проверка на поступление запроса «транзитное Соединение» со своим ID

Если получен запрос «транзитное Соединение» со своим ID

Передача *ID* своей станции и получение ответа/ответов. Каждый ответ содержит: *ID* отвечающей станции и её статус – терминальная или транзитная. В ответе терминальной станции также указывается *ID* транзитной станции, в группе которой она в данный момент состоит

Ожидание получения всех ответов в течение *M* мс

Анализ мощностей принимаемых сигналов и *BER* в пакетах от всех станций

Если уровни сигнала и BER транзитных станций – на приемлемом уровне, то:

Передача сигнала запроса топологий

Получение топологий от всех «слышимых» транзитных станций

Передача сигнала «Назначение новой транзитной станцией»

Если уровни сигнала и BER всех «слышимых» транзитных станций – не удовлетворительны, то:

Передача сигнала «Отказ от назначения транзитной станцией»

Если уровни сигналов и BER всех ответов транзитных станций ниже приемлемого уровня, но сигналы от терминальных станций – в допустимых пределах:

Выбирается терминальная станция с наилучшими уровнем сигнала и *BER*, и ей направляется запрос на транзитное Соединение

Если уровни сигналов и BER всех ответов транзитных и терминальных станций ниже приемлемого уровня:

Абоненту транслируется сигнал: «Вы покидаете сеть»

Сценарий 5. Процедура вызова с терминальной станции

Абонент совершает вызов

Терминальная станция направляет запрос к своей транзитной станции (в префикссе указывается *ID* своей транзитной станции) на соединение с *ID* вызываемого абонента (терминальной станции)

Получив запрос на соединение, своя транзитная станция проверяет таблицу топологий, и затем формирует запрос на соединение с *ID* транзитной станции, в топологии которой была указана вызываемая терминальная станция (указывая также *ID* последней)

транзитная станция, в транзитной группе которой в данный момент состоит вызываемая терминальная станция, проверяет не занята ли вызываемая терминальная станция соединением со станцией другой транзитной группы

Если вызываемая терминальная станция в данный момент занята соединением со станцией другой транзитной группы, то:

транзитная станция транслирует обратно отказ от соединения по причине занятости

Если вызываемая терминальная станция не занята в данный момент соединением со станцией другой транзитной группы, то:

транзитная станция формирует вызов к вызываемой терминальной станции

Если вызываемая терминальная станция в данный момент занята соединением со станцией своей транзитной группы, то:

Терминалная станция отвечает отказом от соединения по причине занятости

Если вызываемая терминалная станция не занята в данный момент соединением со станцией своей транзитной группы, то:

Данная терминалная станция передает сигнал готовности к соединению

транзитная станция транслирует обратно ответ о готовности вызываемой терминалной станции к соединению

Передача пакетов данных между вызывавшей и вызванной терминалными станциями

Сценарий 6. Процедура вызова с транзитной станции

Абонент совершает вызов

Проверив таблицу топологий, данная транзитная станция формирует запрос на соединение к транзитной станции, в топологии которой была указана вызываемая терминалная станция (указывая также ID последней)

транзитная станция, в транзитной группе которой в данный момент состоит вызываемая терминалная станция, проверяет не занята ли вызываемая терминалная станция соединением со станцией другой транзитной группы

Если вызываемая терминалная станция в данный момент занята соединением со станцией другой транзитной группы, то:

транзитная станция транслирует обратно отказ от соединения по причине занятости

Если вызываемая терминалная станция не занята в данный момент соединением со станцией другой транзитной группы, то:

транзитная станция формирует вызов к вызываемой терминалной станции

Если вызываемая терминалная станция в данный момент занята соединением со станцией своей транзитной группы, то:

Терминалная станция отвечает отказом от соединения по причине занятости

Если вызываемая терминалная станция не занята в данный момент соединением со станцией своей транзитной группы, то:

Данная терминалная станция передает сигнал готовности к соединению

транзитная станция транслирует обратно ответ о готовности вызываемой терминалной станции к соединению

Передача пакетов данных между вызывавшей транзитной и вызванной терминалными станциями

Как следует из сценариев предлагаемой сети, функционал выбора статуса (терминалная или транзитная) полностью реализуется каждой отдельной станцией самостоятельно. Определяющими критериями являются: количество одновременно принимаемых станций (как транзитных, так и терминалных), уровни принимаемых

сигналов и частота повторения ошибок. В нормальной ситуации, при нахождении станции в уверенной зоне покрытия сети, должно соблюдаться соотношение, показанное в формуле (3):

$$N_{\text{терм}} > N_{\text{транз}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{терм}}$ – количество принимаемых терминальных станций в данный момент времени, величины P_n и BER_n которых являются допустимыми для поддержания информационного обмена;

$N_{\text{транз}}$ – одновременно доступное количество транзитных станций, через которые также в данный момент осуществляется связь данной терминальной или транзитной станции с сетью вне пределов ее транзитной группы.

Приведенное в (3) соотношение может не выполняться при нахождении станций на краю сети, когда могут быть случаи, что для терминальной станции будет доступна только одна станция сети, которая и станет для нее транзитной.

Высокий потенциал развития рассматриваемых решений может быть реализован, в том числе, с использованием технологий искусственного интеллекта [26 – 29]. Предварительные эксперименты были проведены с программными модулями системы искусственного интеллекта «*AIRecognition*» [30 – 32]. Традиционное построение зависимостей было выполнено с помощью программных изделий «*PlanExp3 for Windows*» и «*PlanExp4*» [33 – 35].

4. ПРЕДЛАГАЕМАЯ АРХИТЕКТУРА АБОНЕНТСКОЙ СТАНЦИИ

Как упоминалось выше, предлагаемая распределенная сеть должна быть однородной структуры, а все абонентские станции – быть одинаковыми по своему составу и иметь возможность выполнять полный функционал сетевого взаимодействия. Структурная схема абонентской станции для предлагаемой сети приведена на рисунке 5.



Рис. 5. Структурная схема абонентской станции

Как показано на структурной схеме, основными блоками являются: радиоприемный тракт, цифровой сигнальный процессор, блок управления станцией, блок отображения информации, банк данных и аккумулятор.

Варианты реализации радиотракта могут быть различными, однако наиболее перспективными представляются использование приемопередатчика, обеспечивающего многостанционный доступ с кодовым (*Code Division Multiple Access – CDMA*) или ортогональным частотным (*Orthogonal Frequency-division Multiplexing – OFDM*) разделением каналов, поскольку данные виды модуляции обеспечивают наибольшую помехоустойчивость и скрытность по сравнению со всеми остальными видами [36, 37].

Цифровой сигнальный процессор и блок управления отвечают за реализацию механизма связности в сети, проведение всех необходимых измерений, а также поддержание работоспособности станции.

Банк данных должен обладать максимально возможной емкостью, поскольку в станции должны помимо данных конфигурации текущей транзитной группы (в случае, когда станция исполняет функционал терминальной станции) храниться также топологии сети – данные обо всех транзитных группах в предлагаемой сети.

Источник питания также должен обладать максимальной емкостью, поскольку каждая станция должна постоянно проводить измерения, генерировать запросы к сети, передавать значительные объемы данных.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое строение и алгоритмы взаимодействия станций в распределенной сети представляются применимыми в следующих областях:

- для передачи данных и сигналов управления между фиксированными и движущимися механизмами, в том числе, для взаимодействия между собой и центральной базой данных самодвижущихся беспилотных транспортных и патрульных средств [38];
- для мониторинга и взаимодействия сетей датчиков в территориально ограниченных зонах обслуживания/безопасности [39];
- для обеспечения связи специальных/спасательных подразделений в удаленных зонах обслуживания при отсутствии покрытия существующими мобильными сетями.

Рассмотренный подход позволяет строить распределенные сети произвольной динамической структуры. Предлагаемые алгоритмы/процедуры связности/установления вызовов обеспечивают самостоятельное назначение станциями статусов терминальная/транзитная, что, в свою очередь, позволяет обходиться без специализированных центров управления. Кроме того, в предлагаемой сети нет логического предела по количеству абонентов. Фактически, оно ограничивается только выделяемой для сети полосой частот и объемами памяти станций, поскольку транзитные станции должны постоянно передавать и хранить значительные объемы данных по постоянно меняющимся топологиям (составу терминальных станций транзитных групп – участков, строящихся по схеме «каждый с каждым»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочкаров А. А., Тимошенко А. В., Литвинов А. В., Лядова Е. Ф., Гайчук Ю. Н. Оценка непрерывности информационного взаимодействия и доведения информации в системах мониторинга с динамической структурой // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2019. – Т. 24. – № 8. – С. 66–71.
2. Лядова Е. Ф. Философия эволюционного развития специализированной системы связи и передачи данных в условиях глобальных угроз // Славянский форум. – 2019. – № 4 (26). – С. 227–237.
3. Давыдов А. Б., Лядова Е. Ф. Философия управления гибкой реконфигурацией специализированной сети связи и передачи данных // Славянский форум. – 2019. – № 4 (26). – С. 328–338.
4. Лядова Е. Ф., Дыбля А. Ю. Модели и методы обеспечения непрерывности информационного взаимодействия при использовании сетей связи и передачи данных специального назначения // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции. В 6-ти томах. – Т. 2. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. – С. 343–348.
5. Мырова Л. О. и др. Низкоорбитальные спутниковые системы связи Starlink и OneWeb / Л. О. Мырова, О. В. Ментус, А. Б. Давыдов, П. А. Замятин, Е. Ф. Лядова, А. С. Филатова // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2021. – № 2. – С. 36–45.
6. Галайко И. В. и др. Вопросы разработки полезной нагрузки космических аппаратов, абонентских терминалов и системы управления сетью для спутниковых систем связи / И. В. Галайко, С. А. Грищенко, А. Б. Давыдов, А. Ю. Дыбля, Ю. В. Дыбля, А. В. Зайковский, П. А. Замятин, О. С. Крылова, Т. А. Кузина, А. В. Литвинов, Е. Ф. Лядова, А. Ю. Непочатов, И. В. Рыбка, В. В. Самойлов, А. Г. Трубачёв, К. В. Яковлев. – М.: Издательство ООО «Сам Полиграфист», 2020. – 208 с.
7. Лядова Е. Ф. Предложения по созданию системы управления сетью для спутниковой системы связи и вещания на высокой эллиптической орбите // LXXIII Международные научные чтения (Памяти А. Н. Колмогорова). Сборник статей Международной научно-практической конференции. – М. : ООО «Европейский фонд инновационного развития», 2020. – С. 33–36.
8. Литвинов А. В., Лядова Е. Ф., Рыбка И. В. Вопросы проектирования космических аппаратов спутниковой системы связи // Инновационная наука. – 2020. – № 4. – С. 43–49.
9. Дыбля А. Ю., Лядова Е. Ф., Самойлов В. В. Разработка методик определения структуры, пропускной способности, надежности и плана резервирования транспортной сети сети мобильной связи пятого поколения на базе технологий программно-конфигурируемых сетей и виртуализации сетевых функций // Славянский форум. – 2020. – № 2 (28). – С. 219–228.
10. Волков А. Н. и др. Модели, методы и средства обеспечения информационной безопасности и непрерывности информационного взаимодействия при использовании транспортных сетей передачи данных на базе ВОЛС / А. Н. Волков, И. В. Галайко, С. А. Грищенко, А. Б. Давыдов, А. Ю. Дыбля, Ю. В. Дыбля, А. А. Кочкаров, Т. А. Кузина, А. В. Литвинов, Е. Ф. Лядова, А. Ю. Непочатов, И. В. Рыбка, В. В. Самойлов, А. В. Тимошенко, А. Г. Трубачёв. – М.: Издательство ООО «Сам Полиграфист», 2019. – 200 с.
11. Литвинов А. В. и др. Конверсия радиочастотного спектра. Вопросы технического регулирования / А. В. Литвинов, И. А. Байгутлина, А. Ю. Замятин, Е. Ф. Лядова. – М. : ООО «Сам полиграфист», 2019. – 124 с.
12. Литвинов А. В. и др. Конверсия радиочастотного спектра. Вопросы электромагнитной совместимости / А. В. Литвинов, А. В. Зайковский, А. Ю. Замятин, Е. Ф. Лядова, К. В. Яковлев. – М. : ООО «Сам полиграфист», 2019. – 48 с.
13. Литвинов А. В. и др. Контроль конверсии радиочастотного спектра / А. В. Литвинов, И. А. Байгутлина, А. Ю. Замятин, Е. Ф. Лядова. – М. : Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком», 2019. – 212 с.
14. Лядова Е. Ф. Организация информационного взаимодействия в системе мониторинга на базе беспилотных летательных аппаратов при использовании спутниковых систем связи в условиях накладываемых ограничений // Технологические исследования: информационное обеспечение, алгоритм проведения, интерпретация результатов. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: ООО «Агентство международных исследований», 2020. – С. 51–57.
15. Байгутлина И. А., Замятин П. А. Система защиты аэропортов от беспилотных летательных аппаратов // Славянский форум. – 2019. – № 4 (26). – С. 289–298.

16. Замятин П. А. Классификационные признаки беспилотных летательных аппаратов аэродромного базирования // Chronos. – 2020. – № 4 (43). – С. 76–84.
17. Замятин П. А. Вопросы эксплуатации беспилотных авиационных систем // Славянский форум. – 2021. – № 1(31). – С. 297–304.
18. Байгутлина И. А. и др. Особенности построения и использования специализированной информационно-справочной системы «UAV-INFO» по беспилотным летательным аппаратам / Байгутлина И. А., Грищенко Д. А., Замятин П. А., Лядова Е. Ф. // Методы и программные средства информационного сервиса в информационных и пространственных полях. Сборник научных трудов. – Бургас, 2020. – С. 139–154.
19. Замятин П. А. Системы управления беспилотными летательными аппаратами // Инновационная наука. – 2020. – № 4. – С. 37–42.
20. Лядова Е. Ф. Организация информационного взаимодействия между беспилотным летательным аппаратом и пунктом управления системы мониторинга: основные варианты и оптимизационный выбор конфигурации // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы современной науки, достижения и инновации. Сборник научных статей по материалам III Международной научно-практической конференции. – Уфа: ООО «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2020. – С. 81–94.
21. Кушнер А. К., Кочкиров А. А., Лядова Е. Ф. Моделирование структурного разрушения сложных сетевых систем без восстановления: компьютерной исследование // Успехи современной радиоэлектроники. – 2020. – Т. 74. – № 7. – С. 38–45.
22. Байгутлина И. А., Замятин П. А. Проверочно-испытательный комплекс для тестирования бортовых коммуникационных и навигационных устройств беспилотных автомобилей // Технологические исследования: информационное обеспечение, алгоритм проведения, интерпретация результатов. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: АМИ, 2020. – С. 8–14.
23. Шайтура С. В. и др. Совокупная стоимость владения решениями на базе технологии «Интернет вещей» / С. В. Шайтура, П. А. Замятин, Л. П. Белоу, Н. Л. Султаева // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 2. – С. 124–133.
24. Давыдов А. Б. и др. Программа для расчёта энергетического бюджета радиолиний спутниковых систем и летательных аппаратов «LinkBudget» / А. Б. Давыдов, А. Ю. Дыбля, О. С. Крылова, Е. Ф. Лядова, П. А. Замятин. – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020662703, 16.10.2020. Заявка № 2020661452 от 01.10.2020.
25. Байгутлина И. А. и др. Программа контроля параметров цифровых систем передачи данных «TelcoMonitoring» / И. А. Байгутлина, А. Ю. Дыбля, П. А. Замятин, Е. Ф. Лядова. – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021616960, 29.04.2021. Заявка № 2021615903 от 21.04.2021.
26. Давыдов А. Б., Дыбля А. Ю., Лядова Е. Ф. Использование технологий виртуальной реальности и искусственного интеллекта для эффективной эксплуатации, эволюционной модернизации и гибкой реконфигурации системы связи и передачи данных // Славянский форум. – 2019. – № 4 (26). – С. 299–309.
27. Грищенко Д. А. и др. Применение технологий искусственного интеллекта для управления системой связи летательного аппарата / Д. А. Грищенко, П. А. Замятин, Э. П. Черноштан, Д. М. Шапиро // Славянский форум. – 2020. – № 4 (30). – С. 181–192.
28. Лядова Е. Ф. Перспективные сервисы на основе технологий искусственного интеллекта и виртуальной реальности // Славянский форум. – 2021. – № 1 (31). – С. 29–40.
29. Лядова Е. Ф. Общий искусственный интеллект и геоинформационные технологии // Славянский форум. – 2021. – № 2 (32). – С. 327–335.
30. Лядова Е. Ф. Применение искусственного интеллекта в перспективных системах принятия решений // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы». Сборник статей III Всероссийской научно-технической видеоконференции. – Анапа: Федеральное автономное государственное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2021. – С. 76–81.
31. Байгутлина И. А. и др. Программа обучения системы искусственного интеллекта «AIRecognitionTraining» / И. А. Байгутлина, А. Ю. Дыбля, П. А. Замятин, Е. Ф. Лядова – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021615087, 02.04.2021. Заявка № 2021614056 от 23.03.2021.

32. Байгутлина И. А. и др. Программа искусственного интеллекта «AIRecognition» / И. А. Байгутлина, А. Ю. Дыбля, П. А. Замятин, Е. Ф. Лядова; В. В. Самойлов, А. С. Филатова. – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021618070. 21.05.21. Заявка № 2021617234 от 13.05.2021.
33. Байгутлина И. А. и др. Программа автоматизированного построения трёхфакторных математических моделей с помощью экспериментов по симметричным композиционным планам «PlanExp3 for Windows» / И. А. Байгутлина, А. Б. Давыдов, П. А. Замятин, Е. Ф. Лядова. – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020663728, 02.11.2020. Заявка № 2020660618 от 15.09.2020.
34. Замятин П. А. Программа автоматизированного построения четырёхфакторных математических моделей с помощью экспериментов по симметричным композиционным планам «PlanExp4». – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021613915, 16.03.2021. Заявка № 2021612717 от 02.03.2021.
35. Замятин П. А. Планирование и обработка результатов экспериментов при реализации геоинформационных сервисов // Славянский форум. – 2020. – № 3 (29). – С. 259–269.
36. Байгутлина И. А., Замятин А. Ю. Некоторые аспекты создания региональных и национальных телекоммуникационных сетей и сервисов // Информационные ресурсы России. – 2005. – № 1 (83). – С. 2.
37. Шевырёв А. В., Замятин А. Ю. Концептуальные аспекты информационного противоборства // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах. – 2017. – С. 1128–1137.
38. Замятин В. Ю., Байгутлина И. А., Замятин П. А. Цифровизация материалов ледовых авиационных наблюдений // Славянский форум. – 2021. – № 1 (31). – С. 269–282.
39. Замятин В. Ю., Байгутлина И. А., Замятин П. А. Ресурсы интернет для доступа к материалам ледовых авиационных наблюдений // Славянский форум. – 2021. – № 1 (31). – С. 283–296.

REFERENCES

1. Kochkarov A. A., Timoshenko A. V., Litvinov A. V., Lyadova E. F., Ghaychuk Y. N. The estimation of the informational interaction continuity and the information delivery in the monitoring systems with the dynamic structures // Electromagnetic waves and electronic systems, Moscow: Radiotechnics, 2019. – Vol. 24. – No 8. – Pp. 66–71.
2. Lyadova E. F. The philosophy of the specialized telecom and data transmission systems evolutionary development in the conditions of the global threats // The Slav Forum. – 2019. – No 4 (26). – Pp. 227–237.
3. Davydov A. B., Lyadova E. F. The philosophy of the specialized telecom and data transmission system flexible reconfiguration // The Slav Forum. – 2019. – No 4 (26). – Pp. 328–338.
4. Lyadova E. F., Dyblya A. Y. The models and methods of the information interaction continuity when using the specialized telecom and data transmission systems // Radiolocation, navigation, telecommunications: The scientific papers collection of The XXVI International Technical Scientific Conference (September 29th – October 1st, 2020): in 6 volumes/ Voronezh State University, JSC «Concern «Sovvezdiye». – Vol. 2. – Voronezh: VGU Publishers, 2020. – Pp. 343–348.
5. Myrova L. O. and others. Low orbit satellite telecom systems Starlink and OneWeb / L. O. Myrova, O. V. Mentus, A. B. Davydov, P. A. Zamyatin, E. F. Lyadova, A. S. Filatova // Radio Research and Development Institute Proceedings. – 2021. - No 2. – Pp. 36–45.
6. Galayko I. V. and others. The issues of the spacecraft payload, the subscriber terminal stations and the control systems development in the satellite telecom systems / I. V. Galayko, S. A. Grischenko, A. B. Davydov, A. Y. Dyblya, Y. V. Dyblya, A. V. Zaykovskiy, P. A. Zamyatin, O. S. Krylova, T. A. Kuzina, A. V. Litvinov, E. F. Lyadova, A. Y. Nepochatov, I. V. Rybka, V. V. Samoylov, A. G. Trubachev, K. V. Yakovlev. – Moscow: JSC «NPK «VTiSS», JSC «Sam Polygraphist» Publishers, 2020. – 208 p.
7. Lyadova E. F. The proposal for the development of HEO telecom and broadcasting network control system // In the collection: LXXIII International Readings (In the memory of A. N. Kolmogorov). The collection of the International scientific-practical conference articles. – Moscow : 2020. – Pp. 33–36.
8. Litvinov A. V., Lyadova E. F., Rybka I. V. The issues of the satellite telecom systems spacecraft design // The Innovation Science. The International Science Magazine. – 2020. – No 4. – Pp. 43–49.
9. Dyblya A. Y., Lyadova E. F., Samoylov V. V. The development of methods for the structure, capacity, reliability and transport network reserve plan definition in the mobile 5G systems, basing of the software

- configurable networks technologies and the network functions virtualization // The Slav Forum. – 2020. – No 2 (28). – Pp. 219–228.
10. Volkov A. N. and others. The models, methods and means to provide the informational security and the information interaction continuity in the fiber optic transport networks / A. N. Volkov, I. V. Galayko, S. A. Grischenko, A. B. Davydov, A. Y. Dyblya, Y. V. Dyblya, A. A. Kochkarov, T. A. Kuzina, A. V. Litvinov, E. F. Lyadova, A. Y. Nepochatov, I. V. Rybka, V. V. Samoylov, A. V. Timoshenko, A. G. Trubachov; Edited by A. V. Timoshenko. – Moscow: JSC «NPK «VTiSS», JSC «Sam Polygraphist» Publishers, 2019. – 200 p.
 11. Litvinov A. V. and others. The radio spectrum conversion. The technical regulation issues / A. V. Litvinov, I. A. Baygutlina, A. Y. Zamyatin, E. F. Lyadova. – Moscow: JSC «Sam Polygraphist» Publishers, 2019. – 124 p.
 12. Litvinov A. V. and others. The radio spectrum conversion. The technical regulation issues / A. V. Litvinov, A. V. Zaykovskiy, A. Y. Zamyatin, E. F. Lyadova., K. V. Yakovlev. – Moscow: JSC «Sam Polygraphist» Publishers, 2019. – 48 p.
 13. Litvinov A. V. and others. The regulation of the radio spectrum conversion / A. V. Litvinov, I. A. Baygutlina, A. Y. Zamyatin, E. F. Lyadova. – Moscow : «Hot Line – Telecom” Publishers, 2019. – 212 p.
 14. Lyadova E. F. Setting the information interaction in the unmanned aerial vehicle based monitoring system when using the satellite telecom systems with certain limitations // The collection of articles of the International science-practical conference «The technological researches: the information provisioning, the behavior algorithms, the results interpretation» (Kazan, May 23, 2020). – Sterlitamak: AMI, 2020. – Pp. 51–57.
 15. Baygutlina I. A., Zamyatin P. A. The anti-unmanned aerial vehicle airport protection system // The Slav Forum. – 2019. – No 4(26). – Pp. 289–298.
 16. Zamyatin P. A. The ground-based unmanned aerial vehicle classification signs // «Chronos» scientific magazine. The collection of scientific proceedings «The modern science issues: the problems, trends and the perspectives». – Proceeding 4 (43), April 13, 2020. – Pp. 76–84.
 17. Zamyatin P. A. The unmanned aerial systems operation issues // The Slav Forum. – 2021. – No 1(31). – Pp. 297–306.
 18. Baygutlina I. A. and others. The features of the «UAV-INFO» unmanned aerial vehicles information system building and operation / Baygutlina I. A., Grischenko D. A., Zamyatin P. A., Lyadova E. F. // In the collection of scientific articles: The methods and SW means of the information service in the informational and spatial fields. – Burgas, 2020. – Pp. 139–154.
 19. Zamyatin P. A. The unmanned aerial vehicles control systems // Innovation science. – 2020. – No 4. – Pp. 37–42.
 20. Lyadova E. F. Setting the informational interaction between the unmanned aerial vehicle and the monitoring system control point: the main variants and the optimization choice of the configuration // The collection of the scientific articles by the materials of the III International science-practical conference «The fundamental and application researches: the actual issues of the modern science, the achievements and innovations» (Ufa, June 13, 2020). – Ufa: NIC Vestnik Nauki Publ., 2020. – Pp. 81–94.
 21. Kushner A. K., Kochkarov A. A., Lyadova E. F. The complex network systems destruction modelling: the computer research // The modern electronics success. – 2020. – No 7. – Pp. 38–45.
 22. Baygutlina I. A., Zamyatin P. A. The monitoring and test complex for the unmanned vehicles onboard communication and navigation systems testing // The collection of articles of the International science-practical conference «The technological researches: the information provisioning, the behavior algorithms, the results interpretation» (Kazan, May 23, 2020). – Sterlitamak: AMI, 2020. – Pp. 8–13.
 23. Shaytura S. V. and others. The total ownership price of the solutions based on the «Internet of things» technology / S. V. Shaytura, P. A. Zamyatin, L. P. Belyu, N. L. Sultaeva // Kursk State Agricultural Academy Proceedings. – 2021. – No 2. – Pp. 124–133.
 24. Cert. 2020662703 Russian Federation. PC SW official registration certificate. The «LinkBudget» program for the satellite systems and the aerial vehicles radio links energy budget calculation / A. B. Davydov, A. Y. Dyblya, O. S. Krylova, E. F. Lyadova, P. A. Zamyatin; the applicant and owner is Davydov A. B. (RU). – No 2020662703; appl. 01.10.20; publ. 16.10.20, The Register of the PC SW. – 1 p.
 25. The PC SW state registration certificate 2021616960 Russian Federation. Программа контроля параметров цифровых систем передачи данных The «TelcoMonitoring» digital data transmission

- systems parameters control program / I. A. Baygutlina, A. Y. Dyblya, P. A. Zamyatin, E. F. Lyadova; the applicant and owner is Baygutlina I. A. – No 2021616960; appl. 21.04.21; publ. 29.04.21, The Register of the PC SW. – 1 p.
26. Davydov A. B., Dyblya A. Y., Lyadova E. F. Using of the virtual reality and the artificial intellect technologies for the communication and data transmission systems effective operation and flexible reconfiguration // The Slav Forum. – 2019. – No 4 (26). – Pp. 299–309.
 27. Grischenko D. A. and others. Using the artificial intellect technologies for the aerial vehicle telecommunication system control / D. A. Grischenko, P. A. Zamyatin, E. P. Chernoshtan, D. M. Shapiro // The Slav Forum. – 2020. – No 4 (30). – Pp. 181–192.
 28. Lyadova E. F. The forward-looking services based on the artificial intellect and virtual reality technologies // The Slav Forum. – 2021. – No 1 (31). – Pp. 29–40.
 29. Lyadova E. F. The common artificial intellect and the geo-inform technologies // The Slav Forum. – 2021. – No 2 (32). – Pp. 327–335.
 30. Lyadova E. F. Using the artificial intellect in the decision making systems // The materials of the III All Russian science and technical video conference «The modern science condition and the development perspectives in the «Automatic Control Systems, information and telecommunication systems» area». In three volumes. Volume 3. – Anapa: The military innovation technical park «Era», 2021. – Pp. 76–81.
 31. The PC SW state registration Certificated 2021615087 Russian Federation. The «AIRecognitionTraining» artificial intellect learning program / I. A. Baygutlina, A. Y. Dyblya, P. A. Zamyatin, E. F. Lyadova; the applicant and owner is Baygutlina I. A. – No 2021615087; appl. 23.03.21; publ. 02.04.21, The PC SW Register – 1 p.
 32. The PC SW state registration Certificated 2021618070 Russian Federation. The «AIRecognition» artificial intellect program / I. A. Baygutlina, A. Y. Dyblya, P. A. Zamyatin, E. F. Lyadova; V. V. Samoylov, A. S. Filatova; the applicant and owner is Baygutlina I. A. – No 2021618070; appl. 13.05.21; publ. 21.05.21, The PC SW Register – 1 p.
 33. The PC SW state registration Certificated 2020663728 Russian Federation. The program of the three factored math models automated building by means of experiments on symmetrical compositional plans «PlanExp3 for Windows» / I. A. Baygutlina, A. B. Davydov, P. A. Zamyatin, E. F. Lyadova; the applicant and owner is Baygutlina I. A. – No 2020663728; appl. 15.09.20; publ. 02.11.20, The PC SW Register – 1 p.
 34. The PC SW state registration Certificated 2021613915 Russian Federation. The program of the four factored math models automated building by means of experiments on symmetrical compositional plans «PlanExp4» / P. A. Zamyatin; the applicant and owner is Baygutlina I. A. – No 2021613915; appl. 02.03.21; publ. 16.03.21, The PC SW Register – 1 p.
 35. Zamyatin P. A. The experiment results planning and processing when creating the geo-inform services // The Slav Forum. – 2020. - No 3 (29). – Pp. 259–269.
 36. Baygutlina I. A., Zamyatin A. Y. Some aspects of regional and national telecom networks and services creation // The informational resources of Russia. – 2005. – No 1(83). – Pp. 1–2.
 37. Shevyrev A. V., Zamyatin A. Y. The informational confrontation concept aspects // In the proceedings: Radiolocation, navigation, telecommunication. The collection of articles of the XXIII International science-technical conference. In three volumes. – 2017. – Pp. 1128–1137.
 38. Zamyatin A. Y., Baygutlina I. A., Zamyatin P. A. The ice air monitoring materials digitalization // The Slav Forum. – 2021. – No 1(31). – Pp. 269–282.
 39. Zamyatin A. Y., Baygutlina I. A., Zamyatin P. A. The Internet resources of the ice air monitoring materials // The Slav Forum. – 2021. – No 1(31). – Pp. 283–296.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ УПРЕЖДАЮЩЕГО ВЫПОЛНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАДАЧ СИСТЕМОЙ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МЕР ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СРЕДСТВАМ РАЗВЕДКИ

А. В. Леньшин¹, Е. В. Кравцов¹, И. А. Сидоренко¹, А. Ю. Кузьмин²

¹ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

²Центральный филиал ФГБОУ ВО «РГУП», Воронеж, Россия

Аннотация. Приведены результаты экспресс-оценки требуемых уровней превышения быстродействия решения информационных задач системой комплексного технического контроля в условиях конфликтного взаимодействия с системой технической разведки.

Ключевые слова: комплексный технический контроль; система технической разведки; решение информационных задач.

ASSESSMENT OF THE PROACTIVE EXECUTION PROBABILITY OF INFORMATION TASKS BY THE INTEGRATED TECHNICAL CONTROL SYSTEM OF COUNTERACTION MEASURES TO TECHNICAL MEANS OF INTELLIGENCE

A. V. Lenshin¹, E. V. Kravtsov¹, I. A. Sidorenko¹, A. Yu. Kuzmin²

¹MESC AF «Air Force Academy», Voronezh, Russia

²Central Branch of the FSFEI HE «Russian State University of Justice», Voronezh, Russia

Abstract. The article presents the results of the required levels express assessment of exceeding the speed of solving information problems by the integrated technical control system in the conditions of conflict interaction with the technical intelligence system.

Keywords: integrated technical control system; technical intelligence system; information problems solving.

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований по проблематике информационного конфликта [1] технических средств разведки(TCP) и средств комплексного технического контроля(КТК) мер противодействия(ПД) TCP свидетельствуют о необходимости упреждающего добывания информации о нарушениях мер ПД TCP на объектах защиты(ОЗ), как о ключевом условии достижения требуемого уровня защиты информации. Успешное решение указанной задачи в значительной степени зависит не только от содержания алгоритмов функционирования, от технических характеристик подсистем первичной обработки информации средств КТК, но и от алгоритмов оценки возможностей TCP, по результатам выполнения которых реализуются процессы организации ведения КТК и применения средств КТК.

При этом, основными техническими характеристиками подсистем первичной обработки информации, оказывающими определяющее влияние на результат конфликта, являются время выполнения процедур оценки возможностей TCP, поиска, обнаружения, оценки параметров и принятия решения о закрытии технических каналов утечки

информации, а также точность и достоверность извлекаемой в ходе этих процедур информации [2, 3].

2. ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ УПРЕЖДАЮЩЕГО ВЫПОЛНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ПРОТИВОБОРСТВУЮЩИМИ СТОРОНАМИ

При разработке алгоритмов оценки потенциально достижимых возможностей TCP [4, 5], применяются соответствующие вероятностные и временные показатели, характеризующие взаимное обнаружение, распознавание и оценку параметров ОЗ в рамках различной сложности информационного конфликта. В качестве таких показателей обычно используются вероятности упреждающего выполнения противоборствующими сторонами A (система КТК) и B (система TCP) информационного обеспечения [6]: $P(A \succ B, t)$ – вероятность того, что к моменту времени t сторона A выполнит информационное обеспечение, а сторона B нет; $P(B \succ A, t)$ – вероятность того, что к моменту времени t сторона B выполнит информационное обеспечение, а сторона A нет, где символ \succ означает превосходство одной стороны над другой. Если определить плоскость состояний конфликтующих систем(фазовую плоскость) как плоскость, в которой в качестве координат выступают $P(A \succ B, t)$ и $P(B \succ A, t)$, то изменение состояний этих систем может быть отражено фазовой траекторией, как показано на рисунке 1.

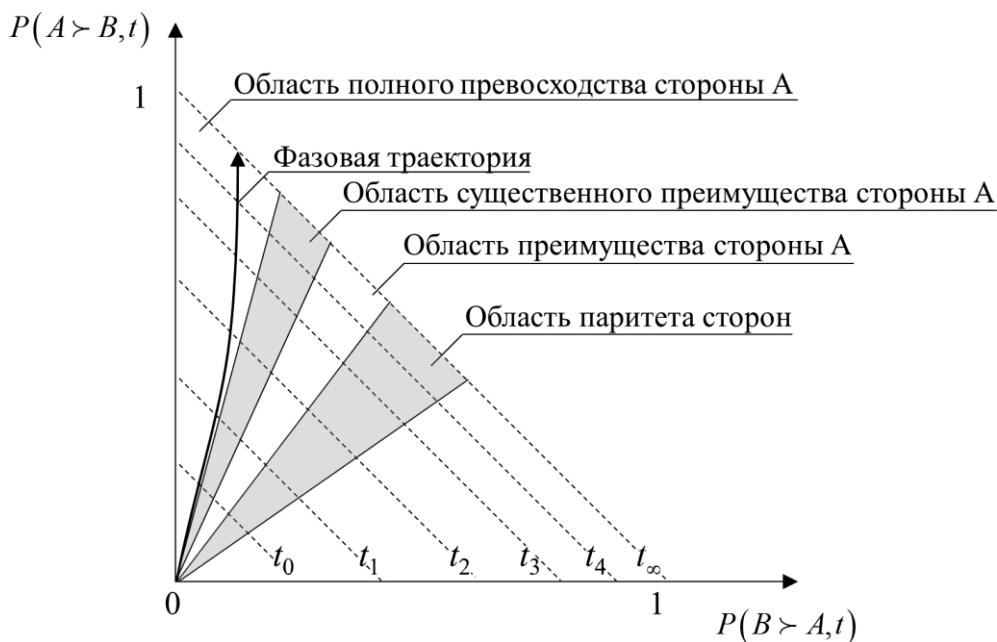


Рис. 1. Фазовая траектория изменения состояний противоборствующих систем

На рисунке 1 выделены области изменения фазовой траектории, в пределах которых достигается паритет сторон, а также различная степень преимущества вплоть до полного превосходства одной из сторон. С учетом этого в качестве дополнительных, но весьма важных показателей могут также рассматриваться временные показатели – продолжительность нахождения сторон A или B в состоянии выигрыша.

3. ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ТРЕБУЕМЫХ УРОВНЕЙ ПРЕВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РЕШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАДАЧ СИСТЕМОЙ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Рассмотрим один из подходов к оценке возможности упреждающего выполнения подсистемами информационного обеспечения систем TCP и КТК по выбранным показателям. Данный подход позволяет проводить экспресс-оценки требуемых уровней превышения быстродействия решения информационных задач с точки зрения обеспечения превосходства в конфликте система TCP – система КТК.

Информационный конфликт двух сторон A и B может быть представлен ориентированным графом, отражающим динамику этого конфликта в виде последовательности смены состояний противоборствующих сторон(рисунок 2).

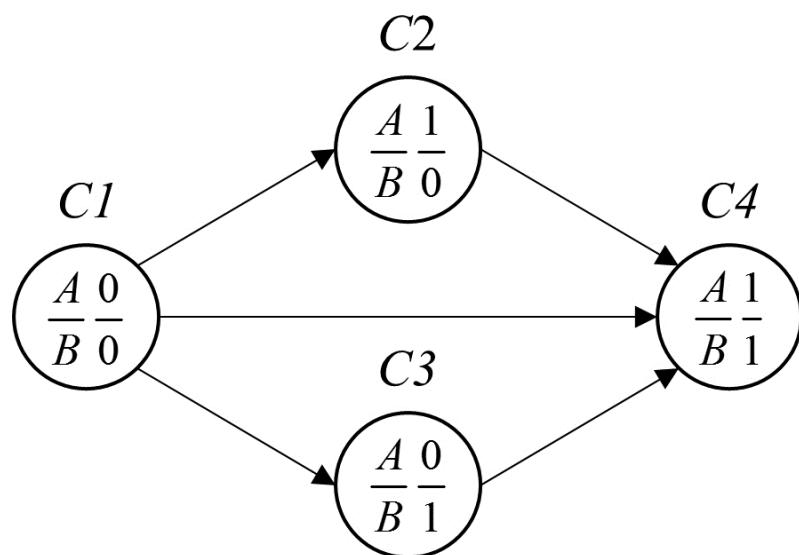


Рис. 2. Граф состояний информационного конфликта системы TCP и системы КТК

На рисунке 2 состояние $C1$ соответствует нахождению противоборствующих сторон в исходном состоянии(информационные задачи обеими сторонами не выполнены); состояние $C2$ – сторона A выполнила информационные задачи, а сторона B нет; состояние $C3$ – сторона B выполнила информационные задачи, а сторона A нет; состояние $C4$ – обе противоборствующие стороны выполнили задачи информационного обеспечения. Система интегро-дифференциальных уравнений, описывающих данный конфликт, имеет следующий вид

$$\tilde{P}_1(t) = P_{1u} \cdot \delta(t), \quad (1)$$

$$\tilde{P}_2(t) = P_{2u} \cdot \delta(t) + P_{12} \cdot \int_0^t \varphi_{12}(t-\tau) \cdot \tilde{P}_1(\tau) d\tau, \quad (2)$$

$$\tilde{P}_3(t) = P_{3u} \cdot \delta(t) + P_{13} \cdot \int_0^t \varphi_{13}(t-\tau) \cdot \tilde{P}_1(\tau) d\tau, \quad (3)$$

$$\tilde{P}_4(t) = P_{4n} \cdot \delta(t) + P_{24} \cdot \int_0^t \varphi_{24}(t-\tau) \cdot \tilde{P}_2(\tau) d\tau + P_{34} \cdot \int_0^t \varphi_{34}(t-\tau) \cdot \tilde{P}_3(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $\tilde{P}_i(t)$ – вероятность того, что конфликтующая система в течение бесконечно малого интервала времени $(t, t+dt)$ перейдет в состояние Ci ; P_{ij} и $\varphi_{ij}(t)$ – соответственно вероятность и функция плотности вероятности перехода конфликтующей системы из состояния Ci в состояние Cj ; P_{in} – вероятность нахождения системы в состоянии Ci в момент времени $t=0$; $\sum_{i=1}^4 P_{in} = 1$; $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

Ввиду того, что на практике вероятность одновременного выполнения задач информационного обеспечения противоборствующими сторонами в течение бесконечно малого интервала времени $(t, t+dt)$ стремится к нулю, при выводе выражения(4) переход из состояния $C1$ в состояние $C4$ не рассматривался.

Обозначим через $H_j^+(t)$ и $H_j^-(t)$ среднее число переходов рассматриваемого процесса в интервале $(0, t)$, после каждого из которых процесс попадает в состояние Cj и покидает состояние Cj . Множество моментов подобных переходов образует процесс восстановления [7]. Учитывая то, что дифференциалы функций восстановления $dH_j^+(t)$ и $dH_j^-(t)$ интерпретируются как вероятности того, что в интервале времени $(t, t+dt)$ произойдут соответствующие переходы, то для данного случая указанные дифференциалы функции восстановления примут следующий вид

$$dH_1^+(t) = \tilde{P}_1(t), \quad dH_1^-(t) = P_{12} \cdot \int_0^t \varphi_{12}(t-\tau) \cdot \tilde{P}_1(\tau) d\tau + P_{13} \cdot \int_0^t \varphi_{13}(t-\tau) \cdot \tilde{P}_1(\tau) d\tau; \quad (5)$$

$$dH_2^+(t) = \tilde{P}_2(t), \quad dH_2^-(t) = P_{24} \cdot \int_0^t \varphi_{24}(t-\tau) \cdot \tilde{P}_2(\tau) d\tau; \quad (6)$$

$$dH_3^+(t) = \tilde{P}_3(t), \quad dH_3^-(t) = P_{34} \cdot \int_0^t \varphi_{34}(t-\tau) \cdot \tilde{P}_3(\tau) d\tau; \quad (7)$$

$$dH_4^+(t) = \tilde{P}_4(t), \quad dH_4^-(t) = 0. \quad (8)$$

Тогда вероятности нахождения конфликтующей системы в каждом конкретном состоянии могут быть определены через функции восстановления следующим образом

$$\begin{aligned} P_1(t) &= \int_0^t \left\{ dH_1^+(u) - dH_1^-(u) \right\} du = \\ &= P_{1n} - P_{12} \cdot \int_0^t \int_0^u \varphi_{12}(u-\tau) \cdot \tilde{P}_1(\tau) d\tau du - P_{13} \cdot \int_0^t \int_0^u \varphi_{13}(u-\tau) \cdot \tilde{P}_1(\tau) d\tau du; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_2(t) &= \int_0^t \left\{ dH_2^+(u) - dH_2^-(u) \right\} du = \\ &= P_{2n} + P_{12} \cdot \int_0^t \int_0^u \varphi_{12}(u-\tau) \cdot \tilde{P}_1(\tau) d\tau du - P_{24} \cdot \int_0^t \int_0^u \varphi_{24}(u-\tau) \cdot \tilde{P}_2(\tau) d\tau du; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
P_3(t) &= \int_0^t \left\{ dH_3^+(u) - dH_3^-(u) \right\} du = \\
&= P_{3u} + P_{13} \cdot \int_0^t \int_0^u \varphi_{13}(u-\tau) \cdot \tilde{P}_1(\tau) d\tau du - P_{34} \cdot \int_0^t \int_0^u \varphi_{34}(u-\tau) \cdot \tilde{P}_3(\tau) d\tau du ;
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
P_4(t) &= \int_0^t \left\{ dH_4^+(u) - dH_4^-(u) \right\} du = \\
&= P_{4u} + P_{24} \cdot \int_0^t \int_0^u \varphi_{24}(u-\tau) \cdot \tilde{P}_2(\tau) d\tau du + P_{34} \cdot \int_0^t \int_0^u \varphi_{34}(u-\tau) \cdot \tilde{P}_3(\tau) d\tau du .
\end{aligned} \tag{12}$$

Применяя преобразование Лапласа, систему уравнений (9)–(12) можно преобразовать к виду

$$L\{P_1(t)\} = P_1(s) = \frac{1}{s} \cdot \left[P_{1u} - (P_{12} \cdot \varphi_{12}(s) + P_{13} \cdot \varphi_{13}(s)) \cdot \tilde{P}_1(s) \right], \tag{13}$$

$$L\{P_2(t)\} = P_2(s) = \frac{1}{s} \cdot \left[P_{2u} + P_{12} \cdot \varphi_{12}(s) \cdot \tilde{P}_1(s) - P_{24} \cdot \varphi_{24}(s) \cdot \tilde{P}_2(s) \right], \tag{14}$$

$$L\{P_3(t)\} = P_3(s) = \frac{1}{s} \cdot \left[P_{3u} + P_{13} \cdot \varphi_{13}(s) \cdot \tilde{P}_1(s) - P_{34} \cdot \varphi_{34}(s) \cdot \tilde{P}_3(s) \right], \tag{15}$$

$$L\{P_4(t)\} = P_4(s) = \frac{1}{s} \cdot \left[P_{4u} + P_{24} \cdot \varphi_{24}(s) \cdot \tilde{P}_2(s) + P_{34} \cdot \varphi_{34}(s) \cdot \tilde{P}_3(s) \right], \tag{16}$$

где $\tilde{P}_i(s)$ и $\varphi_{ij}(s)$ – соответственно, преобразования Лапласа от $\tilde{P}_i(t)$ и $\varphi_{ij}(t)$.

С учетом (1)–(3) $L\{\tilde{P}_1(t)\} = P_{1u}$, а $L\{\tilde{P}_2(t)\} = P_{2u} + P_{12} \cdot \varphi_{12}(s) \cdot P_{1u}$ и $L\{\tilde{P}_3(t)\} = P_{3u} + P_{13} \cdot \varphi_{13}(s) \cdot P_{1u}$, система уравнений (13)–(16) принимает вид

$$P_1(s) = \frac{P_{1u}}{s} \cdot [1 - P_{12} \cdot \varphi_{12}(s) - P_{13} \cdot \varphi_{13}(s)], \tag{17}$$

$$P_2(s) = \frac{P_{2u} + P_{1u} \cdot P_{12} \cdot \varphi_{12}(s)}{s} \cdot [1 - P_{24} \cdot \varphi_{24}(s)], \tag{18}$$

$$P_3(s) = \frac{P_{3u} + P_{1u} \cdot P_{13} \cdot \varphi_{13}(s)}{s} \cdot [1 - P_{34} \cdot \varphi_{34}(s)], \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
P_4(s) &= \frac{1}{s} \cdot \left[P_{4u} + P_{24} \cdot \varphi_{24}(s) \cdot (P_{2u} + P_{1u} \cdot P_{12} \cdot \varphi_{12}(s)) + \right. \\
&\quad \left. + P_{34} \cdot \varphi_{34}(s) \cdot (P_{3u} + P_{1u} \cdot P_{13} \cdot \varphi_{13}(s)) \right].
\end{aligned} \tag{20}$$

Структура модели данного конфликта приведена на рисунке 3.

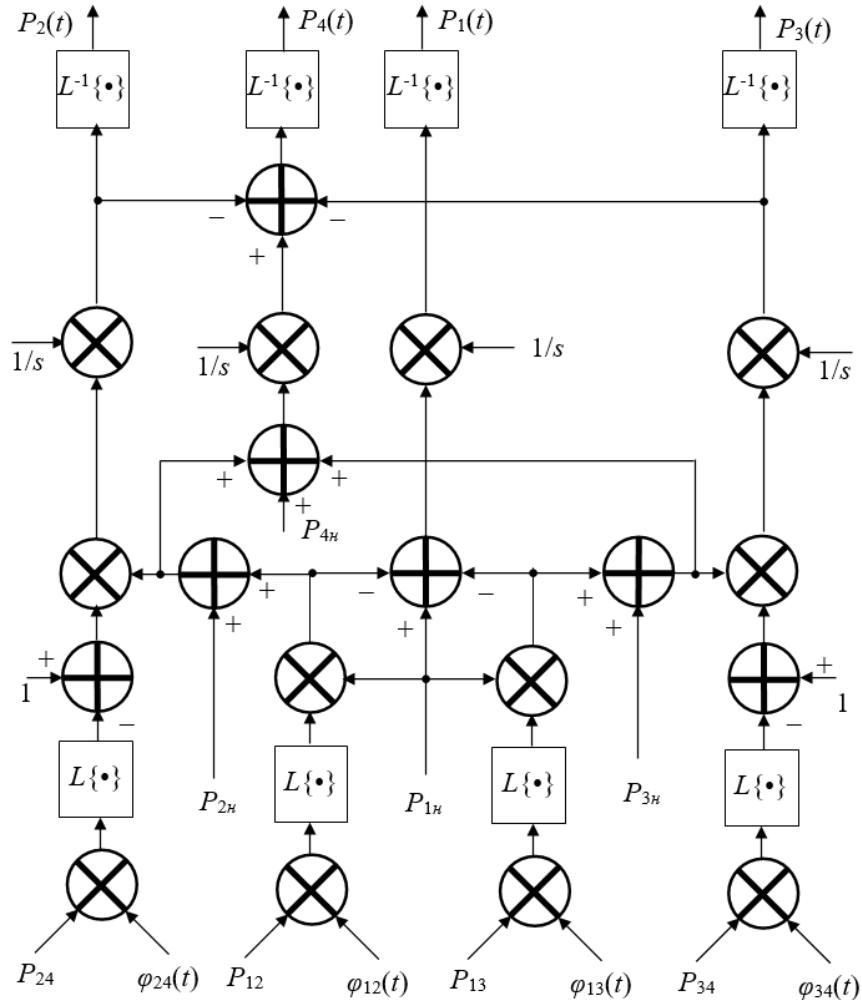


Рис. 3. Структура модели конфликта

На данном рисунке символом $L^{-1}\{\bullet\}$ обозначена операция обратного преобразования Лапласа, символами \oplus и \otimes соответственно операции сложения и умножения. Процедура решения системы уравнений(9)–(12) в соответствии с приведенной на рисунке 3 структурой модели конфликта состоит в нахождении преобразования Лапласа функций плотности вероятности $\varphi_{ij}(t)$, вычислении значений вероятностей состояний конфликтующих систем в операторной форме(17)–(20) и получении вероятностей $P_i(t)$, $i = \overline{1, 4}$ путем обратного преобразования Лапласа.

Для определения времени нахождения в состоянии выигрыша противоборствующих сторон воспользуемся следующим подходом. Обозначим случайные моменты времени, в которые сторона A и сторона B выполняют свои информационные задачи, через τ_A и τ_B . Далее перейдем к новой случайной величине $\nu = \tau_B - \tau_A$, соответствующей при $\nu > 0$ нахождению стороны A в состоянии выигрыша ν единиц времени. Тогда функция плотности вероятности случайной величины ν есть не

что иное, как свертка плотностей вероятностей случайных величин τ_A и τ_B [8], при условии, что $\nu > 0$

$$W_A(\nu) = \int_0^\infty \varphi_A(t) \cdot \varphi_B(t - \nu) dt , \quad (21)$$

а вероятность нахождения в состоянии выигрыша стороны A не менее t_A единиц времени будет определяться выражением

$$P_A(t > t_A) = \int_{t_A}^\infty W_A(\nu) d\nu . \quad (22)$$

Аналогично может быть найдена вероятность нахождения в состоянии выигрыша стороны B .

Полученные выражения(21) и(22) могут быть использованы на практике для проведения экспресс-оценок исхода конфликта. На рисунке 4 приведены графики зависимостей упреждающего выполнения информационных задач противоборствующими сторонами.

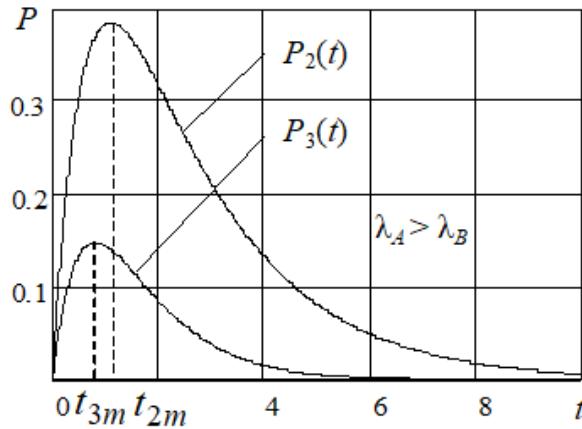


Рис. 4. Вероятности упреждающего выполнения информационных задач $P_2(t)$ и $P_3(t)$

Из анализа рисунка 4 видно, что в моменты времени t_{2m} и t_{3m} вероятности $P(A \succ B, t) = P_2(t)$ и $P(B \succ A, t) = P_3(t)$ принимают максимальное значение. Данные моменты времени определяются с помощью выражений

$$t_{2m} = \frac{1}{\lambda_A} \cdot \ln \left\{ \frac{\lambda_A + \lambda_B}{\lambda_A} \right\}, \quad (23)$$

$$t_{3m} = \frac{1}{\lambda_B} \cdot \ln \left\{ \frac{\lambda_A + \lambda_B}{\lambda_B} \right\}, \quad (24)$$

где $\lambda_{A(B)} = 1/T_{A(B)}$; $T_{A(B)}$ – среднее время выполнения информационных задач стороной $A(B)$.

Следовательно, соответствующие моментам времени t_{2m} и t_{3m} максимальные значения вероятностей упреждающего выполнения информационных задач противоборствующими сторонами определяются с помощью выражений

$$P_{\max}(C2) = \frac{\lambda_A}{\lambda_A + \lambda_B} \cdot \left[\frac{\lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B} \right]^{\lambda_B/\lambda_A} = \frac{q}{q+1} \cdot \left[\frac{1}{q+1} \right]^{1/q}, \quad (25)$$

$$P_{\max}(C3) = \frac{\lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B} \cdot \left[\frac{\lambda_A}{\lambda_A + \lambda_B} \right]^{\lambda_A/\lambda_B} = \frac{1}{q+1} \cdot \left[\frac{q}{q+1} \right]^q, \quad (26)$$

где $q = \lambda_A / \lambda_B$.

На рисунке 5а приведены зависимости $P_{\max}(C2)$ и $P_{\max}(C3)$ от величины отношения $q = \lambda_A / \lambda_B$, а на рисунке 5б – отношения исследуемых вероятностей.

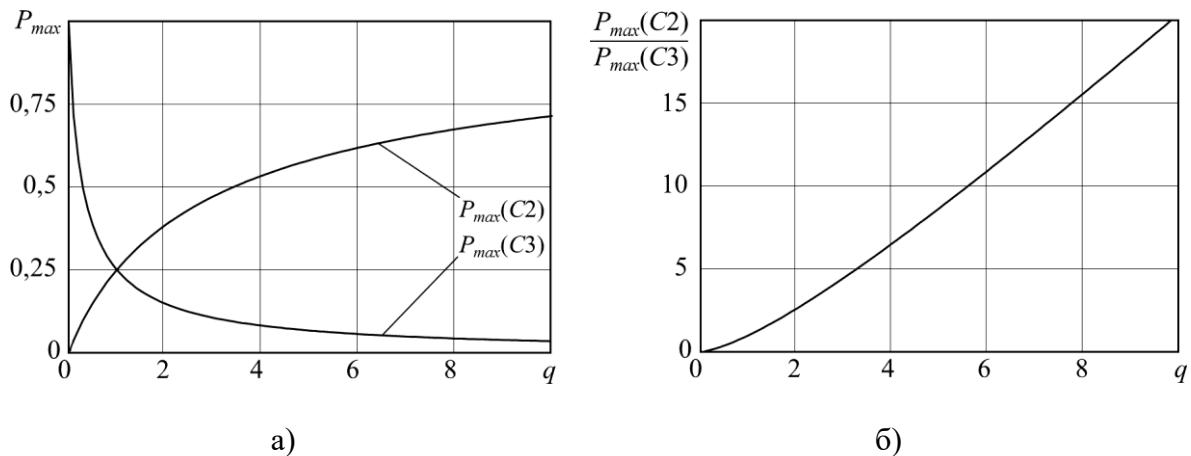


Рис. 5. Зависимости вероятностей $P_2(t)$ и $P_3(t)$ от величины $q = \lambda_A / \lambda_B$ (а) и отношение максимальных значений вероятностей(б)

Функция плотности вероятности времени нахождения в состоянии выигрыша стороны A для рассматриваемого примера определяется выражением

$$W_A(v) = \frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_A + \lambda_B} \exp\{-\lambda_B v\}. \quad (27)$$

График данной функции представлен на рисунке 6а. На основании выражения(27) определим вероятность нахождения в состоянии выигрыша стороны A не менее t_A единиц времени

$$P(t > t_A) = \int_{t_A}^{\infty} W_A(v) dv = \frac{\lambda_A}{\lambda_A + \lambda_B} \cdot \exp\{-\lambda_B t_A\}, \quad (28)$$

а также среднее время нахождения в состоянии выигрыша стороны A

$$\bar{t}_A = \int_0^{\infty} v \cdot W_A(v) dv = \frac{\lambda_A}{(\lambda_A + \lambda_B) \cdot \lambda_B} = \frac{T_B^2}{T_A + T_B}. \quad (29)$$

Графики зависимостей(28) и(29) приведены соответственно на рисунках 6б и 6в.

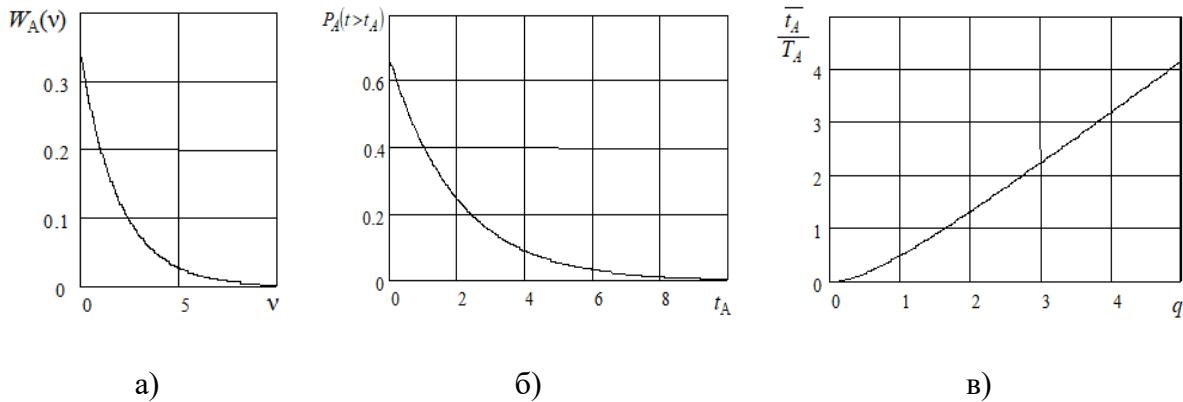


Рис. 6. Плотность вероятности времени нахождения в состоянии выигрыша стороны A (а); зависимость вероятности нахождения в состоянии выигрыша стороны A от продолжительности ее пребывания в этом состоянии(б); зависимость среднего времени нахождения стороны A в состоянии выигрыша от соотношения среднего времени выполнения информационных задач

Из анализа графиков следует, что при $T_A = T_B$ ($q = 1$) среднее время нахождения стороны A в состоянии выигрыша равно половине среднего времени решения информационных задач противоборствующими сторонами, а при $T_B/T_A \rightarrow \infty$ – среднее время нахождения стороны A в состоянии выигрыша стремится к средней продолжительности решения информационных задач стороной B : $\bar{T}_A = T_B$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижения полного превосходства системы КТК при выполнении задач информационного обеспечения в информационном конфликте с системой TCP(упреждения выявления нарушений мер ПД TCP с вероятностью не менее 0,7...0,8) средняя продолжительность процедур оценки возможностей TCP, поиска, обнаружения, оценки параметров и принятия решения о закрытии технических каналов утечки информации должна быть в несколько раз меньше, чем у противостоящей системы TCP.

Таким образом, основываясь на полученных результатах, не трудно определить конкретные значения требуемого времени выполнения задач информационного обеспечения в радиоэлектронных комплексах системы КТК, которые должны находиться в пределах от единиц миллисекунд до единиц секунд. Столь малые уровни времени, отводимые на решение информационных задач, значительно усложняют задачу мгновенного реагирования подсистемы информационного обеспечения системы КТК на изменение радиоэлектронной обстановки с целью упреждающего добывания сведений о нарушении мер ПД TCP и свидетельствует о необходимости повышения оперативности решения задач КТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козирацкий Ю.Л. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения. Монография. – М.: Радиотехника, 2013. – 232 с.
2. Мицтров Л.Е., Кравцов Е.В. Метод представления информационных процессов в системах обеспечения информационной безопасности критически важных объектов // Информационно-

- экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2019. – № 6. – С. 42–47.
3. Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Славнов К.В. Методика оценки эффективности защиты информации на объектах комплексного технического контроля // Радиотехника. – 2021. – № 1. – С. 20–27.
 4. Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сенюков Г.А., Рюмшин Р.И. Оценка возможностей радиотехнической разведки по результатам контроля радиоэлектронных средств комплексом радиотехнического контроля // Динамика сложных систем – XXI век. – 2016. – № 3. – С. 29–35.
 5. Кравцов Е.В. Методический подход к комплексной оперативной оценке возможностей выявления сведений об объектах защиты // Телекоммуникации. – 2020. – № 9. – С. 33–41.
 6. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Статические и динамические модели структуры и архитектуры радиоэлектронной системы защиты информации объектов комплексного технического контроля // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – № 4. – С. 53–62.
 7. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
 8. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1966. – 678 с.

REFERENCES

1. Kozirackij Yu.L. Models of information conflict of search and detection tools. Monograph. M.: Radiotechnics, 2013. – 232 p.
2. Mistrov L.E., Kravtsov E.V. A method for representing information processes in information security systems for critical objects // Information and economic aspects of standardization and technical regulation. – 2019. – No. 6. – Pp. 42–47.
3. Lenshin A.V., Kravtsov E.V., Slavnov K.V. Methodology for evaluating the effectiveness of information protection at the objects of complex technical control // Radiotronics. – 2021. – No. 1. – Pp. 20–27.
4. Lenshin A.V., Kravtsov E.V., Senyukov G.A., Ryumshin R.I. Assessment of the capabilities of radio-technical intelligence based on the results of monitoring of radio-electronic means of radio-technical control complexes // Dynamics of complex systems – the XXI century. – 2016. – No. 3. – Pp. 29–35.
5. Kravtsov E.V. Methodological approach to a comprehensive operational assessment of the possibilities of identifying information about the objects of protection // Telecommunications. – 2020. – No. 9. – Pp. 33–41.
6. Lenshin A.V., Kravtsov E.V. Static and dynamic models of the structure and architecture of the radio-electronic information protection system of objects of complex technical control // Theory and technology of radio communication. – 2020. – No. 4. – Pp. 53–62.
7. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. Introduction to queuing theory. – M.: The science, 1987. – 336 p.
8. Tikhonov V.I. Statistical radio engineering. – M.: Soviet radio, 1966. – 678 p.

ОЦЕНКА РЕАЛИЗАЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

О.А. Кудрявцев

АО «Концерн «Созвездие»

Аннотация. Рассмотрена структурно-функциональная схема типового элемента телекоммуникационной системы (ТКС). Построена математическая модель взаимодействия объектов в ТКС в условиях внешних воздействий. Решены задачи адаптивного управления ТКС в условиях неопределенности параметров функционирования ТКС. Определены отличия оценок полученных в результате комбинированного использования методов функционального анализа систем и свойств предельных множеств от стандартных методов оценки асимптотических решений в теории адаптивных систем. Построены графические зависимости, отражающие процесс функционирования ТКС необходимые для устойчивого управления замкнутой системы и выполнения условий для реализации вероятности выполнения целевой функции ТКС.

Ключевые слова: ТКС, целевая функция, адаптивное управление.

ASSESSMENT OF THE REALIZATION OF THE PROBABILITY OF THE TARGET FUNCTION OF THE TELECOMMUNICATION SYSTEM UNDER EXTERNAL IMPACT CONDITIONS

O. A. Kudryavtsev

JSC «Concern «Sozvezdie»

Abstract. The structural and functional diagram of a typical element of a telecommunication system (TCS) is considered. A mathematical model of the interaction of objects in the TCS under the conditions of external influences has been built. The problems of adaptive control of TCS in conditions of uncertainty of parameters of TCS functioning are solved. The differences between the estimates obtained as a result of the combined use of methods of functional analysis of systems and properties of limit sets from standard methods for estimating asymptotic solutions in the theory of adaptive systems are determined. Graphical dependencies are constructed that reflect the process of TCS functioning necessary for stable control of a closed-loop system and fulfillment of conditions for realizing the probability of fulfilling the TCS target function.

Keywords: TCS, target function, adaptive control.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Повышение эффективности функционирования ТКС с использованием адаптивного управления [1], включающих несколько уровней иерархии взаимодействующих объектов, подчиненные и вышестоящие, с центральным и децентрализованным управлением становится все более актуальным.

Достаточным условием существования единого алгоритма функционирования всех элементов ТКС включающих: управление, обработку, синтез систем управления и приемо-передающих систем является вероятность, того, что для каждого элемента ТКС выполнение целевой задачи будет находиться в интервале, значение которого не должно

быть ниже заданного, в условиях возникновения внешних воздействий, которые могут повлиять на решение центральной функции ТКС, необходимого для организации связи между подвижными и стационарными пунктами управления, необходимых для решения задач по предназначению.

Функции управления реализуются в подобных системах сразу в двух аспектах: управление внутрисистемными ресурсами (реализуется в отношении собственных подсистем, например, внутри подсистемы связи с целью оптимального использования радиоканала, распределения информационных ресурсов в процессе решения центральной задачи), а также управление внешними по отношению к ней системами и объектами в рамках своей центральной задачи. Под центральной задачей системы (компонента) здесь и далее по тексту понимается ее проблемная ориентация, то есть некоторая общая или частная задача, решение которой и есть цель создания и функционирования данной системы (компонента). Конкретный способ (алгоритм, программа, блок кодов) решения центральной задачи можно тогда сопоставить целевой функции системы.

Поэтому целью данной статьи являются:

Проведение сравнения между методами функционального анализа систем и свойств предельных множеств от стандартных методов оценки асимптотических решений в теории адаптивных систем для выработки оценки для реализации выполнения целевой функции ТКС в условиях внешних воздействий. На основе математической модели взаимодействия объектов в ТКС в условиях внешних воздействий необходимо получить дифференциальные уравнения, для решения замкнутой системы с использованием оптимального управления, которое асимптотически стремится к максимальному инвариантному множеству и отражает процесс непрерывности изменения свойств элементов системы от входа к состоянию (выходу) ТКС.

Построение графических зависимостей, отражающих процесс функционирования ТКС необходимых для устойчивого управления замкнутой системы и выполнения условий для реализации вероятности целевой функции с использованием математических оценок и выполнения реализуемости, полноты и ограниченности для устойчивого управления замкнутой системой.

Основные задачи, решаемые в данной работе:

Построение структурно-функциональной схемы типового элемента ТКС;

Описание математической модели взаимодействия объектов в ТКС в условиях внешних воздействий и решение частных задач для реализации целевой функции (адаптивного управления);

Анализ асимптотического поведения ТКС с локально ограниченными операторами и графическое представление динамики функционирования ТКС в виде движения рабочей точки по некоторой дискриминационной поверхности.

При этом одной из основных задач становится определение отношения частных показателей устойчивости элементов ТКС и всей системы в целом. Информационная

устойчивость элементов ТКС определяется через аналогичные показатели ее элементов только в каждом конкретном случае эта оценка уникальна.

Основная идея такого подхода заключается в представлении динамики функционирования ТКС в виде движения рабочей точки по некоторой дискриминационной поверхности, форма которой определяется свойствами системы. При этом вся совокупность вычислительных процессов, определяемая движением рабочих точек для каждого процесса обработки получаемой ТКС последовательности унитарных кодов (вычислительного процесса), может быть представлена некоторой апериодической, хаотической траекторией (или орбитой процесса) конфликтного функционирования, сформированной в области периодических неустойчивых траекторий бесконфликтного режима. Каждая совокупность траекторий, выбранных по какому-либо признаку, может быть универсально закодирована на основе методов символьной динамики. Несложно показать, что существует некоторая универсальная грамматика, определяющая разрешенные слова (последовательности унитарных кодов) или устойчивые периодические траектории, и запрещенные, определяющие конфликтные комбинации последовательностей унитарного кода, обрабатываемого ТКС.

2. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ТИПОВОГО ЭЛЕМЕНТА ТКС

Универсальность применения данной схемы [1] можно трактовать как принадлежность обрабатываемых ТКС последовательностей унитарного кода к одному универсальному классу, которые в области точек бифуркации будут иметь траектории одного вида. При этом точки бифуркации формируются и существуют в области пересечения траекторий (орбит вычислительных процессов). Можно предположить и обратное, что точки пересечения орбит вычислительных процессов формируют особые точки (точки бифуркации). Совершенно очевидно, что существует связь между этими особыми точками (точками изменения режима взаимодействия), их расположением на орbitах вычислительных процессов и метрическими свойствами конкретной реализации хаотического движения рабочей точки по дискриминационной поверхности. При этом хаотическое движение рабочей точки можно рассматривать как случайное блуждание между орбитами вычислительных процессов, каждая из которых вносит вклад в величину вероятности посещения. Тогда потенциальную опасность фрагмента кода можно трактовать как совокупность этих вероятностей, определяемых на основе пролонгации участка траектории движения рабочей точки, определяемого на каждом шаге обработки пакета (последовательности) унитарного кода.

Такой подход может быть реализован на основе математического метода виртуального алгоритма адаптации, с использованием аппарата теории анализа асимптотического поведения систем с локально ограниченными операторами, построенной на базе методов функционального анализа систем и свойств предельных множеств направленной на определение некоторых функционалов траектории случайного движения рабочей точки (блуждания, универсальной грамматики).

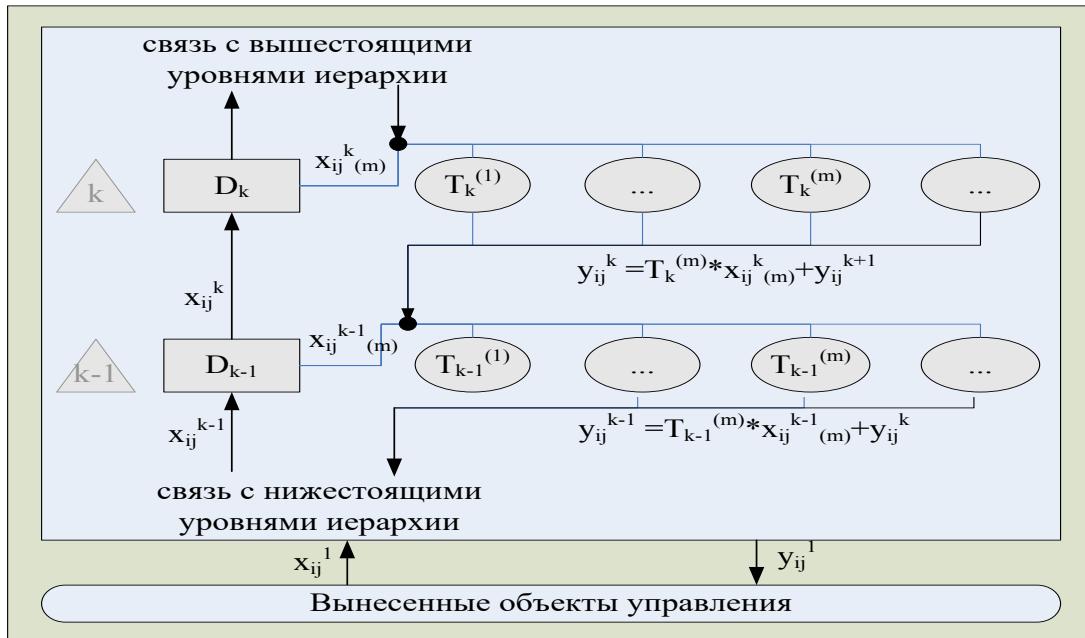


Рис. 1. Структурно-функциональная схема типового элемента ТКС

В результате типичный цикл функционирования выделенного элемента ТКС (рис.1) представляется в виде первичного анализа последовательности унитарных кодов x_{ij}^k , поступающей от i -го вынесенного объекта управления на j -м шаге функционирования на k -й уровень иерархии ТКС (уровни нумеруются снизу вверх по иерархии, начиная с 1). Это осуществляется оператором - дискриминатором D_k , задачей которого является выделение из входной последовательности некоторой вложенной последовательности $x_{ij}^{k(m)}$, которая обрабатывается соответствующей частной целевой функцией $T_k^{(m)}$ с формированием выходной последовательности $y_{ij}^k = T_k^{(m)} \otimes x_{ij}^{k(m)} \oplus y_{ij}^{k+1}$, передаваемой на последующий (нижний) уровень иерархии (знаки \otimes и \oplus отражают некоторые операции, выполняемые над потоком унитарных кодов). Оставшаяся часть последовательности x_{ij}^{k+1} , которая не может быть обработана на k -м уровне, передается на последующий верхний уровень иерархии для дальнейшей обработки.

Однако различие слов универсальной грамматики и распределений вероятностей, рассматриваемое на каждом шаге функционирования ТКС для каждого пакета (выделенной последовательности унитарного кода) без учета динамики изменения на последующем шаге, не может быть использовано в качестве критерия опасности (наличия запрещенных слов). Определение типа или прогноз изменения установившегося режима взаимодействия могут быть осуществлены только при пролонгации изменения вероятности реализации целевой функции ТКС на весь интервал взаимодействия при $j \rightarrow \infty$ на основе конечного набора имеющихся значений вероятности (набора запрещенных и разрешенных слов).

Такая оценка при ее получении на начальном этапе взаимодействия в условиях значительной априорной неопределенности поведения системы постоянно уточняется до достижения заданной достоверности прогноза.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ В ТКС В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, РЕШЕНИЕ ЧАСТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТКС ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ (ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ)

Современные концепции синтеза оптимального управления ТКС как основу реализации их целевой функции рассматривают классификацию текущей ситуации (текущего состояния объекта управления) с целью сведения его к некоторой априорно заданной обобщенной ситуации. Применительно к случаю взаимодействия ТКС такая классификация эквивалентна решению задачи определения режима взаимодействия, то есть отнесения его к классу конфликтных или бесконфликтных (нейтральному или кооперативному). Существенной особенностью такой классификации является необходимость ее проведения в условиях значительной неопределенности параметров анализируемого потока унитарных кодов и их сопоставления с заданным уровнем опасности при ограничении информационно-временного ресурса как средства идентификации, так и средства защиты информации.

В соответствии с известным определением информационного воздействия как фрагмента потенциально опасного кода, обнаружение и идентификация такого фрагмента в последовательности унитарных кодов, поступающих на вход элементов ТКС, может быть осуществлено на основе анализа изменения вероятности реализации целевой функции этим комплексом при взаимодействии с этим потенциально опасным фрагментом. Если такое взаимодействие носит конфликтный характер, вероятность реализации целевой функции ТКС будет заметно снижена, что в ряде случаев может привести к невозможности дальнейшего решения ТКС своей центральной задачи, несмотря на успешное обнаружение указанного фрагмента.

Решение задачи идентификации текущего состояния и оценки опасности конкретного пакета унитарного кода основывается на разделении анализируемых последовательностей на два класса – потенциально опасных, содержащих обращения к запрещенным областям вычислительного процесса, где выполнение этих последовательностей может привести к снижению вероятности реализации целевой функции до уровня ниже заданного, и безопасных, располагающихся в заданной информационной области ТКС.

Для оценки реализации выполнения целевой функции ТКС в условиях внешних воздействий, необходимо на основе ранее рассмотренного в статье [2] метода виртуального алгоритма адаптации, выделить принципиальное решение задачи управления в условиях неопределенности, которое может быть сведено к решению совокупности независимых задач:

1. Задачи синтеза управления

$$U^*(t) = U^*(e_p, x_p(t), t), \quad (1)$$

при наличии достоверной информации о состоянии x_p , т.е. входящем сигнале и внешней среде e_p действующем на него, который трансформирует объект S_p , объектом является система управления – стационарный компонент управления соответствующего уровня иерархии управления.

$$\begin{aligned}
 S_{p,\tau}^*(\delta, e) &= S_{p,\tau}(U^* + \delta, e_p), \\
 H_{p,\tau}^*(\delta, e) &= H_{p,\tau}(U^* + \delta, e_p), \\
 P_{p,\tau}^*(\delta, e) &= P_{p,\tau}(U^* + \delta, e_p, e_\psi).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Задачи синтеза системы наблюдения S_0 состояния $x_p(t)$ по выходу $y_p(t)$, гарантирующий ограниченность норм $J_x \leq \Delta j_x; J_e \leq \Delta j_e$ для всех $U^*(t) = U^*$, при условии, что воздействие среды e_p измеряются;

Задачи синтеза системы адаптации S_a к неконтролируемым возмущениям среды e_p , гарантируют ограниченность нормы $J_c[t_o, T]$ для всех $y_0 \in L_{y_o}$.

Ключевым фактором, в отличие от стандартных подходов, здесь является, то что условие реализуемости, полноты и ограниченности решений замкнутой системы зависит от, того каким образом получены частные решения задач 1-3.

Для решения задачи 1 совершенно не важно, каким образом решаются задачи 2,3. Требуется лишь найти $U^*(t) = U^*$ удовлетворяющее 1. С другой стороны решение задач 2, 3 по сути, требуется выполнения ограничения, достаточности условия разрешимости задачи функционального синтеза адаптивного регулятора, для оценки верхних границ [1], где нормы $J_x \leq \Delta j_x; J_e \leq \Delta j_e$ удовлетворяют данному неравенству. При этом в силу того, что задачи решаются сразу для классов $U^*(t) \in U$ и $y_0 \in L_{y_o}$, общее решение задачи управления не зависит от того какие конкретные элементы U^* и y_0 были выбраны на этапах 1,2.

В зависимости от конкретной задачи вход x_{ij}^k в уравнение (1) управляемой системы S_p^* может играть роль возмущения, ошибки по управлению.

Понятия запрещенной и разрешенной области пространства унитарных кодов ТКС относительны, так как отдельные обращения к этим областям не являются критерием конфликтности или бесконфликтности соответствующего компонента, фрагмента кода. Примером такого разделения может служить хорошо известное разграничение области функционирования процессора на кольца защиты. При этом в качестве критерия конфликтности может использоваться значение некоторого функционала, основанного на свертке поступившего кода и функции критических точек входа, а также статистике обращений к этим точкам. При этом, как показывает анализ обращений к критическим точкам входа, статистики обращения (в том числе запросы на исполнение) к унитарным кодам рассмотренных классов существенно различаются для конфликтного и бесконфликтного взаимодействия, а сравнение некоторых специальных функционалов рассматриваемых статистик может быть использовано для идентификации режима взаимодействия.

Для реализации целей информационного воздействия в данной ТКС могут послужить организованные возмущения. С внедрением программного воздействия,

которые могут изменять структуру сигнала, повлиять на работу основных процессорных устройств по сети.

В связи с этим чрезвычайно важно провести операторное описание динамической системы связи, в которой оператором – дискриминатором D_{ki} – является физический объект, взаимодействующий со средой.

Предположим, что над объектом D_{ki} можно провести эксперимент (потенциальный многократный) с целью воздействия на объект или для описания объекта в заданных условиях.

Пусть выполняются условия:

Процесс наблюдения обычным образом не влияет на объект D_{ki} ;

Процессы в объекте D_{ki} описываются вещественными функциями, определенными на непустом подмножестве $U : \tau \rightarrow \mathbb{R}$,

Воздействие U, e наблюдателя и среды и реакция x_{ij}^k объекта D_k , измерения у этой реакции могут быть описаны вещественными функциями, определенными на τ .

Функции $U : \tau \rightarrow \mathbb{R}^m$, называют воздействиями наблюдателя или управления, функции $e : \tau \rightarrow \mathbb{R}^n$ назовем воздействиями среды или возмущением функции $x_{ij}^k : \tau \rightarrow \mathbb{R}^n$ реакция объекта или состояние, а функции $y_{ij}^k : \tau \rightarrow \mathbb{R}^n$ назовем наблюдением или просто выходом объекта D_{ki} .

Множества допустимых функций $S_\tau : \{U(t), e(t)\} \subseteq U \times E \rightarrow \{x(t)\} \subseteq x$ обозначим символами U, E, X, Y соответственно.

Предположим τ , определение функций $U(t), e(t), x(t), y(t)$ являются интервалом на \mathbb{R} .

Будем называть интервал τ интервалом существование объекта.

Максимально возможный допустимый интервал $\tau^*(D_k, U, e)$ определение функций $x(t)$ назовем временем существование объекта D_k .

Очевидно, что время существование объекта D_k в общем случае зависит от воздействий $U \in U$ и $e \in E$. Однако, если эта зависимость явно определена из контекста, то вместо записи $\tau^*(D_k, U, e)$ будет использован символ τ^* .

В математической теории абстрактных систем понятие “система” вводится как бинарное отношение S , определенное на множестве $P \subseteq \{U \times E\} \times \{X \times Y\}$ и заданное графом $(\{U \times E\} \times \{X \times Y\}) \in \{U \times E\} \times \{X \times Y\}$. Другими словами система задается совокупностью пар $(\{U \times E\} \times \{X \times Y\}) \in \{U \times E\} \times \{X \times Y\}$.

Состояние $L_{p^n}[t_0, T], p \in \mathbb{R}, p \geq 1, \mathbb{R} \geq 1 = \{x \in \mathbb{R} | x \geq 1\} \cup \infty, n \in \mathbb{N}$ и измерение $y(t)$ определены не для всех $U \in U, e \in E$.

Формальное определение абстрактной системы как некоторого отношения на множестве входов $U(t), e(t)$, состояний $x(t)$ и выходов $y(t)$ является одним из наиболее общих в теории систем.

Определено свойство реакции $x(t), y(t)$ объекта по отношению к предъявленным входом $U(t), e(t)$. При этом функциональность графа $P \subseteq \{U \times E\} \times \{X \times Y\}$ отношения S не обязательно.

В силу необходимости для анализа открытых систем, требование функциональности графа P являлось бы существенным ограничением на применимость результатов анализа свойств систем в силу необходимости проверок единственности реакций $x(t)$, не полностью известных, на неизвестные воздействия $e(t)$.

Для задачи причинно-следственных связей (направленных взаимодействий) между элементами, составляющими ТКС, т.е. функциями $U(t), e(t), x(t), y(t)$, а во вторых избыточность и ограниченность требований единственности реакции, введем понятие системы S как совокупности отображений. Тогда системой S , заданной на множестве входов U , воздействий среды E , состояний X и выходов Y , называют совокупностью отображений

$$S_\tau : \{U(t), e(t)\} \subseteq U \times E \rightarrow \{x(t)\} \subseteq X \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_\tau : \{U(t), e(t), x(t)\} &\subseteq U \times E \times X \rightarrow \{y(t)\} \subseteq Y \\ \tau = [t_0, T] &\subseteq \tau^* \end{aligned} \quad (4)$$

Отображение S_τ в (3) формально определяет взаимодействие "вход-состояние", а отображение H_τ в (2) формализует взаимодействие "вход, состояние-выход".

Для возможности сравнения реакций $x(t)$ и $y(t)$ при различных воздействиях $U(t), e(t)$ необходимо ввести какую – либо меру близости (метрику) в множествах функций U, E, X, Y . Кроме того, в подавляющем большинстве технических задач множества функций U, X наделены структурой линейного пространства.

Другими словами, в множестве входов и реакций введены и однозначно определены операции сложения "+", образующие абелеву группу и внешне умножается на скаляр "×". (в данном случае на число из \mathbb{R}) со свойствами дистрибутивности по сложению.

Поэтому в пространстве множеств U, E, X, Y будем рассматривать, прежде всего, метрические пространства. В ряде случаев будет необходимо сравнивать суммы элементов из U, E, X, Y и их умножение на скаляр. Поэтому U, E, X, Y - нормированное пространство над τ . Функциональные пространства $L_p[t_0, T], p \in \mathbb{R}, p \geq 1, \mathbb{R} \geq 1 = \{x \in \mathbb{R} | x \geq 1\} \cup \infty, n \in \mathbb{N}$.

Подобный выбор обусловлен тем, что многие физически значимые свойства функций $U(t), e(t), y(t)$ (амплитуда, частота сигнала) могут быть установлено непосредственно из значений функциональных норм $\| \cdot \| L_c \| \cdot \|_p [t_0, T]$. Кроме того, ряд

стандартных показателей качества и целевых критериев так же могут быть сформулированы на языке функциональных норм в $L_{1^n}[t_0, T], L_{2^n}[t_0, T]$ и $L_{\infty^n}[t_0, T]$.

В отличии от множеств X, Y, U , множество E удобно задать линейным нормированным пространством L_e . Это продиктовано тем обстоятельством, что действие среды не всегда естественно могут быть представлены как функции времени.

Так имеет смысл включить в множество E и неизвестные параметры объекта D_k , начальные и граничные условия.

Примером такого пространства L_e является прямая сумма $L_e = \mathbb{R}^d \oplus L_p[t_0, T]$, где норма $\Pi \times \Pi L_c$ на L_c индуцируется нормами в \mathbb{R}^d и $L_p[t_0, T]$ соответственно $\forall Z \in L_e, Z = \xi \oplus V, \xi \in \mathbb{R}^d, V \in L_p[t_0, T] \Rightarrow \Pi Z \Pi L_e = \Pi \xi \Pi + \Pi V(t) \Pi_{L_p[t_0, T]}$.

Свойство равномерной непрерывности также оказывается ключевым в вопросах анализа аттрактивности инвариантных множеств соединений устойчивых от входа к состоянию систем. Кроме того, это свойство автоматически гарантирует сохранение устойчивости последовательного соединения от входа к состоянию (выходу) систем.

Известна и связь непрерывности коэффициентов передаточных отображений для устойчивых систем от входа к выходу (L_2 -устойчивых) со свойством строгой пассивности по выходу нелинейных систем. А именно, строгая пассивность по выходу влияет L_2 -устойчивых от входа к выходу. Следовательно, согласно изложенного в (1), существование систем с непрерывным коэффициентом Y_x, L_x передаточного отображения из L_2 в L_2 является необходимым условием строгой пассивности по выходу.

Прежде всего, для ТКС факт проверки непрерывности оператора от входа к состоянию подразумевает предварительно решение задачи идентификации состояния объекта.

С другой стороны, если такая идентификация все же успешно проведена, то проверка непрерывности оператора оказывается осложнена неизбежным наличием помех в измерительных данных. Сам факт возможности эффективного исследования непрерывности отображения зависит прежде всего от модели физических объектов показанной на рис.1 с точностью до всех значимых состояний. Даже устойчивые объекты могут оказаться неустойчивыми, при условии, что вектор состояния объекта и модели не полностью адекватны.

Для математических объектов и физической модели в пространстве состояний, показанной на структурно-функциональной схеме типового элемента ТКС рис.1. Математические объекты, как элементы ТКС будут заданы обыкновенными дифференциальными уравнениями.

$$\begin{aligned} x^* &= f(x, D, t, U), f \in C^0, D \in \mathbb{R}^m, U \in \mathbb{R}^n, x \in \mathbb{R}^n \\ y &= h(x), : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^h \\ \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}_+ \end{aligned} \tag{5}$$

Проверка непрерывности зачастую сводится к поиску функции $V(x,t) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_+$

$$a_1 \|x\| \leq V(x,t) \leq a_2 \|x\|, a_1, a_2 \in \mathbb{R}$$

Удовлетворяющий неравенству

$$\frac{dV(x,t)}{dx} f(x, D, t, U) + \frac{dV(x,t)}{dt} \leq 0 \quad (6)$$

Задача поиска функции $V(x,t)$ для произвольного векторного поля $f(x, D, t, U)$ не тривиальна и, вообще говоря, решение существенным образом зависит от точного знания структурно-функциональной схемы типового элемента ТКС.

Проблема поиска функции $V(x,t)$ становится еще более сложной, если в дополнение к устойчивости требуется определить аттрактивность инвариантного множества. В этом случае дополнительно требуется, чтобы левая часть неравенства была отрицательна определена.

Несмотря на то, что для автономных систем эта проблема может быть решена без требования отрицательной определенности полной производной функции $V(x,t)$ и выполнения неравенств, отыскания подходящей функции $V(x,t)$ в общем случае для открытых систем остается проблемой.

4. АНАЛИЗ АСИМПТОТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТКС С ЛОКАЛЬНО ОГРАНИЧЕННЫМИ ОПЕРАТОРАМИ И ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТКС В ВИДЕ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ПО НЕКОТОРОЙ ДИСКРИМИНАЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Современные концепции синтеза оптимального управления ТКС как основу реализации их целевой функции рассматривают классификацию текущей ситуации (текущего состояния объекта управления) с целью сведения его к некоторой априорно заданной обобщенной ситуации. Применительно к случаю взаимодействия ТКС такая классификация эквивалентна решению задачи определения режима взаимодействия, то есть отнесения его к классу конфликтных или бесконфликтных (нейтральному или кооперативному). Существенной особенностью такой классификации является необходимость ее проведения в условиях значительной неопределенности параметров анализируемого потока унитарных кодов и их сопоставления с заданным уровнем опасности при ограничении информационно-временного ресурса как средства идентификации, так и средства защиты информации.

В соответствии с известным определением информационного воздействия как фрагмента потенциально опасного кода, обнаружение и идентификация такого фрагмента в последовательности унитарных кодов, поступающих на вход элементов ТКС, может быть осуществлено на основе анализа изменения вероятности реализации целевой функции ТКС при взаимодействии с этим потенциально опасным фрагментом. Если такое взаимодействие носит конфликтный характер, вероятность реализации целевой функции ТКС будет заметно снижена, что в ряде случаев может привести к

невозможности дальнейшего решения ТКС своей центральной задачи, несмотря на успешное обнаружение указанного фрагмента.

Решение задачи идентификации текущего состояния и оценки опасности конкретного пакета унитарного кода основывается на разделении анализируемых последовательностей на два класса – потенциально опасных, содержащих обращения к запрещенным областям вычислительного процесса, где выполнение этих последовательностей может привести к снижению вероятности реализации целевой функции до уровня ниже заданного, и безопасных, располагающихся в заданной информационной области ТКС.

Поэтому, для того чтобы спрогнозировать изменения параметров (элементов ТКС), представляющих каналы для приема и передачи информации между абонентами сети и элементов вырабатывающие сигналы управления для успешного взаимодействия всех абонентов ТКС связи, необходимо определить оценки верхних границ необходимых для реализации выполнения целевой функции ТКС [2].

Оценки могут быть получены непосредственно из $\Pi X_p(t) \Pi_{\infty}, [t_0, T] \leq \mu S_p(e_p, \Delta p(e_p, e_{\varphi}, \Delta J_x + \Delta J_c + \Pi \delta(t) \Pi L_{\delta}, [t_0, T]))$, что известны оценки сверху на предел [3]

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \Pi \delta(t) \Pi L_{\delta}, [T, \infty] \quad (7)$$

и, кроме того, оценки отображений “вход-выход”, и “вход-состояние” $\mu_{S, \infty}(\cdot), \mu_{H, \infty}(\cdot), \mu_{S_p, \infty}(\cdot)$, области изменений параметров среды e_p и оценки сверху норм $\tau_x = [t_0, \infty], \tau_e = [t_0, \infty]$. Подобная информация, как правило, всегда доступна либо из эксперимента и предметной области происхождения системы, либо возникает на этапе синтеза, как характеристика регулятора.

Точка p называется ω -предельной точкой точки $x = (t, x_0, t_0)$, если существует последовательность моментов времени $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ такая, что

$$\lim_{i \rightarrow \infty} x = (t_i, x, t_0) = p \quad (8)$$

Множество всех ω -предельных точек p для x_0 называется ω -предельным множеством точки x_0 . Фундаментальные свойства предельных множеств для систем, заданных дифференциальными уравнениями вида:

$$x^* = f(x) \quad (9)$$

В данном случае, если решения системы $x^* = f(x)$ ограничены для всех $x_0 \in D$ по $t \geq 0$, то множество $\Omega(D) = U_{X_0} \in D$ $\omega(x_0)$ замкнуто, инвариантно и, кроме того,

$$\begin{aligned} \lim_{i \rightarrow \infty} x &= (t_i, x, t_0, \Omega(D)) = 0 \\ \Omega_{\nu} &= \{x\} \end{aligned} \quad (10)$$

Рассмотрим системы S_p и S_c где выполняются условия в которых при минимально допустимой целью управления будем считать ограниченность состояния

$x_p(t)$ и выхода $y_p(t)$ объекта S_p . Ограничность состояния и выхода в случае реализуемых полных систем лишь в конечном ограниченном интервале времени $[t_o, T]$, безусловно не является конечной целью синтеза. Однако это требование в силу того, что точные количественные характеристики операторов управляемого объекта не используется на данном этапе синтеза, оказывается адекватным уровню доступной информации о самом объекте.

Кроме того системы S_a, S_0 имеют локально ограниченные передаточные отображения “вход-состояние” и $\delta(t) \equiv 0$. Предположим в дополнение, что в области (9) замкнутая система может быть описана дифференциальными уравнениями вида (10). Тогда решение замкнутой системы асимптотически стремится к максимальному инвариантному множеству.

$$\begin{aligned} II X_P II &\leq \max_{e_p \in E_p, d} \mu S_{P,\infty}(e_p, d) \\ M &= \max_{e_p \in E_p, e_\varphi \in E_\varphi, d \leq \Delta x + \Delta e} \Delta p(e_p, e_\varphi, d) \end{aligned} \quad (11)$$

Наиболее важные отличия оценок (11) полученные в результате комбинированного использования методов функционального анализа систем и свойств предельных множеств от стандартных методов оценки асимптотических решений в теории адаптивных систем. Эти различия иллюстрируются рисунком 2.

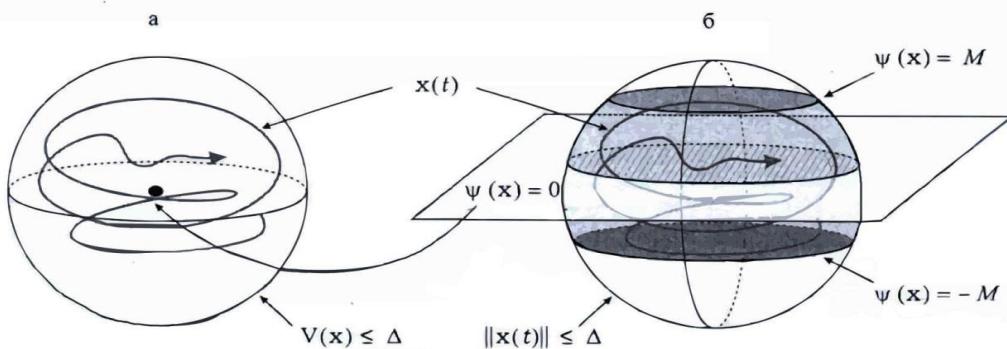


Рис.2.Графическое сравнение методов функционального анализа систем и свойств предельных множеств от стандартных методов оценки асимптотических решений в теории адаптивных систем

Прежде всего, условия реализуемости, полноты и ограниченности сформулированы с учетом мажорирующих отображений $\psi(x, e_\psi)$. Для простоты будем полагать, что $\psi : R^n \rightarrow R$ - скалярная функция состояния и не зависит от e_ψ . Множество $\Omega_\psi = \{x \in R^n | \psi(x) = 0\}$ поэтому задает поверхность в R^n . В стандартных методах адаптивного управления требуется явное задание целевого множества в виде нулей положительно определенной и неограниченно возрастающей по $\|x\|$ функции $V : R^n \rightarrow R$ (рис.1.а.). Это условие зачастую ограничивает применимость теории, во-первых, множествами, для которых такое задание возможно (как правило, это сегменты гладких поверхностей или точки в R^n). Во-вторых, в такой постановке необходимо *a priori* знание целевого множества. Дальнейшее изменение целевых множеств без

изменения алгоритмов управления не допускается. В случае использования функционального подхода эти ограничения автоматически снимаются. Ограниченнность состояния замкнутой системы вытекает из анализа асимптотического поведения систем с локально ограниченными операторами, из теорем о существовании малого контурного усиления, и принципа разделения в задаче синтеза управления в условиях неопределенности (сфера $\Omega_x = \{x \in R^n | x : \|x(t)\| \leq \Delta\}$ на рис.2. [3] С другой стороны состояние $x(t)$ принадлежит области $\Omega_\psi = \{x \in R^n | x : \|\psi(x)\| \leq M\}$. Траектория $x = (t, x_0, t_0, \theta, U(t))$ будет принадлежать множеству $\Omega_x \cap \Omega_\psi$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной статье проведен анализ асимптотического поведения ТКС с локально ограниченными операторами. Построена математическая модель взаимодействия объектов в ТКС в условиях внешних воздействий. На основе математических оценок определены решения для устойчивого управления элементами ТКС в условиях значительной неопределенности параметров анализируемого потока унитарных кодов (состояния системы) и их сопоставления с заданным уровнем опасности внешнего воздействия при ограничении информационно-временного ресурса как средства идентификации, так и средства защиты информации необходимых для реализации целевой функции (функции управления), задачи управления в условиях неопределенности о воздействиях среды и в отсутствие точной информации о состоянии устройства коммутации и управления ТКС.

С использованием метода функционального анализа систем и свойств предельных множеств, а так же метода оценки асимптотических решений для ТКС с использованием адаптивного управления, построено графическое представление траектории случайного движения рабочей точки (блуждания, универсальной грамматики) отражающие процесс функционирования ТКС необходимого для устойчивого управления замкнутой системы и выполнения условий для реализации вероятности выполнения целевой функции ТКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстых Н.Н. Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности : учеб. пособие [Http:rsl.ru]. – Электрон. текстовые, граф. данные (1,95 МБ);
2. Кудрявцев О.А. Модельное представление целевой функции телекоммуникационной системы // Труды 27-й Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" 18-20 апреля 2021, Воронеж №1. С236-237;
3. Тюкин И.Ю. Терехов В.А., Адаптация в нелинейных динамических системах, Санкт-Петербург 2006г.

REFERENCES

1. Tolstykh N.N. Software and hardware for information security: textbook. manual [Http: rsl.ru]. - Electron. text, graph. data (1.95 MB);
2. Kudryavtsev O.A. Model representation of the objective function of a telecommunication system // Proceedings of the 27th International Scientific and Technical Conference "Radar, Navigation, Communication" April 18-20, 2021, Voronezh No. 1. S236-237;
3. Tyukin I.Yu. Terekhov V.A., Adaptation in nonlinear dynamic systems, St. Petersburg 2006.

ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ КАК ПРЕДМЕТ РАССМОТРЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА ЭЛЕКТРОСВЯЗИ В РАЗРЕЗЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

И. А. Байгутлина¹, П. А. Замятин¹, А. Ю. Замятин²

¹ООО «Телеквин», Санкт-Петербург, Россия

²АО «Научно-промышленная компания «Высокие технологии и стратегические системы»
(АО «НПК «ВТиСС»), Москва, Россия

Аннотация. Описаны подходы ITU к вопросам кибербезопасности передачи и обработки информации. Рассмотрены основные аспекты глобальной программы кибербезопасности, руководства по разработке национальной стратегии кибербезопасности и глобального индекса кибербезопасности.

Ключевые слова: кибербезопасность, Международный союз электросвязи, Глобальная программа кибербезопасности, Руководство по разработке Национальной стратегии Кибербезопасности, Глобальный индекс кибербезопасности, МСЭ, ITU.

TRANSMISSION AND PROCESSING OF INFORMATION AS A SUBJECT OF CONSIDERATION OF THE INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION IN THE CONTEXT OF CYBERSECURITY

I. A. Baygutlina¹, P. A. Zamyatin¹, A. J. Zamyatin²

¹«Telequeen» Ltd, Saint-Petersburg, Russia

²JSC «Scientific and Production Company «High Technologies and Strategic Systems»
(JSC «SPC «HTSTS»), Moscow, Russia

Abstract. The ITU approaches to the issues of cybersecurity of information transmission and processing are described. The main aspects of the Global Cybersecurity Agenda, National Cybersecurity Strategy Guide and the Global Cybersecurity Index are considered.

Keywords: cybersecurity, International Telecommunication Unit, Global Cybersecurity Agenda, National Cybersecurity Strategy Guide, Global Cybersecurity Index, ITU.

1. ВВЕДЕНИЕ

Передача и обработка информации являются неотъемлемой составляющей обеспечения кибербезопасности [1 – 4]. Одной из основных международных структур, активно занимающихся вопросами кибербезопасности, является Международный союз электросвязи (МСЭ, специализированное учреждение ООН; англ. International Telecommunication Unit, ITU).

В соответствии с определением МСЭ, кибербезопасность – это набор средств, стратегии, руководящие принципы, подходы к управлению рисками, действия, профессиональная подготовка, передовой опыт, гарантии и технологии, которые могут быть использованы для защиты доступности, целостности и конфиденциальности ресурсов в соединенной инфраструктуре, используемой государственными органами, частными организациями и гражданами; такие ресурсы включают соединенные компьютерные устройства, персонал, инфраструктуру, приложения, услуги, системы

электросвязи и данные в киберсреде (пункт 2.1 Руководства по разработке национальной стратегии кибербезопасности ITU, 2018 [5]).

Во время второго этапа Всемирного саммита на высшем уровне по вопросам информационного общества (World Summit on the Information Society, WSIS), прошедшего в Тунисе в 2005 году, МСЭ было поручено взять на себя руководство по Направлению деятельности C5 «Укрепление доверия и безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий (ИКТ)» в качестве единственной содействующей организации.

2. ГЛОБАЛЬНАЯ ПРОГРАММА КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

В 2007 году МСЭ запустил Глобальную программу кибербезопасности (Global Cybersecurity Agenda, GCA) [6]. Конечная цель Глобальной программы кибербезопасности состоит в достижении значительного прогресса в отношении согласованных целей в борьбе с киберпреступностью и повышения уровня доверия и безопасности в информационном обществе.

Группа экспертов высокого уровня (High-Level Expert Group, HLEG) Глобальной программы кибербезопасности включает специалистов в области кибербезопасности многих заинтересованных сторон, представляющих самый широкий спектр областей: администрации Государств – Членов МСЭ, отрасль, региональные и международные организации, а также научно-исследовательские и академические учреждения.

Члены HLEG назначаются Генеральным секретарем МСЭ с должным учетом географической представленности и профессиональных знаний в пяти областях работы или по пяти основополагающим принципам Глобальной программы кибербезопасности. Общими отличительными особенностями и характерными чертами HLEG являются:

- глобальный «аналитический центр» многих заинтересованных сторон, состоящий из экспертов высокого уровня – представителей правительственные учреждений, отрасли, международных организаций, научно-исследовательских институтов, академических учреждений, а также индивидуальных экспертов.

- для обеспечения сбалансированности состава HLEG его члены выбираются следующим образом:

- а) Государства-Члены – представители правительенных органов стран из пяти районов мира;

- б) отрасль – производители оборудования, операторы, поставщики услуг, разработчики программного обеспечения, компании, работающие в области безопасности и других информационных технологий;

- в) региональные/международные организации;

- г) научно-исследовательские институты и академические учреждения;

- д) индивидуальные эксперты.

Глобальная программа кибербезопасности МСЭ основывается на пяти стратегических принципах (рисунок 1):

- 1) правовые меры (legal measures);

- 2) технические и процедурные меры (technical and procedural measures);

- 3) организационные структуры (organizational structures);
- 4) создание потенциала (capacity building);
- 5) международное сотрудничество (international cooperation).

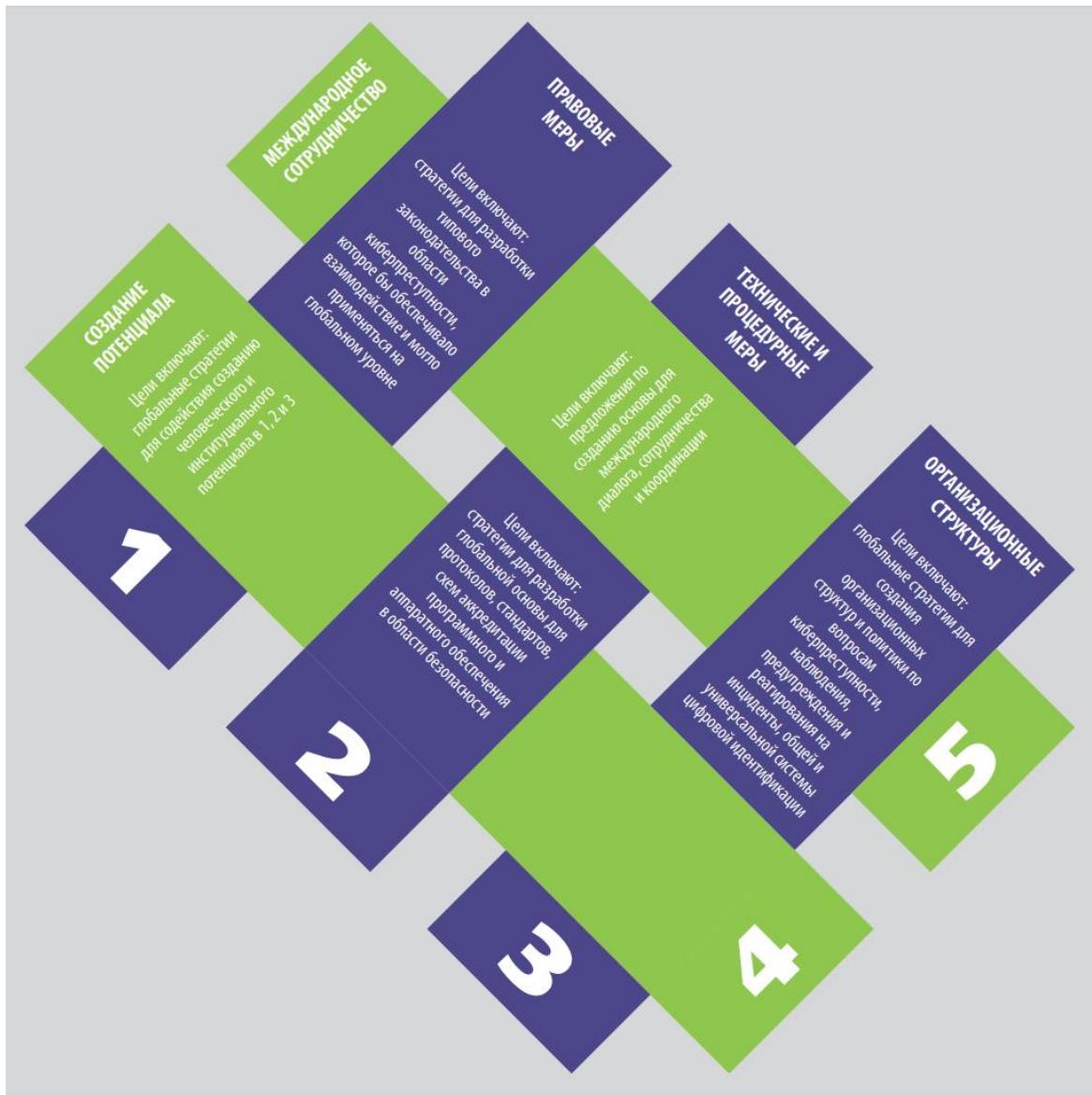


Рис. 1. Пятикомпонентная платформа Глобальной программы кибербезопасности

Правовая база, технические меры и организационные структуры должны быть реализованы на национальном и региональном уровнях, однако согласованы на международном уровне. Последние два основополагающих принципа, а именно создание потенциала и международное сотрудничество, проходят по всем областям.

Глобальная программа кибербезопасности преследует семь основных стратегических целей:

- 1) формирование стратегий для разработки типового законодательства по борьбе с киберпреступностью, которое можно было бы применять в глобальном масштабе и которое было бы совместимо с действующими национальными и региональными мерами законодательного характера;

2) формирование глобальных стратегий для создания надлежащих национальных и региональных организационных структур и политики в области борьбы с киберпреступностью;

3) разработка стратегии для установления приемлемых на глобальном уровне минимальных критериев безопасности и схем санкционирования для аппаратных средств и программных приложений и систем;

4) разработка стратегий для создания глобальной структуры для наблюдения, оповещения и реагирования на инциденты для обеспечения международной координации деятельности в рамках новых и существующих инициатив;

5) разработка глобальных стратегий для создания и утверждения общей и универсальной системы цифровой идентификации, а также необходимых организационных структур в целях обеспечения признания цифровых удостоверений личности без учета географических границ;

6) разработка глобальной стратегии в целях содействия созданию человеческого и институционального потенциала для увеличения знаний и ноу-хау в секторах и во всех вышеупомянутых областях;

7) подготовка предложений по основе глобальной стратегии, основанной на участии многих заинтересованных сторон, в целях налаживания международного сотрудничества, диалога и координации деятельности во всех вышеупомянутых областях.

3. РУКОВОДСТВО ПО РАЗРАБОТКЕ НАЦИОНАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

В 2018 году МСЭ подготовил Руководство по разработке Национальной стратегии Кибербезопасности (National Cybersecurity Strategy Guide) [5].

Цель документа заключается в том, чтобы предоставить руководству и директивным органам стран руководящие указания по разработке национальной стратегии кибербезопасности и стратегическому осмыслению вопросов кибербезопасности, готовности и устойчивости к киберугрозам.

С помощью документа директивные органы смогут разработать стратегии, учитывающие конкретную ситуацию в стране, культурные и социальные ценности, а также поощряющие установление защищенного, устойчивого общества с развитой ИКТ-инфраструктурой, указывается в пресс-релизе МСЭ.

Руководство разработано при содействии различных правительственные и международных организаций, а также представителей частного сектора, включая Содружество телекоммуникационных организаций, Женевский центр политики безопасности, Оксфордский университет, Microsoft, Объединенный центр передовых технологий киберобороны НАТО и пр.

Руководство составлялось, в первую очередь, в качестве вспомогательного ресурса для заинтересованных сторон из числа государственных органов, чтобы они могли его использовать при подготовке и написании их национальной стратегии кибербезопасности, а также в процессе руководства ее применением. Соответственно,

его структура была разработана в соответствии с процессом и порядком разработки стратегии:

- Раздел 1 – Краткий обзор документа;
- Раздел 2 – Введение: обзор основной темы Руководства и соответствующие определения;
- Раздел 3 – Жизненный цикл разработки стратегии: подробное описание этапов разработки стратегии и руководства ее применением на протяжении всего жизненного цикла;
- Раздел 4 – Всеобъемлющие принципы, лежащие в основе стратегии: сквозные базовые соображения, которые следует учитывать в ходе разработки стратегии;
- Раздел 5 – Тематические области и передовой опыт: определение ключевых элементов и тем, которые следует учитывать при разработке стратегии;
- Раздел 6 – Вспомогательные справочные материалы: дополнительные ссылки на литературу по данной тематике, которую заинтересованные стороны могут рассмотреть в процессе написания текста.

Основные этапы разработки Национальной Стратегии Кибербезопасности:

- Этап I – Инициирование;
- Этап II – Обзор и критический анализ имеющегося опыта;
- Этап III – Разработка;
- Этап IV – Осуществление;
- Этап V – Мониторинг и оценка.

Среди основных принципов, на которых должна основываться Национальная Стратегия Кибербезопасности, перечислены следующие:

- 1) в стратегии должна излагаться четкая концепция, учитывающая мнения государства и общества во всей их полноте;
- 2) стратегия должна основываться на всеобъемлющем понимании и анализе общей цифровой среды, однако при этом учитывать особые обстоятельства страны и включать классификацию приоритетов;
- 3) стратегия должна разрабатываться при активном участии всех соответствующих заинтересованных сторон и учитывать их потребности и обязательства;
- 4) стратегия должна способствовать экономическому и социальному процветанию и максимальному увеличению вклада ИКТ в устойчивое развитие и социальную интеграцию;
- 5) стратегия должна предусматривать уважение основополагающих ценностей и согласовываться с ними;
- 6) стратегия должна предусматривать возможность эффективного управления рисками в области кибербезопасности и способствовать повышению устойчивости экономической и социальной деятельности;
- 7) стратегия должна предполагать применение наиболее подходящих из имеющихся в распоряжении политических инструментов для выполнения каждой из определенных в ней задач с учетом конкретных обстоятельств страны;

8) следует утвердить стратегию на самом высоком уровне правительства, которое в таком случае будет отвечать за распределение соответствующих функций и обязанностей и выделение достаточных людских и финансовых ресурсов;

9) стратегия должна способствовать созданию цифровой среды, заслуживающей доверия граждан и делового сообщества.

4. ГЛОБАЛЬНЫЙ ИНДЕКС КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

Начиная с 2015 года, МСЭ выпускает Глобальный индекс кибербезопасности (Global Cybersecurity Index, GCI). Четвёртое издание Индекса вышло в 2021 году [7]. Отмечено, что около 64 процентов стран к концу года приняли национальную стратегию кибербезопасности, и более 70 процентов в 2020 году провели кампании по повышению осведомленности о кибербезопасности, тогда как в 2018 году их было, соответственно, 58 процентов и 66 процентов. При этом многие страны и регионы отстают в следующих ключевых областях:

- обучение навыкам кибербезопасности, которое должно быть адаптировано к потребностям микропредприятий, малых и средних предприятий (ММСП);
- отрасли финансов, здравоохранения, энергетики и другие ключевые сектора, в которых требуются специальные меры для ликвидации пробелов в области кибербезопасности;
- защита критической инфраструктуры, которую необходимо совершенствовать с целью борьбы с новыми и возникающими киберугрозами;
- защита персональных данных, которую необходимо усиливать по мере распространения онлайновой деятельности.

В силу растущей зависимости от цифровых решений требуется более эффективные, но в то же время доступные и удобные для пользователей меры защиты данных.

В четвертом издании индекса, GCI-2020, приводятся оценки степени выполнения 193 Государствами – Членами МСЭ и Государством Палестины обязательств в области кибербезопасности. Он призван выявить пробелы, стать дорожной картой для ориентации национальных стратегий, создать информационную основу для нормативно-правовой базы, развивать потенциал, демонстрировать примеры передового опыта, укреплять международные стандарты и содействовать созданию культуры кибербезопасности.

Уровень развития или участия каждой страны оценивается по пяти направлениям Глобальной программы кибербезопасности МСЭ – правовые меры, технические меры, организационные меры, развитие потенциала и сотрудничество.

В соответствии с GCI-2020 Россия находится на 5 месте (рисунок 2).

Согласно GCI-2020 у России есть потенциал роста в плане технических и организационных мер. По другим группам обеспечены максимальные баллы.

Global Cybersecurity Index 2020

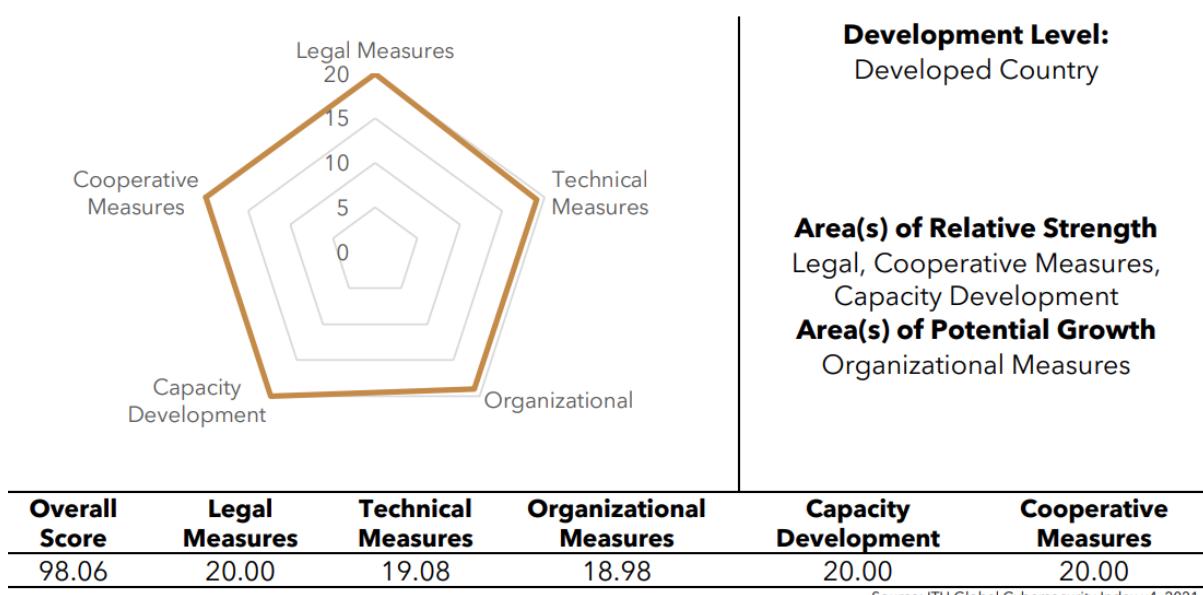
Russian Federation

Рис. 2. Показатели Российской Федерации согласно GCI-2020

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно экспертным оценкам, изложенными в GCI-2020, Российская Федерация имеет возможность усилить свои позиции в области кибербезопасности, в том числе, за счёт развития технических и процедурных мер. Эти направления касаются, в первую очередь, производителей оборудования, проектных институтов и организаций, подразделений эксплуатации и сервисного обслуживания средств передачи и обработки информации.

Учитывая высокий экспортный потенциал российского оборудования и программного обеспечения, разработку технических и процедурных мер целесообразно вести с позиций оценки состояния кибербезопасности целевых рынков сбыта.

На текущем этапе развития РФ в качестве приоритетных направлений в части передачи и обработки информации для повышения кибербезопасности следует особо выделить:

- средства связи и управления роботизированных систем [8 – 11] (включая беспилотные летательные аппараты [12 – 15]);
- наземные и космические составляющие новых спутниковых группировок [16 – 19];
- инфраструктуру и системы управления критически важных объектов (включая системы принятия решений на основе искусственного интеллекта) [20 – 23].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевырёв А. В., Замятин А. Ю. Концептуальные аспекты информационного противоборства // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах. – 2017. – С. 1128–1137.
2. Волков А. Н. и др. Модели, методы и средства обеспечения информационной безопасности и непрерывности информационного взаимодействия при использовании транспортных сетей передачи данных на базе ВОЛС / А. Н. Волков, И. В. Галайко, С. А. Грищенко, А. Б. Давыдов, А. Ю. Дыбля, Ю. В. Дыбля, А. А. Кочкаров, Т. А. Кузина, А. В. Литвинов, Е. Ф. Лядова, А. Ю. Непочатов, И. В. Рыбка, В. В. Самойлов, А. В. Тимошенко, А. Г. Трубачёв. – М.: Издательство ООО «Сам Полиграфист», 2019. – 200 с.
3. Кочкаров А. А., Тимошенко А. В., Литвинов А. В., Лядова Е. Ф., Гайчук Ю. Н. Оценка непрерывности информационного взаимодействия и доведения информации в системах мониторинга с динамической структурой // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2019. – Т. 24. – № 8. – С. 66–71.
4. Кушнер А. К., Кочкаров А. А., Лядова Е. Ф. Моделирование структурного разрушения сложных сетевых систем без восстановления: компьютерной исследование // Успехи современной радиоэлектроники. – 2020. – Т. 74. – № 7. – С. 38–45.
5. Руководство по разработке национальной стратегии кибербезопасности. Стратегическая деятельность по обеспечению кибербезопасности. – Женева: ITU, 2018. – 76 с.
6. Глобальная программа кибербезопасности. – Женева: ITU, 2007. – 18 с.
7. ITU Global Cybersecurity Index 2020. Measuring commitment to cybersecurity. – Geneva: ITU, 2021. – 172 р.
8. Байгутлина И. А., Замятин П. А. Система защиты аэропортов от беспилотных летательных аппаратов // Славянский форум. – 2019. – № 4(26). – С. 289–298.
9. Байгутлина И. А., Замятин П. А. Проверочно - испытательный комплекс для тестирования бортовых коммуникационных и навигационных устройств беспилотных автомобилей // Технологические исследования: информационное обеспечение, алгоритм проведения, интерпретация результатов. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: АМИ, 2020. – С. 8–14.
10. Байгутлина И. А. и др. Особенности построения и использования специализированной информационно-справочной системы «UAV-INFO» по беспилотным летательным аппаратам / Байгутлина И. А., Грищенко Д. А., Замятин П. А., Лядова Е. Ф. // Методы и программные средства информационного сервиса в информационных и пространственных полях. Сборник научных трудов. – Бургас, 2020. – С. 139–154.
11. Шайтура С. В. и др. Совокупная стоимость владения решениями на базе технологии «Интернет вещей» / С. В. Шайтура, П. А. Замятин, Л. П. Белю, Н. Л. Султаева // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 2. – С. 124–133.
12. Замятин П. А. Классификационные признаки беспилотных летательных аппаратов аэродромного базирования // Chronos. – 2020. – № 4 (43). – С. 76–84.
13. Замятин П. А. Вопросы эксплуатации беспилотных авиационных систем // Славянский форум. – 2021. – № 1(31). – С. 297–304.
14. Замятин П. А. Системы управления беспилотными летательными аппаратами // Инновационная наука. – 2020. – № 4. – С. 37–42.
15. Лядова Е. Ф. Организация информационного взаимодействия между беспилотным летательным аппаратом и пунктом управления системы мониторинга: основные варианты и оптимизационный выбор конфигурации // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы современной науки, достижения и инновации. Сборник научных статей по материалам III Международной научно-практической конференции. – Уфа: ООО «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2020. – С. 81–94.
16. Лядова Е. Ф. Организация информационного взаимодействия в системе мониторинга на базе беспилотных летательных аппаратов при использовании спутниковых систем связи в условиях накладываемых ограничений // Технологические исследования: информационное обеспечение, алгоритм проведения, интерпретация результатов. Сборник статей по итогам

- Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: Издательство ООО «Агентство международных исследований», 2020. – С. 51–57.
17. Мырова Л. О. и др. Низкоорбитальные спутниковые системы связи Starlink и OneWeb / Л. О. Мырова, О. В. Ментус, А. Б. Давыдов, П. А. Замятин, Е. Ф. Лядова, А. С. Филатова // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2021. – № 2. – С. 36–45.
 18. Галайко И. В. и др. Вопросы разработки полезной нагрузки космических аппаратов, абонентских терминалов и системы управления сетью для спутниковых систем связи / И. В. Галайко, С. А. Грищенко, А. Б. Давыдов, А. Ю. Дыбля, Ю. В. Дыбля, А. В. Зайковский, П. А. Замятин, О. С. Крылова, Т. А. Кузина, А. В. Литвинов, Е. Ф. Лядова, А. Ю. Непочатов, И. В. Рыбка, В. В. Самойлов, А. Г. Трубачёв, К. В. Яковлев. – М.: Издательство ООО «Сам Полиграфист», 2020. – 208 с.
 19. Литвинов А. В., Лядова Е. Ф., Рыбка И. В. Вопросы проектирования космических аппаратов спутниковой системы связи // Инновационная наука. – 2020. – № 4. – С. 43–49.
 20. Лядова Е. Ф. Применение искусственного интеллекта в системах принятия решений // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телеинформационные системы». Сборник статей III Всероссийской научно-технической видеоконференции. – Анапа: Федеральное автономное государственное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2021. – С. 76–81.
 21. Лядова Е. Ф., Дыбля А. Ю. Модели и методы обеспечения непрерывности информационного взаимодействия при использовании сетей связи и передачи данных специального назначения // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции. В 6-ти томах. – Т. 2. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. – С. 343–348.
 22. Лядова Е. Ф. Перспективные сервисы на основе технологий искусственного интеллекта и виртуальной реальности // Славянский форум. – 2021. – № 1 (31). – С. 29–40.
 23. Лядова Е. Ф. Общий искусственный интеллект и геоинформационные технологии // Славянский форум. – 2021. – № 2 (32). – С. 327–335.

REFERENCES

1. Shevyrev A. V., Zamyatin A. Y. The informational confrontation concept aspects // In the proceedings: Radiolocation, navigation, telecommunication. The collection of articles of the XXIII International science-technical conference. In three volumes. – 2017. – Pp. 1128–1137.
2. Volkov A. N. and others. The models, methods and means to provide the informational security and the information interaction continuity in the fiber optic transport networks / A. N. Volkov, I. V. Galayko, S. A. Grischenko, A. B. Davydov, A. Y. Dyblya, Y. V. Dyblya, A. A. Kochkarov, T. A. Kuzina, A. V. Litvinov, E. F. Lyadova, A. Y. Nepochatov, I. V. Rybka, V. V. Samoylov, A. V. Timoshenko, A. G. Trubachov; Edited by A. V. Timoshenko. – Moscow: JSC «NPK «VTiSS», JSC «Sam Polygraphist» Publishers, 2019. – 200 p.
3. Kochkarov A. A., Timoshenko A. V., Litvinov A. V., Lyadova E. F., Ghaychuk Y. N. The estimation of the informational interaction continuity and the information delivery in the monitoring systems with the dynamic structures // Electromagnetic waves and electronic systems, Moscow: Radiotekhnika, 2019. – Vol. 24. – No 8. – Pp. 66–71.
4. Kushner A. K., Kochkarov A. A., Lyadova E. F. The complex network systems destruction modelling: the computer research // The modern electronics success. – 2020. – № 7. – Pp. 38–45.
5. National Cybersecurity Strategy Guide. – Geneva: ITU, 2021. – 76 p.
6. Global Cybersecurity Agenda. – Geneva: ITU, 2021. – 18 p.
7. ITU Global Cybersecurity Index 2020. Measuring commitment to cybersecurity. – Geneva: ITU, 2021. – 172 p.
8. Baygutlina I. A., Zamyatin P. A. The anti-unmanned aerial vehicle airport protection system // The Slav Forum. – 2019. – № 4(26). – Pp. 289–298.
9. Baygutlina I. A., Zamyatin P. A. The monitoring and test complex for the unmanned vehicles onboard communication and navigation systems testing // The collection of articles of the International science-practical conference «The technological researches: the information

- provisioning, the behavior algorithms, the results interpretation» (Kazan, May 23, 2020). – Sterlitamak: AMI, 2020. – Pp. 8–13.
10. Baygutlina I. A. and others. The features of the «UAV-INFO» unmanned aerial vehicles information system building and operation / Baygutlina I. A., Grischenko D. A., Zamyatin P. A., Lyadova E. F. // In the collection of scientific articles: The methods and SW means of the information service in the informational and spatial fields. – Burgas, 2020. – Pp. 139–154.
 11. Shaytura S. V. and others. The total ownership price of the solutions based on the «Internet of things» technology / S. V. Shaytura, P. A. Zamyatin, L. P. Belyu, N. L. Sultaeva // Kursk State Agricultural Academy Proceedings. – 2021. – No 2. – Pp. 124–133.
 12. Zamyatin P. A. The ground-based unmanned aerial vehicle classification signs // «Chronos» scientific magazine. The collection of scientific proceedings «The modern science issues: the problems, trends and the perspectives». – Proceeding 4 (43), April 13, 2020. – Pp. 76–84.
 13. Zamyatin P. A. The unmanned aerial systems operation issues // The Slav Forum. – 2021. – No 1(31). – Pp. 297–306.
 14. Zamyatin P. A. The unmanned aerial vehicles control systems // Innovation science. – 2020. – No 4. – Pp. 37–42.
 15. Lyadova E. F. Setting the informational interaction between the unmanned aerial vehicle and the monitoring system control point: the main variants and the optimization choice of the configuration // The collection of the scientific articles by the materials of the III International science-practical conference «The fundamental and application researches: the actual issues of the modern science, the achievements and innovations» (Ufa, June 13, 2020). – Ufa: NIC Vestnik Nauki Publ., 2020. – Pp. 81–94.
 16. Lyadova E. F. Setting the information interaction in the unmanned aerial vehicle based monitoring system when using the satellite telecom systems with certain limitations // The collection of articles of the International science-practical conference «The technological researches: the information provisioning, the behavior algorithms, the results interpretation» (Kazan, May 23, 2020). – Sterlitamak: AMI, 2020. – Pp. 51–57.
 17. Myrova L. O. and others. Low orbit satellite telecom systems Starlink and OneWeb / L. O. Myrova, O. V. Mentus, A. B. Davydov, P. A. Zamyatin, E. F. Lyadova, A. S. Filatova // Radio Research and Development Institute Proceedings. – 2021. - No 2. – Pp. 36–45.
 18. Galayko I. V. and others. The issues of the spacecraft payload, the subscriber terminal stations and the control systems development in the satellite telecom systems / I. V. Galayko, S. A. Grischenko, A. B. Davydov, A. Y. Dyblya, Y. V. Dyblya, A. V. Zaykovskiy, P. A. Zamyatin, O. S. Krylova, T. A. Kuzina, A. V. Litvinov, E. F. Lyadova, A. Y. Nepochatov, I. V. Rybka, V. V. Samoylov, A. G. Trubachev, K. V. Yakovlev. – Moscow: JSC «NPK «VTiSS», JSC «Sam Polygraphist» Publishers, 2020. – 208 p.
 19. Litvinov A. V., Lyadova E. F., Rybka I. V. The issues of the satellite telecom systems spacecraft design // The Innovation Science. The International Science Magazine. – 2020. – No 4. – Pp. 43–49.
 20. Lyadova E. F. Using the artificial intellect in the decision making systems // The materials of the III All Russian science and technical video conference «The modern science condition and the development perspectives in the «Automatic Control Systems, information and telecommunication systems» area». In three volumes. Volume 3. – Anapa: The military innovation technical park «Era», 2021. – Pp. 76–81.
 21. Lyadova E. F., Dyblya A. Y. The models and methods of the information interaction continuity when using the specialized telecom and data transmission systems // Radiolocation, navigation, telecommunications: The scientific papers collection of The XXVI International Technical Scientific Conference (September 29th – October 1st, 2020): in 6 volumes/ Voronezh State University, JSC «Concern «Sozvezdiye». – Vol. 2. – Voronezh: VGU Publishers, 2020. – Pp. 343–348.
 22. Lyadova E. F. The forward-looking services based on the artificial intellect and virtual reality technologies // The Slav Forum. – 2021. – No 1 (31). – Pp. 29–40.
 23. Lyadova E. F. The common artificial intellect and the geo-inform technologies // The Slav Forum. – 2021. – No 2 (32). – Pp. 327–335.

РАЗРАБОТКА SC И SCL ДЕКОДЕРОВ НА БАЗЕ FPGA ARTIX-7

Н. Ю. Чилихин¹, Е. К. Карпухина¹, А. О. Горюнов¹

¹Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), Ульяновск, Россия

Аннотация. Язык программирования Vivado позволяет достаточно эффективно и без значительных потерь на этапе прототипирования макетного образца создать SC и SCL декодеры. Сравнение полученных теоретических данных и результатов практических испытаний рассматриваемых алгоритмов показывает незначительное отклонение в пределах 9,6% и на прямую зависит от типа оптимизации и сортировщика. Выбранная в рамках данного исследования платформа позволяет достаточно быстро создать натурный образец, но имеет существенные ограничения в количестве логических вентилей (диапазон от 12800 до 215360) и в пропускной способности (до 6 Гбит/с). Таким образом, для анализа поведения декодеров при их интеграции в высокоскоростные сети требуется либо применять методы масштабирования, либо использовать несколько платформ Artix-7, либо перейти на более высокопроизводительный тип FGPA (Spartan). Среди наиболее важных преимуществ платформы Artix-7 компании Xilinx следует выделить следующие: уменьшенное энергопотребление на 50% по сравнению с конкурентами, поддержка DDR3 со скоростью 1066 Мбит/с, поставка с годовой лицензией и использование технологического процесса 28 нм. Все вышеперечисленные отличительные признаки позволяют использовать предложенную платформу для построения портативных устройств или простейшего прототипирования.

Ключевые слова: полярные коды, последовательный декодер Арикана, списочный декодер, декодер Тала-Варди, программируемая логическая интегральная схема.

SC AND SCL DECODERS DEVELOPMENT BASED ON FPGA ARTIX-7

N. Y. Chilikhin¹, E. K. Karpukhina¹, A. O. Goryunov¹

¹Ulyanovsk state technical university (USTU), Ulyanovsk, Russia

Abstract. The Vivado programming language provides to create SC and SCL decoders quite efficiently and without significant losses at the prototyping stage of a mock-up sample. A comparison of the obtained theoretical data and the results of practical tests of the algorithms under consideration shows a slight deviation in the range of 9.6% and directly depends on the type of optimization and sorter. The platform chosen in this study provides to quickly create a full-scale sample, but it has a significant limitation in the number of logic gates (range from 12800 to 215360) and in bandwidth (up to 6 Gbit/s). Thus, to analyze the decoders operations when they are integrated into high-speed networks, it is necessary to either apply scaling methods, or use several Artix-7 platforms, or switch to a more high-performance type of FGPA (Spartan). The most important advantages of Xilinx's Artix-7 platform are reduced power consumption by 50% compared to competitors, support for DDR3 with a speed of 1066 Mbit/s, delivery with an annual license and the use of a 28 nm technological process. All of the above distinctive features provide to use this platform for building portable devices or the simplest prototyping.

Keywords: polar codes, successive cancellation decoder, list decoder, successive cancelation list decoder, FPGA.

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытое в 2008 г. Э. Ариканом явление поляризации канала вдохновило научное сообщество в области помехоустойчивого кодирования найти замену классическим кодам в виде турбокодов и кодов LDPC. За 13 лет научных изысканий было написано огромное количество научных статей, и создан практический задел для последующих исследований. Классический алгоритм Арикана, алгоритм Тала-Варди, алгоритм Кёттера, алгоритм Думера-Шабунова и другие показали несомненное преимущество полярных кодов. Тем не менее научное сообщество в лице комитета 3GPP все больше склоняется к применению полярных кодов в управляющих каналах связи. Анализ современных источников показал, что среди научных статей достаточно мало работ, в которых описывается интеграция существующих алгоритмов в ПЛИС. Это доказывает актуальность представленного в нашей работе исследования.

2. ОСОБЕННОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПЛИС XILINX ARTIX-7

При разработке последовательного декодера Арикана (SC) и декодера на основе алгоритма Тала-Варди (SCL) необходимо учитывать особенности платформы, на базе которой происходит прототипирование.

ПЛИС Xilinx Artix-7 FPGAS XC7A100T обеспечивают наивысшую производительность и скорость линии приемопередатчика. Они сочетают низкую стоимость с минимальным энергопотреблением, что идеально подходит для производства разнообразных портативных устройств. На рисунке 1 показано, как выглядят ПЛИС.

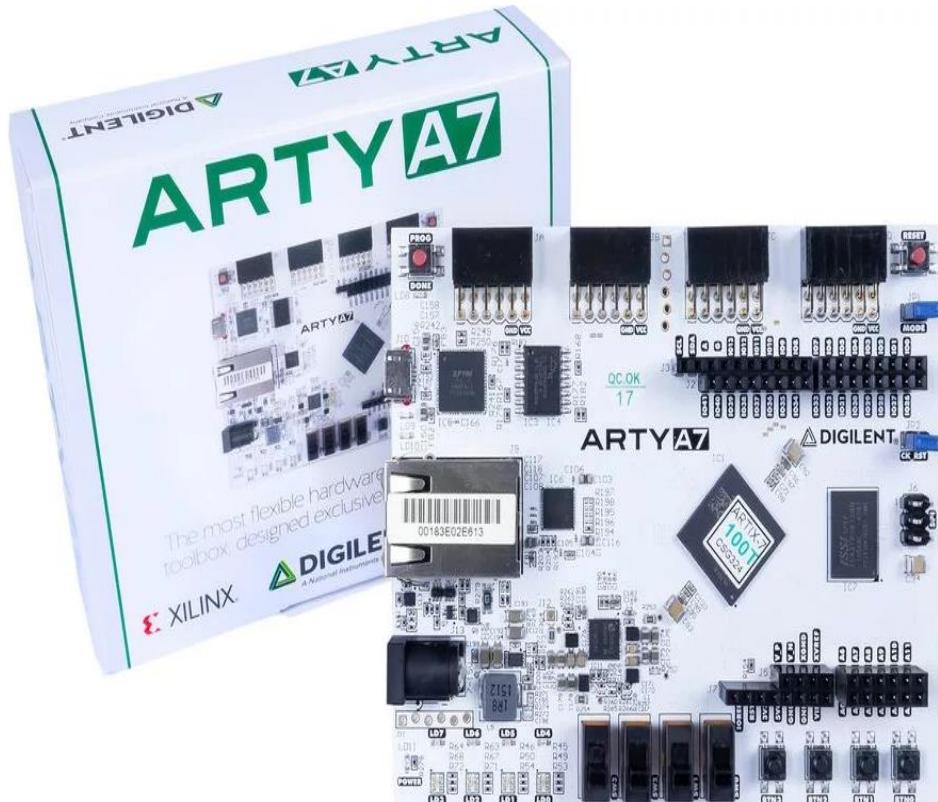


Рис. 1. ПЛИС Xilinx Artix-7 FPGAS XC7A100T.

Данная платформа имеет высокопроизводительные логические ресурсы, реализованные на базе 6-входовых таблиц преобразования (6-LUT), которые также могут конфигурироваться как распределенная память, и 2-портовую блочную память BlockRAM (36 Кбит) со встроенной логикой FIFO (first input-first output). Блоки ввода-вывода, использующие технологию SelectIO, поддерживают высокоскоростные дифференциальные сигнальные стандарты, включая поддержку интерфейса памяти DDR3 (до 1866 бит/с). Высокоскоростные приемопередатчики, позволяющие реализовать последовательную передачу данных со скоростью от 600 Мбит/с до 28 Гбит/с, поддерживают специальный режим низкого потребления и оптимизированы для межкристальной коммутации.

Двойные 12-битные аналого-цифровые преобразователи (ADC) общего назначения с производительностью 1 млн. выборок в секунду имеют встроенные датчики контроля температуры и напряжения. Блоки цифровой обработки сигнала (DSP) с умножителем 25x18, 48-битным аккумулятором и предсумматором для высокопроизводительной фильтрации включают возможность оптимального построения фильтров с симметричными коэффициентами. Блоки управления и синтеза сигналов синхронизации позволяют обеспечить высокую точность сигналов и низкий уровень джиттера. Аппаратные блоки PCIExpress поддерживают порты x8 Gen3 Endpoint и RootPort.

Широкий набор режимов конфигурации включает возможность шифрования конфигурационной последовательности по алгоритму AES (256 бит) с HMAC/SHA-256 аутентификацией и встроенный модуль обнаружения и коррекции однократной ошибки.

Кристаллы производятся по проектной норме 28 нм с использованием технологий HKMG (High-KMetalGate) и HPL (напряжение питания ядра 1.0 В), также доступны кристаллы с напряжением питания ядра 0,9 В с меньшим энергопотреблением.

При прототипировании не обнаружено критических режимов обработки кодовых комбинаций. Это достигается за счет встроенного в язык программирования базового тестировщика, позволяющего устраниТЬ ошибки на этапе написания программного кода, а не после переноса программной реализации в ПЛИС. Однако нужно учитывать, что корректирующие способности SC декодера напрямую зависят от типа ошибки и момента ее возникновения. Если возникают группирующиеся ошибки, то корректирующей способности SC декодера просто недостаточно. Для нивелирования этого эффекта (который, как правило, возникает в оптических линиях связи) необходимо использовать перемежение [1].

Важно отметить, что возникновение ошибки на первых шагах обработки данных SC декодером приводит к лавинообразному распространению ошибок. Этот эффект не присущ SCL декодеру. Тем не менее оценка всех списков/ветвей приводит к увеличению вычислительной сложности создаваемого образца. Безусловно, корректный выбор метода оптимизации и битового сортировщика может существенно снизить подобный эффект, но не полностью устранить его. По этой причине требуется использовать ограниченное количество списков/ветвей, что в свою очередь может приводить к неверной интерпретации принятой кодовой комбинации. Подобные нюансы необходимо учитывать при разработке натурного образца и анализе

полученных результатов, в противном случае могут быть перенесены ошибки проектировщика/алгоритма декодирования на несовершенства аппаратного обеспечения. Таким образом, при реализации имитационного моделирования необходимо уделить особое внимание SCL декодеру как более эффективному подходу для декодирования полученной из канала связи информации.

Наши научные изыскания показали, что необходимо рассматривать SCL декодер не как самостоятельный декодер, а как набор независимых модулей, интегрированных в единый блок адаптивного декодера. За упрощенное декодирование отвечает блок SC декодера, совмещенный с блоком циклического кода CRC. В случае нехватки корректирующей способности этих двух подблоков системой используется декодер SCL.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ БАЗОВЫХ МОДУЛЕЙ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ДЕКОДЕРОВ

В качестве базы для организации декодера используется ПЛИС Xilinx Artix-7 FPGAS XC7A100T. Сама разработка конечного продукта осуществляется в программной среде Vivado VHDL (для написания кодов под блоки) и Videlado Design suite (для объединения разработанных блоков). Язык Vivado по синтаксису очень похож на С-подобные языки, также дополнительным плюсом является возможность объединить код, написанный на Matlab, Vivado и C++, в один готовый проект. Для реализации предложенных декодеров необходимо создание блока списочного процесса (LPU) и битового сортировщика (BS) [2, 3].

LPU состоит из L элементов обработки списка (LPE) и 1 элемента маршрутизатора решений (SRE) для вычисления условных вероятностей (ИКП) δ_0 и δ_1 мягких решений. В разработке применяется полупараллельная архитектура для обработки, чтобы минимизировать общую сложность всех блоков LPU. Следовательно, декодер имеет конечное число V блоков LPU. Каждый LPU читает из памяти и записывает в асимметричную блочную оперативную память (BRAM), которая имеет ширину входных данных $2V \times L \times P$, $4V \times L \times P$ ширину выходных данных и $(2 \times N/V) - 2$ длину адреса [3].

LPE может прочитать одну из различных областей памяти BRAM или буфера данных между LPU, однако, он может записывать только свою собственную ячейку памяти [3]. Во время активации блока частичной суммы списка LPSU и BS все LPU приостановлены. Результаты синтеза LPU, SRE и LPE показаны в таблице 1.

По мере увеличения L SRE использует больше справочных таблиц (LUT), и из таблицы видно, что лидирует LPE реализация.

Чтобы ограничить время ожидания, а также использование ресурсов, был реализован алгоритм BS. Алгоритм BS – это алгоритм полупараллельной сортировки с низкой сложностью, который подходит для реализации в ПЛИС декодирования полярных кодов. Сложность битовой сортировки масштабируется [3, 4].

Таблица 1. Синтез LPE и SRE в LPU

| | | LPU | LPE | SRE |
|----------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| Точность | Длина списка, L | Задержка, нс | Задержка, нс | Задержка, нс |
| 8 | 2 | 3.52 | 71.3 | 28.7 |
| | 4 | 3.98 | 71.7 | 28.3 |
| | 8 | 4.16 | 68.6 | 31.4 |
| | 16 | 4.30 | 66.3 | 33.7 |
| | 32 | 4.76 | 59.9 | 40.1 |
| 16 | 2 | 3.66 | 72.3 | 27.7 |
| | 4 | 4.11 | 72.5 | 27.5 |
| | 8 | 4.30 | 69.3 | 30.7 |
| | 16 | 4.46 | 66.9 | 33.1 |
| | 32 | 4.94 | 60.4 | 39.6 |

В исследовании были реализованы и протестированы 3 BS: классический битовый сортировщик (CBS), быстрый битовый сортировщик (FBS) и быстро восстановленный битовый сортировщик (FRBS). Для реализации CBS использовались конвейерные регистры в конце каждого подэтапа, для реализации FBS – конвейерные регистры для каждого двух подэтапов, а для реализации FRBS – последний журнал L необязательных подэтапов [2, 3]. Сортировщик FRBS имеет преимущества с точки зрения использования ресурсов и задержки, следовательно, именно он и будет применен в разработке, чтобы реализовать адаптивный декодер.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SC И SCL ДЕКОДЕРОВ

Аппаратная реализация декодера SCL – перспективный подход для повышения эффективности реализации полярных кодов с разумно допустимой сложностью.

Как отмечалось ранее, объединение алгоритма декодирования списка SC с CRC делает полярные коды конкурентоспособными, однако, оно используется для декодирования кодовых комбинаций, не превышающих корректирующую способность указанных кодов, при отсутствии группирующихся ошибок. Начальная реализация декодера SCL фокусируется на максимизации пропускной способности с быстрым алгоритмом сортировки с ограниченным размером списка [1, 5].

Эти реализации используют логарифмическое правдоподобие LLR-представления канала. Информация для расчета жестких решений декодирования списка на основе LLR отношения правдоподобия представлена для уменьшения сложности [5, 6]. К тому же обычная задержка декодера SCL может быть снижена посредством уменьшения алгоритма декодирования списка задержек (RLLD).

Результаты пропускной способности варьируются в зависимости от отношения сигнал/шум (E_b/N_0). В низких значениях E_b/N_0 декодеры SC и SCL неэффективны, однако, пропускная способность 20 Мбит/с позволяет работать в физических каналах 3G и в каналах управления любых стандартов связи. Невысокая эффективность в низких

значениях Eb/No приводит к тому, что декодер SCL часто активируется после сбоя CRC в конце декодера SC. При увеличении Eb/No декодер SCL реже активируется, и пропускная способность адаптивного декодера улучшается [7]. Пропускная способность относительно Eb/No показана на рисунке 2.

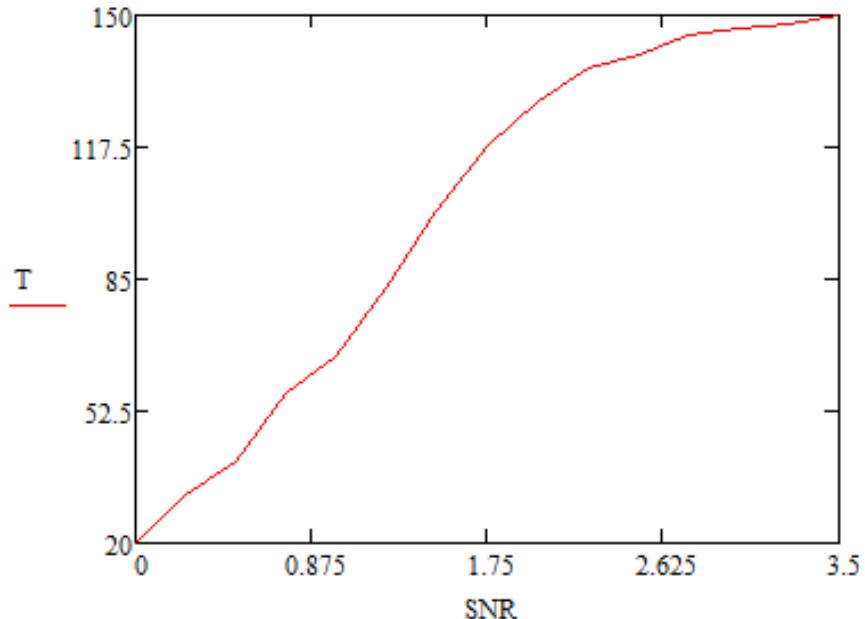


Рис. 2. Пропускная способность адаптивного декодера с параметрами N=256, K=128, L=8.

Анализ полученных статистических характеристик показывает, что вероятность ошибок на бит (BER) увеличивается с увеличением отношения сигнал/шум. Выигрыш составляет порядка 0,1 дБ. Потеря производительности из-за реализации FRBS показана на рисунке 3 для N = 256 и K = 128. Стоит отметить, что наблюдается незначительная потеря производительности при длине списка L = 32 и L = 16.

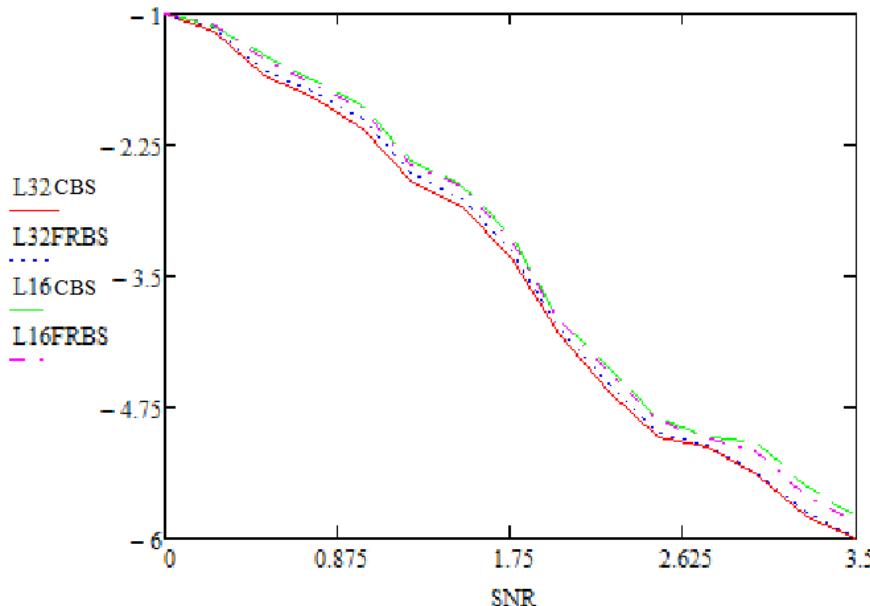


Рис. 3. Значения BER для адаптивного декодера с применением битовых сортировщиков при N=256 и K=128.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе была показана универсальная платформа для прототипирования натурных образцов различных видов декодеров. ПЛИС Xilinx Artix-7 FPGAS XC7A100T является одним из лучших решений по соотношению цены и качества. Невысокая стоимость, бесплатная годовая лицензия, простота языка и среды программирования Vivado, встроенные библиотеки с готовыми решениями позволяют использовать эту платформу как для реализации серьезных проектов, так и для организации учебных процессов.

Сравнительный анализ SC и SCL декодеров показал, что при возникновении группирующихся ошибок ни один из декодеров не позволяет корректно декодировать полученную информацию, что приводит к необходимости обязательного использования перемежения как средства борьбы с подобным классом ошибок. Эффект лавинообразного распространения ошибок существенно снижает целесообразность использования SC декодера при реализации систем связи. Однако в совокупности с CRC SC декодер становится достаточно конкурентоспособным. Этот факт был использован при организации трехмодульного адаптивного декодера, состоящего из двух больших блоков, один из которых состоит из двух подблоков. В подавляющем большинстве случаев декодирование выполняется средствами SC декодера с CRC. При сбое этого блока декодирование передается в модуль SCL декодера с размером списка не более $L=8$. Это ограничение необходимо для сокращения временных задержек для обработки кодовых комбинаций.

Предложенная концепция особенно важна при обработке данных в каналах управления высокоскоростных систем связь. Наименьшее количество ресурсов, безусловно, затрачивает CRC декодер, однако он работает в паре с SC декодером. Анализ 256 битовой комбинации показывает, что при изменении длины списка с дискретными значениями 2, 4, 8 количество затраченных ресурсов и памяти распределяется следующим образом: SC декодер ($60 \div 30$), SCL декодер ($40 \div 70$), CRC декодер (в районе 1%). Анализ 3 видов битовых сортировщиков (классического, быстрого и быстро восстановленного) показал, что при применении FRBS можно получить дополнительный выигрыш порядка 0,2 дБ, а также сокращение временных задержек на 31,6%, уменьшение вычислительной мощности на 17,6% и снижение использования памяти на 11,4%. Сравнение аналитической и имитационной моделей показало незначительное расхождение (порядка 9,6%), что является нормальным и доказывает корректность переноса разработанного кода в ПЛИС.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках договора 13658ГУ/2018 от 21.03.2019, заявка У-49943, конкурс УМНИК-18 (а), Ульяновская область – 2018.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gladkikh A. A., Chilikhin N. Y., Mishin D. V. Improving efficiency of fiber optic communication systems with the use of lexicographic decoding of polar codes // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2018. - C. 1077402.
2. Саркис Г., Гросс В. Дж. Увеличение пропускной способности полярных декодеров // IEEE Comm. Lett., апрель 2013, гл. 17. - С. 725.
3. Саркис Г., Джиард П., Варди А., Тибо К., Гросс В. Дж. Быстрые полярные декодеры: алгоритм и реализация // IEEE Journal on Select. Areas in Comm., май 2014, гл. 32. - С. 946.
4. Gladkikh A. A., Chilikhin N. Y., Mishin D. V., Ibragimov R. Z. Methods of coherent networks matching with codecs computational capabilities // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2019. - C. 1114605.
5. Ганин Д. В., Наместников С. М., Чилихин Н. Ю. Модифицированные алгоритмы лексикографического декодирования полярных кодов в системе обработки изображений // Вестник НГИЭИ, 2017, № 11 (78). - С. 7-22.
6. Карпухина Е. К. Методы защиты номера кластера в процедуре лексикографического декодирования блоковых кодов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. Сборник научных трудов, 2019. - С. 130-132.
7. Наместников С. М., Чилихин Н. Ю., Карпухина Е. К. Концептуальная модель принятия решения квазинтеллектуальным декодером при обработке информации в канале связи с неизвестными параметрами // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А. С. Попова. В 6-ти томах. 2019. - С. 177-182.

REFERENCES

1. Gladkikh A. A., Chilikhin N. Y., Mishin D. V. Improving efficiency of fiber optic communication systems with the use of lexicographic decoding of polar codes // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2018. - P. 1077402.
2. Sarkis G., Gross V. J. Increasing the bandwidth of polar decoders // IEEE Comm. Lett., April 2013, ch. 17. - P. 725.
3. Sarkis G., Giard P., Vardi A., Thibault K., Gross V. J. Fast polar decoders: algorithm and implementation // IEEE Journal on Select. Areas in Comm., May 2014, ch. 32. - P. 946.
4. Gladkikh A. A., Chilikhin N. Y., Mishin D. V., Ibragimov R. Z. Methods of coherent networks matching with codecs computational capabilities // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2019. - P. 1114605.
5. Ganin D. V., Namestnikov S. M., Chilikhin N. Y. Modified algorithms of lexicographic decoding of polar codes in the image processing system // Vestnik NGIEI, 2017, № 11 (78). - Pp. 7-22.
6. Karpukhina E. K. Methods of cluster number protection in the procedure of lexicographic decoding of block codes // Modern problems of design, production and operation of radio engineering systems. Collection of scientific papers, 2019. - Pp. 130-132.
7. Namestnikov S. M., Chilikhin N. Y., Karpukhina E. K. Conceptual model of decision-making by a quasi-intelligent decoder when processing information in a communication channel with unknown parameters // Radar, navigation, communication. Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference dedicated to the 160th anniversary of the birth of A. S. Popov. In 6 volumes. 2019. - Pp. 177-182.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Кравчук Д. А., Панченко А. А.

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Таганрог, Россия

Аннотация. Предложена дистанционная система контроля машиниста поезда по речевому сигналу, направленная на своевременное распознавание ухудшения здоровья и предотвращение связанных с этим чрезвычайных ситуаций. Проведена сравнительная характеристика имеющихся аналогов и предложенной системы, выделены ее преимущества.

Ключевые слова: состояние машиниста, распознавание ухудшения здоровья, дистанционная проверка по речевому сигналу.

A SYSTEM FOR MONITORING THE CONDITION OF LOCOMOTIVE CREWS TO ENSURE SAFE MOVEMENT ON THE RAILWAY

Kravchuk D. A., Panchenko A. A.

Southern Federal University, Taganrog, Russia

Abstract. A remote control system for the train driver by a voice signal is proposed, which is needed for timely recognition of health deterioration and prevention of emergency situations. A comparative characteristic of the existing analogues and the proposed system is carried out, its advantages are highlighted.

Keywords: driver's condition, recognition of deterioration of health, distant check on a speech signal.

1. ВВЕДЕНИЕ

Установлено, что около половины грубых нарушений во время движения были непосредственно связаны с недостаточной психологической профпригодностью работников локомотивных бригад, которые при прохождении профотбора не были допущены к поездной работе. Профотбор работников является важнейшим этапом, по которому идет решение проблемы безопасности движения на железнодорожном транспорте. Оценка специалистом профпригодности работника должна подтверждать не только текущее состояние машиниста или другого работника железной дороги, но и делать вывод о том, сможет ли адаптироваться человек к различным ситуациям в стрессовых условиях. Особенно важно вести наблюдение за изменением здоровья работника и его эмоциональным состоянием. Почему же так важно контролировать психофизиологическое состояние? Дело в том, что все-таки человеческий фактор главенствует над приборами в процессе управления аппаратурой, машиной, компьютером или транспортным средством. Неожиданное ухудшение здоровья человека, управляющего важными приборами, может быть чревато серьезными последствиями. Поэтому стоит важная задача не только вовремя распознать, но и предотвратить возможную опасность. Поэтому следует отметить, что успешность

работы машиниста-оператора во многом зависит от субъективного состоянием самого оператора, сочетания объективных и субъективных моментов его деятельности.

2. АКТУАЛЬНОСТЬ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МАШИНИСТА ПОЕЗДА

В современной России железнодорожный транспорт является ведущей отраслью в транспортной системе государства, играя огромную роль в развитии российской экономики и социальной сферы, связывает регионы и города нашей необъятной страны и ежегодно перевозит около 3 млрд. тон груза и 120 тыс. контейнеров. Уже 152 года важную роль играет железная дорога и в жизни города Таганрога. В городе расположены два вокзала (Старый и Новый вокзалы), откуда можно уехать в различных направлениях на пригородных поездах и поездах дальнего следования. Также через город проложены ветки для перевозки грузов к экономически важны местам: Таганрогскому порту, металлургическому заводу и другим предприятиям города. Протяженность железной дороги в России 87 тыс. км, что составляет 11–12% от общей протяжённости железных дорог мира. На обслуживание такой густой и развилистой сети железных дорог требуется около 1,2 млн. работников [1]. Именно поэтому в железнодорожном деле организаторы производства и исполнители различных работ ежедневно сталкиваются с нетрадиционными и неожиданными ситуациями: новые потоки информации, новые скорости, новые объемы несчастных случаев, новые представления о цене ошибок и т. д. Высокий уровень работы железнодорожного транспорта, его эффективность в экономической плане, целостность грузов и сохранность жизней людей - все это во многом определяется трудом представителей одной из самых массовых профессий на железной дороге - машинистов магистральных локомотивов. Профессиональная деятельность машиниста – это довольно непростая и многообразная деятельность, имеющая свои цели, выполнение которых обеспечивается использованием комплекса психофизиологических и психических феноменов, которым может располагать человек. Такой арсенал для отдельно взятого человека, конечно, имеет определенные особенности, проявляющиеся в различной степени выраженности, развития тех или иных психических свойств или особенностей высшей нервной деятельности.

В настоящее время все большую популярность набирают методы автоматического контроля психофизиологического состояния человека по речевому сигналу. Речь человека выполняет несколько основных функций, главными из которых являются коммуникативная, эмотивная и индикационная. Коммуникативная функция связана с передачей информации об окружающем мире, эмотивная отвечает за передачу информации о внутреннем состоянии говорящего, индикационная указывает на индивидуальность и социальный статус участников речевого акта. Взаимосвязь между акустическими характеристиками речи и психическими состояниями человека наиболее сильно отражается в эмотивной и индикационной функциях речи. Каждая из них может проявляться в двух формах – в осознаваемых изменениях речевых характеристик и в неосознаваемых [4]. Для анализа психофизиологического состояния

человека значительный интерес представляют неосознаваемые изменения речевых характеристик, которые дают достаточно большое количество информации об изменениях психологического состояния говорящего и которые довольно сложно подделать.

3. ПАРАМЕТРЫ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ГОВОРЯЩЕГО

В речевом сигнале содержатся признаки, которые не только характеризуют индивидуальные особенности говорящего, но и его психофизическое состояние. Отечественными авторами неоднократно проводились работы, посвящённые связи эмоционального состояния человека и его речи. В работах авторы выделяют четыре наиболее часто используемых эмоциональных состояний:

Радость. Это состояние характеризуется увеличение темпа речи, заметным повышением частоты основного тона и интенсивности речевого сигнала.

Гнев. Происходит увеличение темпа речи, повышение частоты основного тона, наблюдается повышение мощности высоких частот в спектре.

Горе или печаль. Заметное снижение темпа речи и частоты основного тона, заметное уменьшение интенсивности сигнала и мощности спектра в высоких частотах.

Страх. Характеризуется увеличением темпа речи, низкой интенсивностью сигнала, повышенной частотой основного тона и незначительной мощностью спектра в высоких частотах [5,6].

Для распознавания эмоций по голосовому сигналу нужно количественно охарактеризовать сигнал и выделить важные параметры, которые отвечают за эмоциональное состояние. К признакам, несущим информацию о психофизическом состоянии человека, можно отнести:

- громкость (интенсивность) речи;
- изменение частоты основного тона;
- изменение темпа речи;
- смещение энергетического спектра речи;
- временные характеристики (длительность слов и фраз, паузы между ними и др.).

Энергетическим характеристикам свойственна сравнительно низкая информативность. Чаще всего они используются в сочетании с другими показателями. Спектральные характеристики речи обладают сравнительно большей информативностью, их изменения меньше зависит от желания говорящего. Временные характеристики речевого сигнала используются для диагностики состояний, связанных с утомлением. Известно, что в этом состоянии у человека снижается активное функционирование некоторого ряда систем организма. Например, во время эмоционального напряжения, которое может возникать в ситуациях тревоги, страха или депрессии, приводит к примитивизации речи, проявляющейся в обеднении смысловой стороны высказывания. Для такой речи будет характерно наличие большого количества отдельных слогов, слов, сочетаний слов, что связано с затруднениями поиска следующего слова. Отмечается также увеличение количества слов-паразитов,

«заполнителей молчания» и долгих пауз. С другой стороны, состояние эмоционального возбуждения, приводит к обогащению речи, усилинию ее выразительности и эмоциональности за счет превосходных степеней [6,7].

4. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Устройство контроля психоэмоционального состояния человека не только должно не мешать работе человека, но и не приводить к изменениям в его деятельности, позволяя производить непрерывную и дистанционную проверку [10]. Такая биотехническая система должна удовлетворять условиям, что частотный диапазон измерений будет от 20 до 20 000 Гц, так как ЧОТ у мужчин составляет 85–200 Гц, у женщин – 160–340 Гц, а внешние шумы могут достигать 16–20 Гц. Динамический диапазон до 120 Дб, так как громкость крика человека достигает примерно 80 Дб, а громкий технический шум – 100 Дб. Данное устройство должно быть адаптируемым и автономностраиваемым, так как особенности голоса человека индивидуальны. Также для увеличения точности измерения следует учесть систему компенсации шумов.

Функциональная схема предлагаемого биотехнического устройства приведена на рисунке 1.

Система контроля эмоционального состояния человека содержит два акустоэлектрических преобразователя (микрофона) для преобразования акустических колебаний воздушной среды в электрические. Целесообразней будет использовать электродинамические микрофоны на основе явления электромагнитной индукции, так как их номинальный диапазон частот составляет 10–15 000 Гц [8]. Один микрофон будет использоваться для записи голоса говорящего, а другой для записи окружающего естественного и искусственного шума. Акустические сигналы передаются на предварительные усилители, которые служат больше не для усиления сигнала, а для непосредственной связи источника сигнала и основного усилителя. Поэтому они должны удовлетворять условию, при котором должно обеспечиваться наибольшее усиление входного сигнала при минимальном его искажении. Для этого у входного усилителя должно быть большое входное сопротивление.

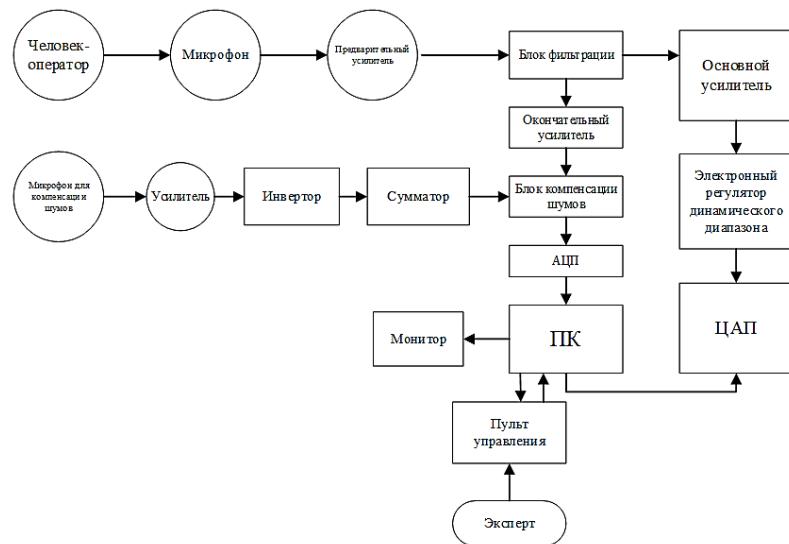


Рис. 1. Функциональная схема устройства

Инвертор и сумматор в части микрофона для компенсации шумов нужны для того, чтобы проинвертировать входной сигналы шума по фазе и сложить их [9]. Блок фильтрации служит для обеспечения полосы восприятия устройством акустического сигнала, что предотвращает ложные срабатывания сигнала и обрезание шумов. Усилитель звуковых частот служит для повышения мощности и напряжения, доведения полученных значений до величин, нужных для работы окончательного усилителя. Дальше сигнал с окончательного усилителя, который значительно усиливает акустический сигнал, так как затухание звука в воздухе очень велико, попадает на блок компенсации шумов, где выделяется часть сигнала, которая несет наибольшую информацию. Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) нужен для преобразования речевой сигнала в поток цифровых данных в цифровой код для дальнейшей обработки и хранения информации. Как звук естественным образом собирается в воздухе и приходит в ушную раковину и обрабатывается барабанными перепонками, так АЦП обрабатывает, объединенные в воздухе и пришедшие на микрофон акустические колебаниями. В данном устройстве следует использовать нелинейный АЦП. Такой АЦП улучшает достоверность передачи сигнала без изменения его качества в области малых амплитуд. А как известно, звуковой сигнал несет много информации в окрестности нуля по амплитуде. С АЦП сигнал информации попадает в персональный компьютер (ПК) и выводится на монитор. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) служит для преобразования абстрактных цифр в конкретный последовательный импульс. С ПК связан пульт управления, с помощью которого наблюдатель может регулировать, изучать и сохранять нужную информацию.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование для эмоционального контроля именно речевого сигнала не изменяет и не нарушает деятельность человека, позволяя осуществлять непрерывную и дистанционную проверку, что очень удобно. Конечно, исследование голосового сигнала возможно не только в режиме реального времени, но и по записи сигнала. По данным множества исследований, было выявлено, что понижение вероятности распознавания эмоций при инверсии записи речи составляет не больше 15%. Из этого можно сделать вывод о том, что особенности психоэмоционального состояния кодируются в речевом сигнале независимо от его семантического элемента. И если речевой сигнал несет в себе нужную информацию для определения состояния человека специалистом, то очень вероятно, что нахождение характеристик этого сигнала для диагностики будет возможным.

ЛИТЕРАТУРА

- Современное состояние железнодорожного транспорта в России // Современное состояние железнодорожного транспорта в России: Образовательный портал Transport-Exhibitions. <https://www.transport-exhibitions.com/Market>, 25.08.2021.
- РЖД тесты // РЖД тесты (SHL тесты, психологические тесты): Сайт TestOnjob.ru . <https://testonjob.ru/training-company/rzhd-test/>.
- Контроль над психофизиологическим состоянием машиниста: Евразия Вести III, 2006.

4. Картавенко, М.В. Об использовании акустических характеристик речи для диагностики психологических состояний человека // Об использовании акустических характеристик речи для диагностики психологических состояний человека: Известия ТРТУ, 2009.
5. Казимирова, Е.А. Речевой сигнал как отражение изменений функционального состояния при депрессивном и тревожно-депрессивном расстройствах // Дис. канд. биол. наук: 03.03.01. – Москва, 2016.
6. Тиньков, А.М. Метод и устройство для контроля психофизиологического состояния оператора по его речевому сигналу // Метод и устройство для контроля психофизиологического состояния оператора по его речевому сигналу: Вестник ОНУ им. И.И. Мечникова. Том 21 – Выпуск 2 (21), 2016.
7. Голубинский, А.Н. Выявление эмоционального состояния человека по речевому сигналу на основе вейвлет-анализа.
8. Илясов, Л.В. Биомедицинская измерительная техника // Биомедицинская измерительная техника: Учеб. пособие для вузов: Высш. шк., 2007. — 342 е.: ил.
9. Жаворонков, М.А. Электроника и электротехника // Электротехника и электроника: Учеб. Пособие для студ. высш. учеб. заведений: Издательский центр «Академия», 2005. – 400с.
10. Панченко А.А., Кравчук Д.А. Перспективные направления применения метода биолокации в работах современных авторов. В сборнике: Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2020. Материалы xxxiii всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2020. С. 18-20.

REFERENCES

1. The current state of railway transport in Russia // The current state of railway transport in Russia: Transport-Exhibitions educational portal. <https://www.transport-exhibitions.com/Market>, 25.08.2021.
2. Russian Railways tests / / Russian Railways tests (SHL tests, psychological tests): Website TestOnjob.ru. <https://testonjob.ru/training-company/rzhd-test/>.
3. Control over the psychophysiological state of the driver: Eurasia Vesti III, 2006.
4. Kartavenko, M. V. On the use of acoustic characteristics of speech for the diagnosis of psychological States of the person // the use of the acoustic characteristics of speech for the diagnosis of psychological States of a person: Izvestiya TSURE, 2009.
5. Kazimirov, E. A. Speech signal as a reflection of changes in the functional state with depression and anxiety and depressive disorders // Dis. Cand. biol. nauk: 03.03.01. - Moscow, 2016.
6. Tinkov, A.M. Method and device for monitoring the psychophysiological state of the operator by his speech signal // Method and device for monitoring the psychophysiological state of the operator by his speech signal: Bulletin of the I. I. Mechnikov ONU. Volume 21-Issue 2 (21), 2016.
7. Golubinsky, A. N. Identification of the emotional state of a person by a speech signal based on a wavelet analysis.
8. Ilyasov, L. V. Biomedical measuring technique // Biomedical measuring technique: Textbook for universities: Higher School, 2007. - 342 e.: il.
9. Zhavoronkov, M. A. Electronics and electrical engineering // Electrical engineering and electronics: Textbook. Manual for students. higher. studies. institutions: Publishing center "Academy", 2005. - 400s.
10. Panchenko A. A., Kravchuk D. A. Perspektivnye directions of application of the biolocation method in the works of modern authors. In the collection: Biotechnical, medical and environmental systems, measuring devices and robotic complexes-Biomedsystems-2020. Materials of the xxxiii All-Russian scientific and technical conference of students, young scientists and specialists. Ryazan, 2020. pp. 18-20.

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ К СОСТОЯНИЮ СРЕДЫ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТОВ НА ИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Н. С. Береснев, В. Н. Поветко, К. В. Пядухова, П. С. Сенин

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Россия

Аннотация. В работе на основе анализа состояния исследований в области технического зрения показано, что одним из ключевых вопросов является формирование инвариантных к состоянию среды признаков объектов. Проведено сравнение пяти используемых для этого фильтров. Выбран лучший из рассмотренных фильтров. Определены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: техническое зрение, инвариантные признаки, фильтры, сравнение эффективности, задачи дальнейших исследований.

TECHNIQUE OF FORMATION OF THE OBJECTS' ATTRIBUTES THAT ARE INVARIANT WITH RESPECT TO THE STATE OF ENVIRONMENT, USING THEIR IMAGES

N. S. Beresnev, V. N. Povetko, K. V. Pyadukhova, P. S. Senin

JSC "Concern "Sozvezdie", Voronezh, Russia

Abstract. Basing on the analysis of the state-of-the-art for the investigations in the field of technical vision it was shown that a one of the key issues is formation of the objects' attributes that are invariant to the state of environment. Five filters applied for solution of this problem were compared. The best one was chosen among the considered filters. The problems of the further investigations were determined.

Keywords: technical vision, invariant attributes, filters, comparison of efficiency, problems of the further investigations.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития технологий является разработка технологий искусственного интеллекта (ИИ). Среди технологий ИИ важное место занимает техническое зрение. Оно используется во многих приложениях. В том числе и при решении ряда задач радиотехники. Например, при решении задач радиоэлектронной разведки могут быть повышенны точность определения координат и оперативность распознавания источников радиоизлучений за счет использования изображений и идентификации объектов, использующих эти излучения.

Для решения задач технического зрения известно много технологий. Их можно разделить на два класса – с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) и без использования последних. Анализ доступных сведений показал, что ИНС (а именно сверточные ИНС) позволяют достаточно эффективно решать задачи технического зрения в относительно простых условиях – при отсутствии существенных искажений изображений возникающих, например, при использовании маскировки объектов или их наблюдении на реальной местности, когда объекты видны лишь частично. Кроме того, реальные изображения существенно зависят от состояния внешней среды (в частности,

от условий освещения). Все это приводит к существенному усложнению процесса обучения ИНС. Поэтому на практике чаще применяются альтернативные ИНС технологии. В частности, давно известно использование цифровых шаблонов объектов и их корреляции с реальными изображениями. При этом представляют интерес инвариантные к состоянию среды признаки объектов на их изображениях. Инвариантные к состоянию среды признаки изображений объектов представляют собой характерную структуру контуров, соответствующих границам объекта и элементов его поверхности. Она практически не зависит от условий естественного освещения. Это позволяет сократить размерность признаков объектов без существенной потери их информативности. Их применение позволяет сократить вычислительную сложность алгоритмов идентификации объектов.

Целью работы является сравнительная оценка фильтров, выделяющих контуры объектов на их изображениях.

2. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ КОНТУРОВ ОБЪЕКТОВ

Известно достаточно много технологий формирования инвариантных к состоянию среды признаков объектов на их изображениях [1]. Среди них использование следующих фильтров для обработки изображений:

- разностный амплитудный фильтр;
- максимальный разностный амплитудный фильтр;
- фильтр Робертса;
- фильтр Превитта;
- фильтр Собела.

Для этого использовано изображение мобильного наземного объекта, рисунок 1. Результаты фильтрации контуров, соответствующих границам объекта и элементов его поверхности, представлены на рисунках 2-6. Они свидетельствуют, что практически все фильтры с тем или иным качеством решают задачу выделения структуры контура объекта.



Рис. 1. Исходное изображение



Рис. 2. Результат работы амплитудного фильтра

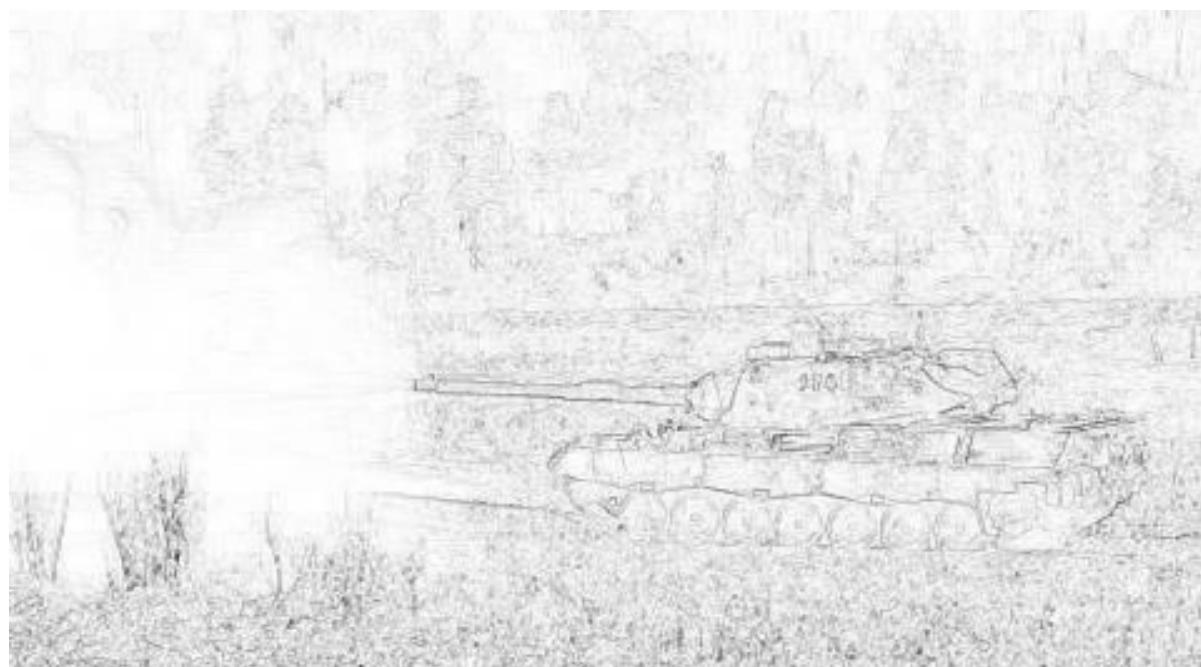


Рис. 3. Результат работы максимального амплитудного фильтра

Изображения, полученные после применения амплитудного и максимального амплитудного фильтра практически идентичны, а видимый контур искомого объекта практически сливаются с фоном.

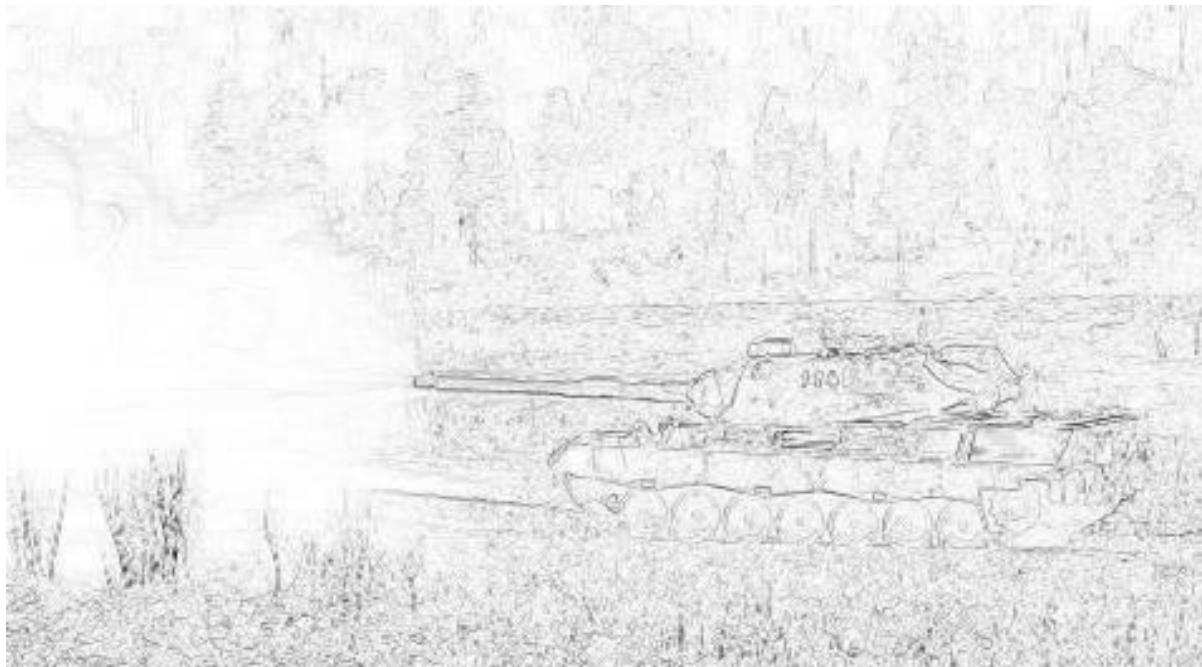


Рис. 4. Результат работы фильтра Робертса

На изображении, полученном после обработки фильтром Робертса, видимый контур искомого объекта практически совпадает с ранее рассмотренными фильтрами и существенных улучшений не наблюдается.

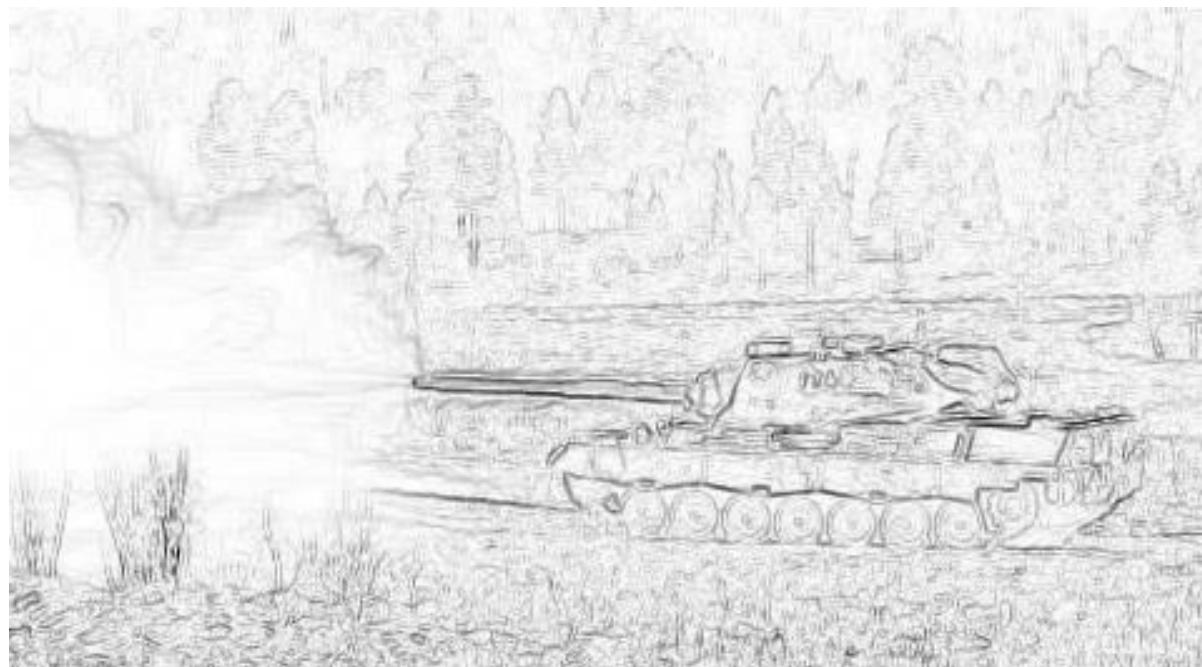


Рис. 5. Результат работы фильтра Превитта

На изображении, полученном после применения фильтра Превитта, можно заметить существенное отличие от ранее рассмотренных фильтров – фон более размыт, в результате чего контур искомого объекта сильнее выделяется.

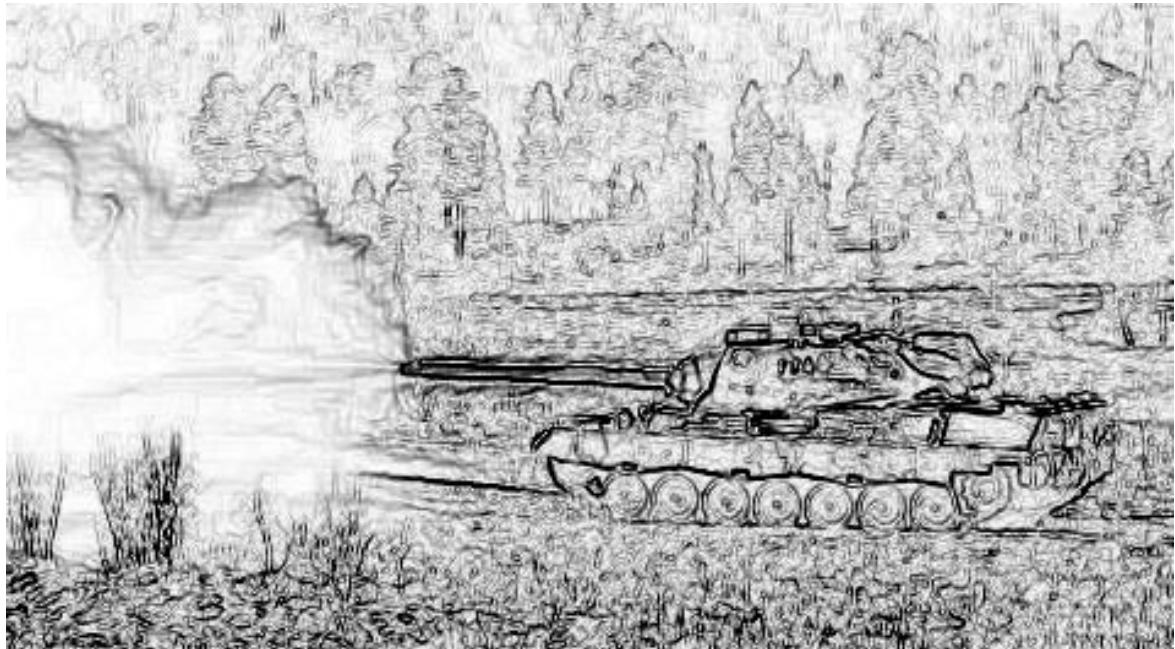


Рис. 6. Результат работы фильтра Собела

Изображение, полученное после обработки фильтром Собела, значительно отличаются от рассмотренных ранее: контур искомого объекта, а также контуры объектов на фоне толще окрашены в черный, а в области пламени после выстрела видно гораздо больше линий контуров. Это говорит о том, что фильтр Собела наиболее чувствительный среди рассмотренных.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ

Для выбора наиболее предпочтительного к использованию фильтра необходимо провести как сравнительный анализ скорости работы алгоритмов фильтрации, так и качество выделения контуров объектов. Вычислительные затраты у разных фильтров различны, см. рисунок 7.

Результаты эксперимента показали, что наиболее быстродействующим является фильтр Робертса (в 1.6-1.7 раза быстрее, чем фильтр Собеля).

Однако все фильтры на реальных изображениях выделяют не только структуру контуров объектов, но и неоднородности фона. Поэтому для практического использования в задачах технического зрения необходимо устранить контуры неоднородностей фона или локализовать только контуры объектов (проводить сегментацию изображения). Решение этой задачи в полном объеме выходят за рамки настоящего доклада и может быть предметом отдельных исследований. На данном этапе проверен один из методов решения задачи – пороговая фильтрация глобальным и локальным методами [1]. Результаты эксперимента представлены на рисунках 8-12. Слева на рисунках показана работа глобального метода фильтрации, справа – локального.

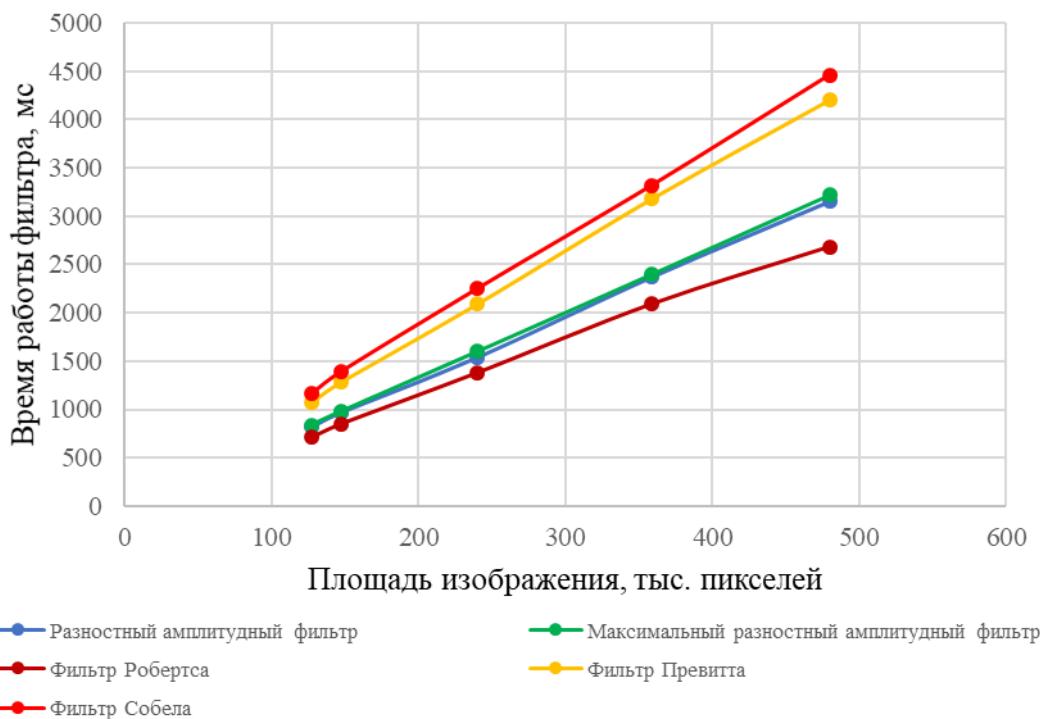


Рис. 7. Зависимость времени фильтрации от размеров изображения (процессор Intel Core I5-8265U с тактовой частотой 1.6 ГГц, оперативная память типа DDR4 с объемом 4 Гб и тактовой частотой 2400 МГц)



Рис. 8. Обработка результатов работы амплитудного фильтра

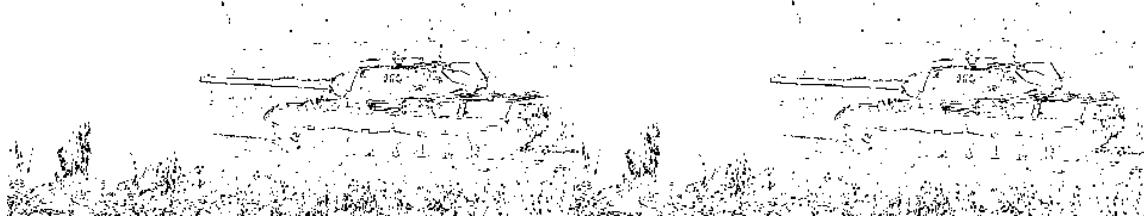


Рис. 9. Обработка результатов максимального амплитудного фильтра



Рис. 10. Обработка результатов фильтра Робертса



Рис. 11. Обработка результатов фильтра Превитта

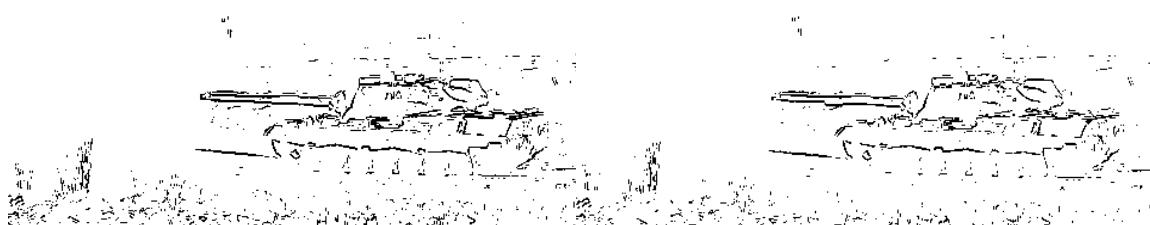


Рис. 12. Обработка результатов фильтра Собеля

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известные технологии формирования инвариантных к состоянию среды признаков объектов на их изображениях позволяют решить эту задачу. Однако качество ее решения зависит от многих факторов.

Одним из таких факторов является необходимость устранения контуров неоднородностей фона или локализации только контуров объектов. Решение этой задачи может быть задачей дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ю. Тропченко, А.А. Тропченко. Методы вторичной обработки и распознавания изображений – Санкт-Петербург, Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО, 2015. – 216 с.

REFERENCES

1. A.Yu. Tropchenko, A.A. Tropchenko. Methods of secondary processing and images recognition – St.Petersburg, Publishing department of ITMO University, 2015. – 215 p.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАГОРИЗОНТНОГО КАНАЛА СВЧ ДИАПАЗОНА

О.К. Каменцев¹, А.В. Киселев¹, Е.И. Рубцов¹

¹АО «Концерн «Созвездие», Воронеж.

Аннотация. Рассмотрена методика определения основных статистических характеристик частотно-селективных каналов с замираниями в условиях малой энергетики радиолинии. Проведено исследование статистических свойств загоризонтных каналов связи на основе экспериментальных измерений. Представлены результаты обработки зондирующих OFDM-символов для различных трасс и погодно-временных условий функционирования тестовой системы.

Ключевые слова: загоризонтный канал связи, импульсная характеристика, доплеровский спектр, интервал частотной когерентности, интервал временной когерентности

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF STATISTICAL PROPERTIES OF OVER-THE-HORIZON MICROWAVE COMMUNICATION CHANNEL

O.K. Kamentsev¹, A.V. Kiselev¹, E.I. Rubtsov¹

¹JSC «Concern «Sozvezdie»

Abstract. A technique for determining the main statistical properties of frequency-selective channels with fading in conditions of low energy of a radio link is considered. The study of the statistical properties of over-the-horizon communication channels was carried out based on experimental measurements. The results of processing the probing OFDM symbols for various communication lines and weather-time conditions of the test system functioning are presented.

Keywords: over-the-horizon communication channel, impulse response, Doppler spectrum, frequency coherence interval, time coherence interval.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, системы релейной СВЧ связи эффективно функционируют при условии прямого распространения электромагнитной волны. Дальность пролёта при этом достигает порядка 40-50 км. На более длинных расстояниях характер распространения волны начинает меняться – волна испытывает дифракцию на поверхности Земли и рассеяние от атмосферных неоднородностей. Современные методы цифровой обработки сигналов позволяют расширить возможности существующих систем релейной связи по дальности за счёт использования этих механизмов распространения волны для установления загоризонтной радиосвязи [1]. Однако для разработки таких систем необходимо знать характер как медленных, так и частотно-селективных замираний сигнала в таких каналах. И если для тропосферных каналов связи, работающих на расстояниях более 120 км, такие исследования проводились [2, 3], то для загоризонтных каналов с дальностью связи 60-100 км результаты подобных комплексных исследований в литературе не представлены. В

работах [4, 5] для подобных трасс приведены результаты только для медленных замираний.

Поэтому в данной работе приведены результаты оценки всех основных статистических характеристик и параметров различных загоризонтных каналов связи на основе экспериментального зондирования тестовыми сигналами.

2. ОСНОВНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ КАНАЛОВ С ЗАМИРАНИЯМИ

Рассмотрим влияние канала на переданный сигнал, общем виде представленный как:

$$s(t) = \operatorname{Re} \left[s_l(t) e^{j2\pi f_c t} \right]$$

Принимаемый сигнал после воздействия многолучевого канала связи в общем виде можно представить в виде:

$$x(t) = \sum_n \alpha_n(t) s(t - \tau_n(t)),$$

где $\alpha_n(t)$ – множитель ослабления сигнала по n-ному пути и $\tau_n(t)$ – задержка распространения для n-го пути.

Таким образом можно получить низкочастотный эквивалент импульсной характеристики [6]:

$$c(\tau, t) = \sum_n \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \delta(t - \tau_n(t))$$

Если рассматривать канал как континуум многопутевых компонент, то НЧ эквивалент импульсной характеристики имеет вид:

$$c(\tau, t) = \alpha_n(\tau, t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)}$$

В предположении о стационарности в широком смысле процесса $c(t, \tau)$ по переменной t автокорреляционная функция определяется следующим выражением:

$$\phi_c(\tau_1, \tau_2, \Delta t) = \frac{1}{2} \left\langle c^*(\tau_1, t) c(\tau_2, t + \Delta t) \right\rangle$$

В предположении о некоррелированном рассеянии и допущении о дискретности многопутевых компонент

$$\phi_c(\tau_1, \tau_2, \Delta t) = \phi_c(\tau_1, \Delta t) \delta(\tau_1 - \tau_2)$$

В таком случае $\phi_c(\tau | \Delta t = 0)$ – интенсивность многопутевого профиля или спектр мощности задержек канала. В общем случае $\phi_c(\tau, \Delta t)$ определяет среднюю мощность выхода канала от задержки τ и разницы моментов времени Δt . Область же значений, в которой $\phi_c(\tau) > 0$, называется многопутевым рассеянием канала T_m .

Полную характеристику многопутевого рассеяния можно определить и в частотной области (взяв преобразование Фурье от $c(\tau)$) и, соответственно, найти автокорреляционную функцию $\phi_c(f_1, f_2, \Delta t)$. Легко получить [6], что $\phi_c(\Delta f, \Delta t)$ и $\phi_c(\tau, \Delta t)$ связаны между собой преобразованием Фурье. Из предположения о некоррелированности рассеяния по отдельным путям следует, что АКФ зависит только

от разности частот, следовательно $\phi_c(\Delta f, \Delta t)$ является совместной корреляционной функцией канала в частотной и временной области.

Как следствие того, что $\phi_c(\Delta f)$ является Фурье-образом $\phi_c(\tau)$, обратная величина многопутевого рассеяния является мерой частотной когерентности канала [7]:

$$\begin{aligned} (\Delta f)_c &\approx \frac{1}{5\sigma_\tau}, \quad \sigma_\tau^2 = \langle \bar{\tau}^2 \rangle - \langle \bar{\tau} \rangle^2 \\ \langle \bar{\tau}^2 \rangle &= \frac{\int \tau^2 \phi(\tau, \Delta t = 0) d\tau}{\int \phi(\tau, \Delta t = 0) d\tau}. \end{aligned} \quad (1)$$

Изменения во времени характеристик канала свидетельствуют о наличии доплеровского рассеяния. Для выявления эффекта Доплера необходимо провести преобразование Фурье от совместной корреляционной функции канала в частотной и временной области по переменной задержек

$$S_c(v, \Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_c(\Delta f, \Delta t) e^{-j2\pi v \Delta t} d\Delta t. \quad (2)$$

При $\Delta f = 0$ функция $S_c(f)$ определяет Доплеровский спектр мощности канала.

$$S_c(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_c(\Delta t) e^{-j2\pi f \Delta t} d\Delta t$$

При неизменном во времени канале $\phi_c(\Delta t) = K$ доплеровский спектр представляет из себя дельта-функцию. Область значений, в которой $S_c(f)$ существенно отлична от нуля, является Доплеровским рассеянием в канале F_d . Из того факта, что что $S_c(f)$ является Фурье-образом $\phi_c(\Delta t)$, следует что величина, обратная к F_d является мерой временной когерентности канала [7]:

$$(\Delta t)_c \approx \frac{0.423}{F_d}.$$

3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА НА ОСНОВЕ ЗОНДИРУЮЩЕГО OFDM-СИГНАЛА

В классическом случае для определения $\phi_c(\Delta f, \Delta t)$ используют передачу двух синусоид с частотным разносом Δf и измерение взаимной корреляции принимаемых сигналов на задержке Δt . В разработанной методике в качестве зондирующего сигнала используются OFDM-символы.

В предположении об эргодичности процесса распространения сигнала оценка совместной корреляционной функции канала в частотной и временной области рассчитывалась следующим образом:

$$\hat{\phi}_c(\tau, \Delta t) = \frac{1}{N} \sum_n^N \left\langle \hat{c}_n^* \hat{c}_{n+1} \right\rangle,$$

где оператор $\langle \dots \rangle$ обозначает расчет взаимно-корреляционной функции (ВКФ), а \hat{c}_n – оценка импульсной характеристики канала, полученная на n -ном символе зондирующего сигнала.

Для оценки импульсной характеристики (ИХ) канала предложен алгоритм, заключающийся в вычислении ВКФ принятого OFDM-символа и эталонного с последующим «шумоподавлением» за счет применения банка вейвлет-фильтров.

Рассмотрим механизм компенсации шумовой компоненты оценки ИХ канала с использованием вейвлет-фильтрации.

Быстрое вейвлет-преобразование (БВП) определяется как [8]

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{m',k} \varphi_{m',k}(t) + \sum_{m=m'}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{m,k} \psi_{m,k}(t) \\ c_{m',k} &= \int_0^T s(t) \varphi_{m',k}(t) dt, \quad d_{m',k} = \int_0^T s(t) \psi_{m,k}(t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varphi_{m',k}(t)$ – масштабирующие функции, $\psi_{m,k}(t)$ – вейвлет-функции, $c_{m,k}$ – коэффициенты аппроксимации, $d_{m,k}$ – коэффициенты детализации. В общем случае, коэффициенты $c_{m,k}$ и $d_{m,k}$ можно вычислять непосредственно по формулам (3).

Обратное быстрое вейвлет-преобразование представляет собой последовательную сборку сигнала от больших m к малым:

$$c_{m-1} = \sum_{n \in I} c_{m,n} g_{k-2n} + \sum_{n \in I} d_{m,n} h_{k-2n}$$

Если подвергнуть сигнал последовательному частотному разделению, используя как низкочастотные (аппроксимирующие) g , так и высокочастотные (детализирующие) h коэффициенты, то возникает дерево расщепления. Для используемого метода шумоподавления предполагается, что высокочастотные компоненты импульсной характеристики канала соответствуют шумовым компонентам [9]. Исходя из этого предположения, производится декомпозиция сигнала с его последующей реконструкцией с измененными высокочастотными компонентами. В частности, при двукратном вейвлет-разложении на этапе реконструкции высокочастотные компоненты второго и первого уровней разрешения обнуляются, что приводит к уменьшению шумовых компонент характеристики канала.

Уровень ошибок вычисления коэффициентов разложения достаточно мал по сравнению с коэффициентами разложения точной функции, что позволяет «распознать» две ситуации: «шумовой коэффициент» или «информационный коэффициент». Таким образом, необходимо обратить в ноль шумовые коэффициенты разложения, которые обусловлены только шумом измерения, сохранив при этом коэффициенты разложения точной функции. В определенной степени этому требованию удовлетворяют пороговые алгоритмы оценивания коэффициентов разложения, которые в зарубежной литературе получили название *thresholding*.

После оценки совместной корреляционной функции канала в частотной и временной области путем усреднения большого числа точечных оценок ИХ в предположении об эргодичности процесса можно получить интенсивность многопутевого профиля и, соответственно, полосу частотной когерентности.

Также, используя полученную оценки совместной корреляционной функции канала в частотной и временной области, можно рассчитать Доплеровское рассеяние,

Доплеровский спектр и интервал временной когерентности. При этом предполагалось, что полученный Доплеровский спектр будет аппроксимироваться либо распределением Джейкса (15), либо распределением Гаусса (16)

$$S(f) = \frac{1}{\pi f_d \sqrt{1 - (f/f_d)^2}}, |f| \leq f_d \quad (4)$$

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_G^2}} \exp\left(-\frac{f^2}{2\sigma_G^2}\right). \quad (5)$$

Также, используя набор оценок ИХ канала в виде дискретного набора случайных величин амплитуд задержанных лучей, предполагалось оценивать их распределение с помощью либо релеевского, либо райсовского приближений.

Общий вид релеевского распределения и его математическое ожидание и дисперсия:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, m = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma, D = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma^2. \quad (6)$$

Общий вид райсовского распределения и его математическое ожидание и дисперсия:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+v^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right), m = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma L_{\frac{1}{2}}\left(-\frac{v^2}{2\sigma^2}\right), D = 2\sigma^2 + v^2 - \frac{\pi\sigma^2}{2} L_{\frac{1}{2}}\left(-\frac{v^2}{2\sigma^2}\right)^2 \quad (7)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя, L – полиномы Лаггера.

$$L_{\frac{1}{2}}(x) = e^{\frac{x}{2}} \left[(1-x)I_0\left(-\frac{x}{2}\right) - xI_1\left(-\frac{x}{2}\right) \right].$$

Разработанная методика предполагает расчет оценок математического ожидания и дисперсии амплитуд задержанных лучей и численного нахождения параметров σ и v из формул (6), (7) для математического ожидания и дисперсии и использование их в качестве начальных значений в прямом моделировании Монте-Карло для аппроксимации полученных результатов каким-либо видом распределения.

4. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ЗОНДИРОВАНИЮ ЗАГОРИЗОНТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Для исследования свойств загоризонтного канала связи и оценки его основных статистических характеристик были проведены натурные эксперименты. Измерения проводились на трех различных трассах в период с ноября по декабрь – наихудших месяцах по условиям распространения радиоволн. Две машины с оборудованием радиорелейной связи Р-430 были расположены на расстояниях 73.96, 74.13 и 93.04 км в Воронежской области вдоль автодороги Воронеж – Луганск. Для зондирования была выбрана несущая частота 5,615 ГГц. Ширина луча антенны была порядка 3 градусов. На рис. 1 показана блок-схема проведения трассовых испытаний.

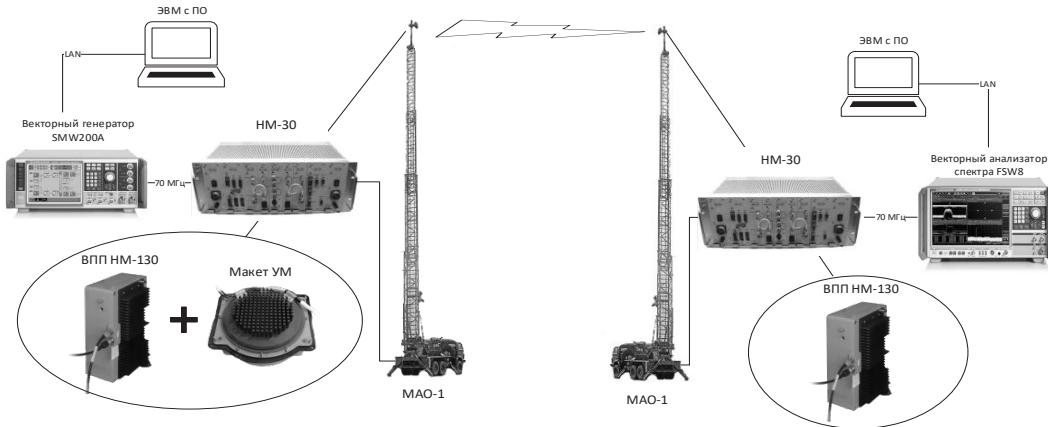


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

С учетом использования оборудования Р-430, макета усилителя мощности энергетический бюджет линии связи составил 199,4 дБ. Расчетные медианные потери в соответствии с рекомендацией [1] приведены в таблице 1. Реальные медианные затухания на трассах составляли 197, 206 и 212 дБ соответственно. Из полученных результатов видно, что, первое, расчётные потери достаточно хорошо согласуются с реально измеренными, второе, из-за малого бюджета линии связи обработка результатов проводилась при низком отношении сигнал/шум.

Профили трасс с построенными зонами Френеля (первой, четвертой, восьмой и десятой) с учетом кривизны Земли показаны на рис. 2. Как видно из рисунков все исследуемые трассы являются закрытыми, только на первой открытой остается порядка 5% двенадцатой зоны Френеля.

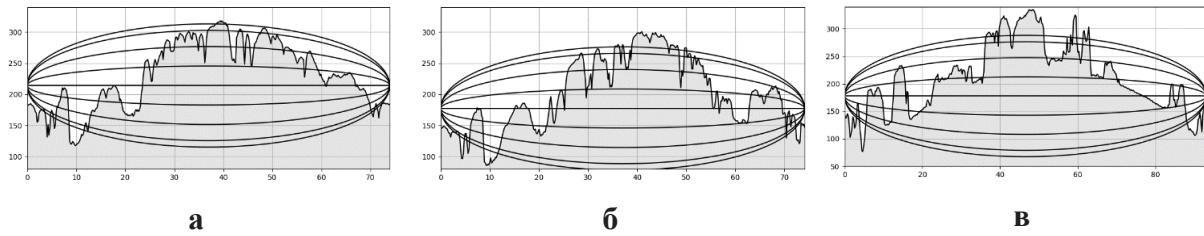


Рис.2. Профили трасс протяженностью а) 73.96 км, б) 74.13 км, в) 94.04 км.

В качестве зондирующих были выбраны OFDM-символы с полосой 28 МГц, частотой дискретизации 56 МГц и длительностью 73,1 мкс. Выбор зондирующих сигналов с большой базой был обусловлен наличием малой энергетики у зондирующей системы. Так среднеквадратическое отношение сигнал/шум на исследуемых трассах составило 2.4 дБ, -6.6 дБ и -12.6 дБ соответственно.

5. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГОРИЗОНТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

С использованием предложенной методики расчета характеристик были получены модули импульсных характеристик каналов от задержки, показанные на рис. 3. Из рисунков видно, что во всех случаях наблюдается наличие нескольких лучей в канале,

при этом имеется симметрия характеристики относительно самого мощного луча. Из этого можно сделать вывод, что имело место рассеяние в каком-то атмосферном объеме, состоящем из нескольких слоев. Поэтому распространение электромагнитных волн на таких трассах можно частично описать тропосферным рассеянием.

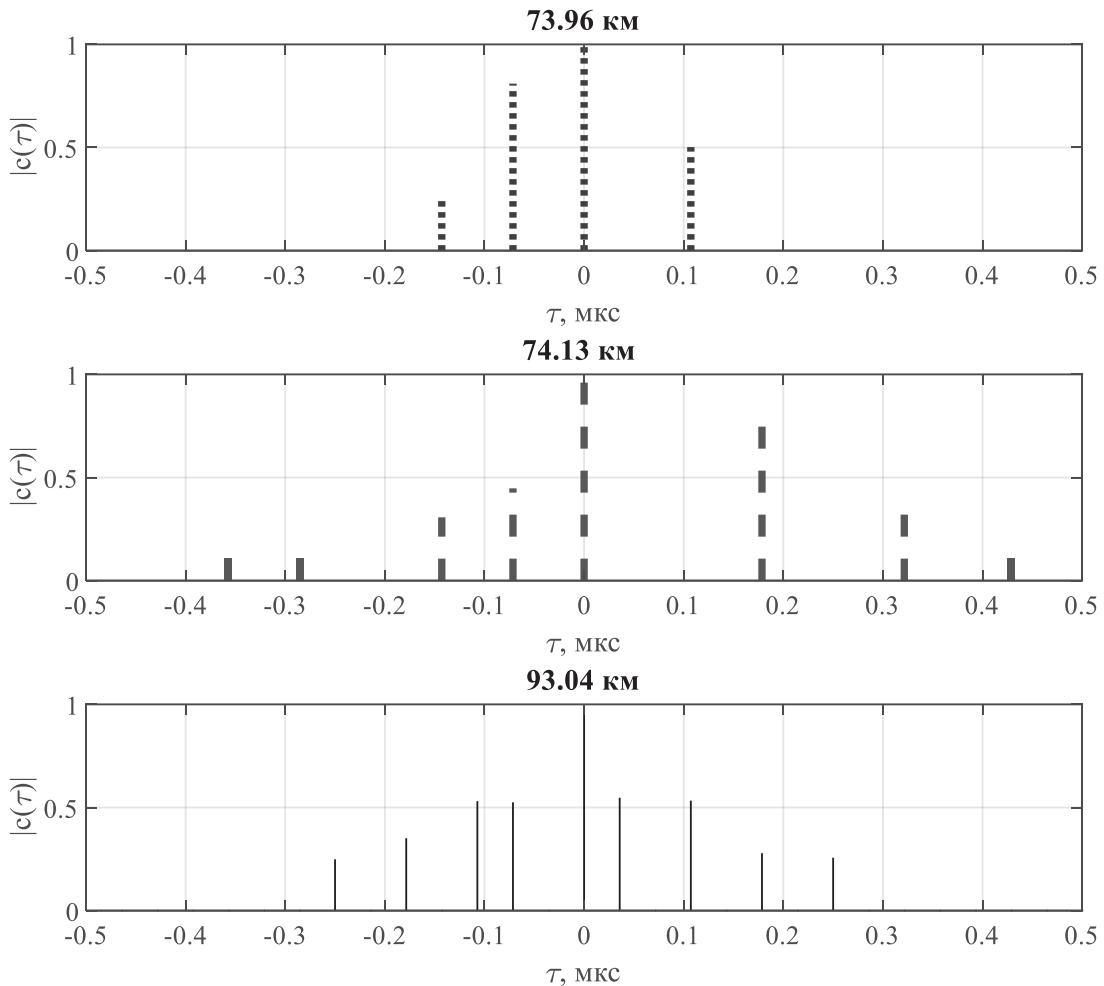


Рис. 3. Модули импульсных характеристик каналов от задержки τ .

Также, используя данные характеристики и соотношения (7), были рассчитаны интервалы частотной когерентности для исследуемых каналов, значения которых представлены в таблице 1.

Далее согласно (2) был получен набор Доплеровских спектров для каждого значения задержки. Оказалось, что доплеровский спектр для каждой из задержек имеет одинаковый характер. На рис.4 приведены усредненные по всем задержкам доплеровские спектры для каждой из исследуемых трасс. Видно, что для более коротких трасс доплеровский спектр подчиняется распределению Джейкса, а для трассы длиной 90 км – Гаусса. Полученные при этом значения доплеровского рассеяния и интервала временной когерентности приведены в таблице 1.

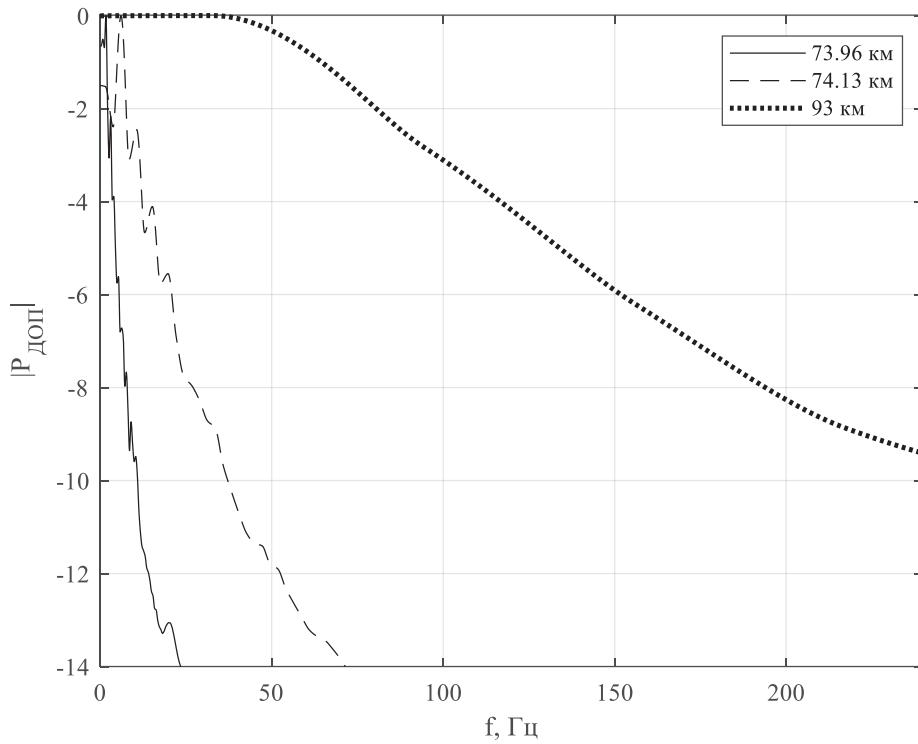


Рис. 4. Доплеровские спектры мощности каналов

И, наконец, из полученного набора оценок IX канала в виде дискретного набора случайных величин амплитуд задержанных лучей, были построены гистограммы распределений амплитуд для каждого луча. Проведённая аппроксимация полученных распределений с помощью соотношений (6) или (7) показала, что все лучи, кроме основного на первой трассе, хорошо аппроксимируются рэлеевским распределением. Значение же амплитуды основного луча на трассе 73.96 км можно интерпретировать как случайную величину, имеющую райсовское распределение (рис.5).

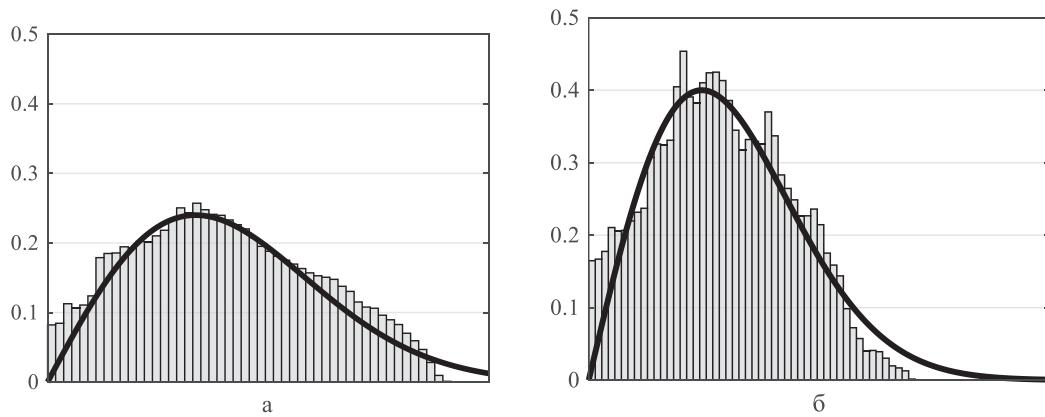
Рис.5 Гистограммы распределения амплитуд лучей и их аппроксимация а) – основной луч (трасса 73.96 км) – райсовское распределение $\sigma = 0.48$, $v = 0.39$, б) – основной луч (трасса 74.13 км) – рэлеевское распределение $\sigma = 0.49$

Таблица 1. Измеренные характеристики каналов

| | | | |
|---|---|---|--------|
| Параметр / Трасса, км | 73.96 | 74.13 | 93.04 |
| Расчетные потери, дБ | 197.43 | 206.76 | 203.18 |
| Измеренные потери, дБ | 197 | 206 | 212 |
| Многопутевое рассеяние, мкс | 0.25 | 0.786 | 0.5 |
| Интервал частотной когерентности, МГц | 3.3 | 1.4 | 2 |
| Доплеровское рассеяние, Гц | 1.92 | 8.78 | 91.4 |
| Интервал временной когерентности, мс | 520 | 115 | 11 |
| Тип распределения доплеровского спектра | Джейкса | Джейкса | Гаусса |
| Тип распределения амплитуд лучей | Основной луч – райсовское, остальные – рэлеевское | Все лучи имеют рэлеевское распределение | |

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика оценки статистических параметров загоризонтного канала связи на расстояниях 70-90 км при малой энергетике системы. Проведены экспериментальные измерения с целью исследования статистических свойств загоризонтного канала связи на различных трассах и в разные временные интервалы. На основе обработки полученных результатов для исследуемой системы установлено следующее. Во-первых, импульсная характеристика загоризонтного канала связи имеет дискретный характер с многопутевым рассеянием до 1 мкс. Соответственно интервал частотной когерентности будет составлять до 3.3 МГц. Во-вторых, интервал временной когерентности на исследуемых трассах составляет от 11 до 520 мс, что соответствует доплеровскому рассеянию от 1.92 Гц до 91.4 Гц.

На основе проведённых исследований можно заключить, что основным механизмом распространения электромагнитной волны в исследуемы загоризонтных канала является тропосферное рассеяния. Этот вывод основан на наличии большого количества задержанных лучей в канале и симметричном их распределении относительно максимального луча.

Полученные результаты могут быть использованы для создания моделей (имитаторов) загоризонтных каналов связи, которые являются основным инструментом разработчиков радиомодемов с цифровой обработкой сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендация МСЭ-Р Р.617-5 Методы прогнозирования и данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования тропосферных радиорелейных систем. – ITU, 2020.
2. Гусятинский И.А. Дальняя тропосферная радиосвязь / И.А. Гусятинский, А.С. Немировский. – Москва: Связь, 1968. – 246 с.
3. Давыденко Ю.И. Дальняя тропосферная связь / Ю.И. Давыденко. – Москва: Военное издательство, 1968. – 212 с.

4. Lewandowski A. The long-range radio relay system utilizing the phenomenon of troposphere scattering / A. Lewandowski // 2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON). – 2014. – P. 1-5.
5. The Study of Experiment on Tropospheric Scatter Propagation at C-band / Q. Zhao [et al.] // 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – 2018. – P. 1-3.
6. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; ред. Д.Д. Кловский; пер. Д.Д. Кловский, Б.И. Николаев. – Москва: Радио и связь, 2000. – 800 с.
7. Costa N. Multiple-input multiple-output channel models : theory and practice / N. Costa, S. Haykin. – John Wiley & Sons, Inc., 1975. – 229 p.
8. Mallat S. A wavelet tour of signal processing: the sparse way / S. Mallat. – Academic Press, 2009. – 824 p.
9. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.

REFERENCES

1. Recommendation ITU-R P.617-5 Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems. – ITU, 2020.
2. Gusyatinsky I.A. Long-range tropospheric radio communication / I.A. Gusyatinsky, A.S. Nemirovsky. - Moscow: Communication, 1968 .– 246 p.
3. Davydenko Yu.I. Distant tropospheric communication / Yu.I. Davydenko. - Moscow: Military publishing house, 1968 .– 212 p.
4. Lewandowski A. The long-range radio relay system utilizing the phenomenon of troposphere scattering / A. Lewandowski // 2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON). – 2014. – P. 1-5.
5. The Study of Experiment on Tropospheric Scatter Propagation at C-band / Q. Zhao [et al.] // 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – 2018. – P. 1-3.
6. Prokis J. Digital communication / J. Prokis; ed. D.D. Klovsky; per. D.D. Klovsky, B.I. Nikolaev. - Moscow: Radio and communication, 2000 .-- 800 p.Costa N. Multiple-input multiple-output channel models : theory and practice / N. Costa, S. Haykin. – John Wiley & Sons, Inc., 1975. – 229 p.
7. Mallat S. A wavelet tour of signal processing: the sparse way / S. Mallat. – Academic Press, 2009. – 824 p.
8. Daubechies I. Ten lectures on wavelets / I. Daubechies. - Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001.– 464 p.

ВЫДЕЛЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ НА СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В. Ю. Волков^{1,2,3}

¹АО "НПП "Радар ммс"

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ);

³Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрена проблема обнаружения и локализации компактных объектов, представляющих интерес, на спекл-радиолокационных изображениях. Анализируется феноменологическая модель спеклов, исследуется взаимосвязь между параметрами модели и дескрипторами корреляционных свойств спеклов. Предложен алгоритм моделирования интересующих объектов с использованием спекл-структур. Изучен алгоритм обнаружения и выделения объектов с использованием адаптивной многопороговой обработки модельных и реальных спекл-радиолокационных изображений.

Ключевые слова: спекл; корреляция; многопороговая обработка; адаптивный порог.

EXTRACTION OF RADAR OBJECTS ON SPECKLE IMAGES

V. Yu. Volkov^{1,2,3}

¹ JSC "NPP" Radar mms "

²Saint-Petersburg State Electrotechnical University (LETI);

³Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI),
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The problem of detection and localization of compact objects of interest on speckle radar images is considered. The phenomenological model of speckles is analyzed, the relationship between the model parameters and the descriptors of the correlation properties of speckles is investigated. An algorithm for modeling objects of interest using speckle structures is proposed. An algorithm for detecting and selecting objects using adaptive multi-threshold processing of model and real speckle radar images is studied.

Keywords: speckle; correlation; multi-threshold processing; adaptive threshold.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изображения, полученные с помощью радара с САР (радар с синтезированной апертурой), могут обеспечить достаточно высокое разрешение объектов (менее одного метра) при наблюдении объектов на поверхности земли или моря с самолета или спутника. Преимуществом таких систем является всепогодность, работоспособность в любое время суток, а также возможность получения изображений под разными углами наклона. Особенностью изображений САР является специфический зернистый (пятнистый) спекл-шум, природа которого связана с интерференцией когерентных радиоволн, приходящих с небольшой разницей в пути с разных участков поверхности. Рисунок пятен характерен как для фона (фона), так и для полезных объектов (переднего плана). Эти поля коррелированы и негауссовы по своей природе [1-7]. Проблема

является общей для большинства когерентных систем: радаров, лазерных и ультразвуковых локаторов.

Наличие спекл - шума значительно усложняет решение задач обнаружения, сегментации, анализа текстур, распознавания и классификации объектов, представляющих интерес, и снижает точность их локализации на изображениях. Пороговая обработка спекл-изображений показывает эффект фрагментации объектов, которые распадаются на множество отдельных частей.

Проблема подавления спекл-шума интенсивно изучается, и ряд предложений по ее снижению связан с фильтрацией в частотной или пространственной областях [1-7]. Существует множество работ по анализу характеристик спекл-структур, моделированию соответствующих полей и решению задач подавления шума и выбора интересующих объектов (например, обзоры в [1-5]). Однако большинство методов фильтрации приводят к разрушению тонкой структуры границ объектов на спекл-изображении, что, как правило, нежелательно. На сегодняшний день не существует устоявшейся методологии анализа и синтеза алгоритмов обработки спекл-изображений, а также практически отсутствует анализ эффективности обнаружения и выделения объектов интереса, их локализации и распознавания на спекл-структурах.

Одна из проблем связана с моделированием фона и объектов на спекл-изображениях. Наиболее адекватными являются феноменологические модели, использующие теорию дифракции Фраунгофера на шероховатой поверхности [8,9]. Однако такие модели содержат параметры (ширина луча, отношение длины обратного пути луча к частоте), которые слабо связаны с корреляционными свойствами полученных спекл-паттернов. В этой ситуации полезны новые дескрипторы [10,11], которые позволяют связать параметры модели со свойствами краткосрочных и долгосрочных вариаций спекла. Кроме того, для таких изображений нет хорошо подтвержденных спекл-моделей для протяженных и компактных объектов, представляющих интерес. В связи с нежелательностью использования различных форм сглаживания на спекл-структурах особый интерес представляет адаптивная многопороговая обработка с последующим выбором интересующих объектов и возможным комбинированием результатов, полученных на каждом двоичном срезе [12].

В данной статье анализируется один из методов моделирования спекл-структур и исследуется взаимосвязь между феноменологическими параметрами модели и дескрипторами корреляционных свойств спекл-изображений. Предложен алгоритм моделирования объектов интереса в виде спекл-структуры. Рассмотрены обнаружение и селекция объектов с использованием многопороговой обработки на модельных и реальных изображениях.

2. ДЕСКРИПТОРЫ КОРРЕЛЯЦИЙ НА СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Изучение корреляционных функций спекл-полей не выявило каких-либо существенных особенностей, отражающих пространственную структуру и зернистость изображений. Попытки использовать теорию фрактальных процессов для описания спекл-структур также не оказались конструктивными. Эта теория предполагает

использование фрактальной размерности D и показателя Херста H для характеристики корреляционных свойств наблюдаемых изображений. Однако существуют трудности в оценке этих параметров на реальных изображениях, которые обычно оказываются мультифрактальными. В результате полученные оценки часто выходят за пределы, допускающие их физическую интерпретацию. Простые и конструктивные дескрипторы вариации данных, предложенные в [11], обсуждаются в [10]:

$$SD1 = \{(1/2)\text{Var}(X_n - X_{n+1})\}^{1/2},$$

$$SD2 = \{2\text{Var}(X) - SD1^2\}^{1/2}.$$

Первое выражение известно как стандартное отклонение последовательных различий в статистике [11]. Таким образом, дескриптор $SD1$ отражает краткосрочные изменения в данных. Выражение для $SD2$ представляет разницу между общим изменением данных $\text{Var}(X)$, и изменениями, связанными с краткосрочными различиями $SD1$. Таким образом, дескриптор $SD2$ эффективно представляет долгосрочные изменения данных. Согласно этим определениям, соотношение $SD2/SD1$ является показателем видимости долгосрочных изменений данных по сравнению с краткосрочными изменениями [10]. Для некоррелированных данных это соотношение равно единице. Чем больше его отклонение от единицы, тем больше корреляция между точками данных.

Если мы используем представление Пуанкаре для двух последовательных наблюдений, соотношение $KSD = SD2/SD1$ характеризует эллиптичность этого представления. Большие значения эллиптичности указывают на высокую степень корреляции данных. Если мы рассмотрим интенсивности не в соседних пикселях, а возьмем значения интенсивности, разделенные k пикселями, то соответствующие дескрипторы будут описывать корреляции с учетом коэффициента огрубления (*coarsening factor*) $k = 1, 2, \dots$ [10]. Этот коэффициент количественно определяет долгосрочные колебания интенсивности. Результирующие дескрипторы имеют вид

$$SD1_k = \{(1/2)\text{Var}(X_n - X_{n+k})\}^{1/2}, \quad SD2_k = \{2\text{Var}(X) - SD1_k^2\}^{1/2}, \quad KSD_k = SD2_k / SD1_k.$$

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКЛ-СТРУКТУР НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Алгоритм, предложенный в [9], использовался для моделирования спекл-структур. На рисунках 1 и 2 показаны шумовые спекл-структуры с размером изображения 256x256, соответствующие параметрам феноменологической модели $RU = 0,5$; $BD = 128, 32$. Параметр RU характеризует шероховатость поверхности, измеренную в длинах волн, а BD определяет ширину луча.

Гистограммы одномерных распределений (рис. 2) и оценки параметров показывают довольно хорошее совпадение с экспоненциальным распределением с тем же средним значением. Однако спекл-шум обладает корреляционными свойствами. Кривые на рис. на рисунке 4 показаны области перехода пятен из зоны корреляции с высокими значениями коэффициента эллиптичности в некоррелированную зону, которая характеризуется коэффициентом эллиптичности $KSD = 1$. По мере уменьшения ширины луча BD долгосрочные изменения интенсивности пятен становятся более значительными.

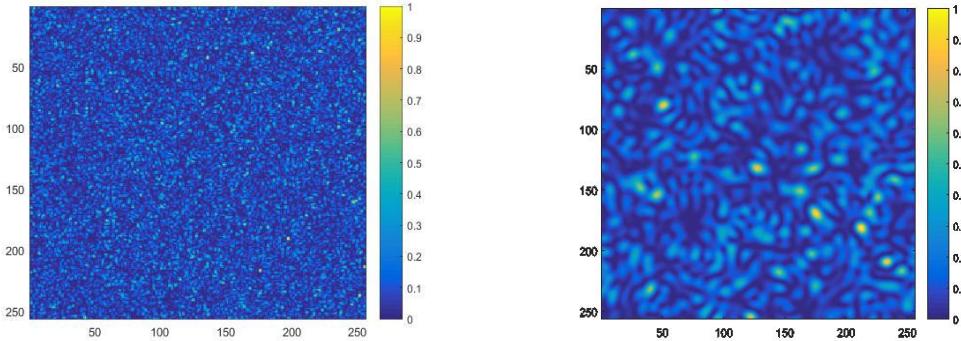


Рис. 1. Спекл-картины, полученная моделированием для $RU = 0,5$; $BD = 128$ (слева) и $BD = 32$ (справа). Цветовая шкала соответствует значениям интенсивности поля.

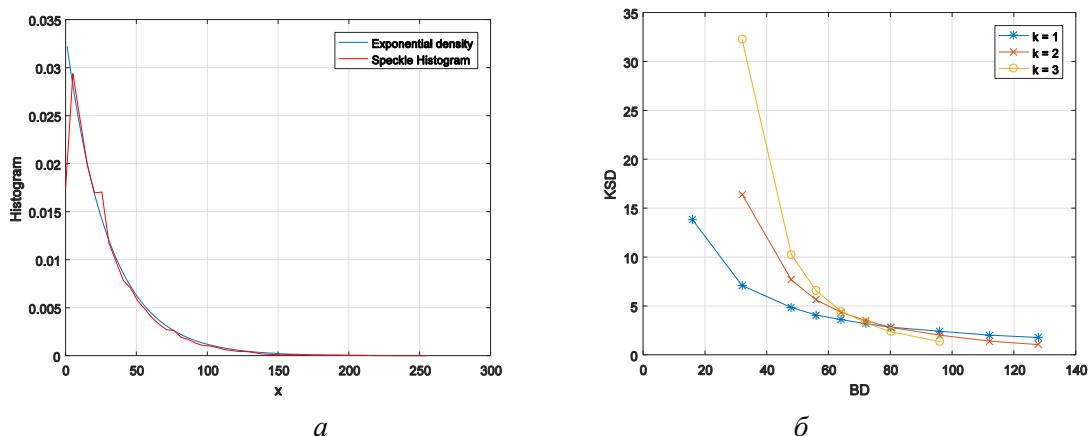


Рис. 2. а – гистограмма спекл-картины для $RU = 0,5$; $BD = 32$. Ось абсцисс содержит значения интенсивности; б – зависимость коэффициента эллиптичности KSD_k от параметра BD при различных значениях коэффициента огрубления k .

Моделирование интересующих объектов реализовано на основе мультипликативной модели: в области интересующего объекта увеличивается масштабный параметр спекл-изображения. Модель наблюдения содержит отношение сигнал/шум d , которое представляет собой относительное увеличение параметра масштаба в области объекта s . Результирующее наблюдаемое спекл - поле имеет вид

$$y(i,j) = g(i,j) \cdot (1+d \cdot s(i,j)),$$

где $g(i,j)$ есть шумовая спекл-структура с параметрами RU и BD .

Формирование модели поля спекла для протяженного объекта с гауссовой формой интенсивности показано на рисунках 3, $a-c$: a представляет гауссову форму s интенсивности объекта; b показывает изображение наблюдения спекла y для отношения сигнал/шум $d = 10$; c описывает распределение интенсивности изображения спекла y . При выборе таких параметров спекл-изображение имеет примерно одинаковые уровни краткосрочных и долгосрочных изменений при $KSD = 2,5$, как следует из рис. 2,б.

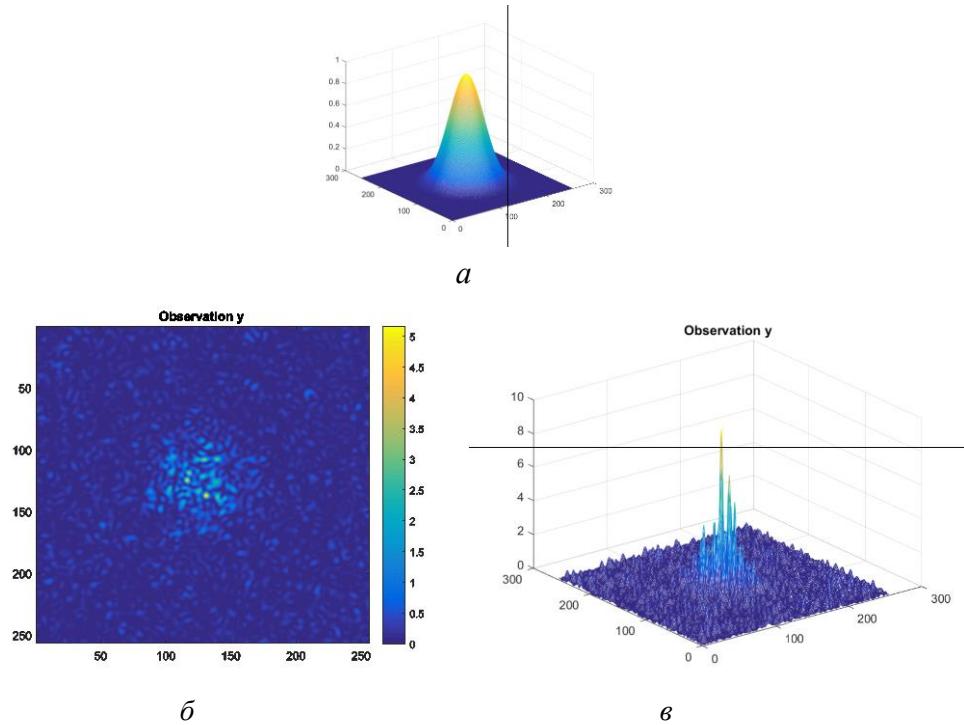


Рис. 3. Моделирование объекта интереса: *а* – гауссова форма интенсивности объекта; *б* – спекл-изображение объекта с $d = 10$; *в* – распределение интенсивности спекл-изображения. Цветовая шкала соответствует значениям интенсивности.

4. ОБНАРУЖЕНИЕ И СЕЛЕКЦИЯ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Результаты обнаружения модельного объекта обнаружителем Неймана-Пирсона с постоянным порогом при экспоненциальном распределении шума показаны на рис. 6 слева. Существенной особенностью обработки спекл-изображений является фрагментация объектов, представляющих интерес. Такая фрагментация может привести к потере важных деталей и ставит задачу последующей "сборки" объекта для его распознавания. После удаления мелких зерен (площадью менее 30 пикселей) изображение принимает вид рисунка 4, а справа, где объект в значительной степени очищен от шума. Однако избежать фрагментации объекта невозможно.

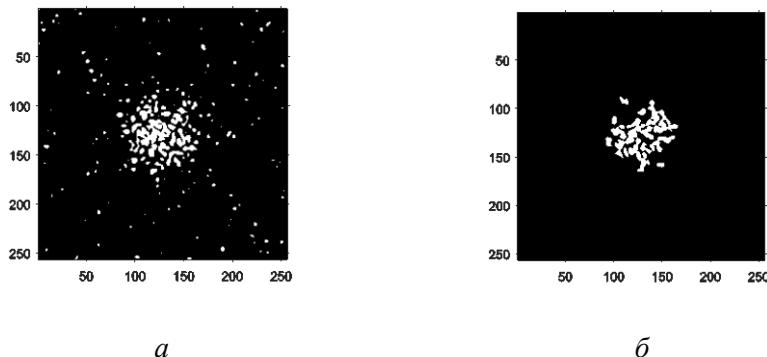


Рис. 4. Обнаружение объекта: *а* – обнаружитель с порогом Неймана-Пирсона для вероятности ложной тревоги $F = 0,01$; *б* – удаление небольших фрагментов площадью менее 30 пикселей.

Недостатком однопороговой обработки является то, что изолированные фрагменты объекта теряют связь с этим объектом. В принципе, можно попытаться восстановить эту связь, используя последующую группировку частей объекта. Но после однопороговой обработки фрагменты склеиваются произвольным образом, что затрудняет выделение отдельных частей интересующего объекта. Многопороговая обработка позволяет выбрать объект с учетом всех разбитых фрагментов, которые также выбираются отдельно и независимо. В этом случае оптимальные пороговые значения надо вычислять для каждого из фрагментов, которые могут существовать одновременно в нескольких двоичных срезах. Это обеспечивает дополнительный набор функций для последующего распознавания интересующих объектов на спектр-изображении. Фрагменты, площадь которых слишком мала (количество пикселей меньше S_{\min}), удаляются, чтобы уменьшить их число и упростить обработку.

Оптимальный порог для каждого из фрагментов рассчитывается из минимального отношения $P_s = P^2/S$ периметра фрагмента P к его площади S . Возможны дополнительные ограничения на максимальное значение P_s . Таким образом, каждый фрагмент выделяется на том пороге, где фрагмент наиболее компактен. Подробности многопорогового выбора объектов с учетом геометрических особенностей можно найти в [12,13]. Результат многопороговой селекции на модельном спектр-изображении показан на рисунке 5. Фрагменты были выбраны с учетом ограничений на минимальную площадь $S_{\min} = 10$ пикселей. Разные цвета фрагментов соответствуют разным пороговым значениям.

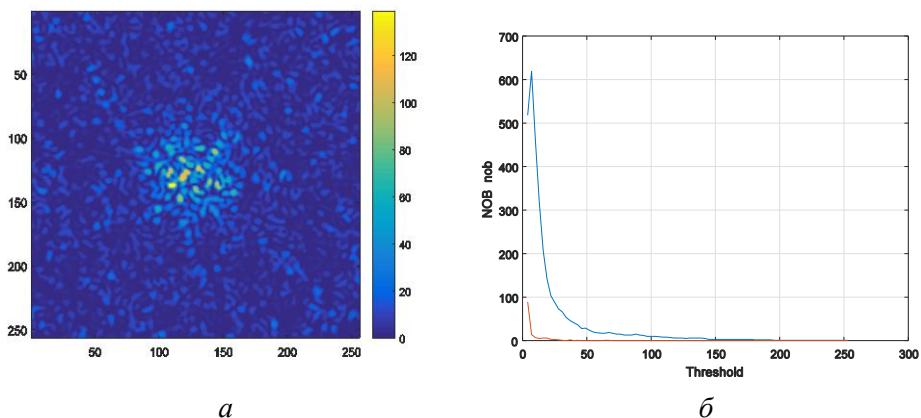


Рис. 5. Многопороговая селекция фрагментов: *а* – обнаружитель с порогом Неймана–Пирсона для вероятности ложной тревоги $F = 0,01$; *б* – удаление небольших фрагментов площадью менее 30 пикселей.

Разные цвета фрагментов соответствуют разным пороговым значениям. При многопороговой обработке количество изолированных фрагментов (NOB) на каждом пороговом уровне зависит от порогового значения, как показано верхней кривой на рисунке 5,*б*. Количество выбранных фрагментов (nob) после удаления мелких показано на рисунке 5,*б* нижней кривой.

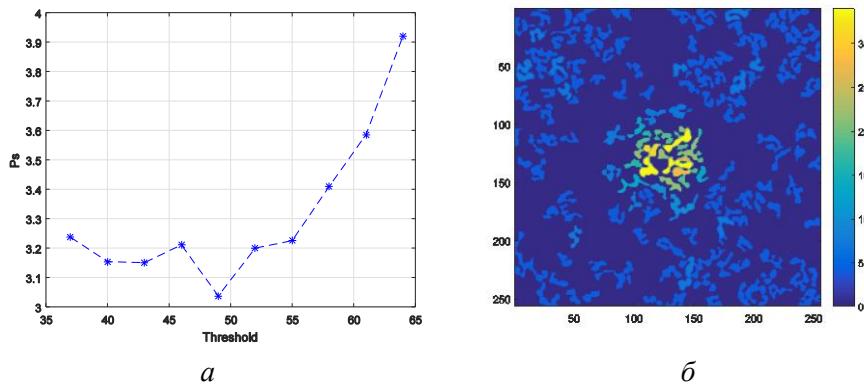


Рис. 6. Многопороговая селекция фрагментов при ограничении на компактность: *а* – типовая зависимость показателя компактности P_s от порогового уровня; *б* – удаление некомпактных фрагментов с $P_s > P_{s\max}$ при $P_{s\max} = 10$.

Пороговые значения для каждого фрагмента аддитивно устанавливаются, так, чтобы выбрать фрагмент на пороговом срезе, где он обладает наибольшей компактностью, т. е. наименьшим значением P_s . Типичная зависимость коэффициента P_s для некоторого фрагмента от порогового значения показана на рисунке 6,*а*. При выборе наиболее компактных фрагментов используется ограничение на коэффициент компактности P_s . На рисунке 6,*б* представлен результат селекции наиболее компактных фрагментов при ограничении $P_s < P_{s\max}$, что позволяет изолировать и локализовать каждый фрагмент объекта. Полученные результаты позволяют проанализировать структуру выбранного объекта, которую можно восстановить с помощью последующей группировки фрагментов.

Пример многопороговой селекции компактных объектов на реальном спектральном изображении, полученном радаром с SAR, показан на рисунке 7, где наблюдаемое изображение расположено вверху, а отсeлектированные фрагменты объектов, представляющих интерес, представлены внизу. Как отдельные объекты, так и их фрагменты выделяются и локализуются независимо. Они выделены разными цветами. На изображении рис. 7, в дополнение к кораблям, также выделены некоторые из их артефактов, такие как следы кильватера.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемы моделирования и обработки спектральных изображений имеют существенные особенности. При использовании феноменологических моделей важно измерять и контролировать корреляционные характеристики пятен. Для этой цели используются дескрипторы, которые отражают краткосрочную и долгосрочную корреляцию спектральных паттернов.

Эта спектральная модель используется для извлечения объектов на спектральных изображениях. Однопороговая обработка имеет несколько недостатков, которых можно избежать с помощью многопороговой обработки. Рассмотрен выбор интересующих объектов с использованием многопороговой обработки на модельных и реальных спектральных изображениях.

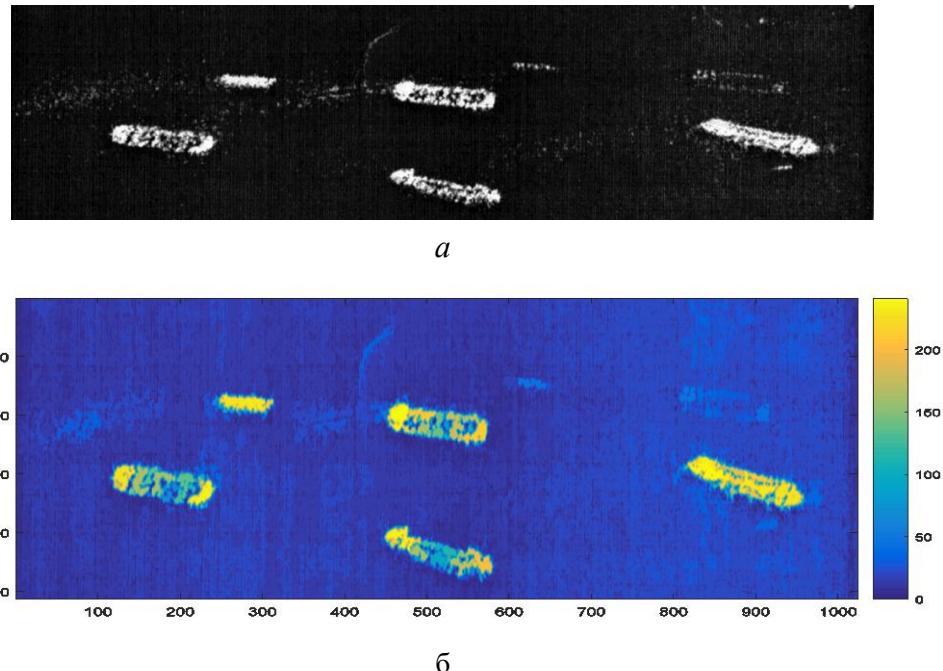


Рис. 7. Многопороговая селекция объектов на спекл-изображении для $S_{\min} = 10$; $P_{s\max} = 10$: *а* – исходное изображение; *б* – результаты селекции

Многопороговая обработка может использоваться для обнаружения и выбора объектов, представляющих интерес, на спекл-изображениях, что не требует сглаживания исходного изображения. Результаты многопороговой селекции позволяют сохранить связи между отдельными фрагментами интересующих объектов и сформировать признаки для их последующего распознавания. В статье представлены новые результаты обнаружения и выделения объектов на модельных и реальных спекл-изображениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rasti, B. Image Restoration for Remote Sensing: Overview and Toolbox / Rasti B., Chang, Yi, Dalsasso, E., Denis, L., Ghamisi, P. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, arXiv:2107.00557v1 [eess.IV] 1July 2021.
2. Misra, A., Kartikeyan, B. Denoising techniques for synthetic aperture radar data – a Review. // International Journal of Computer Engineering & Technology (IJCET), 2015, Vol. 6, Issue 9, - Pp. 01-11.
3. Devapal, D., Kumar, S., Jojo, C. Comprehensive survey on SAR image despeckling techniques. // Indian Journal of Science and Technology, 2015, Vol. 8(24), - Pp. 1-4.
4. Misra, A., Kartikeyan, B., Garg, S. Noise removal techniques for microwave remote sensing radar data and its evaluation. Jan Zizka (Eds): CCSIT, SIPP, AISC, PDCTA – 2013, - Pp. 257-264.
5. Lu, Y., Gao, Q., Sun, D., Zhang, D. SAR Image despeckling with adaptive multiscale products based on directionlet transform. // Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2013. - Pp. 1-10.
6. Kseneman M., Gleich, D. Information extraction and despeckling of SAR images with second generation of wavelet transform. In: Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology. Baleanu D. (ed.), 2012, - Pp. 373-394.
7. Karabchevsky, S., Kahana, D., Ben-Harush, O., Guterman, H. FPGA-based adaptive speckle suppression filter for underwater imaging sonar. // IEEE J. Oceanic Engineering, 2011, Vol. 36, № 4, - Pp. 646-657.

8. Khaksari K., Kirkpatrick, A., Sean J. Laser speckle modeling and simulation for biophysical dynamics: influence of sample statistics // *J. of Biomedical Photonics & Eng*, 2017, Vol. 3(4), -Pp 040302-1-040302-11..
9. Gascon F., Salazar, F. Simulation of rough surfaces and analysis of roughness by MATLAB. In: Ionescu M., (ed.), *MATLAB—A Ubiquitous Tool for the Practical Engineer*, InTech, Rijeka, 2011, – Pp. 391-420.
10. Majumdar, A., Kirkpatrick, A., Sean J. Spatial Poincare plots as descriptors of speckle pattern second-order statistics. // *J. of Biomedical Photonics & Eng*, 2017, Vol. 3(3), - P. 030501-1.
11. Brennan, M., Palaniswami, M., Kamen, P. Distortion properties of the interval spectrum of IPFM generated heartbeats for heart rate variability analysis. // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2001, Vol. 48(11), - Pp. 1251-1264.
12. Волков В. Ю. Адаптивная многопороговая селекция объектов на изображениях в системах дистанционного зондирования. // Информационно-управляющие системы, 2020, № 3, - С. 12-24.
13. Volkov, V. Yu., Bogachev, M. I., Kayumov, A. R. Object selection in computer vision: From multi-thresholding to percolation based scene representation. In: Margarita N. Favorskaya and Lakhmi C. Jain (Eds.). Intelligent Systems Reference Library, 2020, Vol. 175, 2020, - Pp. 161-194.

REFERENCES

1. Rasti, B. Image Restoration for Remote Sensing: Overview and Toolbox / Rasti B., Chang, Yi, Dalsasso, E., Denis, L., Ghamisi, P. // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, arXiv:2107.00557v1 [eess.IV] 1July 2021.
2. Misra, A., Kartikeyan, B. Denoising techniques for synthetic aperture radar data – a Review. // *International Journal of Computer Engineering & Technology (IJCET)*, 2015, Vol. 6, Issue 9, - Pp. 01-11.
3. Devapal, D., Kumar, S., Jojo, C. Comprehensive survey on SAR image despeckling techniques. // *Indian Journal of Science and Technology*, 2015, Vol. 8(24), - Pp. 1-4.
4. Misra, A., Kartikeyan, B., Garg, S. Noise removal techniques for microwave remote sensing radar data and its evaluation. Jan Zizka (Eds): CCSIT, SIPP, AISC, PDCTA – 2013, - Pp. 257-264.
5. Lu, Y., Gao, Q., Sun, D., Zhang, D. SAR Image despeckling with adaptive multiscale products based on directionlet transform. // *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013. - Pp. 1-10.
6. Kseneman M., Gleich, D. Information extraction and despeckling of SAR images with second generation of wavelet transform. In: *Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology*. Baleanu D. (ed.), 2012, - Pp. 373-394.
7. Karabchevsky, S., Kahana, D., Ben-Harush, O., Guterman, H. FPGA-based adaptive speckle suppression filter for underwater imaging sonar. // *IEEE J. Oceanic Engineering*, 2011, Vol. 36, № 4, - Pp. 646-657.
8. Khaksari K., Kirkpatrick, A., Sean J. Laser speckle modeling and simulation for biophysical dynamics: influence of sample statistics. // *J. of Biomedical Photonics & Eng*, 2017, Vol. 3(4), -Pp 040302-1-040302-11..
9. Gascon F., Salazar, F. Simulation of rough surfaces and analysis of roughness by MATLAB. In: Ionescu M., (ed.), *MATLAB—A Ubiquitous Tool for the Practical Engineer*, InTech, Rijeka, 2011, – Pp. 391-420.
10. Majumdar, A., Kirkpatrick, A., Sean J. Spatial Poincare plots as descriptors of speckle pattern second-order statistics. // *J. of Biomedical Photonics & Eng*, 2017, Vol. 3(3), - P. 030501-1.
11. Brennan, M., Palaniswami, M., Kamen, P. Distortion properties of the interval spectrum of IPFM generated heartbeats for heart rate variability analysis. // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2001, Vol. 48(11), - Pp. 1251-1264.
12. Volkov, V. Yu. Adaptive multi-threshold object selection in remote sensing images. // *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, № 3, - Pp. 12-24.
13. Volkov, V. Yu., Bogachev, M. I., Kayumov, A. R. Object selection in computer vision: From multi-thresholding to percolation based scene representation. In: Margarita N. Favorskaya and Lakhmi C. Jain (Eds.). Intelligent Systems Reference Library, 2020, Vol. 175, 2020, - Pp. 161-194.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АППЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННО-СТАТИСТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Е. А. Самойлин¹, С. В. Татаринцев¹, Д. Ю. Дронов¹, К. Е. Скугров¹

¹ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, Россия

Аннотация. Разработан комбинированный алгоритм, позволяющий получить на первом (нейросетевом) этапе приблизительные оценки вероятности появления и среднеквадратического отклонения величины яркости applicативных помех на изображениях, а на втором (статистически оптимальном) этапе осуществить детектирование этих помех с использованием найденных на первом этапе приблизительных оценок их параметров. Представлены результаты численных исследований предложенного алгоритма с расчетом зависимости ошибок обнаружения первого и второго рода от вероятности появления applicативных помех на изображении для предлагаемого и известного алгоритмов.

Ключевые слова: Изображения, applicативные помехи, нейросетевой обнаружитель, статистически оптимальный обнаружитель.

DETECTING APPLICATIVE INTERFERENCE ON DIGITAL IMAGES BASED ON NEURON-STATISTICAL ALGORITHM

E. A. Samoylin¹, S. V. Tatarintsev¹, D. Y. Dronov¹, K. E. Skugorov¹

¹ MESC «Zhukovsky–Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

Abstract. A combined algorithm has been developed that makes it possible to obtain, at the first (neural network) stage, approximate estimates of the probability of occurrence and the standard deviation of the brightness value of applicative noises in images, and at the second (statistically optimal) stage, to detect these noises using the approximate estimates of their parameters found at the first stage. The results of numerical studies of the proposed algorithm with the calculation of the dependence of the detection errors of the first and second kind on the probability of the appearance of applicative noise in the image for the proposed and known algorithms are presented.

Keywords: images, applicative interference, neural network detector, statistically optimal detector

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1, 2], при регистрации, передаче и автоматизированной обработке цифровых изображений довольно часто сталкиваются со случаями появления на растре помех и искажений различной природы. К наиболее часто встречающимся на изображениях помехам относятся импульсные или applicативные помехи (АП) [1-3]. При этом к отдельному классу таких помех можно отнести помехи с распределением яркости, близким к усеченному гауссовскому, мода которых приходится на нижнюю либо верхнюю границы квантования яркости [1-3]. Applicативные помехи на изображениях также часто встречаются при преднамеренных воздействиях на оптико-электронные системы и средства [4].

Практически все известные [1-3, 5] алгоритмы подавления АП на изображениях

являются пространственно-избирательными. Такие алгоритмы предполагают на первом этапе обработки детектирование (обнаружение) АП, а на втором – восстановление каким-либо методом потерянных (вследствие АП) элементов изображения. В настоящее время известно [5-7] достаточное количество алгоритмов обнаружения (как правило, статистических) АП, однако реализовать их на практике не позволяет априорная неизвестность законов и параметров распределения случайных сигналов и помех, и априорная неизвестность вероятностей наличия и отсутствия помех на изображении. Одним из выходов из данной ситуации может быть использование нейросетевого подхода и его комбинирование со статистически оптимальными алгоритмами. Примеры успешного сочетания двух указанных подходов рассмотрены в работах [8, 9] и др. В задаче детектирования помех получение необходимой информации о таких параметрах помех, как априорная вероятность их наличия на изображении и среднеквадратическое отклонение, возможно на основе использования искусственных нейронных сетей, обладающих высокими аппроксимационными свойствами, приобретаемыми ими в процессе обучения на обучающем множестве примеров [10]. Затем эта информация может быть использована статистически оптимальным алгоритмом.

Цель предлагаемой работы – снижение ошибок обнаружения аппликативных помех на изображениях на основе комбинирования нейронной сети и статистически оптимального алгоритма.

2. МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И АППЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ

Модель изображения $\lambda(I_i, J_j)$ со строками $i=1,m$ и столбцами $j=1,n$ имеет вид квантованного дискретного скалярного случайного поля [5-7]:

$$\lambda(I_i, J_j) = Q[D[\Lambda(I, J)]], \quad (1)$$

где Q, D – операторы квантования и прямоугольной дискретизации соответственно; $\Lambda(I, J)$ – непрерывное случайное поле; I, J – непрерывные пространственные переменные.

Область значений Ξ поля $\lambda(I_i, J_j)$ (яркость) квантована на интервале

$$\lambda(I_i, J_j) \in \Xi, \Xi = \{\lambda_k, k = 0, \dots, 1\}, \quad (2)$$

с шагом квантования $1/(2^N - 1)$, где N – степень квантования (как правило, $N=8$).

Модель помех $h(I_i, J_j)$ также имеет вид квантованного дискретного случайного поля с независимыми значениями [5-7]:

$$h(I_i, J_j) \in \Xi, \Xi = \{h_k, k = 0, \dots, 1\}, \quad (3)$$

где h_k – случайные значения шумового поля.

На практике распределение значений h_k (3) на интервале квантования $k=0, \dots, 1$ может быть равномерным, бинарным (искажения типа «соль и перец») либо усеченным гауссовским. В последнем случае усечение и мода могут быть либо в верхней границе квантования (2), (3) (верхнемодальные помехи, $\text{mod}\{h_k\} = 1$):

$$f(k | x = h) = \frac{2}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-1)^2}{2\sigma_h^2}}, \text{ при } x \in [0, \dots, 1], \quad (4)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) помех от матожидания (величины яркости) x ,

либо в нижней границе квантования (2), (3) (нижнемодальные помехи, $\text{mod}\{h_k\} = 0$):

$$f(k | x = h) = \frac{2}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_h^2}}, \text{ при } x \in [0, \dots, 1]. \quad (5)$$

Изображение, содержащее аппликативные помехи, представляет собой частичное замещение элементов $\lambda(I_i, J_j)$ (2) элементами поля $h(I_i, J_j)$ (3) в соответствии с выражением

$$x(I_i, J_j) = \begin{cases} h(I_i, J_j) & \text{с вероятностью } p, \\ \lambda(I_i, J_j) & \text{с вероятностью } 1 - p, \end{cases} \quad (6)$$

где p – вероятность замены значения элемента $\lambda(I_i, J_j)$ на значение $h(I_i, J_j)$ в дискрете с координатами (i, j) , которая имеет равномерную плотность $p = \text{const} \forall i \in 1, \dots, m, j \in 1, \dots, n$, и не зависит ни от наличия помех в других координатах, ни от исходного поля.

Появления $\lambda(I_i, J_j)$ и $h(I_i, J_j)$ образуют полную группу несовместных событий для $i \in 1, \dots, m, j \in 1, \dots, n$. Поскольку переменные I_i, J_j являются индексами, полагаем $\lambda(I_i, J_j) = \lambda_{i,j}$ (элементы матрицы Λ), $h(I_i, J_j) = h_{i,j}$ (элементы H), $x(I_i, J_j) = x_{i,j}$ (элементы X).

3. СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АППЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

При статистическом обнаружении АП обычно используют правило принятия решения [11], согласно которому центральный элемент скользящей по изображению апертуры (пространственной окрестности) принимается за помеху, если величина его яркости находится ближе к mode помехи, чем некоторый порог x_{opt} , устанавливаемый на основе распределения значений сигналов в этой апертуре. При этом в случае верхнемодальных помех ($\text{mod}\{h_k\} = 1$) матрица оценки положения помех \hat{H} строится в соответствии с выражением

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1, & x_{i,j} \geq x_{\text{opt}}, \\ 0, & x_{i,j} < x_{\text{opt}}. \end{cases} \quad (7)$$

Задача статистического синтеза обнаружителя заключается в получении таких значений x_{opt} (7), которые позволяют получить бинарную оценку положения помех

$\hat{h} \in [0,1]$, наиболее близкую к ее истинным значениям:

$$x_{\text{opt}} = \arg \min \{\|\hat{\mathbf{H}} - \tilde{\mathbf{H}}\|_F^2\}, \text{ при } x_{\text{opt}} \in [0, \dots, 1], \quad (8)$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма; $\tilde{\mathbf{H}}$ – бинарная матрица истинного положения помех на изображении \mathbf{X} :

$$\tilde{h}_{i,j} = \begin{cases} 1, & x_{i,j} = h_{i,j}, \\ 0, & x_{i,j} = \lambda_{i,j}. \end{cases} \quad (9)$$

Одно из решений задачи статистического обнаружения помех приведено в [6] и заключается в следующем. Обозначив через $f(k | x = \lambda)$ и $f(k | x = h)$ распределения яркостей сигнала $\lambda_{i,j}$ и помехи $h_{i,j}$ соответственно, можно найти условные вероятности ложного обнаружения $P_{\text{ЛО}}$ и пропуска $P_{\text{проп}}$ помехи:

$$P_{\text{ЛО}} = \sum_{k=x_{\text{opt}}}^1 f(k | x = \lambda) / \sum_{k=0}^1 f(k | x = \lambda), \quad (10)$$

$$P_{\text{проп}} = \sum_{k=0}^{x_{\text{opt}}} f(k | x = h) / \sum_{k=0}^1 f(k | x = h). \quad (11)$$

С учетом априорной вероятности p и условных вероятностей (10), (11) можно определить выражения для безусловных вероятностей ложных тревог (ЛТ) и пропуска помехи (ПП): $P_{\text{ЛТ}} = (1-p)P_{\text{ЛО}}$, $P_{\text{ПП}} = pP_{\text{проп}}$.

Так как на этапе восстановления изображения стоимость ошибок 1-го и 2-го рода различна (ПП влечет, как правило большие потери), то можно воспользоваться критерием минимального среднего риска (байесовским критерием). При этом выражение для значения порога x_{opt} примет вид [6]:

$$x_{\text{opt}} = \arg \min \left\{ \Pi_{\text{ЛТ}}(1-p) \frac{\sum_{k=x_{\text{opt}}}^1 f(k | x = \lambda)}{\sum_{k=0}^1 f(k | x = \lambda)} + \Pi_{\text{ПП}} p \frac{\sum_{k=0}^{x_{\text{opt}}} f(k | x = h)}{\sum_{k=0}^1 f(k | x = h)} \right\}, \quad (12)$$

где $\Pi_{\text{ЛТ}}, \Pi_{\text{ПП}}$ – цены потерь, соответствующие ошибкам типа ЛТ и ПП [7].

Решение уравнения (12) на практике сопряжено со многими трудностями. В частности, поскольку априорно не известны плотности распределений $f(k | x = \lambda)$ и $f(k | x = h)$, неизбежно прибегают к различным их аппроксимациям [6]. Кроме того, даже если удастся найти более менее удачный вид распределений $f(k | x = \lambda)$ и $f(k | x = h)$, по прежнему остаются неизвестными значения априорной вероятности p (12) и СКО σ . (4)-(5). Поэтому использование статистического алгоритма на практике также сопряжено со сложностью получения априорных исходных данных.

4. НЕЙРОСЕТЕВОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АППЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Получить приблизительные оценки вероятности p (12) и СКО σ возможно, используя нейросетевой алгоритм [10] детектирования рассматриваемых помех, а затем

осуществить подсчет частоты появления и отклонений величины яркости этих помех. Рассмотрим один из возможных нейросетевых алгоритмов получения оценок вероятности p (12) и СКО σ . Фрагмент структуры сети этого алгоритма приведен на рисунке 1.

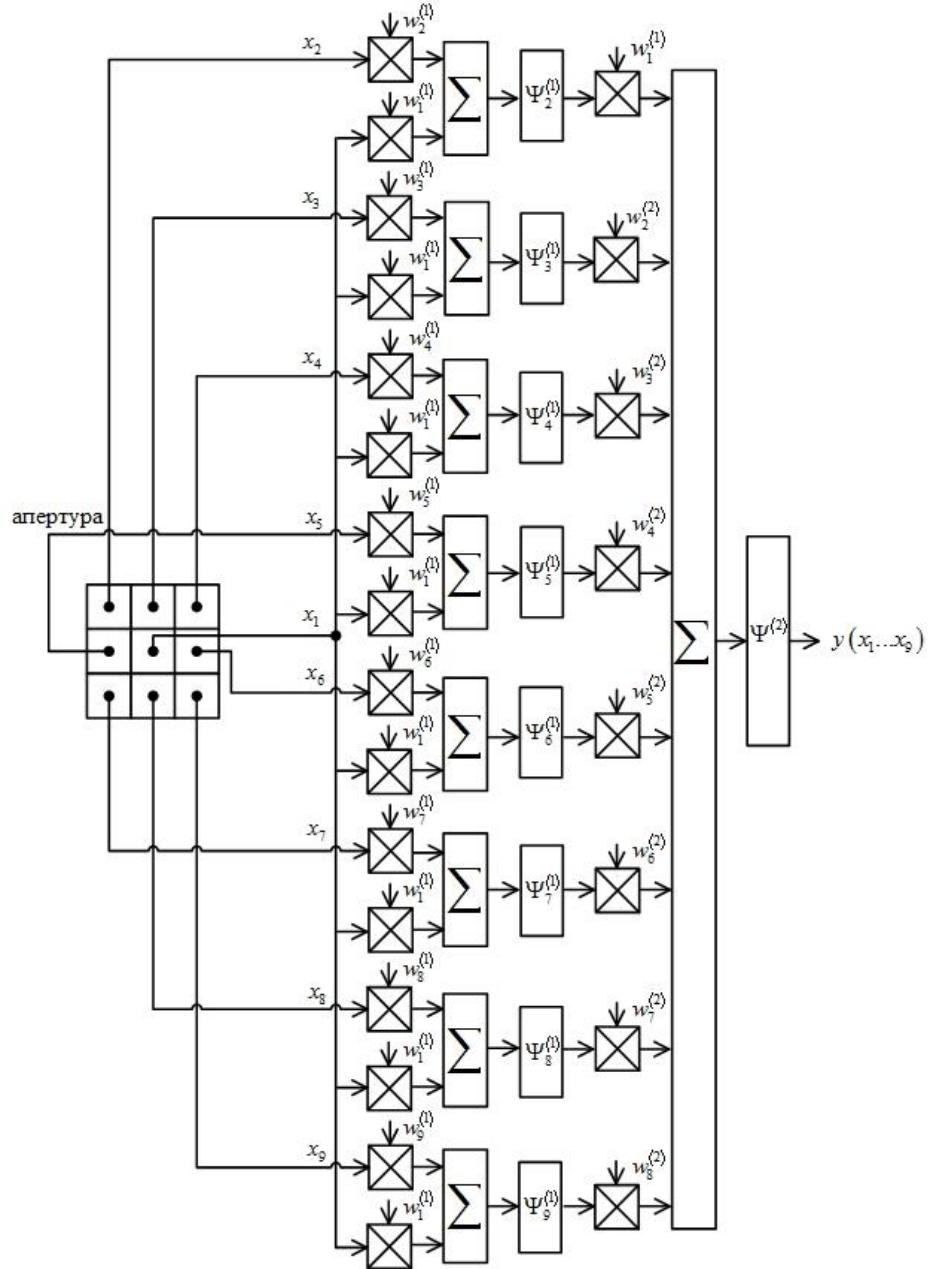


Рис. 1. Фрагмент структуры используемой нейронной сети

Математическая модель такой сети (ее выход y) задается выражением:

$$y(x) = \Psi^{(2)} \left(\sum_{l=2}^9 w_l^{(2)} \Psi^{(1)} \left(x_l w_l^{(1)} + x_l w_l^{(1)} \right) \right), \quad l = 2, 3, \dots, 9, \quad (13)$$

где $\Psi^{(2)}(\dots)$ – функция активации (ФА) нейронов второго слоя; $w_2^{(2)} \dots w_9^{(2)}$ – весовые коэффициенты (ВК) нейронов второго слоя; $\Psi^{(1)}(\dots)$ – ФА нейронов первого

слоя; $x_1 \dots x_9$ – значения яркости пикселей локальной апертуры изображения, как показано на рисунке 1; $w_1^{(1)} \dots w_9^{(1)}$ – ВК нейронов первого слоя, соответствующие $x_1 \dots x_9$.

Выбор данной структуры НС сделан исходя из того, что такая ее архитектура реализует градиентный (по 8-ми направлениям) алгоритм выделения локальных яркостных перепадов [1].

Поскольку используется градиентное обнаружение помех в апертуре, для получения аналога градиента (перепада яркости), начальные веса нейронов первого слоя должны быть равны по модулю и противоположны по знаку, в частности $w_1^{(1)} = 1$, $w_2^{(1)} \dots w_9^{(1)} = -1$, а ФА нейронов первого слоя должны быть четными. Данному требованию удовлетворяет, например, бисигмоидная ФА («двойной сигмоид»):

$$\Psi^{(1)}\left(x_1 w_1^{(1)} + x_l w_l^{(1)}\right) = \begin{cases} \frac{1}{1 + a \exp\left\{-b\left(x_1 w_1^{(1)} + x_l w_l^{(1)}\right) + c\right\}} & \text{при } x_1 w_1^{(1)} + x_l w_l^{(1)} \geq 0; \\ \frac{1}{1 + a \exp\left\{b\left(x_1 w_1^{(1)} + x_l w_l^{(1)}\right) + c\right\}} & \text{при } x_1 w_1^{(1)} + x_l w_l^{(1)} < 0, \end{cases} \quad (14)$$

где a, b, c – параметры функции.

В качестве ФА $\Psi^{(2)}(\dots)$ (13) можно использовать классическую сигмоидную зависимость:

$$\Psi^{(2)}\left(x_1 w_1^{(1)} + x_l w_l^{(1)}\right) = \frac{1}{1 + \exp\left\{-\left(x_1 w_1^{(1)} + x_l w_l^{(1)}\right)\right\}}. \quad (15)$$

В данном случае правило принятия решения о наличии или отсутствии помехи в локальной апертуре может быть представлено в виде:

$$x_1 \rightarrow \begin{cases} \text{искажение, если } y \geq 0.5, \\ \text{полезный сигнал, если } y < 0.5, \end{cases} \quad (16)$$

где символ \rightarrow означает соответствие.

Перед работой сети ее необходимо обучить, используя обучающие наборы «входные сигналы $x_1 \dots x_9$ – желаемый выход НС y_T » [10]. В качестве правила обучения может быть использован известный алгоритм обратного распространения ошибки [10], основанный на правиле наискорейшего спуска. После процедуры обучения, т.е. настройки ВК $w_2^{(2)} \dots w_9^{(2)}$ и донастройки $w_1^{(1)} \dots w_9^{(1)}$, принятие решений осуществляется на основе правила (16).

Представленная архитектура НС используется для принятия решения о том, каким элементом является центр одной из апертур (полезным сигналом или помехой). Для принятия решения по элементам других апертур, структура сети должна либо последовательно перемещаться на один элемент по строкам и столбцам, либо быть параллельной с учетом краев изображений. В последнем случае число параллельных НС, показанных на рисунке 1, будет равно числу элементов изображения. При этом обучить можно только одну сеть и использовать настроенные значения ВК $w_1^{(1)} \dots w_9^{(1)}$ и

$w_2^{(2)} \dots w_n^{(2)}$ для всех остальных НС.

Обученная на достаточном множестве обучающих пар НС (рисунок 1) способна обнаруживать аппликативные помехи на изображениях (формировать оценку $\hat{\mathbf{H}}$ (9)) в условиях, когда неизвестны ни вероятность p наличия помех, ни их СКО σ . После того, как сетью будет построена бинарная матрица оценок пространственного положения помех $\hat{\mathbf{H}}$ (9), получить приблизительные оценки p и σ параметров искажений (с модой $\text{mod}\{h_k\} = 1$) можно из следующих выражений соответственно:

$$\hat{p} = \frac{1}{mn} \mathbf{A}^T \hat{\mathbf{H}} \mathbf{B}, \quad (17)$$

где $\mathbf{A} = [a_1 = 1 \ a_2 = 1 \ \dots \ a_m = 1]^T$; $\mathbf{B} = [b_1 = 1 \ b_2 = 1 \ \dots \ b_n = 1]^T$,

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\mathbf{A}^T \hat{\mathbf{H}} \mathbf{B}} \mathbf{A}^T (\mathbf{E} - \mathbf{D}) \otimes (\mathbf{E} - \mathbf{D}) \mathbf{B}, \quad (18)$$

где \mathbf{E} – единичная матрица размером $m \times n$; \mathbf{D} – матрица размером $m \times n$ с элементами $d_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} & \text{при } \hat{h}_{i,j} = 1, \\ 1 & \text{при } \hat{h}_{i,j} = 0 \end{cases}$; символ \otimes означает адамарово произведение.

В целом предлагаемый нейронно-статистический алгоритм предполагает использование на первом этапе обработки обученной НС (рисунок 1), функционирующей в условиях полной априорной неопределенности и позволяющей получить приблизительные оценки \hat{p} и $\hat{\sigma}$ помех на изображении, а на втором этапе обработки – правила (12) на основе критерия минимального среднего риска (байесовского критерия), использующего нейросетевые оценки \hat{p} и $\hat{\sigma}$.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕЙРОННО-СТАТИСТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Для проведения численных исследований были отобраны разнообразные неискаженные цифровые оптические изображения с параметрами $m \times n = 800 \times 600$, $N = 8$. Перед обработкой данные изображения целенаправленно подвергались воздействию гауссовских аппликативных помех с верхним усеченным распределением яркости (4) с СКО $\sigma = 0.04$. Наложение помех осуществлялось в диапазоне вероятности их появления от $p = 0.01$ до $p = 0.99$ с шагом 0.01.

При численных исследованиях на каждом шаге вероятности p осуществлялось обнаружение помех на изображении нейросетевым алгоритмом (13)-(16), нейронно-статистическим алгоритмом (7)-(12), использующим НС-оценки \hat{p} и $\hat{\sigma}$ (17)-(18), а также статистически оптимальным алгоритмом (7)-(12), использующим истинные значения p и σ . Параметры последнего алгоритма выбраны следующие: $\Pi_{\text{LT}} = \Pi_{\text{PR}} = 1$, размер апертуры – 3×3 элемента.

Эффективность обнаружения помех вычислялась по частоте ошибок 1-го и 2-го рода:

$$H_{\text{ЛТ}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \begin{cases} 1, & \hat{h}_{i,j} - \tilde{h}_{i,j} = 1, \\ 0, & \hat{h}_{i,j} - \tilde{h}_{i,j} \neq 1, \end{cases} \quad (19)$$

$$H_{\text{ПР}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \begin{cases} 1, & \tilde{h}_{i,j} - \hat{h}_{i,j} = 1, \\ 0, & \tilde{h}_{i,j} - \hat{h}_{i,j} \neq 1, \end{cases} \quad (20)$$

Выражения (19) и (20) представляют собой отношение числа ошибок 1-го и 2-го рода соответственно к общему числу элементов изображения.

На рисунке 2 и 3 представлены зависимости ошибок обнаружения (19) и (20) соответственно от вероятности наличия аппликативной помехи на изображении для исследуемых алгоритмов.

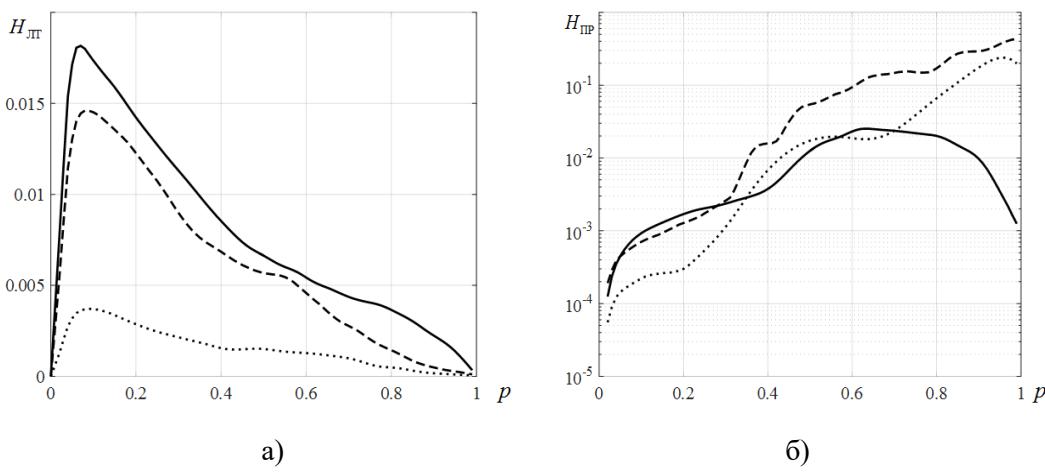


Рис. 2. Зависимость ошибок обнаружения 1-го (а) и 2-го (б) рода от вероятности наличия помехи для: 1 – нейросетевого алгоритма (13)-(16); 2 – нейронно-статистического алгоритма (7)-(12), использующего НС-оценки \hat{p} и $\hat{\sigma}$ (17)-(18); 3 – статистически оптимального алгоритма (7)-(12), использующего истинные значения p и σ

Из рисунка 2 следует, что практически во всем исследуемом диапазоне вероятности p наиболее эффективным является статистически оптимальный алгоритм, использующий истинные значения p и σ . В случае полной априорной неопределенности (при отсутствии данных о p и σ), предлагаемый нейронно-статистический алгоритм является более эффективным по сравнению с нейросетевым алгоритмом во всем исследуемом диапазоне интенсивности p для ошибок 1-го рода (рисунок 2а), и в интервале интенсивности p для ошибок 2-го рода (рисунок 2б), кроме для интервала $p>0.24$, где нейросетевой алгоритм оказывается более эффективным.

На рисунке 3 представлен пример использования предлагаемого нейронно-статистического алгоритма в задаче пространственно-избирательной ранговой фильтрации изображений, содержащих модальные аппликативные помехи с верхним усеченным гауссовским распределением яркости в условиях априорной неопределенности.

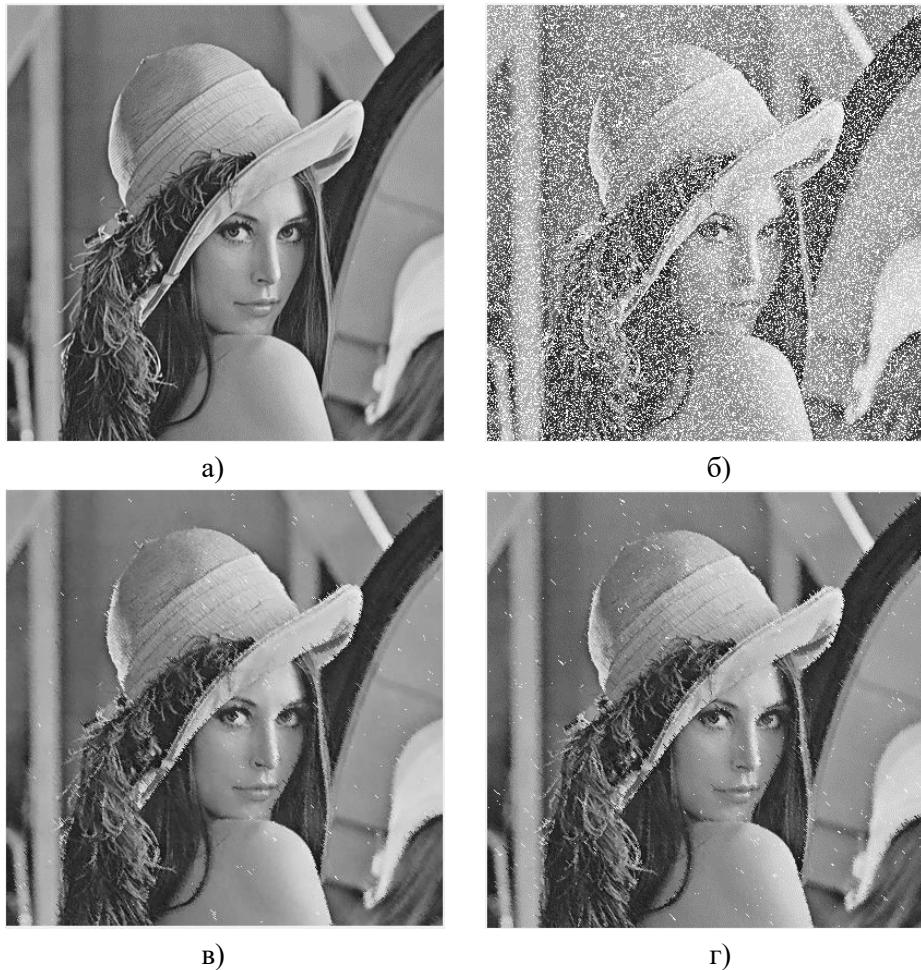


Рис. 3. Пример пространственно-избирательной ранговой фильтрации цифровых оптических изображений: *а* – исходное изображение; *б* – изображение, содержащее АП; *в* – результат фильтрации при статистически оптимальном алгоритме обнаружения, использующем истинные значения p и σ ; *г* – результат фильтрации при предлагаемом нейронно-статистическом алгоритме обнаружения

Из рисунка 3 видно, что заметны различия в эффективности статистически оптимального алгоритма и предлагаемого нейронно-статистического алгоритма в пользу первого. Однако эти различия (потеря в качестве последнего) представляют собой плату за возможность использования предлагаемого нейронно-статистического алгоритма в условиях полной априорной неопределенности относительно параметров помех.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный комбинированный нейронно-статистический алгоритм детектирования помех позволяет получать на первом этапе с использованием НС приблизительные оценки вероятности появления и СКО величины яркости applicативных помех на изображениях, а на втором этапе осуществить статистически оптимальное обнаружение этих помех с использованием найденных на первом этапе приблизительных оценок их параметров. Представленные результаты численных исследований эффективности предложенного комбинированного детектора помех показывают его преимущество перед известным обнаружителем в условиях априорной неопределенности практически во всем диапазоне вероятности наличия помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. - 1104 с.
2. Хуанг Т.С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г.Дж., Зохар Ш., Юстуссон Б.И., Тян Ш.-Г. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. М.: Радио и связь, 1984. - 224 с.
3. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. - 168 с.
4. Юхно П.М. Преднамеренные оптические помехи высокоточному оружию. Монография. М.: Радиотехника, 2017. - 640 с.
5. Самойлин Е.А. Пространственно-избирательная фильтрация полутоновых изображений // Радиотехника. 2006. № 12. - С. 42-45.
6. Самойлин Е.А., Славнов К.В., Татаринцев С.В. Синтез алгоритма работы статистически оптимального обнаружителя модальных аппликативных помех с усеченным гауссовским распределением яркости на цифровых оптических изображениях // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 1. - С. 96-103.
7. Самойлин Е.А. Синтез статистически оптимальных обнаружителей импульсных помех при фильтрации изображений // Радиотехника. 2009. № 9. - С. 25-31.
8. Степанов О.А. Нейросетевые алгоритмы в задаче нелинейного оценивания. Взаимосвязь с байесовским подходом // Сб. науч. ст. по материалам XI конференции молодых ученых. Санкт-Петербург: ГНЦ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. - С. 39-65.
9. Кирсанов Э.А., Сирота А.А. Обработка информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга: статистический и нейросетевой подходы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 344 с.
10. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. / Пер. с англ. Ю.А. Зуев, В.А. Точенов. – М.: Мир, 1992. - 240 с.
11. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. М.: Сов. радио. 1969. - 752 с.

REFERENCES

1. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. M.: Tekhnosfera, 2012. - 1104 p.
2. Huang TS, Eklund J.-O., Nussbaumer G.J., Zohar Sh., Yustusson B.I., Tian Sh.-G. Fast algorithms in digital image processing. M.: Radio and communication, 1984 . - 224 p.
3. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I., Spector A.A. Digital image processing in information systems: Textbook. Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2000. - 168 p.
4. Yukhno P.M. Deliberate optical interference with precision weapons. Monograph. M.: Radiotekhnika, 2017. - 640 p.
5. Samoilin E.A. Spatially selective filtering of halftone images // Radiotekhnika. 2006. No. 12. - Pp. 42-45.
6. Samoilin E.A., Slavnov K.V., Tatarintsev S.V. Synthesis of the algorithm for the operation of a statistically optimal detector of modal applicative interference with a truncated Gaussian distribution of brightness on digital optical images // Radiotekhnika. 2021. T. 85. No. 1. - Pp. 96-103.
7. Samoilin E.A. Synthesis of statistically optimal detectors of impulse noise in image filtering // Radiotekhnika. 2009. No. 9. - Pp. 25-31.
8. Stepanov O.A. Neural network algorithms in the problem of nonlinear estimation. Relationship with the Bayesian approach // Sb. scientific. Art. based on the materials of the XI conference of young scientists. St. Petersburg: State Research Center OJSC "Concern" TsNII "Elektropribor", 2009. - Pp. 39-65.
9. Kirsanov E.A., Sirota A.A. Information processing in spatially distributed radio monitoring systems: statistical and neural network approaches. - M.: FIZMATLIT, 2012. - 344 p.
10. Wasserman F. Neurocomputer technology: theory and practice. / Per. from English Yu.A. Zuev, V.A. Tochenov. - M.: Mir, 1992. - 240 p.
11. Levin B.R. Theoretical foundations of statistical radio engineering. Book. 1. M.: Sov. radio. 1969. - 752 p.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

М.С. Германчук, М. Г. Козлова, Л. И. Руденко

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

Аннотация. В работе рассматривается актуальная задача использования ресурсов социальных сетей для решения целенаправленных прикладных задач по управлению потоком информации. Исследуется применимость технологий искусственного интеллекта для задач поиска, извлечения, сравнения и анализа изображений. Разработка программного обеспечения направлена на создание базы данных, пригодной для формирования запросов, извлечения знаний и получения правдоподобного (достоверного) вывода об изучаемом объекте в соответствии с поставленными целями.

Ключевые слова: сравнение изображений, перцептивные хэш-алгоритмы, социальные сети.

INTELLECTUALIZATION OF IMAGE PROCESSING OF SOCIAL NETWORKS

M. S. Germanchuk, M. G. Kozlova, L. I. Rudenko

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Abstract. The paper considers the actual problem of using the resources of social networks to solve targeted applied tasks for managing the flow of information. The applicability of artificial intelligence technologies for the tasks of search, extraction, comparison and analysis of images is investigated. Software development is aimed at creating a database suitable for forming queries, extracting knowledge and obtaining a plausible (accessible) conclusion about the object under study in accordance with the set goals.

Keywords: image comparison, perceptual hash algorithms, social networks.

1. ВВЕДЕНИЕ

Социальные сети обладают огромным ресурсом неиспользуемой информации. Визуальная информация (изображения) сопровождается текстом и разными активностями (лайки, комментарии и пр.), отображающими динамику восприятия агентами-потребителями этой информации. Кластеризация потребителей, оценка системы влияния, управления влиянием для достижения коммерческих, политических и других целей являются актуальными задачами интеллектуализированного подхода обработки информации социальных сетей. Для решения этих задач необходимо иметь инструменты поиска, извлечения, обработки и сравнения объектов в неорганизованной коллекции изображений социальных сетей.

В работе рассмотрены методы поиска изображений в конкретном сервисе и извлечение информации о них. Программное обеспечение, выполненное в качестве прикладной части работы, позволяет пользователю по заданному запросу находить оригинальные изображения в поисковом сервисе «Google Images», сохранять их в базу данных и просматривать сами изображения и информацию о них при необходимости.

Пользователь может сравнить два интересующих его изображения, используя различные из предложенных методов сравнения.

Рассмотрим задачу, в которой ежедневно нужно отправлять запросы в «Google Images», чтобы, например, следить за частотой смены изображений по конкретному запросу. Здесь сразу возникает проблема одинаковых изображений. Записывать их разными записями в базу данных – неправильное решение. Будет правильным просто обновить уже существующую запись. Для того, чтобы понять, что картинки одинаковые, нужны методы сравнения изображений.

В открытом доступе предлагаются различные решения [1-5], которые позволяют доставать изображения из «Google Images», но из-за того, что Google часто изменяет свои алгоритмы, большинство описанных методов, практически все, не работают, а та часть, что функционирует, коммерческая. Поэтому было принято решение разработать собственный алгоритм скачивания изображений.

Объект исследования – изображения. **Предмет исследования** – процессы, связанные с обработкой и анализом изображений. **Цель работы** – разработка веб-приложения для поиска и сравнения изображений. **Задачи**: извлечение изображений и информации о них из «Google Images»; разработать веб-приложение, объединяющее в себе два сервиса: сервис сравнения изображений и сервис поиска изображений; создать базу данных, в которой будут храниться сведения о найденных изображениях; разработать удобный и интуитивно понятный GUI для веб-приложения.

Предполагается, что данная работа будет полезна в исследованиях, связанных с анализом изображений, а также выступит в роли удобного инструмента для поиска, обработки и хранения картинок и сведений о них. Заметим, что авторами не было найдено готового веб-приложения, выполняющего функции, описанные выше.

2. РАЗРАБОТКА СЕРВИСА ПОИСКА И СРАВНЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Выбор инструментов для разработки программного обеспечения. Для разработки программного обеспечения был выбран язык программирования Python (простой синтаксис и большое число библиотек). В качестве фреймворка выбор был сделан в пользу Django (высокоуровневый фреймворк, большой функционал, предназначен для быстрой и эффективной разработки).

Алгоритмы сравнения изображений. *Перцептивное хэширование* – это процесс использования алгоритмов, генерирующих хэши – «отпечатки» различных форм мультимедиа, в том числе и изображений. Исходные изображения при помощи различных перцептивных методов преобразовываются в хэши, в конечные последовательности 1 и 0, которые можно интерпретировать как индивидуальный «отпечаток» данной картинки. Важно понимать, что именно «индивидуальный», об уникальности речи не идёт, так как может случиться такое, что существуют два изображения, не схожих между собой, однако их хэши могут совпадать.

В отличие от криптографических хэш-функций, перцептивные представляют собой иной взгляд на хэш. В криптографии каждый хэш уникальный, то есть конкретному

объекту принадлежит конкретный хэш. Большинство перцептивных алгоритмов работают по схожему принципу. На их работу не влияет изменение соотношения сторон – сжатие или растягивание объекта, также лёгкое искажение яркости и контрастности останется незамеченным. Перцептивные хэш-функции широко используются для поиска случаев нарушения авторских прав в Интернете, также для установления схожести видеоматериалов, чтобы уберечь контент от пиратства. В [6] показано, что подобные алгоритмы могут быть использованы для поиска и сравнения изображений в базе данных. Было доказано, что шифрование речи перцептивными методами эффективнее стандартных подходов. В [7] описана разработка системы, в которой шифрование было не только более точным, но и компактным. Рассмотрим некоторые перцептивные хэш-алгоритмы.

aHash (Average Hash) – перцептивный хэш-алгоритм, в котором хэш вычисляется следующим образом.

1. *Уменьшение размера.* Уменьшить исходное изображение до размера 8x8. Общее количество пикселей после этой операции составит 64. Таким образом, все изображения будут одного размера.
2. *Обесцвечивание.* Квадратное изображение перевести в градации серого. Благодаря этому хэш уменьшается втрое – каждый пиксель описывается одним числом вместо трёх.
3. *Вычисление среднего арифметического.* Найти среднее среди всех 64 значений серого цвета. Это число является пороговым значением.
4. *Пороговая бинаризация.* Для каждого цвета получить 0 или 1. Если текущий цвет меньше «порога», то 0, иначе – 1.
5. *Формирование хэша.* Пройти по матрице и записать нули и единицы в строку, сверху вниз, слева направо.

Для вычисления степени схожести двух изображений, различия их хэшей вычисляются по расстоянию Хэмминга. Нулевое расстояние указывает на то, что изображения идентичны. Если дистанция не больше 5, то, скорее всего, картинки похожи, хоть и имеются небольшие различия. Но, если же расстояние больше 10, то вероятнее всего, что изображения разные.

```
def aHash(self):
    # dimension - compression ratio
    N = 8
    # take images and process them
    img1 = self.compressing(N, IMG1)
    img2 = self.compressing(N, IMG2)
    # counting of averages
    avr1 = np.mean(img1)
    avr2 = np.mean(img2)
    # thresholding
    ret, img1=cv2.threshold(img1,avr1,255,cv2.THRESH_BINARY)
    ret, img2=cv2.threshold(img2,avr2,255,cv2.THRESH_BINARY)
    # computing of answer
    self.get_ans(img1, img2)
```

Листинг 1. aHash

```

def compressing(self, N, name):
    # discoloration and compressing
    img = cv2.imread(name, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
    img = cv2.resize(img, (N,N), interpolation=cv2.INTER_AREA)
    return img

```

Листинг 2. Сжатие и обесцвечивание

```

def get_ans(self, im1, im2):
    # counting of answer and hashes
    self.ans = util.ans(im1, im2)
    self.hash1 = util.hash(im1)
    self.hash2 = util.hash(im2)

```

Листинг 3. Получение ответа и хэшей

```

def ans(img1, img2):
    # counting of errors
    errors = compare(img1, img2)
    ans = (1 - errors) * 100
    ans = round(ans)
    return ans

```

Листинг 4. Вычисление схожести изображений

```

# "errors" of images
def compare(img1, img2):

    size = img1.size
    Oy = len(img1.T)
    Ox = len(img1)
    cnt = 0
    for x in range(0, Ox):
        for y in range(0, Oy):
            if img1[x, y] != img2[x, y]:
                cnt += 1
    return cnt/size

```

Листинг 5. Поиск несовпадений в чёрно-белых изображениях

```

# computing hash
def hash(img):
    Oy = len(img.T)
    Ox = len(img)
    hash = ""
    cnt = 0
    for x in range(0, Ox):
        for y in range(0, Oy):
            if img[x, y] == 0:
                hash += "0"
            else:
                hash += "1"
            # cnt uses for readability hash
            cnt += 1
            if cnt == 4:
                hash += " "
                cnt = 0
    return hash

```

Листинг 6. Получение хэша из чёрно-белого изображения

Приведем пример работы данного алгоритма.



Рис. 1. Заяц

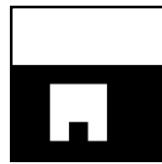


Рис. 2. Заяц (aHash)



Рис. 3. «Сжатый»
заяц

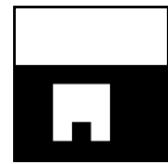


Рис. 4. «Сжатый»
заяц (aHash)

Сравним рисунки 1 и 3. Алгоритм показывает, что изображения схожи на 100% – различие в их хэшах нулевое (на выходе получаем идентичные чёрно-белые «отпечатки» – рис. 2 и 4).



Рис. 5. Ирбис

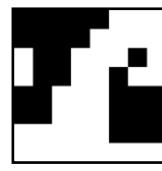


Рис. 6. Ирбис (aHash)

Сравним изображения рис. 1. и рис. 5. Алгоритм aHash показывает, что хэши отличаются на 20 битов (рис. 6), схожесть оценивается примерно в 45%, это позволяет сделать вывод, что изображения совершенно разные.

Приведем результаты тестирования алгоритма aHash, когда меняется яркость и контраст изображения.



Рис. 7. «Яркий» заяц

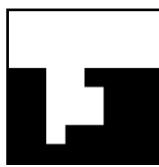


Рис. 8. «Яркий» заяц
(aHash)



Рис. 9. «Тусклый»
заяц

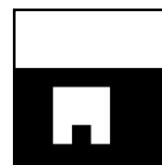


Рис. 10.
«Тусклый»
заяц
(aHash)

На рис. 7 яркость изображения увеличена на 25%, а на рис. 9 уменьшена на 25%. Сравним с исходным изображением (рис. 1). В случае с увеличением разница в хэшах составила 3 бита (рис. 8), схожесть – 95%. Однозначно можно утверждать: изображения похожи. Ситуация с уменьшением яркости и контрастности показала стопроцентную идентичность изображений (рис. 10).

Рассмотрим случай, когда половина изображения засвечена, а другая наоборот – затемнена (рис. 11).



Рис. 11. «Разный» заяц

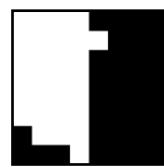


Рис. 12. «Разный»
заяц (aHash)

Алгоритм aHash показывает, что изображения на рис. 1 и 11 похожи на 61%, а разница в их хэшах составляет 25 битов (рис. 12). Слабое место данного перцептивного хэш-алгоритма – чрезмерное изменение яркости и контрастности на одном изображении. Это обуславливается тем, что, проводя бинаризацию, алгоритм приравнивает, всё то, что изначально было ярче, единице, а, тёмную часть – нулю. Исходя из всего этого, получаем белую и чёрную половины изображения (рис. 12).

dHash (Difference Hash) – перцептивный хэш-алгоритм, который имеет две вариации: горизонтальную и вертикальную и работает следующим образом.

1. *Уменьшение размера.* Уменьшить исходное изображение до размера 9x9, но хэш будет строиться по матрице 8x8.
2. *Обесцвечивание.* Шаг идентичен второму шагу алгоритма aHash.
3. *Бинаризация.* Каждому пикселью присваивается значение в зависимости от пикселя справа для горизонтальной версии и снизу для вертикальной: если следующий пиксель темнее текущего, то значение текущего заменяется на 255, иначе – 0. Однако девятый столбец (строка) не учитываются – мы их «отбрасываем».
4. *Формирование хэша.* Пройти по матрице 8x8 и записать нули и единицы в строку, сверху вниз, слева направо.

Код горизонтальной и вертикальной версий алгоритма приведен на листингах 7 и 8.

```
def dHash_row(self):
    # dimension
    N = 8
    # take images
    image1 = self.compressing(N + 1, IMG1)
    image2 = self.compressing(N + 1, IMG2)
    # thresholding
    row1 = np.empty([N, N])
    row2 = np.empty([N, N])
    for x in range(0, N):
        for y in range(0, N):
            if image1[x, y] < image1[x + 1, y]:
                row1[x, y] = 0
            else:
                row1[x, y] = 255
            if image2[x, y] < image2[x + 1, y]:
                row2[x, y] = 0
            else:
                row2[x, y] = 255
    # computing of answer
    self.get_ans(row1, row2)
```

Листинг 7. Горизонтальный dHash

```
def dHash_col(self):
    # dimension
    N = 8
    # take images
    image1 = self.compressing(N + 1, IMG1)
    image2 = self.compressing(N + 1, IMG2)
    # thresholding
    col1 = np.empty([N, N])
```

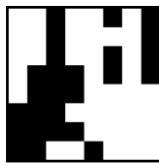
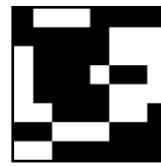
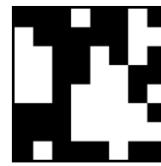
```

col2 = np.empty([N, N])
for x in range(0, N):
    for y in range(0, N):
        if image1[x, y] < image1[x, y + 1]:
            col1[x, y] = 0
        else:
            col1[x, y] = 255
        if image2[x, y] < image2[x, y + 1]:
            col2[x, y] = 0
        else:
            col2[x, y] = 255
    # computing of answer
    self.get_ans(col1, col2)

```

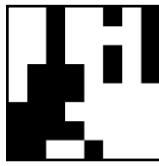
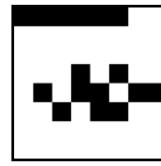
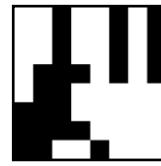
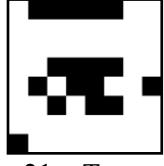
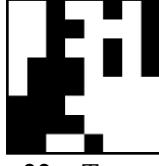
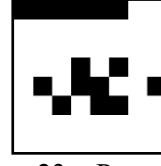
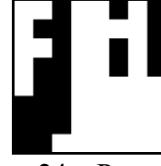
Листинг 8. Вертикальный dHash

Для тестирования используем то же изображение, что и для предыдущего алгоритма. Пройденные через dHash чёрно-белые хэши исходного изображения (рис. 1), приведены на рис. 13 и 14.

Рис. 13. Заяц
(dHash гор.)Рис. 14. Заяц
(dHash вер.)Рис. 15. Ирбис
(dHash гор.)Рис. 16. Ирбис
(dHash вер.)

Пройденные через dHash чёрно-белые хэши ирбиса (рис. 5), представлены на рис 15 и 16. По обеим версиям можно сделать вывод, что изображения разные. У первой – схожесть около 44% и расстояние между хэшами – 36 битов, у второй – 66% и 22 бита.

Результат работы методы в сравнении суженным изображением приведены на рис. 17-18. Видно, что со сжатой по бокам картинкой алгоритмы семейства dHash справились отлично – хэши одинаковые, схожесть стопроцентная.

Рис. 17. «Сжатый»
заяц (dHash гор.)Рис. 18. «Сжатый»
заяц (dHash вер.)Рис. 19. «Яркий»
заяц (dHash гор.)Рис. 20. «Яркий»
заяц (dHash вер.)Рис. 21. «Тусклый»
заяц (dHash гор.)Рис. 22. «Тусклый»
заяц (dHash вер.)Рис. 23. «Разный»
заяц (dHash гор.)Рис. 24. «Разный»
заяц (dHash вер.)

По результатам работы с яркостью и контрастностью горизонтальный dHash показывает, что разница 4 бита и схожесть 94% (рис. 19), вертикальный – разница 2 бита и схожесть, соответственно, 97% (рис. 20). У изображения с пониженной яркостью и контрастностью дела обстоят чуть лучше – 1 бит и 98% (рис. 21-22). При сравнении с рис. 11, в отличие от aHash, алгоритм dHash обрадовал результатом – 5 битов и 92% у

двух версий данного метода (рис. 23-24). Это обуславливается самим способом бинаризации, играет роль отсутствие порога, как такового.

Для тестирования алгоритма на изображении, представленном на рис. 11, характеристики меняли под прямым углом. Попробуем применить изменение яркости и контрастности диагонально (рис. 25, 28).



Рис. 25. «Разный» заяц (v2)

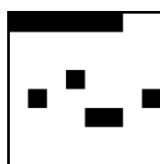


Рис. 26. «Разный» заяц (v2)
(dHash гор.)

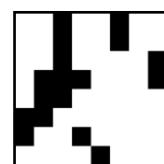


Рис. 27. «Разный» заяц (v2)
(dHash вер.)

Алгоритм показывает, что для изображения, приведенного на рис. 25, схожесть горизонтального метода составляет 86%, разница в хэшах 9 битов. Для вертикального – схожесть 83%, разница 11 битов. Неужели алгоритм нам подсказывает, что изображения разные? Рассмотрим результат для изображения, приведенного на рис. 28. Результат особо не изменился. Для горизонтального метода всё так же, а для вертикального – схожесть 91%, разница 6 битов.



Рис. 28. «Разный» заяц (v3)

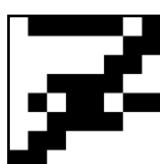


Рис. 29. «Разный» заяц (v3)
(dHash гор.)

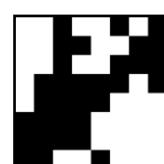


Рис. 30. «Разный» заяц (v3)
(dHash вер.)

Сказать, что это погрешность, будет неверно. Правильным будет считать, что найдено слабое место данного алгоритма. Если присмотреться к рис. 29, можно увидеть чёрную диагональную линию, повторяющую границу изменения яркости рис. 28. Можно сделать вывод, что алгоритм, в виду своей особой бинаризации, не может «спокойно» перейти эту границу.

Для произвольной границы в виде многоугольника (рис. 31) горизонтальный вариант дал схожесть 73%, разность хэшей 17 битов; вертикальный – схожесть 77%, разность хэшей 15 битов.



Рис. 2.31. «Разный» заяц (v4)



Рис. 2.32. «Разный» заяц (v4)
(dHash гор.).

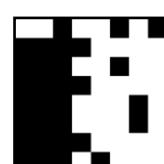


Рис. 2.33. «Разный» заяц (v4)
(dHash вер.)

Можно сделать вывод, что dHash с изменениями яркости и контрастности под прямым углом справляется лучше, чем aHash, но вообще преобразование изображения по этим характеристикам не его конёк.

pHash (Perceptual Hash) – перцептивный хэш-алгоритм, основной особенностью, которого является использование дискретного косинусного преобразования (DCT) для устранения высоких частот изображения.

$$DCT = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} \end{pmatrix}, d_{ij} = 2 \sum_{k=1}^n x_{ij} \cos \frac{\pi(j-1)(2k-1)}{2n} \quad (1)$$

В основе дискретного косинусного преобразования лежит преобразование Фурье, которое является одним из лучших методов анализа спектра сигнала. Единственная «проблема» состоит в том, что этот алгоритм работает в предположении, что сигнал является периодическим и бесконечным. В реальных задачах используется быстрое преобразование Фурье (Fast Fourier Transformation). А дискретное косинусное преобразование, в свою очередь, основано на быстром преобразовании Фурье.

Существует две вариации данного метода – простая и обычная. Работа алгоритма осуществляется следующим образом.

1. Уменьшение размера. Уменьшаем исходное изображение до размера 32x32.
2. Обесцвечивание.
3. Вычисление DCT. Над полученным серым изображением производим дискретное косинусное преобразование (1).
4. Уменьшение DCT. Берём верхний левый угол 8x8, сдвигаясь на один столбец вправо.
5. Вычисление порога. Ищем среднее арифметическое значение матрицы из предыдущего шага для простого метода, а для обычного – медиану.
6. Пороговая бинаризация. Для каждого цвета получаем 0 или 255. Если текущий цвет меньше «порога», то 0, иначе – 255.
7. Формирование хэша. Проходимся по матрице 32x32 и записываем нули и единицы (255) в строку, сверху вниз, слева направо.

Результат тестирования изображения рис. 1 с помощью данного алгоритма показал, что для «сжатого» по бокам зайца простой метод находит сходство примерно в 99% и разность хэшей всего в 7 битов. Обычный pHash показывает, что сходство изображений можно оценить так же в 99%, а разница между хэшами картинок составляет 9 битов. Сравним изображение с ирбисом (рис. 5). Простой pHash: сходства нет – 39% и расстояние между хэшами 622 бита. Другой метод указывает на больший процент схожести – 56% и 452 бита. Однозначно, и в том, и в другом случае можно уверенно утверждать, что изображения не похожи. Перейдём к изменениям яркости. У изображения с повышенной яркостью (рис. 7) похожесть оценивается примерно в 86% и разность хэшей 139 битов для простого метода, и для обычного варианта – 91% и 97 битов, соответственно. Схожесть «тусклого» зайца (рис. 8) и «обычного» (рис. 1) равна 99% и разница хэшей 8 битов, и 10 битов и так же 99% для простой вариации pHash. При сравнении исходного изображения рис. 1 с изображением рис. 11 алгоритм pHash не смог установить схожесть между ними – всего 83% и 178 битов (простой метод), 77% и 237 битов (обычный pHash), что мало для того, чтобы сказать, что картинки одинаковые. Авторами сделан вывод, что pHash плохо сравнивает засвеченные изображения и картинки с разными характеристиками яркости и контрастности.

В таблице 1 показаны вычисления всех сравнений с рис. 1.

Таблица 1. Результаты сравнения работы алгоритма на тестовом изображении рис. 1

| Рисунок | aHash | | dHash гор. | | dHash вер. | | pHash sim. | | pHash | |
|-----------|-------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|-------|--------|
| | % | Расст. | % | Расст. | % | Расст. | % | Расст. | % | Расст. |
| Ирбис | 56 | 28 | 44 | 36 | 66 | 22 | 39 | 622 | 56 | 452 |
| «Сжатый» | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 99 | 7 | 99 | 9 |
| «Яркий» | 95 | 3 | 94 | 4 | 97 | 2 | 86 | 139 | 97 | 97 |
| «Тусклый» | 100 | 0 | 98 | 1 | 98 | 1 | 99 | 10 | 99 | 8 |
| «Разный» | 61 | 25 | 92 | 5 | 92 | 5 | 83 | 178 | 77 | 237 |

Из таблицы 1 видно, что методы pHash отходят на второй план, так как помимо того, что это медленно работающие алгоритмы, они дают неверные ответы. Для дальнейшей работы был выбран алгоритм aHash, т.к. он работает быстрее, чем любой метод dHash, прост в реализации и позволяет избежать ложноположительных срабатываний.

Сервис сравнения изображений. В результате работы был создан проект «Image_Comparison». Интерфейс приложения приведен на рис. 34.



Рис. 34. Сервис сравнения изображений

База данных приложения. Приложение позволяет просмотреть все найденные изображения, т. к. информация о каждом запросе сохраняется в базе данных.

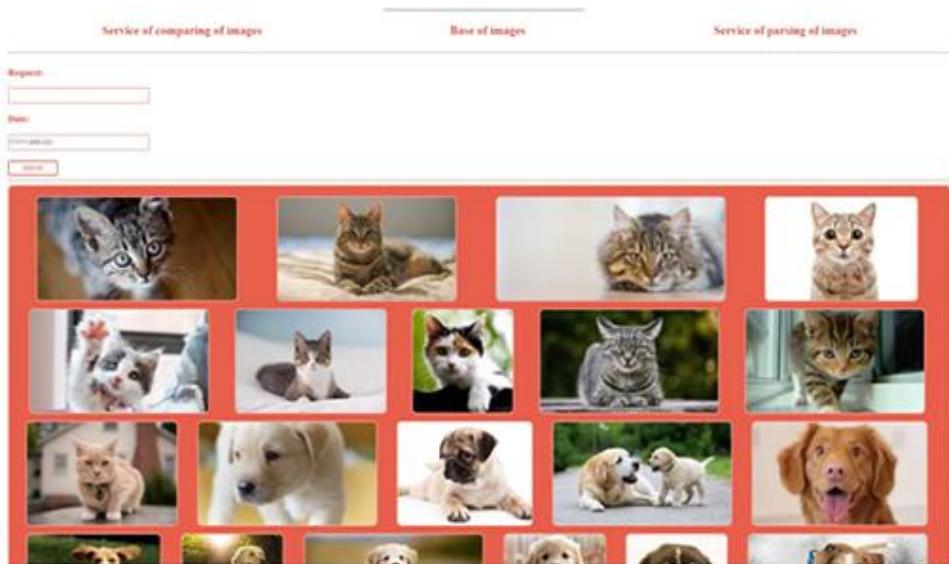


Рис. 35. Изображения из базы данных

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный сервис предназначен для использования в прикладных задачах по оценке влияния интернет-мемов на молодежную аудиторию в рамках проекта «Разработка программного комплекса для автоматического мониторинга влияния политических мемов на русскоязычный сегмент Интернета».

Сервис может использоваться самостоятельно, он позволяет формировать структурированные базы изображений и потоковой информации, а также проводится онто-семантический анализ текстовой информации, сопровождающей изображения.

4. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 21-011-31733 «Разработка программного комплекса для автоматического мониторинга влияния политических мемов на русскоязычный сегмент Интернета (этап - формирование базы данных для обучения нейросети)».

ЛИТЕРАТУРА

1. hardikvasa/google-images-download: Python Script to download hundreds of images from 'Google Images'. It is a ready-to-run code! – URL: <https://github.com/hardikvasa/google-images-download>
2. web scraping – Python – Download Images from google Image search? – Stack Overflow. – URL: <https://stackoverflow.com/questions/20716842/python-download-images-from-google-image-search>
3. Парсинг изображений из Google картинок | Zennolab – Сообщество профессионалов автоматизации. – URL: <https://zennolab.com/discussion/threads/parsing-izobrazhenij-iz-google-kartink.78081/>
4. scraping full size images from Google Images. – URL: <https://gist.github.com/genekogan/ebd77196e4bf0705db51f86431099e57>
5. atif93/google_image_downloader: Downloading any number of images for a search query. – URL: https://github.com/atif93/google_image_downloader
6. Architecture of Software-Hardware Complex for Searching Images in Database / V. Zakharov, A. Kirikova, V. Munerman, T. Samoilova. // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2019. – № 1. – С. 1735–1739.
7. A retrieval algorithm of encrypted speech based on short-term cross-correlation and perceptual hashing / Q. Zhang, L. Zhou, T. Zhang, D. Zhang. // Multimedia Tools and Applications. – 2019. – № 78. – С. 17825–17846.
8. Германчук М. С., Козлова М. Г. Распознавание, анализ и визуализация интернет-мемов // Математические методы распознавания образов: Тезисы докладов 19-й Всероссийской конференции с международным участием, г. Москва 2019 г. - М.: Российская академия наук, 2019. – С. 351-355.
9. Германчук М. С., Козлова М. Г., Лукьяненко В. А. Интеллектуализация обработки данных потока интернет-мемов // Материалы III Международной научной конференции «Осенние математические чтения в Адыгее». – Майкоп: изд-во АГУ, 2019. – С. 139-143.
10. Германчук М. С., Козлова М. Г., Лукьяненко В. А. Программные инструменты и технологии анализа потока интернет-мемов / Таврический вестник информатики и математики. – 2020. – № 3 (48). – С. 37-58.
11. Gabrielyan O. A., Lukyanenko V. A., Kozlova M. G., Gasparyan M. V., Gabrielyan T. O. (2021) Intellectualization Of The Sociometric Data Processing Of Internet Memes Within Virtual Communication Structure / International Scientific Forum «National Interest, National Identity and National Security» // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences. – Volume 102 - NININS 2020. – Pp. 274-278. – DOI 10.15405/epsbs.2021.02.02.35. (WoS).
12. Kozlova M. G., Lukianenko V. A., Germanchuk M. S. Development of the toolkit to process the Internet memes meant for the modelling, analysis, monitoring and management of social processes / In book “Recognition and Perception of Images. Fundamentals and Applications” Edited by Iftikhar B. Abbasov. – USA: Wiley, 2021. – Pp. 189-220. ISBN: 978-1-119-75055-0
13. Germanchuk M. S., Kozlova M. G., Lukianenko V. A. Some features of design of intelligent systems for processing the internet memes flow (2021) CEUR Workshop Proceedings, 2834, pp. 148-158. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2834>

14. Germanchuk M. S., Kozlova M. G., Lukianenko V. A. Identification and Prediction of an Internet Meme Flow Lifecycle (2021) CEUR Workshop Proceedings, 2914, pp. 112-123. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2914>

REFERENCES

1. hardikvasa / google-images-download: Python Script to download hundreds of images from 'Google Images'. It is a ready-to-run code! - URL: <https://github.com/hardikvasa/google-images-download>
2. web scraping - Python - Download Images from google Image search? - Stack Overflow. - URL: <https://stackoverflow.com/questions/20716842/python-download-images-from-google-image-search>
3. Parsing Images from Google Images | ZennoLab - A community of automation professionals. - URL: <https://zennolab.com/discussion/threads/parsing-izobrazhenij-iz-google-kartink.78081/>
4. scraping full size images from Google Images. - URL: <https://gist.github.com/genekogan/ebd77196e4bf0705db51f86431099e57>
5. atif93 / google_image_downloader: Downloading any number of images for a search query. - URL: https://github.com/atif93/google_image_downloader
6. Architecture of Software-Hardware Complex for Searching Images in Database / V. Zakharov, A. Kirikova, V. Munerman, T. Samoilova. // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICoRus). - 2019. - No. 1. - P. 1735–1739.
7. A retrieval algorithm of encrypted speech based on short-term cross-correlation and perceptual hashing / Q. Zhang, L. Zhou, T. Zhang, D. Zhang. // Multimedia Tools and Applications. - 2019. - No. 78. - P. 17825–17846.
8. Germanchuk M.S., Kozlova M.G. Recognition, analysis and visualization of Internet memes // Mathematical methods of pattern recognition: Abstracts of the 19th All-Russian conference with international participation, Moscow, 2019 - Moscow: Russian Academy of Sciences , 2019 .-- S. 351-355.
9. Germanchuk M. S., Kozlova M. G., Lukyanenko V. A. Intellectualization of data processing of the stream of Internet memes // Proceedings of the III International Scientific Conference "Autumn Mathematical Readings in Adygea". - Maykop: ASU publishing house, 2019 .-- S. 139-143.
10. Germanchuk M.S., Kozlova M.G., Lukyanenko V.A. Program tools and technologies for analyzing the flow of Internet memes / Tavrichesky Bulletin of Informatics and Mathematics. - 2020. - No. 3 (48). - S. 37-58.
11. Gabrielyan OA, Lukyanenko VA, Kozlova MG, Gasparyan MV, Gabrielyan TO (2021) Intellectualization Of The Sociometric Data Processing Of Internet Memes Within Virtual Communication Structure / International Scientific Forum "National Interest, National Identity and National Security" // The European Proceedings of Social & Behavioral Sciences. - Volume 102 - NININS 2020. - Pp. 274-278. - DOI 10.15405 / epsbs.2021.02.02.35. (WoS).
12. Kozlova M. G., Lukianenko V. A., Germanchuk M. S. Development of the toolkit to process the Internet memes meant for the modeling, analysis, monitoring and management of social processes / In book "Recognition and Perception of Images. Fundamentals and Applications" Edited by Iftikhar B. Abbasov. - USA: Wiley, 2021. - Pp. 189-220. ISBN: 978-1-119-75055-0
13. Germanchuk M. S., Kozlova M. G., Lukianenko V. A. Some features of design of intelligent systems for processing the internet memes flow (2021) CEUR Workshop Proceedings, 2834, pp. 148-158. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2834>
14. Germanchuk M. S., Kozlova M. G., Lukianenko V. A. Identification and Prediction of an Internet Meme Flow Lifecycle (2021) CEUR Workshop Proceedings, 2914, pp. 112-123. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2914>

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ

А. А. Васильченко, И. В. Керимов, М. Э. Магарамов

Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого, Серпухов, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены результаты оценивания качества сегментации объектов по изображениям в условиях их зашумленности. Приведены результаты исследования показателей качества детекторов сегментации в зависимости от степени зашумления и вида синтезируемых шумов.

Ключевые слова: сегментация, детектор Кэнни, детектор Марра-Хилдрета, чувствительность, специфичность, расстояние Хаусдорфа, ROC-кривая.

RESEARCH OF SEGMENTATION METHODS

A. A. Vasilchenko, I. V. Kerimov, M. E. Magaramov

Branch of Military academy of Rocket Strategic forces of a name Peter the Great, Serpuhov, Russian Federation

Abstract. In article results of estimation of quality of segmentation of objects under images in the conditions of noise are presented. Results of research of indicators of quality of detectors of segmentation depending on degree of noise and a kind of synthesised noise are resulted.

Keywords: segmentation, canny detector, Marr-Hildreth detector, sensitivity, specificity, Hausdorff distance, ROC-curve.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оценивание качества сегментации можно рассматривать с точки зрения нескольких парадигм. Справедливо рассмотрение детектора сегментации как бинарного классификатора, и в то же время справедливо рассмотрение результатов сегментации (как карт признаков) в точки зрения теории множеств [1-4]. Появление шумов различных видов приводит к появлению как «ложных» пикселей, так и к пропуску принадлежащих объектам. Сложность текстур динамических картин на изображениях, фиксируемых в ходе наблюдений за исследуемыми объектами (ИО) (образцов) и появление различных дефектов могут существенно менять карты признаков, не позволяя устойчиво выделить контур и геометрическую конфигурацию объектов.

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для оценивания качества сегментации осуществлялось сравнение изображений с эталонной разметкой с разметкой, полученной детекторами сегментации, при этом качество сегментации оценивалось следующими метриками (параметрами) [5]:

- 1) простой коэффициент совместимости (M_1),
- 2) индекс Тверски (M_2),
- 3) коэффициент Серенсена (M_3),
- 4) расстояние Хаусдорфа (M_4).

Введем необходимые обозначения: пусть N_{00} - общее количество пикселей, для которых эталонная и полученная алгоритмом разметки равны «0»; N_{11} - общее

количество пикселей, для которых эталонная и полученная алгоритмом разметки равны «1»; N_{10} - общее количество пикселей, для которых эталонная разметка принимает значение «1», а полученная алгоритмом –«0», N_{01} - общее количество пикселей, для которых эталонная разметка принимает значение «0», а полученная алгоритмом «1».

Оценивание метрики M_1 осуществляется по выражению:

$$M_1 = \frac{N_{00} + N_{11}}{N_{00} + N_{01} + N_{10} + N_{11}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

Метрика M_2 - индекс Тверски – позволяет регулировать значение коэффициента α и β , на которые соответственно умножаются количества «ложных срабатываний» и «пропусков целей», получаемых в результате работы алгоритмов:

$$M_2 = \frac{N_{11}}{N_{11} + \alpha N_{01} + \beta N_{01}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

При вычислении индекса Тверски были заданы параметры $\alpha=0,4$, и $\beta=0,6$.

Метрика M_3 – коэффициент Серенсена – является разновидностью метрики индекс Тверски, полученной при коэффициенте $\alpha=\beta=0,5$. В данном случае штрафы за «ложные срабатывания» и «пропуски элементов» совпадают. Оценивание метрики M_3 осуществляется по выражению:

$$M_3 = \frac{N_{11}}{N_{11} + 0,5 \cdot N_{01} + 0,5 \cdot N_{01}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

Метрика M_4 – расстояние Хаусдорфа – является дистанционной мерой сходства двух изображений и рассматривает все изображение в целом, а не отдельные участки совпадения элементов:

$$M4 = (A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)), \quad (4)$$

где $h(A, B) = \max(\min(||a-b||))$, A - эталонная разметка изображения; B – результат сегментации изображения алгоритмом; a, b – точки $a \in A, b \in B, ||a-b||$ – евклидово расстояние.

В качестве исследуемых детекторов были рассмотрены: детектор Марра-Хилдрета, детектор Кэнни, детектор Оцу. В качестве накладываемых на изображения объектов использованы со среднеквадратическим отклонением σ (СКО) (степенью зашумления) в диапазоне от 0.01 до 0.9 (где $\sigma=\Delta/256$): аддитивный «белый» гауссовский шум, импульсный шум, мультиплективный шум.

При решении задачи сегментации, как распределения значений яркости пикселей по двум классам, что эквивалентно задаче бинарной классификации, часто требуется оценить качество используемых классификаторов (методов сегментации) с целью сравнения и выявления наилучшего для дальнейшего применения на новых данных и выбора наиболее эффективного из них в условиях воздействующих шумов.

Работа классификатора (метода сегментации) может быть охарактеризована его достоверностью, то есть способностью принимать верные решения. Оценку достоверности классификатора, как правило, можно получить экспериментально.

Существуют такие критерии качества классификатора, как ошибки первого и второго рода, *Accuracy*, *AUC*, чувствительность и специфичность классификатора, матрицу неточностей, матрицу штрафов, ROC-кривые и коэффициент Джини.

Показатель *Accuracy* (точность), определяет долю верных прогнозов среди всех возможных прогнозов принадлежности или непринадлежности конкретного пикселя ОИ (метрика M_1). Чувствительность R (*recall*, *sensitivity*, отзыв) показывает долю верно классифицированных пикселей на принадлежность ИО на изображениях. Специфичность S (*specificity*) показывает долю верно классифицированных пикселей на непринадлежность ИО на изображениях.

Следует отметить, что отдельное использование таких показателей, как чувствительность и специфичность, в том числе производных показателей, а также ошибок первого и второго рода не является наилучшим критерием эффективности классификатора, поскольку каждый из них преследует свои цели и показывает сегментацию, как бинарную классификацию, ИО только с одной стороны. Для чего возможен анализ построения ROC-кривой (*receiver operating characteristic*, кривая ошибок) используемой для сравнения качества бинарной классификации нескольких классификаторов (детекторов) и показывает зависимость между долей верно сегментированных пикселей на принадлежность ИО (чувствительности) и долей верно классифицированных пикселей на непринадлежность к ИО. Вид ROC-кривой, графиков зависимости чувствительности и специфичности представлен на рисунках 1-3.

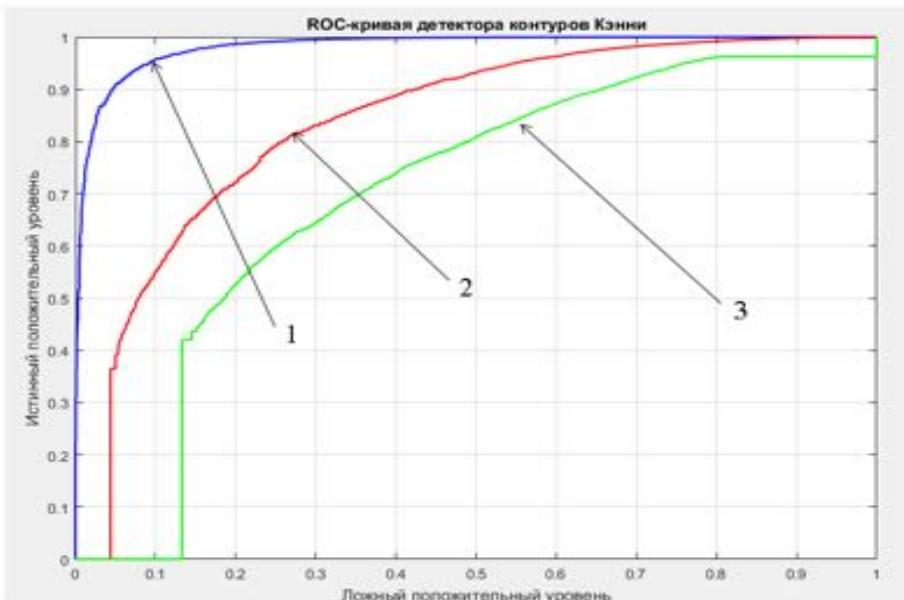


Рис. 1. ROC-кривая детектора Кэнни при значении порога обнаружения принадлежности к ИО $T=120$ и степени зашумленности изображений σ :

- 1) от значений степени зашумленности изображений $\sigma=0,05$;
- 2) от значений степени зашумленности изображений $\sigma=0,15$;
- 3) от значений степени зашумленности изображений $\sigma=0,25$

Поскольку визуальное сравнение ROC-кривых не всегда позволяет выявить наиболее эффективный классификатор, часто применяют метрику *AUC* (*area under curve*), которая представляет собой площадь под ROC-кривой и определяет вероятность

того, что классификатор присвоит больший вес в случае принадлежности пикселя ИО на изображениях, нежели в случае его непринадлежности.

3. ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Оценивания рассмотренные метрики можно в целом оценить качество сегментации траекторных снимков для рассмотренных типов детекторов и моделируемых типов шумов. Рассмотрим более подробно процесс оценивания качества сегментации траекторных снимков.

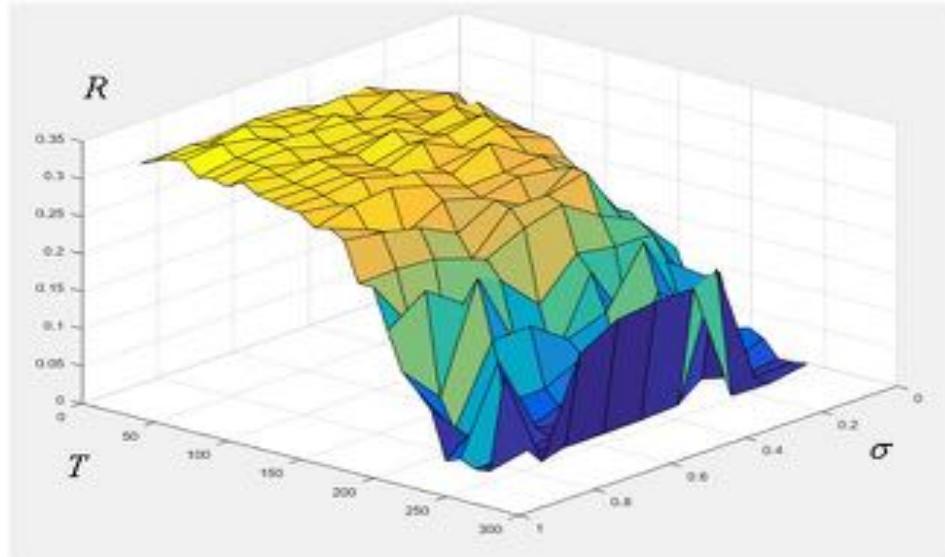


Рис. 2. Трехмерный график зависимости чувствительности R от значений степени зашумленности изображений σ и значения порога обнаружения принадлежности к ИО T

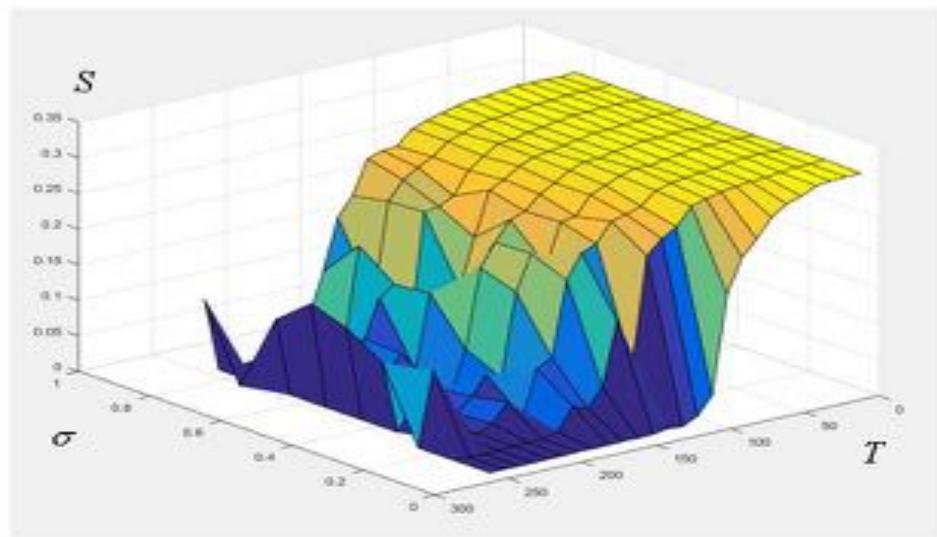


Рис. 3. Трехмерный график зависимости специфичности S от значений степени зашумленности изображений σ и значения порога обнаружения принадлежности к ИО T

В ходе имитационного моделирования процесса сегментации изображений ВО детекторами Кэнни и Маара-Хилдрета в условиях накладываемых аддитивных, импульсных и мультиплекативных шумов были получены оценки ключевых

показателей качества процесса сегментации (метрики M_1 и AUC). Результаты оценивания метрик M_1 и AUC представлены на рисунках 4-7.

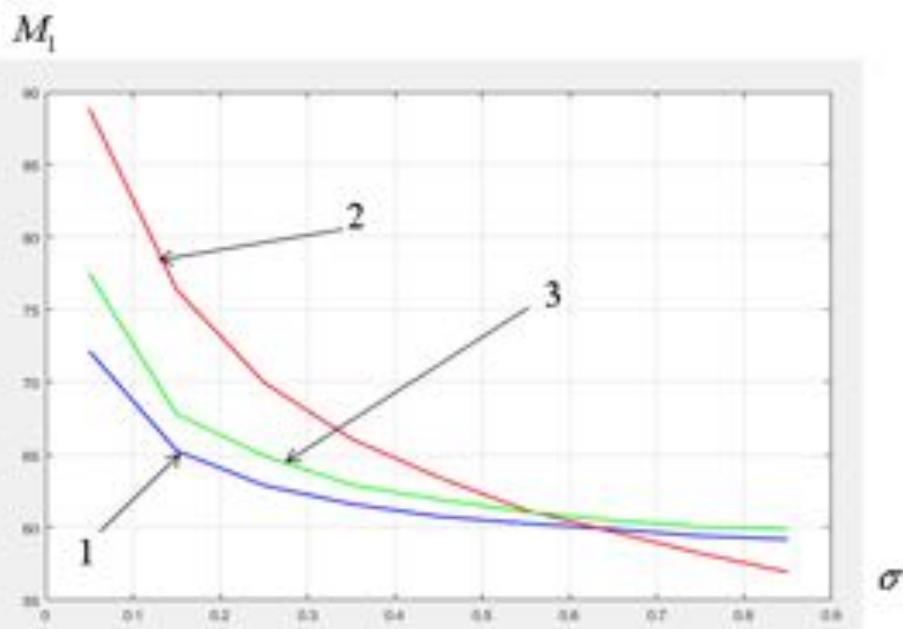


Рис. 4. Графики зависимости метрики M_1 от значений степеней зашумленности изображений σ для детектора Маара-Хилдрета для различных видов шумов:
1) АБГШ; 2) импульсный шум; 3) мультипликативный шум

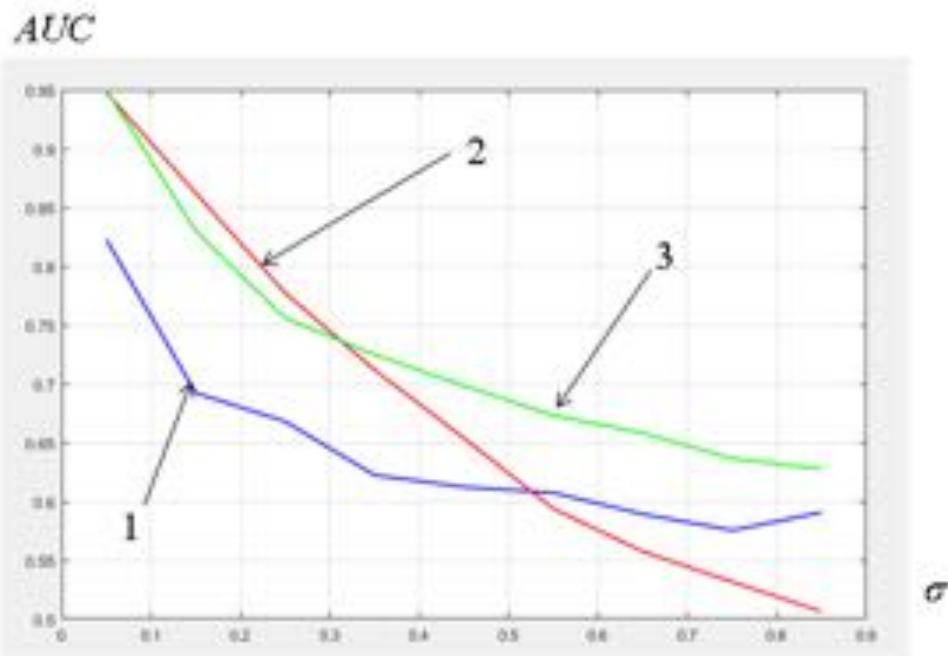


Рис. 5. График зависимости метрики AUC от значений степеней зашумленности изображений σ для детектора Маара-Хилдрета для различных видов шумов:
1) АБГШ; 2) импульсный шум; 3) мультипликативный шум

Как видно из полученных графиков наименьшие значения метрики M_1 для детектора Маара-Хилдрета достигаются при наложении АБГШ (данний вид шума является наиболее неблагоприятным) до значений $\sigma < 0.65$; далее наименьшие значения

метрики M_1 достигаются при наложении импульсного шума. Наибольшие значения метрики M_1 достигаются при наложении импульсного шума до значений $\sigma < 0,65$.

Наименьшие значения метрики AUC для детектора Маара-Хилдрета достигаются при наложении АБГШ (данный вид шума является наиболее неблагоприятным до значений $\sigma < 0,53$; далее наименьшие значения метрики AUC достигаются при наложении импульсного шума. Наибольшие значения метрики AUC достигаются при наложении импульсного шума до значений $\sigma < 0,31$, далее наибольшие значения метрики AUC достигаются при наложении мультипликативного шума.

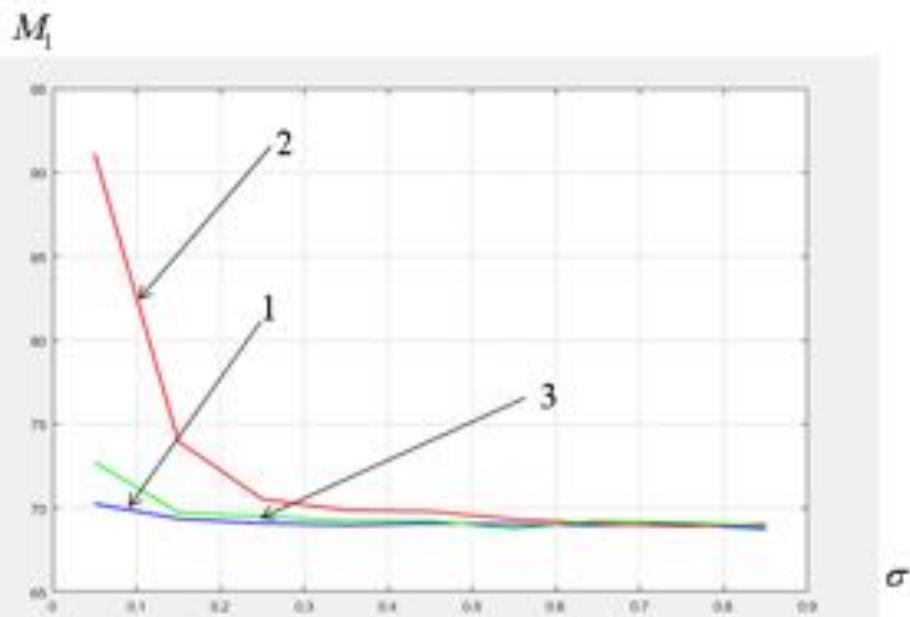


Рис. 6. График зависимости метрики M_1 от значений степеней зашумленности изображений σ для детектора Кэнни для различных видов шумов:

1) АБГШ; 2) импульсный шум; 3) мультипликативный шум

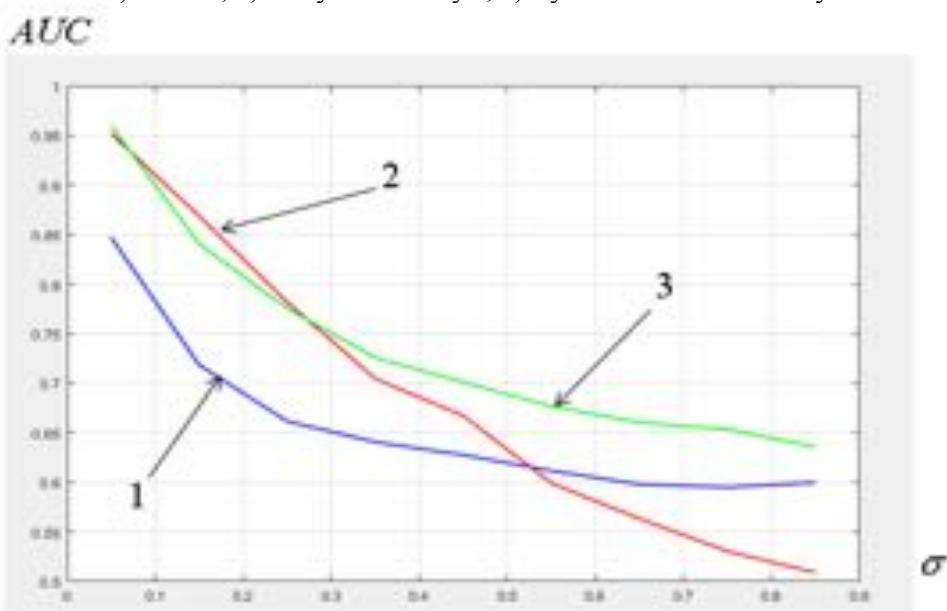


Рис.7. График зависимости метрики AUC от значений степеней зашумленности изображений σ для детектора Кэнни для различных видов шумов:

1) АБГШ; 2) импульсный шум; 3) мультипликативный шум

Наименьшие значения метрики M_1 для детектора Кэнни достигаются при наложении АБГШ (данного вид шума является наиболее неблагоприятным. Наибольшие значения метрики M_1 достигаются при наложении импульсного шума. Наименьшие значения метрики AUC для детектора Кэнни достигаются при наложении АБГШ (данного вид шума является наиболее неблагоприятным до значений $\sigma < 0,53$; далее наименьшие значения метрики AUC достигаются при наложении импульсного шума. Наибольшие значения метрики AUC достигаются при наложении импульсного шума до значений $\sigma < 0,27$, далее наибольшие значения метрики AUC достигаются при наложении мультипликативного шума.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в условиях рассматриваемых видов шумов и различной степени зашумленности изображений наилучшим качеством сегментации изображений обладает детектор Кэнни.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васенков, Д. В. Методы обучения искусственных нейронных сетей. - Информатизация образования, 2007. – С. 20-29.
2. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Осоксов М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
3. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1007 с.
4. Форсайт, Д. А. Компьютерное зрение. Современный подход - М.: Вильямс, 2004. - 928 с.
5. Среднякова О.С., Степанова О.А., Лебедев О.А., Хрящев В.В.. Применение гистограммного анализа изображений для решения задачи выделения воздушных объектов по траекторной информации [Текст] / «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2019); Доклады; Серия: науч. конф. Рос. науч.-техн. общ. радиотехн., электрон. и связи им. А.С. Попова. – М.: ООО «БРИС-М», 2019. – Вып. XXI-2. – С. 529–533.

REFERENCES

1. Vasenkov, D. V. Methods of training artificial neural networks. - Informatization of Education, 2007. - pp. 20-29.
2. Vizilter Yu. V., Zheltov S. Yu., Bondarenko A.V., Ososkov M. V., Morzhin A.V. Image processing and analysis in machine vision problems: A course of lectures and practical classes. - Moscow: Fizmatkniga, 2010 – - 672 p.
3. Gonzalez, R. Digital image processing. - Moscow: Technosphere, 2005 – - 1007 p.
4. Foresight, D. A. Computer vision. Modern approach-Moscow: Williams, 2004. - 928 p.
5. Srednyakova O. S., Stepanova O. A., Lebedev O. A., Khryashchev V. V.. Application of histogram image analysis to solve the problem of selecting air objects from trajectory information [Text] / "Digital signal processing and its application" (DSPA-2019); Reports; Series: scientific Conference of the Russian Scientific-Technical Society. radio engineering, electron. and communications named after A. S. Popov. - M.: LLC "BRIS-M", 2019. - Issue XXI-2. - pp. 529-533.

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ БАНКА ДАННЫХ ДАЛЬНОСТНО-ДОПЛЕРОВСКИХ ПОРТРЕТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ЦЕЛЬЮ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ

В. А. Кузнецов¹, Н. А. Меныхих², С. О. Митичкин²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»), Воронеж, Россия

²Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА» (ФГАУ ВИТ «ЭРА»), Анапа, Россия

Аннотация. Описана методика создания банка данных динамических математических моделей в формате STL и предложен механизм создания нейронной сети, позволяющей достоверно обнаружить и распознать воздушную цель.

Ключевые слова: радиолокационная станция, банк данных, воздушное судно, нейронная сеть.

METHODOLOGY OF OBTAINING A DATA BANK OF JOINT DOPPLER RANGE PORTRAITS OF AIRCRAFT FOR THE PURPOSE OF TEACHING NEURAL NETWORKS

V.A. Kuznetsov¹ S. O. Mitichkin², N. A. Menshikh²

¹Military educational and scientific center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin ", Voronezh

²Federal State Autonomous Institution "Military Innovative Technopolis" ERA ", Anapa

Annotation. The technique of creating a databank of dynamic mathematical models in the STL format is described and a mechanism for creating a neural network that allows reliable detection and recognition of an air target is proposed.

Keywords: radar station, data bank, aircraft, neural network.

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день для обнаружения и сопровождения воздушной цели используются как наземные, так и бортовые радиолокационные станции (РЛС). Они позволяют определить дистанцию до цели, её скорость и размеры благодаря полученным дальностно-доплеровским портретам, но не дают возможность отличать друг от друга воздушные цели, имеющие одинаковые размеры, например, самолёт F-22 Raptor от самолета F-35, а также не смогут указать данные, указывающие на наличие или отсутствие внешней полезной нагрузки. Решение данной задачи необходимо для выбора приоритетной цели в ходе воздушного боя, а также для своевременного принятия решения системами ПВО.

Для решения задачи определения типа воздушного судна бортовыми и наземными РЛС необходимо иметь информацию о сигнале, который отражается от того или иного воздушного судна, на основе которой можно сделать выводы о некоторых характеристиках воздушной цели. Чтобы получить требуемый сигнал, можно пойти двумя путями: первый – это создать уменьшенную копию модели воздушного судна, которая имеет такую же геометрию и свойства материала, что и реальное судно и затем облучить данную модель электромагнитным излучением, зафиксировав отражённый

сигнал. Данный способ отличается трудоемкостью и дороговизной, но дает исчерпывающие данные, необходимые для определения типа воздушного судна. Второй способ заключается в математическом моделировании электромагнитных процессов взаимодействия с трехмерной моделью воздушного судна. Данный способ не требует значительных денежных и временных ресурсов, но предоставляет менее достоверные данные, которые, впрочем, являются также исчерпывающими для определения типа воздушного судна. Сегодня широкое распространение получил именно способ натурных экспериментов с уменьшенными копиями исследуемых воздушных судов ввиду изученности и наличия широкой как материально-технической, так и теоретической базы. Моделирование электромагнитных процессов является приоритетным направлением развития как для России, так и для мира, так как оно позволит значительно уменьшить время выпуска новых моделей наземной и воздушной техники.

Целью данной работы является описание имеющихся наработок в области распознавания типа воздушного судна по дальностно-доплеровскому портрету, разбор способов и методик получения необходимых дальностно-доплеровских портретов, а также определение методики получения данных, необходимых для обучения нейронной сети, которая будет решать задачу распознавания типа воздушного судна и определения наличия у него внешней полезной нагрузки.

2. ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К БОРТОВЫМ РЛС

В варианте концепции всестороннего распознавания состояний воздушных целей [1] отмечается, что для поддержки принятия решений летчиком и оптимизации наведения ракет существует острая необходимость в расширении информационных возможностей бортовой радиолокационной станции (БРЛС)истребителя.

В работах [1–4] предлагается расширение функциональных возможностей БРЛС и улучшение ее точностных характеристик за счет реализации на бортуистребителя новых алгоритмов распознавания таких состояний групповых воздушных целей (ГВЦ), как их численного и типового (классового) составов, функционального назначения самолетов в группе по принципу «ведущий–ведомый», боевого порядка (пеленг, клин и т.д.), характера их полета по принципу «стационарный полет – маневр группой – маневр в группе», видов оказываемого информационного противодействия (например, по скорости и/или по дальности помехи), а также фактов и количества выпущенных ракет.

Важность и необходимость наличия этой информации на бортуистребителя подтверждается результатами анкетирования летного состава [1]. Однако, информационные возможности БРЛС современныхистребителей позволяют распознавать лишь тип летательного аппарата из класса «самолет с турбореактивным двигателем», численный состав группы до 10 целей, а также факты пуска ракет, что представляется недостаточным в сравнении с реальными вариантами воздушной целевой обстановки.

Таким образом, информационные возможности современных БРЛС не в полной мере соответствуют предъявляемым требованиям.

Результаты летно-экспериментальных исследований и анализ информационных свойств радиолокационных сигналов, отраженных от реальных воздушных целей, позволили выявить устойчивые информационные признаки, подтверждающие принципиальную возможность распознавания требуемых состояний [5].

Основу перспективных алгоритмов [1–4] составляет многогипотезная многомерная линейная калмановская фильтрация [3], строящаяся на априорных сведениях в виде динамических моделей эволюции функционально-связанных координат (ФСК) по двухэтапной схеме «прогноз–коррекция». При этом, под ФСК понимаются дальности до элементов ГВЦ, радиальные скорости и ускорения взаимного сближения самолетов группы и истребителя-носителя БРЛС, а также дистанции между самолетами в боевом порядке.

Специфической особенностью решения задачи распознавания в вышеупомянутом смысле является необходимость на основе одних и тех же результатов наблюдений совместно вынести два решения – указать одно из возможных состояний ГВЦ и оценить ФСК. Эта особенность предопределила применение в многогипотезном подходе положений теории совместного оценивания и различия сигналов [6], позволившее учесть зависимость как размерности вектора фазовых координат, подлежащих оцениванию, так и физического смысла отдельных его компонент от состояния ГВЦ. Однако, следствием применения в многогипотезном подходе теории линейной калмановской фильтрации и теории совместного оценивания и различия сигналов явились следующие ограничения и допущения:

- предполагается, что состояние ГВЦ не меняется на интервале времени наблюдения, но может изменяться при переходе от одного интервала к другому, если рассматривается их последовательность [6];
- для используемой вероятностной модели характерна статистическая независимость состояний на различных интервалах наблюдения [6];
- не учитываются априорные сведения о динамике распознаваемых состояний ГВЦ;
- не учитывается дополнительная статистическая взаимосвязь между ФСК и состоянием ГВЦ.

Таким образом, перспективные методы и алгоритмы [1–4] распознавания не в полной мере способны реализовать потенциальные возможности БРЛС по достоверности и количеству получаемой в результате распознавания информации.

3. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для работы устройств распознавания используют группы специфических признаков разной информативности. Скалярные признаки, как правило, просты в обращении, но слабоинформационны. Векторные же признаки требуют особо сложных алгоритмов обнаружения, но вносят более ощутимый вклад в достоверность распознавания.

В локационных системах для распознавания воздушных судов (ВС) стремятся использовать такие векторные признаки как радиолокационные портреты. В этом

смысле для типовых РЛС основанных на сигналах с ограниченным спектром [3]. Скептическое отношение к дальностным портретам (ДП) как признаку идентификации уже неоднократно развеивалось результатами экспериментов, в том числе и натурных. Была показана возможность различения самолетов разных размеров по протяженности ДП, то есть пригодность ДП для классификации [4]. Однако векторные признаки, будучи высокоинформативными, должны решать более фундаментальные задачи, к которым относится распознавание (различение объектов равных размеров, но различной архитектуры).

Для исследования информационных возможностей ДП проведены натурные эксперименты по проверке устойчивости их структуры к изменению частоты зондирования и по построению гистограмм вторичных различительных признаков ДП, используемых при идентификации.

Первая серия натурных экспериментов показала, что при абсолютном расхождении отражательных характеристик ВО, сформированных в идентичных условиях сопровождения на разных частотах зондирования, структура формируемых из отраженных характеристик портретов во многом схожа и изменяется по единому закону. В качестве подтверждения на рисунке 1 продемонстрирована динамика (процесс эволюций) структуры ДП аэробуса А-319, сопровождаемого двумя локаторами с разносом частот порядка 110 МГц.

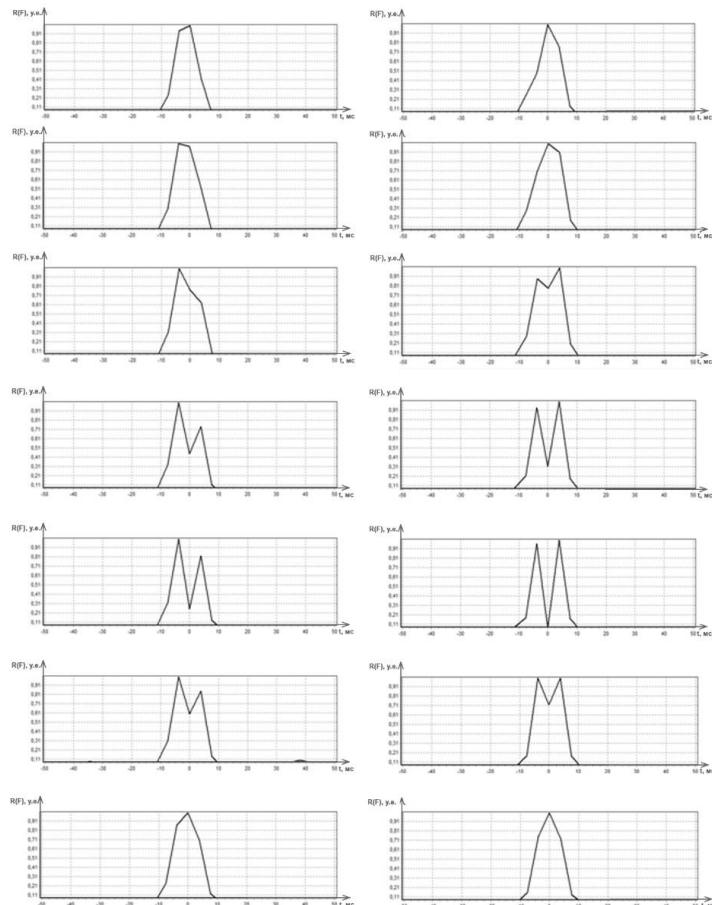


Рис.1. Синхронная динамика ДП в локаторах с разными частотами

Время синтезирования составляло 0,256 с. Ракурс полета А-319 был близок к $\pi/2$. Исследуемое время формирования ДП составляло 2 с. Левой и правой колонкам П (рисунок 1) соответствует периодичное изменение времени с шагом 0,25 с для двух, не совпадающих по частоте радаров. Легко заметить, что «одногорбая» структура ДП в обоих локаторах сначала разделяется на 2 отклика, а затем синхронно сливаются в один отклик. При этом абсолютного совпадения ДП не зарегистрировано. Моменты разделения и слияния откликов в ДП также имеют расхождения, однако столь малое, что оно не может повлиять на результаты идентификации.

Таким образом, натурными экспериментами [1] подтверждены устойчивость структуры ДП к изменению частоты зондирования и возможность проведения идентификации ВС одинаковых габаритов в пределах классов, что отрицалось ранее некоторыми исследователями.

4. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к нейросетевым методам и построенным на их базе нейрокомпьютерам. Исследования по искусственным нейронным сетям (НС) связаны с тем, что способ обработки информации человеческим мозгом в корне отличается от методов, применяемых обычными цифровыми компьютерами. Мозг представляет собой чрезвычайно сложный, нелинейный, параллельный компьютер (систему обработки информации) обладает способностью организовывать свои структурные компоненты, называемые нейронами, так, чтобы они могли выполнять конкретные задачи (такие как распознавание образов, обработку сигналов органов чувств, моторные функции) во много раз быстрее, чем могут позволить самые быстродействующие современные компьютеры.

Нейронной сетью является громадный распределенный параллельный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки. Процесс обучения нейронных сетей производится в определенной последовательности, которая называется алгоритмом обучения. Эта процедура выстраивает в синаптические веса НС для обеспечения необходимой структуры взаимосвязей нейронов.

Изменение синаптических весов представляет собой традиционный метод настройки НС. Этот подход очень близок к теории линейных аддитивных фильтров, которая уже давно применяется в различных областях деятельности человека. Однако НС могут изменять собственную топологию. Это обусловлено тем фактом, что нейроны в человеческом мозге постоянно отмирают, а новые синаптические связи постоянно создаются.

Совершенно очевидно, что свои возможности НС приобретают, во-первых, благодаря распараллеливанию обработки информации и, во-вторых, способности самообучаться. Под термином обобщение понимается способность получать обоснованный результат на основании данных, которые не встречались в процессе обучения. Эти свойства позволяют НС решать сложные (масштабные) задачи, которые на сегодняшний день считаются трудноразрешимыми.

Использование НС обеспечивает следующие полезные свойства систем:

1. Нелинейность.
2. Отображение входной информации в выходную.
3. Адаптивность.
5. Отказоустойчивость.
6. Масштабируемость.
7. Единообразие анализа и проектирования.

В отличие от классических методов обработки информации, базирующихся на изучении и априорном задании более или менее сложной модели процесса или системы, нейросети сами формируют модель явления в процессе обучения, т.е. практически не требуют априорных данных о модели. После обучения такие системы могут достигать потенциальных пределов качества функционирования при решении задач обнаружения, разрешения-сверхразрешения, оценки параметров сигналов, распознавания образов.

Таким образом, применение НС является одним из наиболее перспективных путей повышения эффективности и сокращения сложности системы распознавания радиолокационных целей (РЛЦ).

5. МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ БАНКА ДАННЫХ СОВМЕСТНЫХ ДАЛЬНОСТНО-ДОПЛЕРОВСКИХ ПОРТРЕТОВ

Для работы нейросети необходима достаточно большая обучающая выборка, на которой будет производиться обучение и проверка работы нейросети. В качестве обучающей выборки для решения задачи распознавания типа воздушного судна, предлагается использовать сигнал, отраженный от воздушной цели и представленный в ходе обработки РЛС в виде дискретных отсчетов аналогового сигнала.

Для того, чтобы синтезировать требуемый сигнал необходимо решить ряд задач:

- создать достоверную 3D модель исследуемого воздушного судна;
- замоделировать движение всех подвижных частей исследуемого воздушного судна;
- рассчитать эффективную площадь рассеивания (ЭПР) исследуемого воздушного судна при заданном положении подвижных частей в фиксированный момент времени с заданного угла обзора;
- рассчитать векторное значение скоростей движения воздушной цели и его подвижных частей для дальнейшего моделирования эффекта вторичной доплеровской модуляции [6-8];
- замоделировать эффект вторичной доплеровской модуляции, с учетом отражения и переотражения электромагнитной волны [8-10];

После выполнения выше указанных процедур необходимо получить дискретные отсчеты аналогового сигнала для данного положения подвижных частей ВС с целью дальнейшего обучения нейронной сети, что дает возможность создать сколь угодно большой банк данных, размер которого ограничивается лишь временем, отводимым для его формирования и возможностями вычислительной системы.

3D-модели некоторых ВС можно найти в свободном доступе в сети Интернет, но их, как правило, требуется доработать для того, чтобы можно было выделить участок модели, движение которого необходимо замоделировать, как отдельный, не связанный с другими. Так же, немаловажным фактором является необходимость представления модели в фацетном виде формата .STL. Пример доработанной трехмерной фацетной модели беспилотного летательного аппарата (БПЛА) формата .STL показан на рисунке 2.

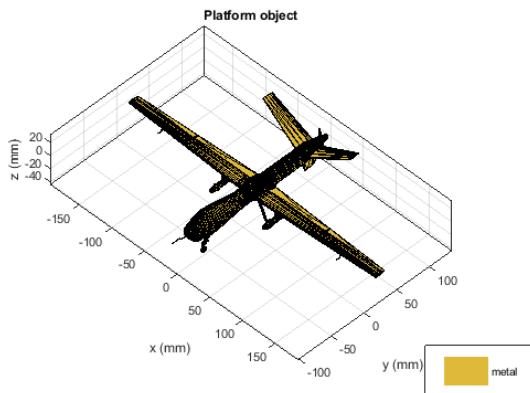


Рис.2. Доработанная трехмерная фацетная модель БПЛА Predator

После того, как была получена и доработана достоверная 3D модель требуемого формата, необходимо замоделировать движение подвижных частей ВС. Для этой цели была разработана программа, включающая в себя несколько модулей, первый из которых решает задачу разбиения трёхмерной фацетной модели формата .STL на объекты. Данный модуль позволяет получить несколько фацетных моделей, которые все вместе образуют исходную трёхмерную модель. Второй модуль решает задачу выделения одной из подвижных частей фацетной модели по клику мыши и считыванию координат клика. Далее, по указанным координатам, которым определяются вершины ближайшего фацета, исходя из которых определяется номер фацетной модели из общего массива. Третий модуль решает задачу вращения заданных фацетных моделей с помощью матрицы вращения с заданным шагом, стартовым и конечным углами вращения. Разработанная программа позволяет выполнить задачу моделирования движения подвижных частей заданной модели ВС формата .STL, что необходимо для получения достоверного дальностно-доплеровского портрета.

После того, как было замоделировано движение подвижных частей ВС, необходимо рассчитать ЭПР воздушной цели с назначенного ракурса облучения РЛС. Для этого нужно замоделировать процесс распространения ЭМВ, с учетом условий окружающей среды, процесс отражения ЭМВ от исследуемого ВС с учетом радиопоглощающего материала (РПМ) и радиопоглощающего покрытия (РПП) и с учетом геометрии ВС. Все поставленные задачи имеется возможность решить в модуле MATLAB Phased Array System Toolbox. Для работы данного модуля необходимо задать: позицию и мощность наземной РЛС, позицию и траекторию полёта ВС, помеховую составляющую окружающей среды, показатели преломления, поглощения и отражения РПП и РПМ воздушного судна. После настройки всех необходимых параметров можно

переходить к процессу моделирования и получить зависимость ЭПР от угла облучения ВС.

Получив необходимую зависимость ЭПР от угла облучения, необходимо осуществить к процессу моделирования эффекта вторичной доплеровской модуляции. Для этого требуется определить видимые фацеты с заданной позиции РЛС под заданным углом облучения. Пример сферы видимости подвижных частей объекта исследования показан на рисунке 4. После того, как были определены углы, с которых видны подвижные части, следует рассчитать векторные составляющие скоростей движения заданных подвижных частей ВС в глобальной системе координат, затем передать рассчитанные векторные составляющие скоростей и полученные значения ЭПР заданных подвижных частей в систему Phased Array System Toolbox, которая позволит замоделировать распространение ЭМВ и прием отраженного сигнала.

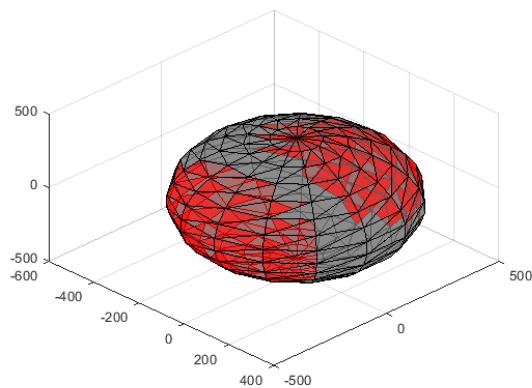


Рис.4. Сфера видимости заданных деталей ВС

Дальностно-доплеровские портреты, полученные в ходе указанной ранее методики и станут обучающей выборкой для обучения нейронной сети. Время для формирования одного дальностно-доплеровского портрета зависит от размеров и качества трехмерной модели воздушного судна, так как в ходе работы программы расчета ЭПР и формирования доплеровского портрета выполняется расчёт координат всех фацетов, формирующих трехмерную модель заданного ВС. Ввиду того, что чем больше и качественнее модель ВС, тем больше фацетов формируют данную модель, что и определяет увеличение времени работы программы. Время для расчета и формирования одного ДП составляет порядка 10 сек–30 сек. Для получения выборки со всех углов обзора РЛС с угловым шагом 1 градус, в зависимости от мощности вычислительной машины потребуется время порядка 45 мин–4 час. В ходе изменения положения подвижных частей изменится картина отраженного сигнала и получатся новые наборы данных для результирующей выборки. В итоге, выборки различных объектов исследований необходимо объединить в банк данных, достаточный для обучения нейронной сети.

Предлагаемая методика позволит получить банк данных дальностно-доплеровских портретов, необходимый для решения задачи распознавания типа ВС и наличия у него внешней полезной нагрузки в беспомеховых условиях с использованием нейросети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стайнберг Б. Д. Формирование радиолокационного изображения самолета в диапазоне СВЧ // ТИИЭР, 1988. – Т. 76. – № 12. – С. 26–46.
2. ЭРА вычислений на новом уровне : СуперЭВМ расширила исследовательские возможности технополиса Минобороны [электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.era-tehnopolis.ru/news/mass-media/era-vychisleniy-na-novom-urovne/> (дата обращения: 02.01.21.)
3. Процессор Intel® Xeon® 6150 класса Gold [электронный ресурс] Режим доступа: <https://ark.intel.com/content/www/ru/ru/ark/products/120490/intel-xeon-gold-6150-processor-24-75m-cache-2-70-ghz.html> (дата обращения: 02.01.21.)
4. MATLAB Coder Documentation : Code Generation [электронный ресурс] Режим доступа:<https://www.mathworks.com/help/coder/code-generation.html> (дата обращения: 02.01.21.)
5. Белова, И.М. Параллельное программирование: учебное пособие / И. М. Белова, А.А. Рассказов. – М.: МГИУ, 2012. – 101 с.
6. Кузнецов В. А., Амбросов Д. В. Динамическая модель истребителя F-22 Raptor // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. Т. 3. – С. 126–137.
7. Кузнецов В. А., Амбросов Д. В., Дятлов Д. В. Динамическая модель пространственно-распределенной воздушной цели // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2018661660. 2018.
8. Кузнецов В. А., Амбросов Д. В. Программа формирования многочастотных поляриметрических дальностино-доплеровских портретов пространственно-распределенных воздушных целей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2018619398. 2018.
9. Штагер Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
10. Лихачев В. П., Кузнецов В. А., Амбросов Д. В., Дятлов Д. В. Способ поляриметрической селекции ложных воздушных целей // Заявка на изобретение RU 2018140146, опубл. 14.11.2018.

REFERENCES

1. Steinberg B. D. Formation of a radar image of an aircraft in the microwave range // TIIER, 1988. - V. 76. - No. 12. - P. 26–46.
2. ERA of computing at a new level: Supercomputer has expanded the research capabilities of the Technopolis of the Ministry of Defense [electronic resource] Access mode: <https://www.era-tehnopolis.ru/news/mass-media/era-vychisleniy-na-novom-urovne/> (date of appeal : 02.01.21.)
3. Intel® Xeon® 6150 Gold processor [electronic resource] Access mode: <https://ark.intel.com/content/www/ru/ru/ark/products/120490/intel-xeon-gold-6150-processor-24-75m-cache-2-70-ghz.html> (date of access: 02.01.21.)
4. MATLAB Coder Documentation: Code Generation [electronic resource] Access mode: <https://www.mathworks.com/help/coder/code-generation.html> (date of access: 02.01.21.)
5. Belova, I.M. Parallel programming: textbook / I.M.Belova, A.A. Stories. - M.: MGIU, 2012 .-- 101 p.
6. Kuznetsov V.A., Ambrosov D.V. Dynamic model of the F-22 Raptor // Radar, navigation, communication: collection of proceedings of the International Scientific and Technical Conference. - Voronezh: Voronezh State University, 2019. V. 3. - P. 126–137.
7. Kuznetsov V.A., Ambrosov D.V., Dyatlov D.V. Dynamic model of a spatially distributed air target // Certificate of state registration of a computer program. No. 2018661660.2018.
8. Kuznetsov V.A., Ambrosov D.V. Program for the formation of multifrequency polarimetric range-Doppler portraits of spatially distributed air targets // Certificate of state registration of a computer program. No. 2018619398.2018.
9. E. A. Shtager, Scattering of Radio Waves by Complex Shaped Bodies. - M.: Radio and communication, 1986 .-- 184 p.
10. Likhachev V.P., Kuznetsov V.A., Ambrosov D.V., Dyatlov D.V. Method of polarimetric selection of false air targets // Application for invention RU 2018140146, publ. 11/14/2018.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАБОРА ДАННЫХ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

А. В. Бугурусланов¹, В. М. Брюханов¹, Е. С. Дмитриев¹, А. А. Жидков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа

Аннотация. Тепловизионные изображения ограничены в свободном доступе по сравнению с изображениями в видимом спектре. Для того, чтобы разрешить проблему нехватки тепловизионных изображений для исследований и разработки алгоритмов машинного обучения предлагается набор данных Visible-Thermal Face (VTF), который содержит более 500000 изображений 395 субъектов. Это самая большая коллекция парных изображений лиц в видимом и тепловом спектрах.

Ключевые слова: обнаружение лиц в условиях низкой освещённости, перспективы использования набора данных, тепловизионные изображения, видимый спектр изображений.

PROSPECTS FOR USING THE DATA SET FOR CONVENTIONAL NEURAL NETWORK TRAINING

A. V. Buguruslanov¹, V. M. Brykhanov¹, E. S. Dmitriev¹, A. A. Zhidkov¹

¹Military innovative technopolis "ERA", Anapa

Abstract. Thermal images that capture the heat emitted from a person's face are less readily available than images in the visible spectrum. The Visible-Thermal Face dataset offers an opportunity to solve the problem of thermal imaging shortages for research and development of machine learning algorithms. The dataset contains over 500,000 images of 395 subjects. It is the largest collection of paired facial images in the visible and thermal spectrum.

Keywords: face detection in low light conditions, dataset perspectives, thermal images, visible images.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование тепловизионных изображений неуклонно росло в течение последних десятилетий, что связано с развитием технологий и снижением их стоимости. Инфракрасные датчики улавливают тепловое излучение, например, человеческого тела, в средневолновом инфракрасном диапазоне (middle wavelength infrared, MWIR) от 3 до 5 мкм и длинноволновом инфракрасном диапазоне (long wavelength infrared, LWIR) от 7 до 14 мкм. Тепловизионные снимки лица могут использоваться в вооруженных силах, правоохранительных органах для распознавания лиц в условиях низкой освещённости в тёмное время суток, а также в здравоохранении, где требуется надёжные модели распознавания. Однако большинство MWIR и LWIR наборов данных доступных на момент написания статьи содержат изображения низкого разрешения, которые были сделаны с помощью устаревших тепловизоров.

В то время как лучшие модели для распознавания лиц (около 90%) используют обрезанную фотографию разрешением 64 x 64, которая была сделана с помощью старых тепловизионных камер, существует пробел в требованиях для систем распознавания.

Чтобы удовлетворить эти требования, набор данных содержит тепловизионные снимки в высоком разрешении и в разных условиях, таких как изменение положения лица, его выражение и разрешение изображения. Кроме того, необходимо часто синхронизировать и совместно регистрировать данные собранные с разных датчиков, которые пригодятся в алгоритмах слияния, адаптации предметной области и кросс-модального синтеза изображений.

С этой целью исследовательской лабораторией армии США был создан видимо-тепловой набор данных. Это самый большой набор данных тепловых поверхностей доступный для исследований на сегодняшний день.

Основные преимущества Visible Thermal Face:

- 500000 мультимодальных, синхронизированных во времени фотографий, снятых с использованием нескольких синхронизированных камер видимого спектра для создания 3D эффекта и одного LWIR датчика, работающего в длинноволновом инфракрасном диапазоне;
- Три последовательности изображений, содержащих начальное положение человека, выражение лица и положение тела. Четвертое условие – очки (если субъект носит очки);
- Описание положения головы, очков, границ лица и 6 контуров его расположения;
- Стандартизованные методы для обучения и оценки моделей.

2. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

В этом разделе проводится сравнение различных общедоступных наборов данных в средневолновом инфракрасном диапазоне (MWIR) и длинноволновом инфракрасном диапазоне (LWIR). Ключевые характеристики каждого из них представлены в таблице 1, где переменные состояния отмечены следующим образом: Р – положение тела, I – освещение, Е – выражение лица, Т – временная задержка, G – очки и О – преграда. Разрешение изображения записывается как (ш × в).

Таблица 1. Сводная статистика наборов данных, содержащих данные о лицах

| Набор данных | Модальность | Количество субъектов | Вариативность | Разрешение | Дальность |
|---------------|-------------|----------------------|---------------|------------|------------|
| UND [8] | LWIR, RGB | 241 | I, E, T | 320 x 240 | Неизвестно |
| IRIS [9] | LWIR, RGB | 30 | P, I, E | 320 x 240 | Неизвестно |
| IRIS-M3 [10] | LWIR, RGB | 82 | I | 320 x 240 | 1.2 |
| Terravic [11] | LWIR | 20 | P, G | 320 x 240 | Неизвестно |
| UH [12] | MWIR | 138 | P, E | 320 x 240 | Неизвестно |
| HVIE [13] | LWIR, Mono | 215 | I, E, G | 320 x 240 | 0.75 |
| KTFE [14] | LWIR, RGB | 26 | E, G | 320 x 240 | 0.85 |
| Carl [15] | N/LWIR, RGB | 41 | I, E, T | 160 x 120 | 1.35 |

| | | | | | |
|---------------|-----------------|-----|---------------|------------|-----|
| ULFMT [16] | MWIR, RGB | 238 | P, E | 640 x 512 | 1.0 |
| ARL-MMFD [17] | P-L/LWIR, RGB | 111 | E | 640 x 480 | 2.5 |
| Eurocom [18] | LWIR, RGB | 50 | P, I, E, G, O | 160 x 120 | 1.5 |
| RWTH [19] | LWIR | 94 | P, E | 1024 x 768 | 0.9 |
| Tufts [20] | N/LWIR, RGB | 100 | P, E | 336 x 256 | 1.5 |
| ARL-VTF | LWIR, RGB, Mono | 395 | P, E, G | 640 x 512 | 2.1 |

Набор данных Университета Нотр-Дама (UND), собранный в 2002 г. с помощью обычных и LWIR-камер, остается одним из крупнейших наборов данных с точки зрения уникальной идентичности (241 субъект), однако он имеет только 4 изображения для каждого субъекта и использует очень низкое разрешение [8].

Набор данных IRIS имеет синхронные изображения 30 субъектов, находящихся в разных положениях и с разным выражением лица, сделанных в средневолновом инфракрасном диапазоне и в спектре видимого света, но он не имеет никакого описания кроме идентификатора субъекта [9]. IRIS-M3 содержит изображения 88 объектов, снятых в различных помещениях и при разном уровне освещения [10].

Два разных набора данных были созданы Хьюстонским университетом (UH). Последняя версия содержит 7590 (MWIR) изображений 138 субъектов. Старая версия содержит синхронные изображения 88 субъектов сделанных в видимом, тепловом спектре, а также содержит данные для создания 3D модели [12].

База данных выражений лица сделанных в спектре видимого света и инфракрасном спектре, содержит изображения, содержащие широкий диапазон эмоций 215 субъектов. Последовательности изображений, содержащие невыразительные эмоции при просмотре субъектом видеоклипов, некоторые из которых носили очки [13].

Набор данных KTFE содержит изображения естественных эмоций 26 субъектов, сделанные при просмотре субъектами видеоклипов. Между последовательностями использовалась эмоциональная разгрузка посредством прослушивания инструментальной музыки. Субъектам было разрешено носить очки во время съемки. Данные были сняты камерой InfRec R300 [14].

Набор данных Carl содержит покадровые данные 41 субъекта, сделанные за 4 сеанса с интервалом в два дня. Кроме того, испытуемым разрешалось вести себя естественно. Синхронные данные были записаны с помощью комбинированной камеры видимого спектра и LWIR [15].

Университет Лаваля представляет базу данных ULFMT составленной с помощью интервальной съемки движения лица, в которую входит 238 субъектов формата MWIR [16].

Набор данных мультимодальной базы данных лиц MMFD состоит из двух отдельных коллекций, синхронизированные данные в видимом диапазоне, LWIR и

поляриметрическом диапазоне LWIR. Состоит из 111 предметов. Уникальной особенностью этого набора данных является изменение расстояния, на котором снимаются предметы [17].

Набор данных Eurocom с 50 объектами, снятыми с помощью комбинированной камеры видимого / LWIR-диапазона, в частности, содержит широкий спектр сценариев сбора данных, включая последовательности во время которого испытуемый прикрывает рукой глаза и рот [18].

Набор данных RWTH-Aachen содержит LWIR-изображения высокого разрешения 94 субъектов. Каждый субъект снят с различными выражениями лица и положением головы [19].

База данных Tufts Face – это мультимодальный набор данных с несколькими устройствами и сценариями получения изображений. Сценарии предполагают одновременный захват видимого и фронтального изображения (LWIR), а также изображения (LWIR) полученного мобильной платформой с многокамерными датчиками, поворачиваемой перед объектом по дуге. В обоих сценариях испытуемых просили позировать с различными выражениями лица, а также использовать солнцезащитные очки. Также в набор данных включены изображения с 3D-камеры светового поля, 3D-облако точек реконструировано изображения лиц и компьютерные наброски лиц. Набор данных содержит 100 субъектов [20].

По сравнению с набором данных ARL-VTF с 395 объектами, следующий по величине набор данных теплового лица с высоким разрешением, ULFMT содержит 238 предметов и включает MWIR видеозаписи в формате RGB при полном наборе переменных условий, но без синхронизированных данных. Хотя для набора данных RWTH был использован тепловизор с более высоким разрешением камеры и предоставлено описание для переменных выражений лица, он не содержит видимых аналогов в виде изображений, в отличие от ARL-VTF, который имеет синхронизированный сбор данных и стереосистему, поддерживает разработку алгоритмов для изучения трехмерных моделей, мультимодального слияния, адаптации предметной области, и кросс-доменный синтез изображений.

Таким образом, набор данных ARL-VTF – единственный набор данных который имеет все следующие характеристики:

- Синхронизированные по времени видимые и тепловые изображения;
- Сбор данных с использованием имеющихся в продаже неохлаждаемых LWIR камер;
- Переменное выражение лица, поза и возможное использование очков;
- Описание контуров лица;
- Наибольшее количество субъектов и изображения на сегодняшний день.

3. СБОР БАЗЫ ДАННЫХ VISIBLE THERMAL FACE

Сбор данных происходил в течение 9 дней в ноябре 2019 г. Опубликованный набор данных содержит 395 субъектов, каждый из которых прошел проверку IRB. Испытуемые сидели перед термически нейтральным фоном на расстоянии 2,1 метра от

матрицы датчиков. Голова была расположена на уровне датчиков. Освещение обеспечивалось стандартными стационарными потолочными лампочками (рисунок 1).



Рис. 1. Схема расположения зоны сбора.

Лица испытуемых записывались в течение 8 – 10 секунд с каждым из следующих условий и параметров:

1. Начальная последовательность фронтальных изображений с нейтральным выражением лица. Испытуемых просили снять очки, если они носили их;
2. Экспрессивная последовательность фронтальных изображений испытуемого, который считает последовательно вслух, начиная числа с единицы;
3. Последовательность поз, в которой испытуемых просили медленно поворачивать голову слева направо;
4. Если испытуемые носили очки (которые они снимали при их наличии на первом этапе), их просили снова надеть их для создания дополнительной последовательности начальных изображений.

Этот набор данных был собран с помощью массива из трех камер видимого спектра и одного термодатчика LWIR. Снимок видимого спектра был записан с помощью двух монохромных FLIR Grasshopper 3 CMOS-камеры и одной RGB-подсветки, Basler Scout ПЗС-камеры (ПЗС - прибор с зарядовой связью). Данные LWIR регистрируются неохлаждаемым микроболометром VOX FLIR Boson со спектральной полосой от 7,5 мкм до 13,5 мкм и термочувствительностью до 50 мК. Датчики были смонтированы на одну оптическую пластину (рисунок 2).

Калибровка сенсора проводилась каждый день после сбора данных, чтобы обеспечить постобработку для регистрации двумерного изображения и геометрическую калибровку трехмерного изображения нескольких видимых и инфракрасных сенсоров. Шахматная доска 8 × 10 с квадратами 20 мм установлена перед черным квадратом, который обеспечивает контраст как для видимых, так и для тепловых изображений. Для тепловой камеры использовался специально разработанный рисунок с использованием квадратных отверстий 20 мм с интервалом 10 мм. Чтобы облегчить разработку алгоритмов на основе 3D, внутренние и внешние параметры камеры предоставляются с этим набором данных.

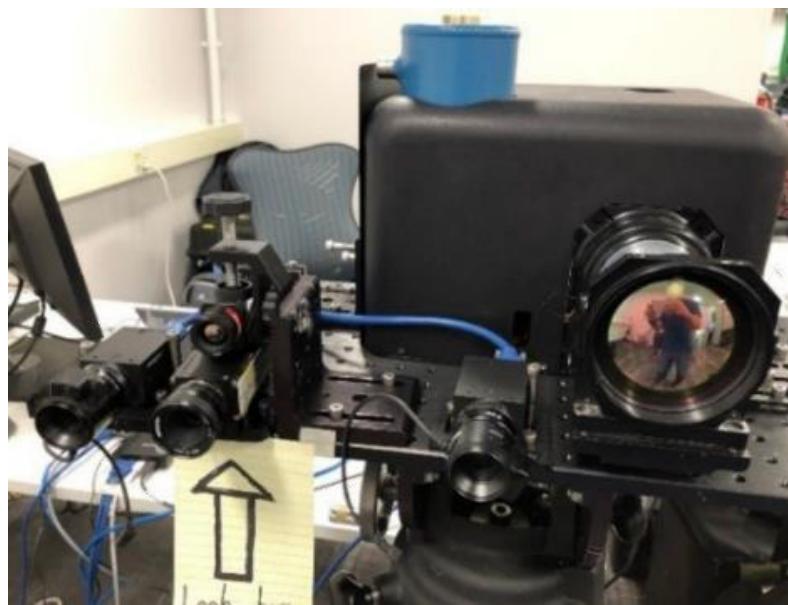


Рис. 2. Используемое оборудование.

Было использовано специальное программное обеспечение для взаимодействия с каждой камерой: изображения были захвачены синхронно по времени с помощью программных триггеров с несколькими потоками со скоростью 15 кадров в секунду из-за ограничений полосы пропускания при передаче данных.

Всего набор данных содержит 395 субъектов и 549712 изображений. Чтобы обеспечить точность распознавания контуров лица, используется средние межзрачковое расстояние (IPD) фронтальных базовых изображений, которые представлены в таблице 3. IPD рассчитываются как расстояние в пикселях между центрами левого и правого глаза. Чтобы облегчить воспроизводимость и оценку, набор данных разделен на предметно-несвязное развитие (обучение и проверка) и тестовые наборы с 295 испытуемыми в обучающем наборе данных и оставшиеся 100 испытуемых в тестовой выборке. Субъекты внутри набора для разработки подразделяются на наборы для обучения и проверки с использованием 5-кратной схемы перекрестной проверки для настройки гиперпараметров и выбора модели. Из 395 субъектов, было записано 60 субъектов, как с очками, так и без них.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый, крупномасштабный набор данных человеческих лиц, с синхронизацией по времени. Изображения представлены в спектрах видимого и теплового излучения LWIR. Чтобы имитировать реальные условия, испытуемым предлагали выразить ту или иную эмоцию, изменить положение головы или снять-надеть очки. Кроме того, набор данных ориентирован на обнаружение и верификацию лиц в тепловом спектре. Этот набор данных оценивается высокой степенью точности и планируется его выгрузка в сеть Интернет для того, чтобы пополнять и, в дальнейшем, использовать наиболее эффективно.

Изучение этого набора данных и документации к нему может послужить основой для создания его отечественной версии и эксплуатации на российском оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. X. Di, H. Zhang, and V. M. Patel. Polarimetric thermal to visible face verification via attribute preserved synthesis. In 2018 IEEE 9th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS), pages 1–10, 2018.
2. Travis Gault and Aly Farag. A Fully Automatic Method to Extract the Heart Rate from Thermal Video. In 2013 IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. Work., pages 336–341, 2013.
3. Shuowen Hu, Nathaniel Short, Benjamin S. Riggan, Matthew Chasse, and M. Saquib Sarfraz. Heterogeneous Face Recognition: Recent Advances in Infrared-to-Visible Matching. In 2017 12th IEEE Int. Conf. Autom. Face Gesture Recognit. (FG 2017), pages 883–890. IEEE, may 2017.
4. Panagiotis Tsiamyrtzis, Jonathan Dowdall, Dvijesh Shastri, Ioannis T Pavlidis, MG Frank, and P Ekman. Imaging facial physiology for the detection of deceit. International Journal of Computer Vision, 71(2):197–214, 2007.
5. Zhi-Hao Wang, Gwo-Jiun Horng, Tz-Heng Hsu, Chao-Chun Chen, and Gwo-Jia Jong. A Novel Facial Thermal Feature Extraction Method for Non-Contact Healthcare System. IEEE Access, 8:86545 – 86553, may 2020.
6. Eslam Mostafa, Riad Hammoud, Asem Ali, and Aly Farag. Face recognition in low resolution thermal images. Comput. Vis. Image Underst., 117(12):1689–1694, dec 2013.
7. G. Bradski. The OpenCV Library. Dr. Dobb’s Journal of Software Tools, 2000.
8. Xin Chen, Patrick J. Flynn, and Kevin W. Bowyer. Visiblelight and infrared face recognition. In ACM Work. Multimodal User Authentication, pages 48–55, 2003.
9. Besma Abidi. IRIS Thermal/Visible Face Database, IEEE OTCBVS WS Series Bench. <http://vcipl-okstate.org/pbvs/bench/>, accessed 2020-06-09.
10. Hong Chang, H Harishwaran, Mingzhong Yi, A Koschan, B Abidi, and M Abidi. An indoor and outdoor, multimodal, multispectral and multi-illuminant database for face recognition. In Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., volume 2006, 2006.
11. Roland Miezianko. Terravic Facial IR Database. <http://vcipl-okstate.org/pbvs/bench/>, accessed 2020-06-09.
12. Pradeep Buddharaju, Ioannis T. Pavlidis, Panagiotis Tsiamyrtzis, and Mike Bazakos. Physiology-based face recognition in the thermal infrared spectrum. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 29(4):613–626, apr 2007.
13. Shangfei Wang, Zhilei Liu, Siliang Lv, Yanpeng Lv, Guobing Wu, Peng Peng, Fei Chen, and Xufa Wang. A natural visible and infrared facial expression database for expression recognition and emotion inference. IEEE Trans. Multimed., 12(7):682–691, nov 2010.
14. Hung Nguyen, Kazunori Kotani, Fan Chen, and Bac Le. A thermal facial emotion database and its analysis. In PacificRim Symp. Image Video Technol., volume 8333 LNCS, pages 397–408. Springer Verlag, oct 2013.
15. Virginia Espinosa-Duro, Marcos Faundez-Zanuy, and Jiri Mekyska. A New Face Database Simultaneously Acquired in Visible, Near-Infrared and Thermal Spectrums. Cognit. Comput., 5(1):119–135, mar 2013.
16. Reza Shoja Ghiass, Hakim Bendada, and Xavier Mal dague. Universite Laval Face Motion and Time-Lapse Video ’ Database (UL-FMTV). Technical report, Universite Laval, 2018.
17. He Zhang, Benjamin S. Riggan, Shuowen Hu, Nathaniel J. Short, and Vishal M. Patel. Synthesis of High-Quality Visible Faces from Polarimetric Thermal Faces using Generative Adversarial Networks. Int. J. Comput. Vis., 127(6-7):845– 862, jun 2019.
18. Khawla Mallat and Jean Luc Dugelay. A benchmark database of visible and thermal paired face images across multiple variations. In 2018 Int. Conf. Biometrics Spec. Interes. Group, BIOSIG 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., oct 2018.
19. Marcin Kopaczka, Raphael Kolk, Justus Schock, Felix Burkhard, and Dorit Merhof. A Thermal Infrared Face Database with Facial Landmarks and Emotion Labels. IEEE Trans. Instrum. Meas., 68(5):1389–1401, may 2019.
20. Karen Panetta, Arash Samani, Xin Yuan, Qianwen Wan, Sos Agaian, Srijith Rajeev, Shreyas Kamath, Rahul Rajendran, Shishir Paramathma Rao, Aleksandra Kaszowska, and Holly A. Taylor. A Comprehensive Database for Benchmarking Imaging Systems. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 42(3):509–520, mar 2020.

REFERENCES

1. X. Di, H. Zhang, and V. M. Patel. Polarimetric thermal to visible face verification via attribute preserved synthesis. In 2018 IEEE 9th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS), pages 1–10, 2018.
2. Travis Gault and Aly Farag. A Fully Automatic Method to Extract the Heart Rate from Thermal Video. In 2013 IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. Work., pages 336–341, 2013.
3. Shuowen Hu, Nathaniel Short, Benjamin S. Riggan, Matthew Chasse, and M. Saquib Sarfraz. Heterogeneous Face Recognition: Recent Advances in Infrared-to-Visible Matching. In 2017 12th IEEE Int. Conf. Autom. Face Gesture Recognit. (FG 2017), pages 883–890. IEEE, may 2017.
4. Panagiotis Tsiamyrtzis, Jonathan Dowdall, Dvijesh Shastri, Ioannis T Pavlidis, MG Frank, and P Ekman. Imaging facial physiology for the detection of deceit. International Journal of Computer Vision, 71(2):197–214, 2007.
5. Zhi-Hao Wang, Gwo-Jiun Horng, Tz-Heng Hsu, Chao-Chun Chen, and Gwo-Jia Jong. A Novel Facial Thermal Feature Extraction Method for Non-Contact Healthcare System. IEEE Access, 8:86545 – 86553, may 2020.
6. Eslam Mostafa, Riad Hammoud, Asem Ali, and Aly Farag. Face recognition in low resolution thermal images. Comput. Vis. Image Underst., 117(12):1689–1694, dec 2013.
7. G. Bradski. The OpenCV Library. Dr. Dobb’s Journal of Software Tools, 2000.
8. Xin Chen, Patrick J. Flynn, and Kevin W. Bowyer. Visiblelight and infrared face recognition. In ACM Work. Multimodal User Authentication, pages 48–55, 2003.
9. Besma Abidi. IRIS Thermal/Visible Face Database, IEEE OTCBVS WS Series Bench. <http://vcipl-okstate.org/pbvs/bench/>, accessed 2020-06-09.
10. Hong Chang, H Harishwaran, Mingzhong Yi, A Koschan, B Abidi, and M Abidi. An indoor and outdoor, multimodal, multispectral and multi-illuminant database for face recognition. In Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., volume 2006, 2006.
11. Roland Miezianko. Terravic Facial IR Database. <http://vcipl-okstate.org/pbvs/bench/>, accessed 2020-06-09.
12. Pradeep Buddharaju, Ioannis T. Pavlidis, Panagiotis Tsiamyrtzis, and Mike Bazakos. Physiology-based face recognition in the thermal infrared spectrum. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 29(4):613–626, apr 2007.
13. Shangfei Wang, Zhilei Liu, Siliang Lv, Yanpeng Lv, Guobing Wu, Peng Peng, Fei Chen, and Xufa Wang. A natural visible and infrared facial expression database for expression recognition and emotion inference. IEEE Trans. Multimed., 12(7):682–691, nov 2010.
14. Hung Nguyen, Kazunori Kotani, Fan Chen, and Bac Le. A thermal facial emotion database and its analysis. In PacificRim Symp. Image Video Technol., volume 8333 LNCS, pages 397–408. Springer Verlag, oct 2013.
15. Virginia Espinosa-Duro, Marcos Faundez-Zanuy, and Jiri Mekyska. A New Face Database Simultaneously Acquired in Visible, Near-Infrared and Thermal Spectrums. Cognit. Comput., 5(1):119–135, mar 2013.
16. Reza Shoja Ghiass, Hakim Bendada, and Xavier Mal dague. Universite Laval Face Motion and Time-Lapse Video ’ Database (UL-FMTV). Technical report, Universite Laval, 2018.
17. He Zhang, Benjamin S. Riggan, Shuowen Hu, Nathaniel J. Short, and Vishal M. Patel. Synthesis of High-Quality Visible Faces from Polarimetric Thermal Faces using Generative Adversarial Networks. Int. J. Comput. Vis., 127(6-7):845– 862, jun 2019.
18. Khawla Mallat and Jean Luc Dugelay. A benchmark database of visible and thermal paired face images across multiple variations. In 2018 Int. Conf. Biometrics Spec. Interes. Group, BIOSIG 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., oct 2018.
19. Marcin Kopaczka, Raphael Kolk, Justus Schock, Felix Burkhard, and Dorit Merhof. A Thermal Infrared Face Database with Facial Landmarks and Emotion Labels. IEEE Trans. Instrum. Meas., 68(5):1389–1401, may 2019.
20. Karen Panetta, Arash Samani, Xin Yuan, Qianwen Wan, Sos Agaian, Srijith Rajeev, Shreyas Kamath, Rahul Rajendran, Shishir Paramathma Rao, Aleksandra Kaszowska, and Holly A. Taylor. A Comprehensive Database for Benchmarking Imaging Systems. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 42(3):509–520, mar 2020.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Н. А. Андриянов¹

¹ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» (Финансовый университет), Москва, Россия

Аннотация. В работе предложено решение задачи распознавания изображений на основе методов сокращения размерности. Исследование было проведено для стандартного датасета MNIST, в котором представлены изображения рукописных цифр. Из изображений размером 8 на 8 извлекались соответствующие признаки. Для сокращения размерности был использован метод главных компонент в различных вариациях: сокращение в строку, в столбец, в область. В результате обучения моделей машинного обучения, таких как деревья решений и сверточные сети, установлено, что при небольшой потере точности распознавания, с использованием метода главных компонент удается увеличить скорость обработки в 3 раза.

Ключевые слова: распознавание образов, факторный анализ, сокращение размерности, MNIST, ускорение нейронных сетей, деревья решений, сверточные сети.

APPLICATION OF THE PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS TO ACCELERATE THE IMAGE RECOGNITION PROCESS

N. A. Andriyanov¹

¹Financial University under the Government of the Russian Federation (Financial University), Moscow, Russia

Abstract. The paper proposes a solution to the image recognition problem based on dimension reduction methods. The research was carried out on the standard MNIST dataset, which presents images of handwritten numbers. The corresponding features were extracted from the 8 by 8 images. To reduce the dimension, the principal component method was used in various variations: reduction to a row, to a column, to an area. As a result of training machine learning models, such as decision trees and convolutional networks, it was found that with a small loss of recognition accuracy, using the principal component method, it is possible to increase the processing speed by 3 times.

Keywords: pattern recognition, factor analysis, dimension reduction, MNIST, neural network acceleration, decision trees, convolutional networks.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особый интерес исследователей вызывает задача распознавания образов на изображениях [1-4]. При этом вычислительные возможности постоянно растут, а появившиеся методы глубокого обучения [5] позволили совершить сильный прорыв в задаче распознавания изображений. Тем не менее, увеличивающиеся объемы данных, а также требования к быстродействию алгоритмов наталкивают исследователей на поиск новых решений, связанных с ускорением существующих распознавателей. Первый путь ускорения подразумевает усовершенствование аппаратной части, что в подавляющем большинстве случаев может требовать сильных финансовых затрат. Второй же путь – направлен на оптимизацию и модификацию алгоритмов обработки данных. Например, в работе [6] рассмотрено, как можно ускорить инференс нейронных сетей с использованием специализированных программных средств, нацеленных на

эффективную загрузку процессора. Еще одним вариантом в рамках второго пути является применение алгоритмов сокращения размерности [7]. В частности, в работе [8] рассмотрена эффективность применения сингулярного разложения матриц на датасете MNIST [9]. Однако в ней исследуется лишь качественная характеристика работы алгоритма, связанная с оценкой точности распознавания. Вместе с тем, интересно было бы оценить не только потери по точности распознавания, но и выигрыш по скорости обработки. В данной статье будет выполнен анализ применения метода главных компонент при распознавании изображений рукописных цифр MNIST.

2. МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Поскольку изображения вообще представлены двумерными матрицами значений яркости пикселей в различных цветовых каналах, как правило, RGB, то в задаче распознавания образов легко можно перейти от тензора (трех каналов яркости) к одному каналу яркости. Более того, изображения MNIST уже представлены как изображения в оттенках серого. На рисунке 1 представлены примеры изображений из данного набора.

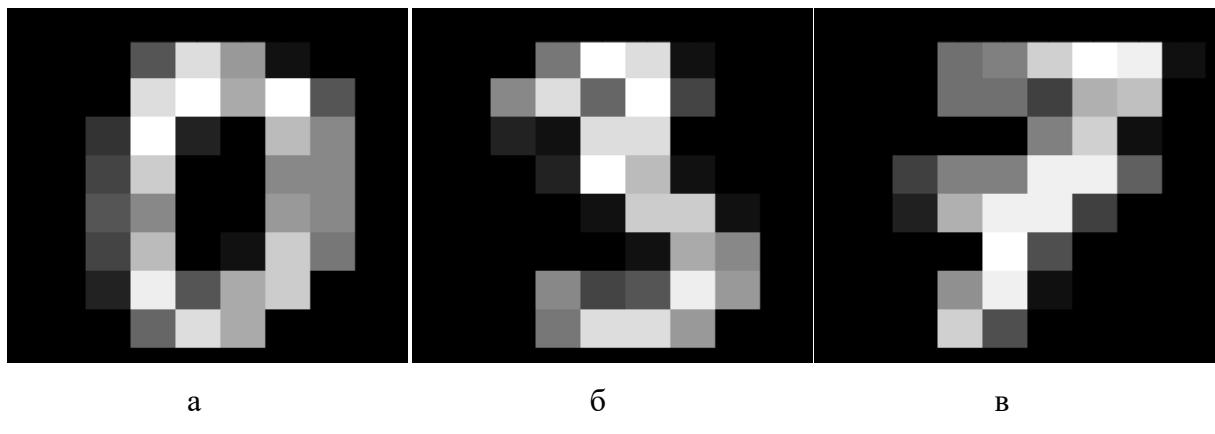


Рис. 1. Примеры исходных изображений: (а) – цифра «0», (б) – цифра «3», (в) – цифра «7».

Данные изображения имеют размер 8x8 пикселей. Метод главных компонент в его базовой версии рассматривает наборы многомерных данных, представленных двумерной матрицей. Считается, что каждая строка описывает какой-то объект (или его часть), а каждый столбец соответствует тому или иному признаку объекта. Идея метода заключается в том, чтобы найти связи между признаками, что позволит перейти к новому пространству, в котором в общем случае, будут выделены наиболее значимые признаки (главные компоненты), а в остальных будет содержаться лишь малая описательная способность.

Поэтому для преобразования методом главных компонент необходимо найти корреляционную матрицу признаков. В нашем случае она тоже будет иметь размерность 8x8. Затем вычисляют собственные числа и собственные векторы этой матрицы. Для сжатия достаточно оставить только те собственные числа, значения которых больше 1. После этого можно выполнить следующую операцию:

$$PCA = V^T O^T, \quad (1)$$

где PCA – новый набор признаков и объектов, V – матрица из собственных векторов, O – исходный набор признаков и объектов, $[]^T$ – операция транспонирования матрицы.

Матрица V , вообще говоря, имеет размер $M \times N$, где N – исходное число признаков, M – исходное число объектов. Однако выбор вместо новых N признаков меньшего числа P обеспечивает в формуле (1), что размер матрицы PCA будет $M \times P$. Это позволяет сократить размер изображения построчно или по столбцам.

Но для учета пространственной структуры изображения будем использовать следующий подход. Пусть имеется исходная матрица (8x8 пикселей), включающая всего 64 пикселя. Будем заменять 4 близко стоящие компоненты на 1 или 2 новых. Для этого рассмотрим пиксели в соответствии с рисунком 2.

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
| 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 |
| 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| A | B | C | D |
| E | F | G | H |
| I | J | K | L |
| M | N | O | P |

Рис. 2. Разложение двумерных данных с сохранением пространственной структуры

На рисунке 2 слева каждый пиксель обозначен порядковым номером, как отдельный признак. На рисунке справа матрица размером 4x4 элемента. Рассмотрим формирование признаков на примере признаков A – P. Сперва переходим к двумерной матрице вида:

A: 1, 2, 9, 10

B: 3, 4, 11, 12

C: 5, 6, 13, 14

...

P: 55, 56, 63, 64

Вместо номеров старых признаков в данную матрицу следует подставить значения яркостей в соответствующих рисунку 2 пикселях. Полученная матрица имеет размер 16x4. Далее применяем к ней метод главных компонент и получаем размер 16x1. Расставляем полученные 16 значений новых признаков объектов-букв в соответствии с пространственной ориентацией.

Следует отметить, что описанную процедуру сжатия необходимо применить к каждому из изображений. Разобьем исходную выборку из 60 000 картинок на обучающую выборку из 50 000 картинок и тестовую выборку размеров 10 000 картинок.

Соответственно получаем три варианта сжатий изображений для всех выборок: в строке, в столбце, пространственно.

На рисунке 3 показан пример сжатия строки из 8 пикселей в строку из 6 пикселей.

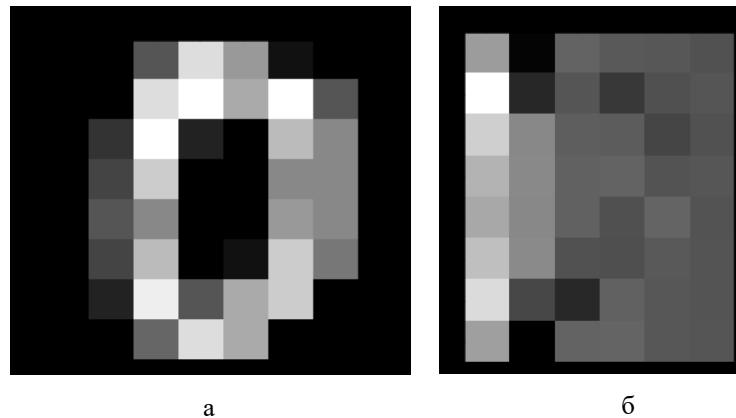


Рис. 3. Применение метода главных компонент: (а) – оригинальное изображение, (б) – построчное сокращение размерности до 6 компонент.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки целесообразности применения метода главных компонент рекомендуется построить график осыпи. На рисунке 4 показаны усредненные значения по всем рисункам по числу компонент (от 1 до 8) при сжатии строковых данных.

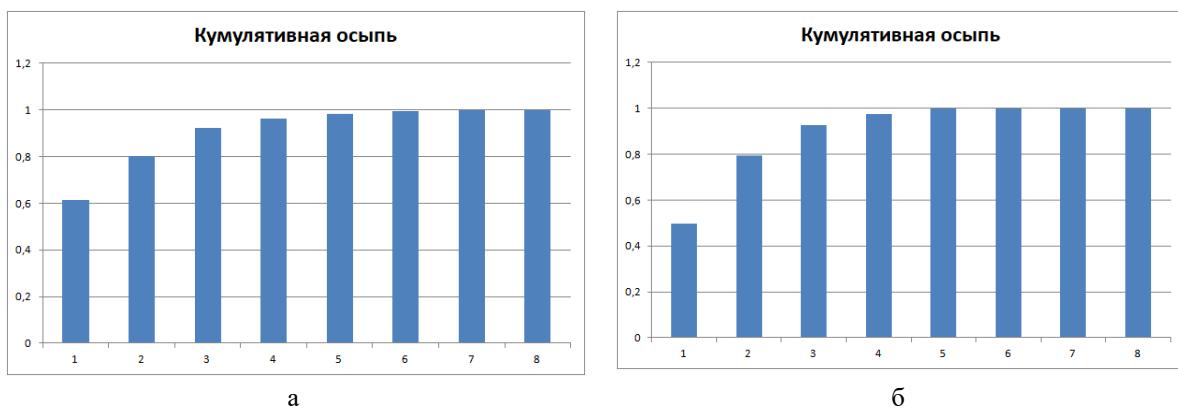


Рис. 4. Доля объясненной дисперсии при сокращении размеров: (а) – строки, (б) – столбца

Из представленного графика видно, что с помощью трех новых компонент в среднем получается на 90% объяснить изменчивость данных. Это связано с тем, что яркости пикселей внутри строки действительно имеют высокую корреляцию. Следует отметить, что сокращение данных по столбцам в среднем будет менее эффективно, если использовать только одну компоненту.

При анализе пространственного алгоритма сжатия будем использовать средние данные по доле объясняемой дисперсии со всех участков изображения и со всех различных изображений тестовой выборки. На рисунке 5 приведен аналогичный график на основе сжатия четырех компонент локальной области.



Рис. 5. Доля объясненной дисперсии при пространственном сокращении размерности

Из представленного рисунка видно, что учет пространственной структуры позволяет наилучшим образом описать изменчивость яркости четырех соседних пикселей в одной компоненте. Это связано с тем, что выбираются локальные участки с сильной корреляцией.

Обучение по всем изображениям проводилось на обучающей выборке, а затем обученные модели были протестированы с помощью 10 000 изображений (или сжатых изображений), которые модель не видела при обучении. Также измерялось время, затрачиваемое для построения прогноза по всем 10 000 изображений. Для реализации моделей машинного обучения использовался процессор Intel Core i7-8750H (2.2 GHz). Результаты по точности распознавания представлены в таблице 1, а по среднему времени обработки одного кадра – в таблице 2.

Таблица 1. Сравнительная характеристика эффективности алгоритмов

| Модель обучения | Доля верных распознаваний, % | | | |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|
| | Строка-сокращение (2 компоненты) | Столбец-сокращение (2 компоненты) | Пространственное сокращение (16 компонент) | Без сокращения размерности |
| Дерево решений (глубина 20) | 71,64 | 67,25 | 83,75 | 90,02 |
| Многослойный перцептрон (3 слоя по 8 нейронов) | 74,87 | 70,54 | 88,32 | 91,64 |
| Сврточная сеть (3 слоя по 16 фильтров) | 73,62 | 70,38 | 91,08 | 94,35 |

Наблюдаемые в таблице 1 результаты позволяют сказать, что сокращение размерности для сверточной нейронной сети с учетом пространства приводит к небольшой потери точности модели. Также для всех алгоритмов следует отметить важность сохранения пространственной связи между новыми компонентами.

Таблица 2. Сравнительная характеристика быстродействия алгоритмов

| Модель обучения | Средняя производительность, кадров/с | | | |
|---|---|--|--|-------------------------------|
| | Строка- сокращение (2 компоненты) | Столбец- сокращение (2 компоненты) | Пространственное сокращение (16 компонент) | Без сокращения размерности |
| Дерево решений (глубина 20) | 2287,4 | 2319,6 | 1941,6 | 487,3 |
| Многослойный перцептрон (3 слоя по 8 нейронов) | 1331,1 | 1296,7 | 1075,5 | 291,2 |
| Сверточная сеть (3 слоя по 16 фильтров) | 1189,5 | 1191,3 | 876,6 | 267,8 |

Анализ данных таблицы 2 показывает, что удается достичь почти 4-х кратного увеличения быстродействия при потере порядка 3-4% точности. А модель на базе дерева решений за счет более простой структуры работает на 70% быстрее перцептрана и сверточных сетей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены способы сокращения размерности изображений перед применением моделей машинного обучения, базирующиеся на методе главных компонент. Для набора данных MNIST проведено исследование различных алгоритмов сокращения размерности. При этом наилучший результат показали алгоритмы сокращения размерности, учитывающие пространственную структуру изображений, которые приводят к падению точности на 3-6%, однако позволяют повысить производительность в 3-4 раза. Также следует отметить, что лучшее качество показали алгоритмы на базе сверточных нейронных сетей, а скорость – модели деревьев решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еремеев Е.А. Распознавание образов в экспертных системах принятия решений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2019, №4. – С. 67-71
2. Grauman K. Visual object recognition / K. Grauman, B. Leibe // Morgan & Claypool Publishers, 2010. — Р. 165-186
3. Хуршудов А.А. Обнаружение локальных пространственных структур для распознавания изображений // Научно-технические ведомости СпбГУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2014, № 5(205). — С. 72–82.

4. Каденцева А.А. Обзор современных технологий и распознавания образов и возможность их применения при создании информационных продуктов / А.А. Каденцева, В.Ю. Кондратьев, Л.Е. Попок, М.В. Филоненко // Экономика устойчивого развития, 2018, №2(34). – С. 301-306
5. LeCun Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature, 2015, v. 521. – P. 436–444
6. Andriyanov N.A. Analysis of the Acceleration of Neural Networks Inference on Intel Processors Based on OpenVINO Toolkit// IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, 2020. – P. 1–5.
7. Старовойтов В.В. Сингулярное разложение матриц в анализе цифровых изображений // Информатика, 2017, №2(54). – С. 70-83.
8. Андриянов Н.А. Анализ эффективности методов сокращения размерности данных в обработке изображений // Современная математика и концепции инновационного математического образования, 2021, Т. 8, № 1. – С. 217-223
9. MNIST Dataset [Электронный ресурс] – URL: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>, (дата обращения: 07.09.2021)

REFERENCES

1. Eremeev, E.A. Pattern recognition in expert decision-making systems // Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics, 2019, No. 4. – Pp. 67-71
2. Grauman, K. Visual object recognition / Grauman K., Leibe B. // Morgan & Claypool Publishers, 2010. — Pp. 165-186
3. Khurshudov, A.A. Detection of local spatial structures for image recognition // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGU. Computer science. Telecommunications. Management, 2014, No. 5 (205). – Pp. 72–82.
4. Kadentseva, A.A. Review of modern technologies and image recognition and the possibility of their application in the creation of information products / Kadentseva A.A., Kondratyev V.Yu., Popok L.E., Filonenko M.V. // Economics of Sustainable Development, 2018, No. 2 (34). – Pp. 301-306
5. LeCun, Y. Deep learning / LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. // Nature, 2015, No. 521. – Pp. 436–444
6. Andriyanov, N.A. Analysis of the Acceleration of Neural Networks Inference on Intel Processors Based on OpenVINO Toolkit// IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, 2020. – Pp. 1–5. Doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166067.
7. Starovoitov, V.V. Singular value decomposition of matrices in the analysis of digital images // Informatics, 2017, No. 2 (54), – Pp. 70-83.
8. Andriyanov, N.A. Analysis of the effectiveness of methods for reducing the dimensionality of data in image processing // Modern mathematics and the concept of innovative mathematical education, 2021, V. 8, No. 1. – Pp. 217-223
9. MNIST Dataset [Electronic resource] - URL: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>, (date of access: 09/07/2021)

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО МЕТОДА ПРОНИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ УРЫСОНА

В. А. Лукьяненко, В. А. Белозуб

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского» (КФУ им. В. И. Вернадского),
г. Симферополь, Россия

Аннотация. Уравнение Урысона моделирует регистрацию отраженного от поверхности импульсного сигнала в процессе сканирования. Задача решения уравнения (восстановление поверхности или характерных точек) является некорректной. Регуляризующие алгоритмы учитывают как априорную и другую доступную информацию, так и специфику сканирования. Рассматривается модельное уравнение типа Урысона, которое в образах Фурье имеет осциллирующее ядро. Представленный алгоритм основан на сведении к нелинейной алгебраической системе уравнений. На основе факторизации система приводится к решению линейного разностного уравнения и нахождению корней характеристического многочлена. Регуляризация обеспечивает устойчивость применяемым алгоритмам.

Ключевые слова: уравнение Урысона с осциллирующим ядром; метод Прони; регуляризующие алгоритмы.

APPLICATION OF THE GENERALIZED PRONY METHOD FOR SOLVING THE URYSOHN EQUATIONS

V. A. Lukianenko, V. A. Belozub

V. I. Vernadsky Crimean Federal University (V. I. Vernadsky CFU), Simferopol, Russia

Abstract. The Urysohn equation simulates the registration of a pulse signal reflected from the surface during the scanning process. The problem of solving the equation (restoring the surface or characteristic points) is incorrect. Regularizing algorithms take into account both a priori and other available information, as well as the specifics of scanning. We consider a model equation of the Urysohn type, which in Fourier images has an oscillating core. The presented algorithm is based on the reduction to a nonlinear algebraic system of equations. Based on factorization, the system is reduced to solving a linear difference equation and finding the roots of the characteristic polynomial. Regularization provides stability to the applied algorithms.

Keywords: Urysohn equation with an oscillating core; Prony method; regularizing algorithms.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача восстановления поверхности, изображения, характерных свойств объектов по результатам косвенных измерений является актуальной прикладной задачей [1]. В фиксированный момент сканирующее устройство (антенна) регистрирует дельтаобразный импульс, который отражается от изучаемой поверхности. Характер отражения может быть заданным или искомым. Моделирует такой процесс нелинейное интегральное уравнение типа Урысона с осциллирующим ядром. Задача решения таких уравнений является некорректно поставленной. Решение мало упрощается даже в случае поиска характерных точек поверхности (блестящих), вклад которых в правую часть наибольший [2; Т. 3, с. 223-232].

Данное исследование является продолжением работы [2; Т. 2, с. 119-129], [3], где приведен достаточно подробный обзор модельных уравнений, методов и регуляризирующих алгоритмов.

2. УРАВНЕНИЕ УРЫСОНА С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ЯДРОМ

Рассмотрим частный случай уравнения Урысона на отрезке

$$A(f, \tau) \equiv \int_a^b f(s) e^{i w \tau(s)} ds = V(w), \quad c \leq w \leq d. \quad (1)$$

Дискретный вариант имеет вид

$$\sum_{k=1}^p A_k f_k e^{i[c+(n-1)h_w]\tau_k} = v_n, \quad n = 1, 2, \dots, p, \quad (2)$$

$$w_n = c + (n-1) \frac{d-c}{p-1} = c + (n-1)h_w, \quad n = \overline{1, p}, \quad s_k = a + (k-1) \frac{b-a}{p-1} = a + (k-1)h_s, \quad k = \overline{1, p},$$

$$\tau_k = \tau(s_k), \quad v_n = v(w_n), \quad f_k = f(s_k).$$

Обозначая

$$h_k = A_k f_k e^{i c \tau_k}, \quad z_k = e^{i h_w \tau_k} \quad (3)$$

приходим к нелинейному уравнению

$$\sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} = v_n, \quad n = \overline{1, p} \quad (4)$$

с искомыми величинами $h_1, h_2, \dots, h_p, z_1, z_2, \dots, z_p$. Если $z = z_1, z_2, \dots, z_p$ и $h = h_1, h_2, \dots, h_p$ найдены, то τ_k и f_k находятся по формулам

$$\tau_k = \frac{1}{i h_w} \ln z_k, \quad f_k = A_k^{-1} e^{-i c \tau_k} h_k. \quad (5)$$

Решение уравнения (4) находится методом Прони в случае точно заданных величин $v = (v_1, v_2, \dots, v_p)$. Переобозначим v_n через $x[n]$: $x[n] \equiv v_n$.

Входящие в (4) p уравнений, где $1 \leq n \leq p$, можно записать в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \cdot & \cdot & \cdot & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \cdot & \cdot & \cdot & z_p^1 \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & \cdot & \cdot & \cdot & z_p^{p-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ h_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x[1] \\ x[2] \\ \vdots \\ \vdots \\ x[p] \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Матрица с временными индексами элементов z имеет структуру матрицы Вандермонда. Если может быть найден метод для раздельного определения элементов z , то уравнение (6) можно рассматривать как систему уравнений, решив которую, определяют неизвестный вектор комплексных амплитуд. Вклад самого Прони как раз и состоял в отыскании такого метода.

Разделение основано на том факте, что $x[n]$ в (6) является решением некоторого однородного линейного разностного уравнения с постоянными коэффициентами. Для того чтобы определить вид этого разностного уравнения, определим сначала полином $\varphi(z)$, корнями которого являются экспоненты z_k :

$$\varphi(z) = \prod_{k=1}^p (z - z_k). \quad (7)$$

Если произведения в (7) выразить в виде степенной последовательности, то полином можно представить в следующем виде:

$$\varphi(z) = \sum_{m=0}^p a[m] z^{p-m}, \quad (8)$$

где $a[m]$ – комплексные коэффициенты, для которых $a[0]=1$. Осуществляя в уравнении (4) сдвиг индекса от n к $n-m$ и умножая обе его части на параметр $a[m]$, получаем

$$a[m]x[n-m] = a[m] \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-m-1}. \quad (9)$$

Записывая аналогичные произведения $a[0]x[n], \dots, a[m-1]x[n-m+1]$ и осуществляя суммирование, получаем

$$\sum_{m=0}^p a[m]x[n-m] = \sum_{i=0}^p h_i \sum_{m=0}^p a[m] z_i^{n-m-1}, \quad (10)$$

которое справедливо при $p+1 \leq n \leq 2p$. Осуществляя подстановку $z_i^{n-m-1} = z_i^{n-p} z_i^{p-m-1}$, получаем

$$\sum_{m=0}^p a[m]x[n-m] = \sum_{i=0}^p h_i z_i^{n-p} \sum_{m=0}^p a[m] z_i^{p-m-1} = 0. \quad (11)$$

Сумму в правой части (11) можно рассматривать как полином, определяемый уравнением (8), который записан через свои корни, что и обеспечивает в (11) равенство нулю. Уравнение (11) – это линейное разностное уравнение, однородное решение которого выражается формулой (4). Полином (8), ассоциированный с этим линейным разностным уравнением, называется характеристическим.

Уравнения, представляющие истинные значения коэффициентов $a[n]$, удовлетворяющих (11), можно записать в виде следующего $p \times p$ матричного уравнения:

$$\begin{pmatrix} x[p] & x[p-1] & \dots & x[1] \\ x[p+1] & x[p] & \dots & x[2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x[2p-1] & x[2p-2] & \dots & x[p] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a[1] \\ a[2] \\ \vdots \\ a[p] \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x[p+1] \\ x[p+2] \\ \vdots \\ x[2p] \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Комплексные полиномиальные коэффициенты $a[1], \dots, a[p]$, которые являются функциями только зависящих от времени компонентов z_k экспоненциальной модели, позволяют по временным отсчетам сформировать соотношения для линейного предсказания. Матрица в уравнении (12) имеет теплицеву структуру, поэтому решение может быть получено с помощью известных программ.

Алгоритм Прони для определения p экспонент к $2p$ отсчетам данных можно теперь представить в виде следующих трех этапов.

На первом этапе получается решение уравнения (12) для коэффициентов полинома.

На втором этапе вычисляются корни полинома, определяемого уравнением (8). Для этой цели используется программы факторизации полинома. Используя корни z_i , можно определить значения искомой функции τ_k и f_k по формулам (5). Здесь f – функция, характеризующая свойства отражения от поверхности, τ – искомая функция, зависящая от поверхности $h(\xi)$. Функция f может зависеть от разности аргументов $(\xi - s)$. В этом случае правая часть v будет зависеть от (ξ, w) .

Так как задача является некорректной, то на всех этапах алгоритма необходимо проводить регуляризацию. Например, для уравнения (12) в операторной форме $XA = U$ регуляризующий алгоритм может иметь вид

$$\alpha X + X^* X A = X^* U,$$

где α – параметр регуляризации.

3. УЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрим случай большого параметра $w \gg 1$ в уравнении (1) вида [4; с. 127]

$$(K_w f)(t) = \int_{\Omega} f(s) e^{iwt(t-s)} ds = v(t, w).$$

Пусть $\Omega = [a, b]$ и $0 \in \Omega$, $f \in C_0^\infty(\Omega)$, $\tau \in C^\infty(\mathbb{R})$, а фаза τ единственную и притом невырожденную стационарную точку $t = 0$. Тогда оператор $\sqrt{\frac{w}{2\pi}} K_w : C_0^\infty(\Omega) \rightarrow C^\infty(\Omega)$ есть оператор с δ -образным ядром. Справедливо [4] асимптотическое представление

$$\left(\sqrt{\frac{w}{2\pi}} K_w f \right)(t) = \exp \left[\frac{i\pi}{4} \operatorname{sgn} \tau''(0) |\tau''(0)|^{\frac{1}{2}} \right] \left[f(t) + O(w^{-1}) \right]$$

равномерно по $t \in \Omega$. Если $h = t - s$ и коэффициенты разложения $\tau(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h + \dots$, то можно записать представление

$$v(t, w) = \sqrt{\frac{2\pi}{w}} \exp \frac{i\pi}{4} \operatorname{sgn} a_2 |a_2|^{\frac{1}{2}} [f(t) + O(w^{-1})],$$

которое позволяет грубо оценивать вклад f и τ в правую часть уравнения $v(t, w)$.

Классификация характерных точек уравнения (1) может быть произведена по характеристическому многочлену (8). Так как уравнение (1) представляет строку (или столбец) двумерной поверхности, то имеем близкие уравнения. Полученное решение для одного уравнения является приближенным для итерационного алгоритма построения решения близкого уравнения. Соответствующие теоремы, шаги алгоритма и оценки погрешности приведены в работе [3] для уравнения Урысона вида

$$A(f, \tau) \equiv \int_{\mathbb{R}} f(\xi - s) n(t - \tau(s)) ds = u(t, \xi), \quad t, \xi \in \mathbb{R} \quad (13)$$

с ядром $n(t)$ в виде дельтаобразной функции. Искомыми могут быть как функция f , так и τ .

Неизвестная функция $\tau(s)$ характеризует время прохождения двойного расстояния импульсом от точки наблюдения до искомой поверхности и обратно. Функция f может быть искомой или известной (характеризует специфику отражения импульса от поверхности). Для единственности решения необходима система таких уравнений или регистрация отраженного сигнала в процессе движения точки наблюдения по заданной траектории. В случае заданной функции $\tau(s)$ и правой части $u(t, \xi)$ также косвенно можно определить характер нелинейности в результате решения спектральной задачи для линейного по f оператора.

Применяя к уравнению (13) преобразование Фурье

$$(\mathfrak{F}f)(w) = F(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} f(t) e^{iwt} dt,$$

с учетом соотношения

$$\mathfrak{F}\{n(t - \tau(\xi - s))\} = e^{iwt(\xi - s)} N(w)$$

приходим к уравнению Урысона с осциллирующим ядром вида (1)

$$\int_{\mathbb{R}} f(s) e^{iwt(\xi - s)} ds = N^{-1}(w) U(w, \xi) \equiv V(w, \xi).$$

В зависимости от области интегрирования (финитности функции) также рассматриваются интегральные операторы вида

$$(A_w f)(\xi) = \int_{\Omega} f(s) e^{iwg(\xi, s)} ds.$$

Представляет интерес вычисление спектра $\sigma(A_w)$ таких операторов. Например, для одномерного оператора на конечном промежутке

$$(A_w f)(t) = \int_{-1}^1 f(s) e^{iwt(t-s)} ds = \lambda f(t), \quad |t| \leq 1.$$

Зная (λ_j, f_j) для известных $\tau(t)$ и w имеем правую часть $u = u_j = \lambda_j f_j$. И обратно, по набору (λ_j, f_j) и правой части $u(t)$ можем оценить качественное поведение функции

$\tau(t)$. Для этого необходимо для набора характерных функций $\tau_j(t)$ найти соответствующие им правые части $u = u_j(t)$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уравнения Урысона с осциллирующим ядром представляют теоретический интерес имеют приложения в качестве моделей косвенного измерения в задачах восстановления поверхности. Приближенные решения предлагается находить на основе обобщенного метода Прони с учетом регуляризации. Использование теплицевых операторов и быстрого преобразования Фурье позволяет ускорить процедуру поиска решений. Для больших значений параметров задачи асимптотические методы приводят к простым формулам вычисления характеристик точек решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
2. Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 29 сентября – 1 октября 2020 г.); в 6 т. / Воронежский государственный университет; АО «Концерн “Созвездие”». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020.
3. Belozub V., Kozlova M., Lukianenko V. Approximated solution algorithms for Urysohn-type equations. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1902. – pp. 012051. doi:10.1088/1722-6596/1902/1/0122051.
4. Федорюк М. В. Метод перевала. М.: Наука, 1977. – 368 с.

REFERENCES

1. Vasilenko G.I., Taratorin A.M. Image restoration. M.: Radio and communication, 1986 .-- 304 p.
2. Radar, navigation, communications: collection of proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference (Voronezh, September 29 - October 1, 2020): in 6 volumes / Voronezh State University; Concern Sozvezdie JSC. - Voronezh: Voronezh State University Publishing House, 2020.
3. Belozub V., Kozlova M., Lukianenko V. Approximated solution algorithms for Urysohn-type equations. // J. Phys .: Conf. Ser. 2021. Vol. 1902. - pp. 012051.doi: 10.1088 / 1722-6596 / 1902/1/0122051.
4. Fedoryuk M.V. Moscow: Nauka, 1977 .-- 368 p.

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ СВЕРТОЧНЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЬЯМИ

А. А. Васильченко, И. В. Керимов, А. С. Мельников

Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого, Серпухов, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены результаты оценивания качества распознавания объектов по изображениям в условиях их зашумленности и последующей фильтрации. Приведены зависимости чувствительности распознавания объектов в зависимости от степени зашумления для различных типов фильтров и различных типов сверточных нейронных сетей (CNN).

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, цветовое пространство, чувствительность, фильтр, ROC-кривая.

OBJECT RECOGNITION BY CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

A. A. Vasilchenko, I. V. Kerimov, A. S. Melnikov

Branch of Military academy of Rocket Strategic forces of a name Peter the Great, Serpuhov, Russian Federation

Abstract. In article results of estimation of quality of recognition of objects under images in the conditions of imposing of noise and the subsequent filtration are presented. Dependences of sensitivity of recognition of objects depending on degree of noise for various types of filters and various types convolution neural networks (CNN) are resulted.

Keywords: CNN, colour space, sensitivity, the filter, ROC-curve.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют различные подходы к выделению и распознаванию объектов по изображениям (снимкам), основанные на теории распознавания образов, цифровой обработки и анализа изображений, теории множеств, корреляционных методах, сверточных нейронных сетях (CNN), гистограммном анализе изображений и т.д. [1-4]. В связи с техническими особенностями процесса съемки и появлением дефектов на изображениях, таких как наличие шумов (аддитивных, мультиплекативных, импульсных) и смазывание возникает необходимость применения таких детекторов, способных в условиях появления указанных дефектов изображений устойчиво выполнять функции выделения и распознавания. Такие детекторы могут быть использованы в системе технического зрения.

Большим преимуществом искусственных нейронных сетей является то, что этот научно-методический аппарат создан на основе современных представлений о способе обработки информации человеческим мозгом, который обладает способностью изменять организацию своих структурных компонентов –нейронов и таким образом, чтобы решать конкретные, сложные, плохо формализованные задачи, к числу которых относится также и распознавание образов [3]. В первую очередь нейронные сети характеризуют такие их свойства как массивное параллелизм процесса обработки информации и способность к обобщению. Несмотря на это, на сегодняшний день, нейронные сети еще

не способны давать сложные готовые решения, из-за чего их приходится интегрировать в многосоставные системы для решения конкретных, пусть и не тривиальных задач.

Искусственные нейронные сети имеют ряд полезных свойств [4]:

1. Нелинейность всей сети и отдельных нейронов, из которых она состоит.
2. Адаптивность. Нейронные сети могут изменять свою структуру, приспосабливаясь к изменениям в окружающей среде или предметной области.
3. Устойчивость к отказам. При повреждении отдельных нейронов или связей в аппаратной реализации нейронной сети, работоспособность всей системы сохраняется.
4. Единый подход к анализу и проектированию, универсальность в решении задач, относящихся к различным предметным областям.

Однако при всех своих объективных достоинствах нейронные сети остаются чрезвычайно сложным механизмом обработки информации.

При решении задачи распознавания часто требуется оценить качество используемых детекторов (классификаторов) с целью сравнения и выявления наилучшего детектора для дальнейшего применения на новых данных и выбора наиболее эффективного фильтра для компенсации шума. Работа детектора может быть охарактеризована его достоверностью, то есть способностью принимать верные решения. Оценку достоверности классификатора, как правило, можно получить экспериментально.

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Существуют такие критерии качества классификатора, как ошибки первого и второго рода, Accuracy [5], AUC [6], чувствительность и специфичность классификатора [5], матрицу неточностей, матрицу штрафов, ROC-кривые [7] и коэффициент Джини [6].

Ошибка первого рода возникает, когда интересующее нас событие ошибочно не обнаружилось, то есть в нашем примере – это наличие на объекта на изображении классифицированных (детектируемых) как отсутствие. Ошибка второго рода возникает, когда при отсутствии объекта ошибочно выносится решение о его присутствии на изображении.

Показатель *Accuracy* (точность), определяет долю верных прогнозов среди всех возможных прогнозов наличия или отсутствия объекта. Чувствительность *R* (*recall*, *sensitivity*, отзыв) показывает долю верно классифицированных объектов в случае их наличия среди всех изображений. Специфичность *S* (*specificity*) показывает долю верно классифицированных изображений, на которых объект отсутствует.

ROC-кривая (*receiver operating characteristic*, кривая ошибок) используется для сравнения качества бинарной классификации нескольких классификаторов и показывает зависимость между долей верно детектируемых объектов (чувствительности) и долей верно классифицированных изображений, на которых объект отсутствует.

Поскольку визуальное сравнение *ROC*-кривых не всегда позволяет выявить наиболее эффективный классификатор, часто применяют метрику *AUC* (*area under curve*), которая представляет собой площадь под *ROC*-кривой и определяет вероятность того, что классификатор присвоит больший вес в случае наличия объекта на изображении, нежели в случае его отсутствия.

В качестве детекторов были использованы следующие структуры CNN: Alexnet, googleNet, VGG16, VGG19, squeezyNet, RESNET50, RESNET101 [7-8]. Для оценивания качества используемых детекторов (классификаторов) была сформирована обучающая выборка из 4000 изображений (в 2000 снимках объект находился на изображении, в 2000 снимках объект отсутствовал. Данная выборка отражала следующие особенности:

- различное местонахождение объекта в пространстве относительно наблюдателя;
- различные типы наблюдаемых объектов;
- различное разрешение изображений;
- различные погодные условия, при которых производится съемка;
- различная степень зашумленности.

Задача фильтрации состоит в преобразовании зашумленного изображения (трехмерного массива) некоторого размера в различных цветовых пространствах (в качестве используемого рассматривается цветовое пространство RGB). В качестве модели рассматриваемого шума используется аддитивный белый гауссовский шум (БГШ) с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением σ (СКО) (степенью зашумления) в диапазоне от 0.01 до 0.4 (где $\sigma = \Delta/256$). Преобразование осуществляется посредством операции свертки исследуемого изображения с некоторой структуры (фильтра) с системными параметрами (размерами окрестности, значениями весовых коэффициентов). В общем виде фильтрация изображения размерами $M \times N$ с помощью фильтра размерами $M \times N$ задается выражением [2]:

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (1)$$

где x и y изменяются так, что каждая точка оператора w в какой-то момент попадает на каждый пиксель изображения f .

В качестве исследуемого типа фильтрации были рассмотрены: пространственная фильтрация (пространственный фильтра усреднения, медианный фильтр, минимаксный фильтр); частотная фильтрация (фильтр низких частот Баттервортса 2 порядка); сингулярный фильтр; вейвлет-фильтрация (вейвлет Добеши 3).

3. ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ

В ходе имитационного моделирования процесса выделения и распознавания объекта для указанных типов CNN были получены графики зависимости чувствительности от степени зашумленности изображений. Данные зависимости представлены на рисунке 1.

Следует отметить, что лучшую чувствительность детектирования имеет CNN RESNET101, однако $recall=0,5$ достигается при $\sigma=0,065$ и при $\sigma>0,17$ распознавание объекта на изображениях при воздействии АБГШ становится практически невозможным. Далее данная структура CNN обрабатывала изображения, полученные в ходе зашумления и последующей процедуры фильтрации указанными типами фильтров. Результат работы детектора (классификатора) полученных изображений с шумом CNN RESNET101 представлен на рисунке 2.

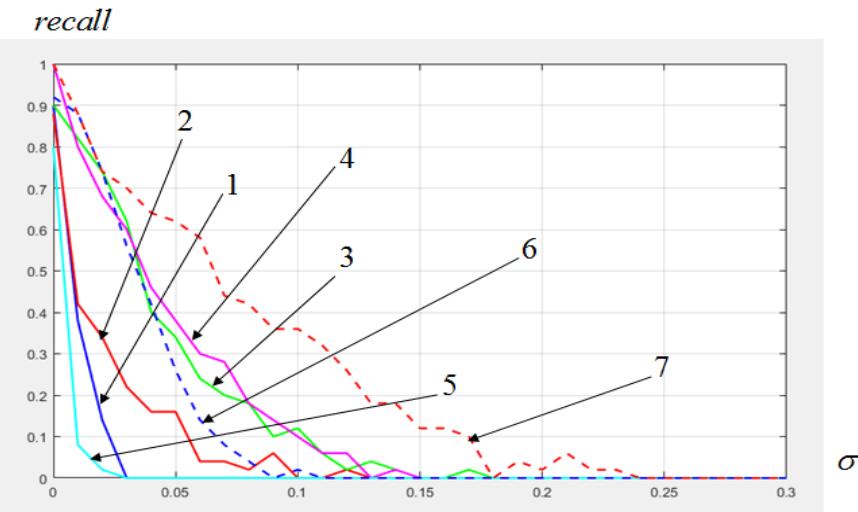


Рис. 1. Графики зависимости чувствительности детектирования (классификации) от степени зашумленности изображений σ для рассматриваемых детекторов:
1) Alexnet; 2) googleNet; 3) VGG16; 4) VGG19; 5) squeezyNet; 6) RESNET50; 7) RESNET101

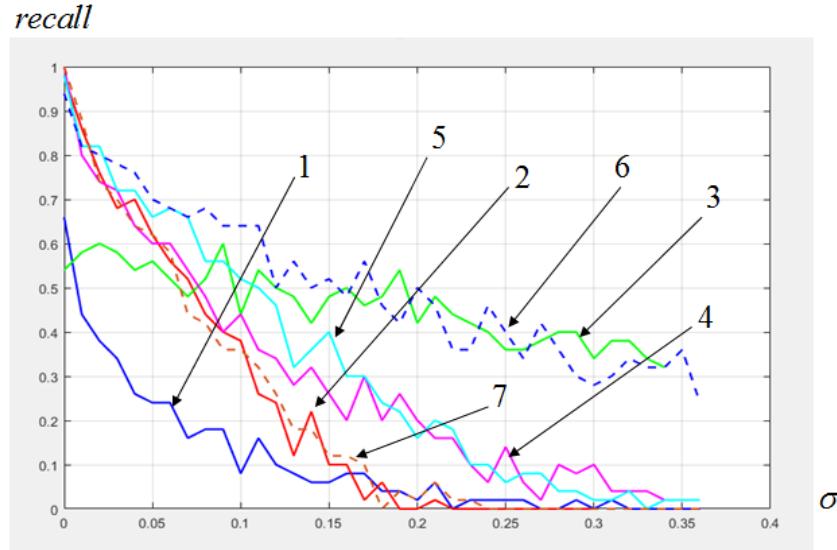


Рис. 2. Графики зависимости чувствительности детектирования (классификации) CNN RESNET101 от степени зашумленности изображений σ для рассматриваемых типов фильтров:
1) пространственный минимаксный фильтр; 2) фильтр низких частот Баттервортса 2 порядка;
3) сингулярный фильтр; 4) вейвлет-фильтрация; 5) медианный фильтр;
6) усредняющий фильтр; 7) при отсутствии фильтрации

Лучшую чувствительность детектирования CNN RESNET101 имеет при фильтрации изображений усредняющим фильтром окрестностью 3×3 и сингулярный фильтр, при этом распознавание объекта возможно при значениях $\sigma < 0,62$. Однако при значениях $0 < \sigma < 0,15$ сингулярный фильтр показывает худшее качество распознавания, чем усредняющий фильтр.

Для выбранной структуры CNN RESNET101 и наилучших типов фильтров была построена ROC-кривая, позволяющая так же оценить качество классификации для рассмотренных процессов. Следует отметить, что усредняющий фильтр совместно с CNN RESNET101 позволяет получить более высокое качество классификации, по сравнению с применением сингулярного фильтра. Данная ROC-кривая представлена на рисунке 3.

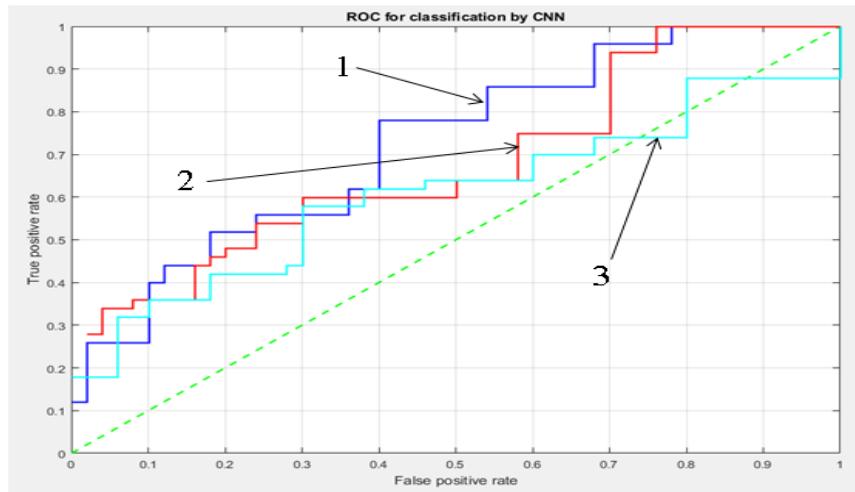


Рис. 3. ROC-кривая детектирования (классификации) CNN RESNET101 для рассматриваемых типов фильтров: 1) усредняющий фильтр; 2) сингулярный фильтр; 3) при отсутствии фильтрации

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее целесообразным для распознавания объектов на изображениях является применение CNN RESNET101 совместно с усредняющим фильтром окрестностью 3×3 и сингулярного фильтра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Осоков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005. - 1007 с.
3. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. - М.: Техносфера, 2006. - 615 с.
4. Powers D. M. Evaluation: From precision, recall and f-factor to roc, informedness, markedness and correlation. // Technical report, School of Informatics and Engineering, Flinders University Adelaide, South Australia. – 2007.
5. Мерков А. Б. Распознавание образов: введение в методы статистического обучения. – М.: URSS, 2010. – 254 с.
6. Желтов, С. Ю. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. - М.: Физматкнига, 2010. - 672 с.
7. Форсайт, Д. А. Компьютерное зрение. Современный подход, 2004. - 928 с.

REFERENCES

1. Visilter Yu. V., Zhelтов S. Yu., Bondarenko A.V., Ososkov M. V., Morzhin A.V. Image processing and analysis in machine vision problems: A course of lectures and practical classes. - Moscow: Fizmatkniga, 2010 – 672 p.
2. Gonzalez, R. Digital image processing. - Moscow: Technosphere, 2005. - 1007 p.
3. Gonzalez, R. Digital image processing in the Matlab environment. - Moscow: Technosphere, 2006. - 615 p.
4. Powers D. M. Evaluation: From precision, recall and f-factor to roc, informedness, markedness and correlation. // Technical report, School of Informatics and Engineering, Flinders University, Adelaide, South Australia. – 2007.
5. The mark of A. B. pattern Recognition: an introduction to methods of statistical learning. – M.: URSS, 2010. – 254 p.
6. Zhelтов, S. Yu. Image processing and analysis in machine vision problems. - M.: Fizmatkniga, 2010. - 672 p.
7. Foresight, D. A. Computer vision. Modern approach, 2004. - 928 p.

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ПОБОЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИНТЕЗАТОРОВ С ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

А. В. Леньшин¹, Е. В. Шаталов², В. Н. Тихомиров³

¹ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

²УГИБДД ГУ МВД России по Воронежской области, Воронеж, Россия

³АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Россия

Аннотация. Проанализированы подходы по уменьшению уровня нежелательных побочных спектральных составляющих (ПСС) в спектре выходного сигнала синтезатора частот (СЧ). Предложены схемотехнические решения по уменьшению уровня ПСС выходного сигнала СЧ. Приведены результаты экспериментального измерения спектров выходного сигнала синтезатора с фазовой автоподстройкой частоты в широкополосном и узкополосных режимах. Обосновано использование дополнительных буферных каскадов по входу и выходу СЧ для решения проблемы помехи коммутации.

Ключевые слова: синтезатор частот, фазовая автоподстройка частоты, побочные спектральные составляющие, экспериментальные измерения, помехи коммутации.

ANALYSIS OF OPTIONS FOR REDUCING THE LEVEL OF SIDE EFFECTS SPECTRAL COMPONENTS OF SYNTHESIZERS WITH PHASE-LOCKED FREQUENCY

A. V. Lenshin¹, E. V. Shatalov², V. N. Tikhomirov³

¹Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

²UGIBDD GU of the Ministry of Internal Affairs of Russia in the Voronezh region, Voronezh, Russia

³JSC « Concern «Sozvezdie », Voronezh, Russia

Abstract. Approaches to reduce the level of undesirable side spectral components (PSS) in the spectrum of the output signal of the frequency synthesizer (MF) are analyzed. Circuit solutions for reducing the PSS level of the output signal of the midrange are proposed. The results of experimental measurement of the spectra of the output signal of a synthesizer with phase-locked frequency in wide-band and narrow-band modes are presented. The use of additional buffer stages for the input and output of the MF is justified to solve the problem of switching interference.

Keywords: frequency synthesizer, phase-locked frequency tuning, spurious spectral components, experimental measurements, switching interference.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в системах и комплексах радиосвязи, системах передачи информации широкое распространение получили синтезаторы частот (СЧ), построенные на основе прямого цифрового синтеза или импульсной фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ), принципы работы которых описаны в [1]. Синтезатор представляет собой следящую систему, охваченную обратной связью по частоте. В таких СЧ-ИФАПЧ синтез частот может производиться как с целочисленными, так и с дробными коэффициентами деления частоты в цепи обратной связи системы ИФАПЧ. При целочисленном делении значение частоты сравнения в частотно-фазовом детекторе (ЧФД) равно требуемому значению шага сетки. Уменьшение шага сетки влечет

соответствующее уменьшение значения частоты сравнения и увеличение значения коэффициента деления, что неизбежно повышает инерционность системы ИФАПЧ и уменьшает скорость перестройки СЧ [2, 3].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фазовые шумы СЧ характеризуют степень приближения выходного сигнала СЧ к идеальному. Реальный сигнал СЧ всегда имеет случайную амплитудную и фазовую модуляцию. Выходной сигнал СЧ можно представить в виде

$$u_{\text{СЧ}}(t) = [U_0 + U(t)] \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (1)$$

где U_0 , ω_0 – ожидаемые (идеальные) значения амплитуды и частоты колебаний СЧ; $U(t)$ – случайные отклонения амплитуды колебаний от ожидаемого значения; $\varphi(t) = \Delta f_0 \cdot \delta t$ – случайные отклонения фазы колебаний вследствие отклонения $\Delta f_0 = f - f_0$ мгновенной частоты колебаний от ожидаемого значения f_0 за временной интервал δt [4].

При малых случайных отклонениях амплитуды и фазы колебания от истинных значений выражение (1) принимает вид

$$u_{\text{СЧ}}(t) \approx U_0 \cos \omega_0 t + U(t) \cos \omega_0 t - U_0 \varphi(t) \sin \omega_0 t. \quad (2)$$

Совместное влияние амплитудных и фазовых флуктуаций на мгновенное значение частоты колебаний характеризуется фазовым шумом. В частотной области фазовые шумы характеризуются спектральной плотностью мощности фазового шума в зависимости от разности мгновенного и идеального (ожидаемого значения частот) Δf_0 .

Использование дробных коэффициентов деления обеспечивает работу системы ИФАПЧ на частотах сравнения, намного превышающих величину шага сетки выходной частоты за счет применения в цепи обратной связи делителя с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД). Это приводит к увеличению значения частоты сравнения и уменьшению общего значения коэффициента деления, что неизбежно понижает инерционность системы ИФАПЧ и увеличивает скорость перестройки СЧ. В результате сокращается длительность переходного процесса и улучшаются качественные показатели автоподстройки, что безусловно позитивно влияет на величину фазового шума выходного сигнала [5].

Целью статьи является обоснование и разработка схемотехнических решений по уменьшению уровня побочных спектральных составляющих в спектре выходного сигнала синтезатора частот.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для уменьшения уровня помех дробности в спектре выходного сигнала СЧ в составе ДДПКД используется схема дельта-сигма модулятора (ДСМ) [6, 7]. В работе [8] получены аналитические выражения для определения спектра помех дробности нелинейной непрерывной системы фазовой автоподстройки частоты с дробными делителями частоты.

Вместе с тем, при реализации СЧ-ИФАПЧ с дробным делением в широком диапазоне перестройки частоты $\Delta F > f_{\text{ог}}$ в спектре выходного сигнала имеются частотные области с нежелательными побочными спектральными составляющими (ПСС) на рабочих частотах, кратных частоте $f_{\text{ог}}$ сигнала опорного генератора (ОГ). При этом ширина этой частотной области $\Delta F_{\text{ПСС}}$ определяется полосой пропускания системы ИФАПЧ f_{CP} , порядком фильтра нижних частот (ФНЧ) $N_{\text{ФНЧ}}$ системы ИФАПЧ и требуемым подавлением ПСС в спектре выходного сигнала в соответствии с выражением

$$\Delta F_{\text{ПСС}} \sim \frac{2f_{\text{CP}} \cdot D_{\text{ПСС}}}{N_{\text{ФНЧ}}}, \quad (3)$$

где $D_{\text{ПСС}}$ – требуемый динамический диапазон подавления ПСС относительно несущей частоты.

Сущность подхода к достижению снижения уровня нежелательных ПСС в спектре выходного сигнала синтезатора сводится к тому, что для ухода от интермодуляционных составляющих (биений частоты выходного сигнала СЧ-ИФАПЧ с n -й гармоникой частоты выходного сигнала ОГ) необходимо изменять частоту опорного сигнала $f_{\text{ог}}$. При этом необходимым требованием является не кратность двух (или более) опорных частот друг другу. В работе [9] предлагается коммутировать на опорном входе СЧ-ИФАПЧ два ОГ (рисунок 1) с некратными частотами выходных сигналов. Такой вариант построения опорного канала синтезатора с ОГ1 и ОГ2 исключает увеличение шумов выходного сигнала, прост в реализации, но имеет также ряд недостатков, среди которых: увеличение энергопотребления, габаритных размеров и стоимости [10].

В описании к интегральной схеме фирмы «Hittite» HMC833LP6GE [11] для ухода от интермодуляционных ПСС предлагается использовать каскадное включение двух дробных СЧ (рисунок 2).

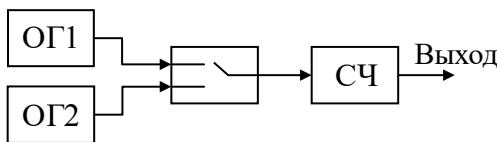


Рис. 1. Схема СЧ-ИФАПЧ с коммутацией опорных генераторов

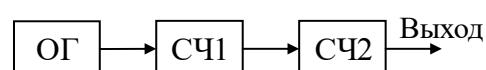


Рис. 2. Схема каскадного включения СЧ-ИФАПЧ

При таком включении выходной сигнал СЧ1 является опорным сигналом для СЧ2, формирующего выходной сигнал. При этом СЧ1 может выдавать дискретное множество некратных частот, за счет изменения которых по определенному алгоритму (заранее расчетному или экспериментально установленному) можно избежать целочисленных ПСС в спектре выходного сигнала СЧ2. Такая методика также имеет ряд недостатков: увеличение спектральной плотности мощности фазовых шумов (СПМ ФШ), увеличение времени установления частоты.

Для существенного снижения уровня ПСС в СЧ-ИФАПЧ было предложено новое решение по объединению достоинств с одновременным уменьшением недостатков описанных выше схем с коммутацией опорных генераторов и каскадного включения СЧ. Для ухода от целочисленных ПСС предлагается использовать сигнал СЧ с фиксированной частотой (ФСЧ-ИФАПЧ) также в качестве опорного для СЧ с перестраиваемой частотой (ПСЧ-ИФАПЧ). Для этого необходимо поделить частоту выходного сигнала ФСЧ-ИФАПЧ. Структурная схема СЧ-ИФАПЧ, реализующая предложенное новое схемотехническое решение, представлена на рисунке 3.

В отличие от описанных в различных публикациях технических решений по снижению уровня ПСС в СЧ-ИФАПЧ в предлагаемом решении используется только один опорный генератор. В качестве второго опорного сигнала используется сигнал ФСЧ-ИФАПЧ. Значение частоты выходного сигнала ФСЧ-ИФАПЧ не изменяется в ходе работы всей схемы усовершенствованного СЧ-ИФАПЧ, так как он включается автоматически по заранее заданной программе. Такое техническое решение существенно упрощает алгоритм управления перестраиваемым синтезатором частот ПСЧ-ИФАПЧ в отличие от решения, представленного на рисунке 2. Результатом применения нового построения схемы СЧ-ИФАПЧ является отсутствие интермодуляционных ПСС в спектре выходного сигнала на частотах вблизи гармоник частоты ОГ.

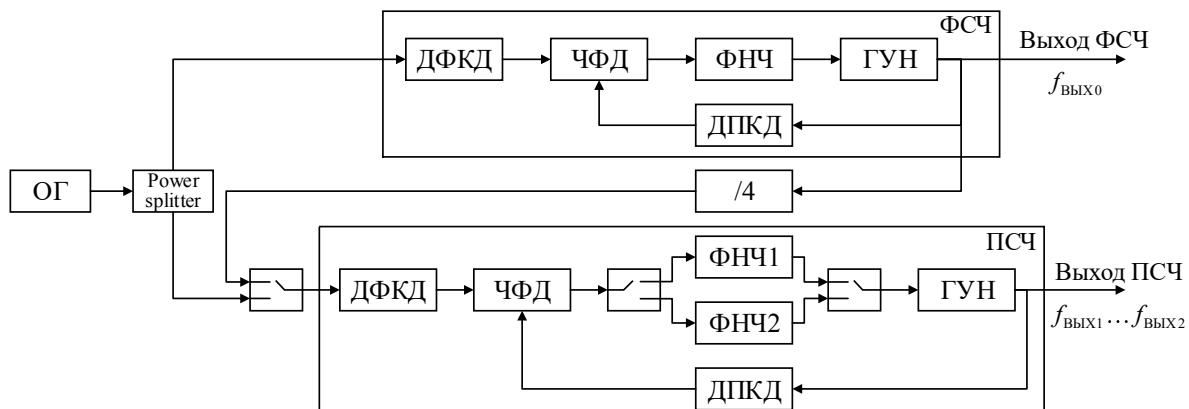


Рис. 3. Схема СЧ-ИФАПЧ с коммутацией ФСЧ-ИФАПЧ и ПСЧ-ИФАПЧ

На рисунках 4–7 представлены спектры выходного сигнала ПСЧ-ИФАПЧ в широкополосном (при использовании ФНЧ1) и узкополосных режимах (при ФНЧ2).

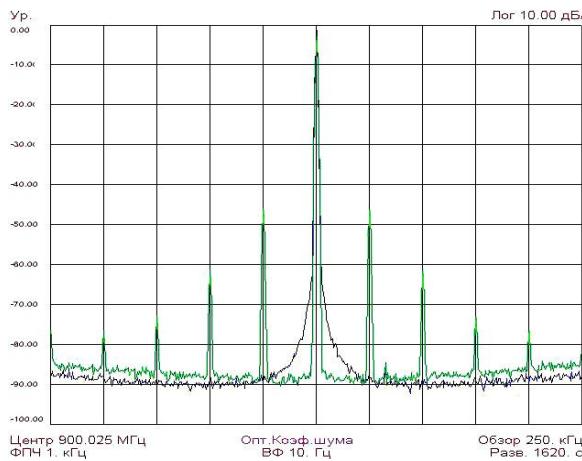


Рис. 4. Спектрограмма выходного сигнала ПСЧ-ИФАПЧ с ФНЧ1

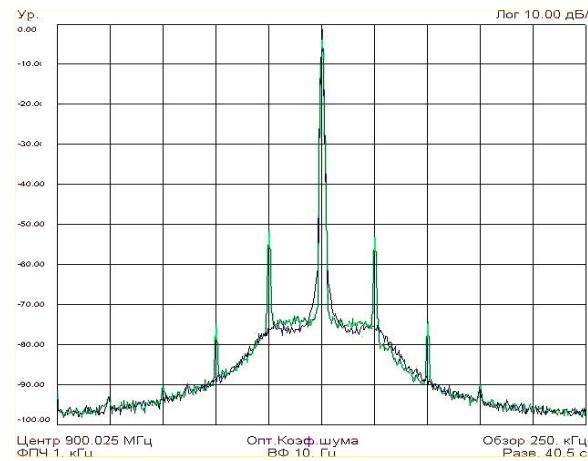


Рис. 5. Спектрограмма выходного сигнала ПСЧ-ИФАПЧ с ФНЧ2

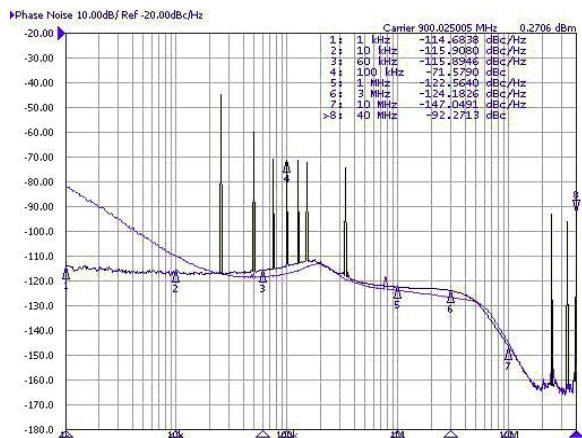


Рис. 6. СПМ ФШ выходного сигнала ПСЧ-ИФАПЧ с ФНЧ1

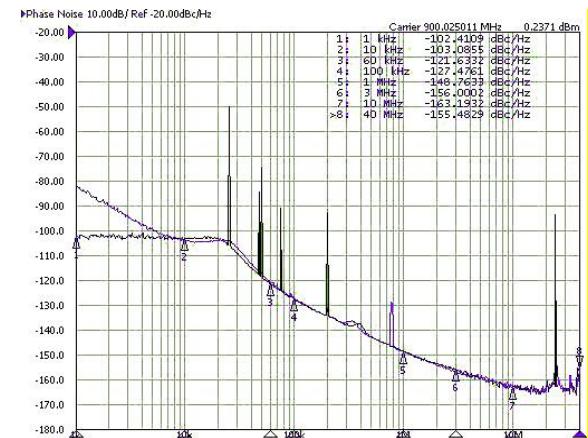


Рис. 7. СПМ ФШ выходного сигнала ПСЧ-ИФАПЧ с ФНЧ2

Анализ рисунков 4–7 позволяет сделать однозначный вывод, что при применении новой схемы удалось избежать наличия ПСС в спектре выходного сигнала во всех режимах работы ПСЧ-ИФАПЧ.

Однако, при отработке параметров СЧ-ИФАПЧ (рис. 3) обнаружилась проблема возникновения помехи коммутации при перестройке частоты ПСЧ-ИФАПЧ. Данная помеха связана с коммутацией сигнала ОГ и с соответствующим изменением его уровня на входе ФСЧ-ИФАПЧ [2]. Эта помеха приводит к паразитному скачку частоты выходного сигнала ФСЧ-ИФАПЧ примерно на частоте 200 кГц. Ввиду того, что в ФСЧ-ИФАПЧ применена система автоподстройки с малой полосой пропускания, этот паразитный скачок частоты отрабатывается системой ИФАПЧ достаточно долго (порядка 2 мс). А так как выходной сигнал ФСЧ-ИФАПЧ используется в качестве опорного сигнала для ПСЧ-ИФАПЧ, то переходной процесс отработки паразитного скачка частоты накладывается на переходной процесс ПСЧ-ИФАПЧ. И в широкополосном режиме с ФНЧ1 из требуемых десятков микросекунд получаются единицы миллисекунд.

Данную проблему можно решить введением дополнительных буферных каскадов по входу и выходу ФСЧ-ИФАПЧ (рисунок 8).

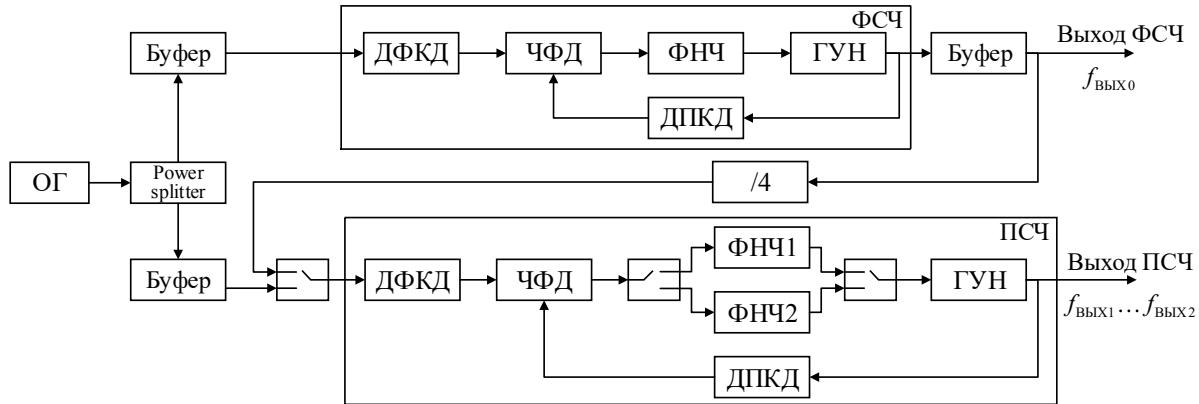


Рис. 8. Структурная схема усовершенствованного СЧ-ИФАПЧ с буферными каскадами

Результаты экспериментальных измерений основных характеристик усовершенствованного СЧ-ИФАПЧ приведены на рисунках 9–12.

Измерения были проведены с использованием анализатора источников сигналов E5052B производства компании «Keysight Technologies» [12].

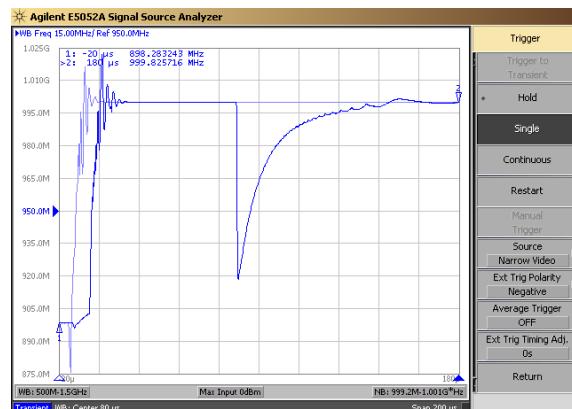


Рис. 9. Установление выходной частоты при скачке частоты вверх

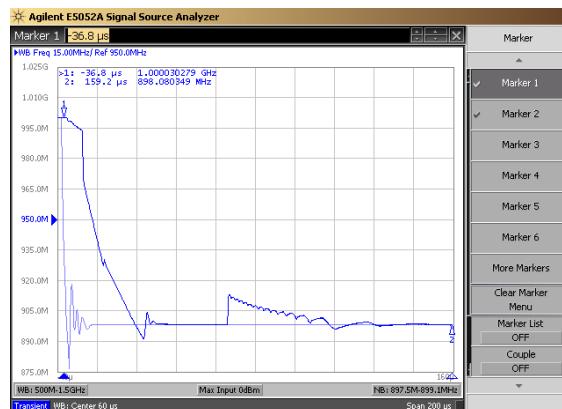


Рис. 10. Установление выходной частоты при скачке частоты вниз

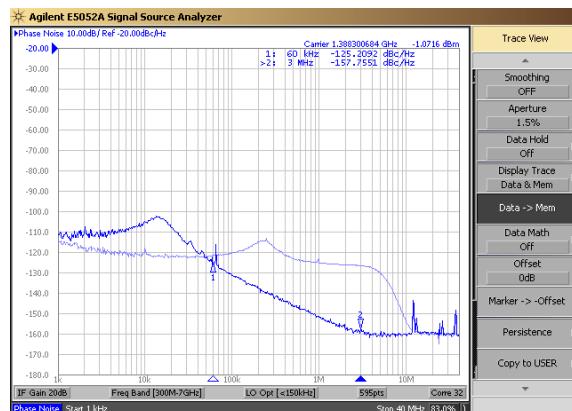


Рис. 11. Шумы вверху диапазона с широкой и узкой полосой

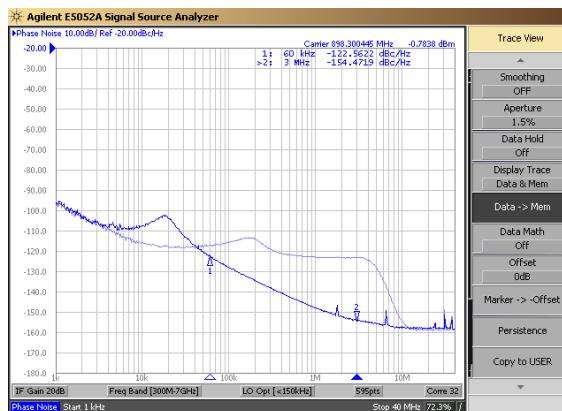


Рис. 12. Шумы снизу диапазона с широкой и узкой полосой

Одним из возможных способов улучшения характеристик СЧ является применение новейших на данный момент интегральных микросхем (ИМС). Фирма Texas Instruments

представляет самые совершенные на сегодняшнем рынке ИМС СЧ-ИФАПЧ с интегрированным ГУН. При самых низких в отрасли фазовых шумах однокристальные устройства LMX2591/92/94/95 позволяют разработчикам достичь уровня характеристики, для реализации которых еще недавно требовалось использование нескольких дискретных устройств. Из представленной линейки интегральных микросхем СЧ-ИФАПЧ была выбрана новейшая LMX2594 в без выводном исполнении [13].

Можно сформулировать следующие практические рекомендации по уменьшению уровня ПСС в СЧ с фазовой автоподстройкой частоты:

- 1) определение ширины пораженного поддиапазона $\Delta F_{\text{ПСС}}$;
- 2) использование изменения частоты сравнения в ЧФД (по возможности);
- 3) использование двух и более опорных сигналов с некратными частотами;
- 4) увеличение развязки сигналов опорных сигналов друг от друга (дополнительные электронные ключи, фильтры и т.д.);
- 5) отключение от источника питания неиспользуемых ОГ (по возможности) для исключения паразитных интермодуляционных эффектов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены подходы по снижению уровня нежелательных ПСС в спектре выходного сигнала синтезатора частот. Предложено использовать сигнал СЧ с фиксированной частотой в качестве опорного для СЧ с перестраиваемой частотой. Приведены результаты экспериментального измерения спектральных характеристик выходного сигнала ПСЧ-ИФАПЧ в широкополосном и узкополосных режимах полосы пропускания кольца ИФАПЧ. Предложено для решения проблемы с нежелательной помехой коммутации использовать дополнительные буферные каскады по входу и выходу ФСЧ-ИФАПЧ. Приведены результаты экспериментальных измерений основных характеристик усовершенствованного СЧ-ИФАПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аналого-цифровое преобразование / Под ред. У. Костера. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.
2. Романов С.К., Тихомиров Н.М., Леньшин А.В. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот: монография. – М.: Радио и связь, 2010. – 328 с.
3. S.K. Romanov, Lenshin A.V., V.N. Tikhomirov, E.V. Shatalov. Application of linearization transient PLL to eliminate slips // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). – Yaroslavl, 1–3 July 2019: IEEE Xplore digital library, – С. 58–63.
4. Ченакин А.В., Горевой А.В. Практическое построение синтезаторов частот СВЧ-диапазона. – М.: Горячая линия–Телеком, 2021. – 280 с.
5. Lenshin A.V., N.M. Tikhomirov, M.V. Maturazov, M.P. Savchenko, O.N. Tukalenko. Influence of charge pump pumping nonlinearities and a fractional frequency divider with a delta-sigma modulator on the noise interference spectrum in the PLL system // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). – Yaroslavl, 1–3 July 2019: IEEE Xplore digital library, – С. 31–37.
6. Борисов В.И., Тихомиров Н.М., Леньшин А.В., Романов С.К., Шаталов Е.В. Определение помех дробности в фазоцифровых синтезаторах частот, использующих дельта-сигма модуляторы // Теория и техника радиосвязи. – 2015. – № 4. – С. 47–53.

7. Борисов В.И., Тихомиров Н.М., Романов С.К., Леньшин А.В. Методика расчета шумовых характеристик дробного синтезатора частот с использованием системы MATLAB // Радиотехника. – 2016. – № 5. – С. 38–44.
8. Леньшин А.В., Тихомиров Н.М., Шаталов Е.В. Определение спектра шумов помех дробности в непрерывной нелинейной модели системы фазовой автоподстройки // Телекоммуникации. – 2017. – № 12. – С. 2–6.
9. Скоторенко И.В. Метод уменьшения уровня побочных спектральных составляющих в синтезаторах частот с ФАПЧ, имеющих дробный делитель частоты // Доклады ТУСУРа. – 2017. – № 2 (24). – Часть 1. – С. 102–105.
10. Леньшин А.В., Шаталов Е.В., Тихомиров В.Н. Снижение уровня побочных спектральных составляющих синтезаторов с фазовой автоподстройкой частоты // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. тезисов докл. VIII Международной научно-практической конференции «АВИАТОР». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2021. – С. 257–259.
11. HMC833LP6GE. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc833.pdf>.
12. E5052B. – URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/about.html>.
13. LMX2594. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmx2594.pdf>.

REFERENCES

1. Analog-to-digital conversion / Edited by U. Koster. – M.: Technosphere, 2007 – 1016 p.
2. Romanov S.K., Tikhomirov N.M., Lenshin A.V. Systems of pulse-phase auto-tuning in frequency synthesis and stabilization devices: monograph. – M.: Radio and Communication, 2010. - 328 p.
3. S.K. Romanov, Lenshin A.V., V.N. Tikhomirov, E.V. Shatalov. Application of linearization transient PLL to eliminate slips // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). – Yaroslavl, 1-3 July 2019: IEEE Xplore digital library. – P. 58–63.
4. Chenakin A.V., Gorevoy A.V. Practical construction of microwave frequency synthesizers. – M.: Hotline-Telecom, 2021. – 280 p.
5. Lenshin A.V., N.M. Tikhomirov, M.V. Maturazov, M.P. Savchenko, O.N. Tukalenko. Influence of charge pump pumping nonlinearities and a fractional frequency divider with a delta-sigma modulator on the noise interference spectrum in the PLL system // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). – Yaroslavl, 1-3 July 2019: IEEE Xplore digital library. – P. 31–37.
6. Borisov V.I., Tikhomirov N.M., Lenshin A.V., Romanov S.K., Shatalov E.V. Determination of fractional noise in phase-digital frequency synthesizers using delta-sigma modulators // Theory and technique of radio communication. – 2015. – №. 4. – P. 47–53.
7. Borisov V.I., Tikhomirov N.M., Romanov S.K., Lenshin A.V. Methodology for calculating the noise characteristics of a fractional frequency synthesizer using the MATLAB system // Radioengineering. – 2016. – №. 5. – P. 38–44.
8. Lenshin A.V., Tikhomirov N.M., Shatalov E.V. Determination of the noise spectrum of fractional noise in a continuous nonlinear model of a phase-locked system // Telecommunications. – 2017. – №. 12. – P. 2–6.
9. Skotorenko I.V. Method for reducing the level of secondary spectral components in frequency synthesizers with PLL having a fractional frequency divider // TUSUR reports. – 2017. – № 2 (24). – Part 1. – P. 102–105.
10. Lenshin A.V., Shatalov E.V., Tikhomirov V.N. Reducing the level of secondary spectral components of synthesizers with phase-locked frequency tuning // Actual issues of research in avionics: theory, service, development: collection of theses of the VIII International Scientific and Practical Conference «AVIATOR». – Voronezh: VUNTS VVS «VVA», 2021. – P. 257–259.
11. HMC833LP6GE. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc833.pdf>.
12. E5052B. – URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/about.html>.
13. LMX2594. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmx2594.pdf>.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КОДИРОВАНИЯ СИГНАЛА И ОРТОГОНАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

И.А. Галкин¹, Д.А. Иванов², Э.В. Аведян²

¹Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (ВАС им. Буденного)

Санкт-Петербург, Россия

²Филиал Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» в г. Челябинске (ФВУНЦ ВВС «ВВА» в г. Челябинске)
Челябинск, Россия

Аннотация. В статье проведен анализ особенностей функционирования существующих беспроводных сетей в условиях воздействия злоумышленника. Описаны наиболее опасные атаки. Рассмотрены особенности применения технологий пространственного кодирования сигнала и ортогонального частотного мультиплексирования при построении беспроводных сетей, а также возможность их использования на сетях, построенных по технологии NanoNet.

Ключевые слова: беспроводная сеть, технология OFDM, технология MIMO, технология NanoNet, злоумышленник.

ANALYSIS OF SPATIAL SIGNAL ENCODING AND ORTHOGONAL FREQUENCY MULTIPLEXING IN THE CONSTRUCTION OF WIRELESS NETWORKS

I.A. Galkin¹, D.A.Ivanov², A.V. Avedyan²

¹Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (VAS named after Budennogo), Saint Petersburg, Russia

²Branch of the Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" in Chelyabinsk (FVUNTS of the Air Force " VVA " in Chelyabinsk)
Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article analyzes the features of functioning of existing wireless networks under the influence of an attacker. The most dangerous attacks are described. Features of application of spatial signal encoding and orthogonal frequency multiplexing technologies in the construction of wireless networks, as well as the possibility of their use on networks built using NanoNet technology, are considered.

Keywords: wireless network, OFDM technology, MIMO technology, NanoNet technology, attacker.

1. ВВЕДЕНИЕ

В мире высоких скоростей человеку, не движущемуся с высокой скоростью, нет места. Высокие темпы современной жизни, быстрые и резкие изменения маршрутов передвижения обуславливают необходимость постоянного развития и повышения эффективности беспроводных сетей (БС).

В настоящее время беспроводные сети используются практически во всем мире. Это обусловлено их удобством, гибкостью и сравнительно невысокой стоимостью. Возможности БС определяются характеристиками средств и комплексов, построенных на базе технологий кодового разделения каналов и широкополосного беспроводного доступа. Вместе с тем, их непосредственное внедрение в БС приводит к усилению

опасности существующих и появлению новых атак злоумышленника на подлинность и доступность информации, подлинность корреспондентов БС и передаваемой от них мультимедийной информации.

При этом, если ранее основными угрозами считались угрозы нарушения секретности передаваемых сообщений и трафика в целом, то по мере внедрения достаточно стойких методов шифрования акцент в разработке атак и мер по их нейтрализации стал смещаться в сторону угроз подлинности передаваемой в сети информации и угроз доступности информации и ресурсов сети для законных ее пользователей.

Все более актуальной становится задача разработки и использования таких систем имитозащиты сообщений и аутентификации корреспондентов, которые способны обеспечить требуемую защищенность от воздействия квалифицированных злоумышленников и интенсивных случайных и преднамеренных помех передачи. Особые сложности вызывает обеспечение доступности услуг передачи различных видов мультимедийной информации в условиях применения как хорошо апробированных методов радиоэлектронного подавления линий и каналов БС, так и новых видов атак блокирования различных элементов сетей БС.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Особые сложности вызывает обеспечение доступности услуг передачи различных видов мультимедийной информации в условиях реализации злоумышленником атак отказа в обслуживании, что в силу электромагнитной доступности для злоумышленника каналов доступа базовых станций (БСт) и существенным затратам времени на аутентификацию корреспондентов дает возможность заблокировать (существенно ухудшить) доступ должностных лиц к услугам связи БС.

Учитывая вышеизложенное, беспроводные технологии должны удовлетворять ряду требований к качеству, скорости, радиусу приема и защищенности, причем защищенность часто является самым важным фактором. Сложность обеспечения безопасности БС очевидна. Если в проводных сетях злоумышленник должен сначала получить физический доступ к кабельной системе или оконечным устройствам, то в беспроводных сетях это условие отпадает само собой: поскольку данные передаются «по воздуху», для получения доступа достаточно обычного приемника, установленного в радиусе действия сети.

Однако, несмотря на различия в реализации, подход к безопасности БС и их проводных аналогов идентичен: здесь присутствуют аналогичные требования к обеспечению конфиденциальности и целостности передаваемых данных и, конечно же, к проверке подлинности как беспроводных клиентов, так и точек доступа.

Поэтому для обеспечения безопасности связи и информации в БС требуется решить ряд сложных научно-технических проблем, таких как обеспечение требуемой защищенности сообщений в условиях комплексных атак квалифицированного злоумышленника, выявления и нейтрализации атак злоумышленника, гарантированной доставки заверенных сообщений в условиях противодействия злоумышленника,

направленного на дезорганизацию и срыв процесса обмена информацией, а также ввод в систему связи ложной информации.

Существующие в настоящее время методики оценки вероятности предоставления обслуживания законных ее пользователей не в полной мере учитывают особенности построения каналов доступа БС, а также новые возможности злоумышленника по противодействию действиям законных корреспондентов БС, таких как атака отказа в обслуживании. Вместе с тем, существенные недостатки протоколов аутентификации, используемых в технологиях БС и специфика построения атак злоумышленника диктуют необходимость разработки новых способов аутентификации, а также средств их реализующих.

Необходимо отметить, что защищенность от атак злоумышленника, построенных с применением технологий беспроводного радиодоступа, таких как 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11i (*Wi-Fi*), 802.16 (*Wi-Max*) и др., в целом оценивается ниже, даже чем у технологий сотовой и транкинговой связи [1].

Это в полной мере относится и сетям, построенным по технологии *NanoNet* на основе стандарта IEEE 802.15.4a, предназначенным для организации «последней мили» по беспроводным сетям, например, для сбора информации с различного рода датчиков и устройств.

Эту проблему частично получилось решить благодаря технологиям пространственного кодирования сигнала (*MIMO - Multiple Input Multiple Output*) и ортогонального частотного мультиплексирования (*OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), получившие широкое применение в БС 802.11n/ac, *LTE (Long Term Evolution)*, *UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)* и т.д [2].

Технологии *MIMO* и *OFDM* используют различные методы обработки сигналов, позволяющие повысить помехоустойчивость и скорость передачи сигналов за счет использования пространственно-временного разнесения.

В данном случае общий поток данных делится на несколько подпотоков, а затем передается в общем канале связи. Тем самым растет скорость передачи данных при неизменной полосе частот. Для обеспечения независимости подпотоков в пространственное и разнесение. При этом системы *MIMO* хорошо работают вне зоны прямой видимости и при наличии хорошо рассеивающей среды, каждый из передаваемых сигналов оказывается «промаркированным» самой средой передачи (межканальной и межсимвольной интерференцией, затуханием, задержкой во времени, и другими искажениями).

Тем не менее, для того чтобы ощутить преимущества технологии *MIMO*, требуются мощные процедуры обработки сигналов от множества антенн в приемнике, с целью повышения пропускной способности канала и повышения достоверности принимаемых сообщений. Основными факторами, препятствующими решению поставленных задач, является аддитивные помехи (сигналы мешающих станций и флюктуационный шум) и рассеяние энергии передаваемого сигнала во времени, что приводит к явлению межсимвольной и межпотоковой интерференции.

В настоящее время интенсивно прорабатываются вопросы повышения безопасности технологий беспроводного радиодоступа, что дает основание планировать их возможное применение в перспективных сетях, а также сетях, построенных на незащищенных стандартах, например, *NanoNet*. Очевидно, что наиболее перспективным направлением развития сетей *NanoNet* является построение их на базе современных цифровых технологий *MIMO* и *OFDM* [3].

Реализация данных технологий в *NanoNet* даст возможность существенно повысить информационную эффективность в условиях многолучевого распространения, эффективность использования радиочастотного спектра, противостояние межсимвольным помехам, а также обеспечит возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации.

Однако, эти технологии изначально разрабатывались для полноценных базовых станций, как правило, в стационарных условиях, поэтому их реализация в различного рода датчиках и устройствах выявляет ряд уязвимостей, таких как: необходимость обеспечения высокой синхронизации частоты и времени; чувствительность к эффекту Доплера; не идеальность современных приёмников и передатчиков вызывает фазовый шум, что ограничивает производительность системы; защитный интервал, используемый в OFDM для борьбы с многолучевым распространением, снижает спектральную эффективность сигнала.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, Проведенный анализ особенностей современных БС, возможностей систем и средств злоумышленника, возможных его атак и их влияния на безопасность информации и связи, показывает, что несмотря на общую тенденцию снижения электромагнитной, признаковой и семантической доступности элементов БС, принимаемые противоборствующими сторонами меры по совершенствованию элементов БС, с одной стороны, и комплексов злоумышленника с другой стороны, приводят не к сокращению, а лишь к модификации пространства воздействия. Это обстоятельство обуславливает стремление злоумышленника применять новые способы воздействия, такие как атака отказа в обслуживании, направленные на дезорганизацию и срыв обмена информацией и обязывает противоположную (защищающуюся) сторону применять такие системы имитозащиты и аутентификации корреспондентов, которые способны обеспечить требуемую защищенность.

Очевидно, что реализация злоумышленником атаки отказа в обслуживании в силу удобства беспроводного доступа к объекту атаки и существенным затратам времени на аутентификацию корреспондентов дает возможность злоумышленнику заблокировать (существенно ограничить) доступ подлинных корреспондентов БС к информационным ресурсам БС. В этих условиях целесообразно проведение научных исследований, целью которых является исследование новых физических процессов, позволяющих повысить эффективность работы сетей и систем связи, например, простроенных по технологии *NanoNet*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. — М.: Горячая линия - Телеком, 2014. — 242 с. — ISBN 978-5-9912-0457-6.
2. Власенко М.А., Иванов Д.А., Кузнецов С.И., Лаута О.С. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сборник научных статей. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Бачевского. 2018. С. 167-171.
3. Коцыняк М.А., Иванов Д.А., Лаута О.С., Нечепуренко А.П., Муртазин И.Р. Методика прогнозирования воздействия таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационную сеть В сборнике: Региональная информатика и информационная безопасность. 2017. С. 109-111.
4. Коцыняк М.А., Иванов Д.А. Обеспечение безопасности управления роботизированных систем от воздействия таргетированных кибернетических атак В книге: Нейрокомпьютеры и их применение. Тезисы докладов. 2018. С. 108-А.
5. Коцыняк М.А., Лаута О.С., Иванов Д.А., Лукина О.М. Модель воздействия таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационную сеть Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 3-4 (129-130). С. 58-65.
6. Лаута О.С., Иванов Д.А., Нечепуренко А.П., Власенко М.А. Методика синтеза системы защиты информационно-телекоммуникационной сети в условиях информационного противоборства В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. В 5-и томах. 2018. С. 124-129.

REFERENCES

1. Bakulin M. G., Varukina L. A., Kreindelin V. B. MIMO technology: principles and algorithms. - M .: Hot line - Telecom, 2014 .-- 242 p. - ISBN 978-5-9912-0457-6.
2. Vlasenko M.A., Ivanov D.A., Kuznetsov S.I., Lauta O.S. In the collection: Actual problems of information telecommunications in science and education (APINO 2018). VII International Scientific-Technical and Scientific-Methodological Conference. Collection of scientific articles. In 4 volumes. Edited by S.V. Bachevsky. 2018.S. 167-171.
3. Kotsynyak M.A., Ivanov D.A., Lauta O.S., Nechepurenko A.P., Murtazin I.R. Methods for predicting the impact of a targeted cyber attack on an information and telecommunications network In the collection: Regional informatics and information security. 2017.S. 109-111.
4. Kotsynyak M.A., Ivanov D.A. Ensuring the security of control of robotic systems from the impact of targeted cyber attacks In the book: Neurocomputers and their application. Abstracts of reports. 2018.S. 108-A.
5. Kotsynyak M.A., Lauta O.S., Ivanov D.A., Lukina O.M. A model of the impact of a targeted cyber attack on an information and telecommunications network. Questions of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism. 2019. No. 3-4 (129-130). S. 58-65.
6. Lauta O.S., Ivanov D.A., Nechepurenko A.P., Vlasenko M.A. Methods for the synthesis of the protection system of the information and telecommunication network in the conditions of information confrontation In the collection: Radar, navigation, communication. Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference. In 5 volumes. 2018.S. 124-129.

АНАЛИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. Ю. Трофимов¹, А. Ю. Живодерников¹, Н. В. Трофимова², М. И. Рафальская¹

¹Военная академия связи им. С. М. Буденного (ВАС), г. Санкт-Петербург, РФ

²ООО «ТАиП», г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация. В статье рассматривается анализ существующих систем мониторинга, используемых в мультисервисных сетях связи специального назначения. На основе анализа выработаны предложения по наиболее эффективному их применению на сетях связи специального назначения.

Ключевые слова: система мониторинга, мультисервисная сеть связи специального назначения, система управления функционированием.

ANALYSIS OF MONITORING SYSTEMS OF MULTISERVICE COMMUNICATIONS NETWORK FOR SPECIAL PURPOSE

A. Y. Trofimov¹, A. Y. Zhivodernikov¹, N. V. Trofimova², M. I. Rafalskaya¹

¹Military Academy of Telecommunications named after S. M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia

²LLC “ТАиП”, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The article discusses the analysis of existing monitoring systems used in multiservice communication networks for special purposes. On the basis of the analysis, proposals were developed for their most effective application in special-purpose communication networks.

Keywords: monitoring system, multi-service communication network for special purposes, operation control system.

1. ВВЕДЕНИЕ

Мультисервисная сеть связи специального назначения (далее – МСС СН) предназначена для обеспечения обмена всеми видами информации в интересах систем управления министерствами, ведомствами и организациями, в различных условиях деятельности. Как правило, телекоммуникационным ядром таких сетей являются IP-сети или IP/MPLS-сети, наложенные на ресурсы сетей операторов связи.

Основная задача управления МСС СН – обеспечение функционирования сети с заданными показателями качества при внешних и внутренних дестабилизирующих воздействиях. Иначе говоря, обеспечение выполнения МСС СН её целевой функции – предоставление пользователям различного типа требуемых услуг с гарантированным качеством в условиях воздействий на её сетевые элементы. Наиболее эффективно эту задачу можно решать, основываясь на концепции сетей управления телекоммуникациями (Telecommunication Management Network, TMN) [1].

В настоящее время происходит активное увеличение числа МСС СН. Основное направление использования МСС СН, как во время борьбы с пандемией Covid-19, так и в рамках управления ведомственными сетями, – предоставление услуг телефонии, видеонаблюдения, передачи данных, охраны и других. Основными показателями

качества услуг являются: время задержки пакета, джиттер задержки пакета и пропускная способность канала.

2. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ МСС СН

Структурно, модель TMN состоит из 4 уровней: административное управление и управление услугами (верхние уровни управления), управление сетью и управление отдельными её элементами (нижние уровни управления), в основе которых находится организационно-технический комплекс взаимодействующих сетевых элементов.

Для обеспечения устойчивого и качественного функционирования МСС СН, в условиях существенного влияния внешних и внутренних дестабилизирующих факторов и возросшей потребности пользователей в услугах трафика реального времени, в комплексе задач системы управления можно выделить ряд функциональных подзадач, без выполнения которых, сеть не сможет выполнять свои функции по предоставлению услуг связи. К таким задачам относятся задачи управления трафиком и качеством обслуживания. Решение данных задач возлагается на подсистему управления функционированием МСС СН. Для эффективного управления функционированием необходимо решение следующих подзадач: управление маршрутизацией, классификацией, приоритезацией, маркировкой пакетов, ресурсами (пропускной способностью), очередями, перегрузками, мониторинг и оценка состояния сети и сетевых элементов.

При этом общую задачу эффективного управления функционированием МСС можно разделить на три этапа:

- контроль показателей качества функционирования сети, нагрузки на сетевых элементах и линиях связи, а также показателей производительности сетевого оборудования;

- управление трафиком на сети;

- изменение процедур управления функционированием, с целью обеспечить требуемые показатели качества.

При решении задач управления функционированием МСС СН, важную роль играет задача мониторинга показателей качества функционирования сети. Именно от своевременного получения текущего состояния сети, которое сигнализирует об отклонении от нормы, зависит способность системы управления качественно и вовремя применить управляющее воздействие на МСС СН, с целью обеспечения пользователей. К главным функциям мониторинга состояния МСС СН можно отнести следующие процедуры контроля:

- контроль и измерение рабочих характеристик сетевого оборудования, параметров его производительности и оценка загруженности сети;

- контроль и обнаружение физического нарушения связи между элементами сети (обрыв соединительной линии);

- определение «точек уязвимости» – сетевых устройств, наиболее подверженных внешнему или внутреннему воздействию дестабилизирующих факторов;

- своевременное доведение результатов контроля до «Администратора».

Работа систем мониторинга и управления функционированием сетей основана на работе протокола SNMP, который позволяет работать с MIB-базами телекоммуникационного оборудования, а также сигнализацией о выходе из строя элемента сети или превышением допустимых норм нагрузки на направлениях связи. При этом процесс, позволяющий помочь в выработке решения по восстановлению данных показателей в норму, не автоматизирован [2].

Так как система управления функционированием использует каналы и оборудование самой МСС СН, важнейшей задачей является обеспечение приоритетного обслуживания подсети управления. Стоит отметить, что сокращение времени цикла этих процедур управления приводит к повышению эффективности функционирования системы управления МСС СН в целом.

Требования, предъявляемые к современным системам мониторинга, достаточно широки:

- автоматическое обнаружение конфигурации сети (на основе шаблонов устройств) и ее схематичное отображение;
- схематичное отображение каналов транспортной сети;
- графическое представление топологии на GIS подложке;
- мониторинг неисправностей элементов сети (активные аварии и проактивный мониторинг);
- поиск ключевой причины возникшей неисправности (корреляция аварий);
- мониторинг производительности элементов сети;
- мониторинг QoS [3].

3. Существующие системы мониторинга МСС СН

В настоящее время, основными системами, используемыми в интересах министерств и ведомств, являются системы, построенные на “ядре” системы Zabbix. При этом стоит отметить, что такое широкое использование данной системы, обусловлено её главным преимуществом – «Open Source» (открытый код).

Zabbix представляет собой наиболее гибкое решение, которое администратор получает комплексно, без установки дополнительного стороннего программного обеспечения. Система обладает возможностями создания и дальнейшего использования подключаемых модулей, способных контролировать различные параметры оборудования сети и возможностью гибкого масштабирования, путем распределения вычислительных мощностей на несколько АРМ. Zabbix-agent может быть установлен на UNIX-подобных или Windows-хостах [4]. В состав системы мониторинга Zabbix входят:

- сервер мониторинга, обеспечивающий получение данных, их обработку, анализ, хранение и запуск сценариев оповещения;
- базы данных: MySQL, Oracle, PostgreSQL;
- web-интерфейс;
- агенты, которые выполняются на отслеживаемых объектах и обеспечивают передачу данных от оборудования к серверу.

К основным возможностям Zabbix, следует отнести:

- автоматическое обнаружение серверов и других устройств в сети;
- распределенный мониторинг с централизованным администрированием через Web-интерфейс;
- поддержка обоих механизмов пуллеров и трапперов;
- мониторинг без агентов;
- поддержка JMX и мониторинга логов в базовой поставке;
- мощная поддержка пользовательских параметров (порогов, оповещений, графиков).

Большой интерес представляет графическая система представления статистических данных, позволяющая формировать графики изменения наблюдаемых параметров с произвольной временной выборкой и, таким образом, производить оценку и анализ качества предоставляемых услуг с течением времени в различных условиях обстановки.

Так, на «ядре» системы Zabbix, российская компания «РОССИННО», разработала программный продукт – «Центральный Пульт», одной из главных функций которого является мониторинг МСС СН. Платформа предназначена для визуализации и мониторинга работы сети, оборудования, приложений и сервисов. В качестве объекта мониторинга может выступать практически любой объект физического или логического мира – например, память, процессор, файловая система, процесс или программа, количество пользователей, очередь файлов на обработку, объем обработанного трафика. Пользователей платформы можно встретить в сфере телекоммуникаций и связи, промышленности, логистике, финансовых организациях, электроэнергетике, и здравоохранении.

Также существует еще один программный продукт с «открытым кодом», часто используемый в МСС СН. Это система мониторинга Nagios. Nagios – программа с открытым кодом, предназначенная для мониторинга компьютерных систем и сетей. Она следит за указанными узлами и службами, и оповещает администратора в случае, если какие-либо из служб прекращают (или возобновляют) свою работу. Программа предусматривает возможность создания карты сети, с указанием детальной информации об анализируемых объектах.

Nagios была разработана для работы под Linux, но работает и с другими ОС. Основные возможности системы:

- мониторинг сетевых служб (SMTP, POP3, HTTP, NNTP, ICMP, SNMP);
- мониторинг состояния хостов (загрузка процессора, использование диска, системные логи) в большинстве сетевых операционных систем;
- поддержка удаленного мониторинга через шифрованные туннели SSH или SSL;
- возможность определять иерархии хостов сети с помощью «родительских» хостов, позволяет обнаруживать и различать хосты, которые вышли из строя, и те, которые недоступны;
- отправка оповещений в случае возникновения проблем со службой или хостом;
- возможность организации совместной работы нескольких систем мониторинга с целью повышения надёжности и создания распределенной системы мониторинга;

- включает в себя утилиту nagiostats, которая выводит общую сводку по всем хостам, по которым ведется мониторинг [6].

К минусам Nagios можно отнести:

- отсутствие системы, позволяющей снимать данные о состоянии сети и длительно их хранить;
- отсутствие возможности программно анализировать полученные данные;
- сложность настройки Nagios (состоит в отсутствии готовых рецептов именно под конкретную систему).

Другой системой распределенного мониторинга сетей связи является «СПАЙДЕР», обеспечивающий мониторинг сети связи, как на уровне сети, так и на уровне услуг. Система выполняет функции контроля состояния, анализа производительности сети связи, наблюдения за текущей конфигурацией, учета сигнального и разговорного трафика, измерения показателей качества обслуживания и обеспечения безопасности.

Система СПАЙДЕР предоставляет органам управления следующие возможности:

- мониторинг сети связи в режиме реального времени;
- автоматический расчет показателей QoS;
- анализ изменений нагрузки в режиме реального времени;
- трассировка вызова;
- сбор CDR/TDR в режиме реального времени;
- отслеживание незавершенных и неотвеченных вызовов;
- мультипротокольные xDR (ISUP, MAP, DSS1, H.323, SIP).

В целях эксплуатации и планирования на основании анализа сигнального трафика система в реальном времени рассчитывает и формирует унифицированные отчеты и графики показателей QoS (ASR, NER, PDD, BMI и др.) для трактов разных типов (ОКС-7, ISDN PRI, VoIP) с разбивкой по присоединенным операторам, кодам направлений, кодам услуг сетей, пучкам звеньев. Система контролирует соблюдение согласованного с ними уровня качества обслуживания (SLA) посредством формирования отчетов по SLA и выдачу тревожных сообщений при отклонении уровней качества от заданных в SLA [5].

Также производители современного телекоммуникационного оборудования выпускают собственные решения систем мониторинга и управления для собственных изделий. Ярким примером такого ПО является единая система администрирования и мониторинга инфраструктуры – Cisco Prime Infrastructure.

Основные задачи, которые решает данная система (CPI):

- поддержка постоянных задач: мониторинг оборудования, резервное копирование, восстановление, сбор базовой статистики, сетевой аудит, настройка оборудования по готовым сценариям и шаблонам;
- контроль работы приложений (модуль Assurance);
- автоматическая установка оборудования «с нуля» без использования консольного доступа (модуль Plug and Play).

Однако, стоит отметить, что Cisco как производитель не гарантирует совместимость и корректную работу своего программного обеспечения с другими производителями. Именно поэтому специализированные системы мониторинга и управления сетью создаются как моновендорные системы.

При этом унификация оборудования МСС СН, в данный момент времени, не возможна. Это обусловлено тем, что отечественные производители оборудования и производители программного обеспечения преследуют разные цели. В интересах функционирования МСС СН, производители систем мониторинга и управления функционированием сети закладывают реализацию максимально возможных решений получения статистики и анализа показателей качества функционирования самой МСС СН с разнотипного оборудования, которое в данный момент актуально на «рынке», с последующим решением органа управления на управляющее воздействие. При этом, производитель оборудования нацелен на интеграцию оборудования в единую сеть ОАЦСС и Указом Президента «по импортозамещению».

Основной задачей системы управления функционированием МСС СН, состоит в обеспечении пользователей услугами связи, согласно SLA.

Показатель эффективности МСС СН имеет вид:

$$R = R(X, X^{\dagger}) \quad (1),$$

где X – набор характеристик, определяющих вариант построения МСС СН,

X^{\dagger} – набор характеристик, определяющих систему управления.

При этом, в качестве показателя качества, определяющего автоматизацию управления МСС СН, следует рассмотреть зависимость:

$$P_s = R(X, X^{\dagger}) / R(X_a, X_a^{\dagger}) \quad (2),$$

где X_a, X_a^{\dagger} – характеристики автоматизированного управления МСС СН.

Следует выделить, что в настоящее время для объективной оценки показателей качества обслуживания МСС СН наиболее важны:

- мониторинг сети связи в режиме реального времени;
- автоматический расчет показателей QoS;
- анализ изменений нагрузки в режиме реального времени;
- время реакции администратора сети;
- расчет таблиц маршрутов;
- характеристики потери пакета.

Набор этих функций является наиболее важным при планировании и построении системы мониторинга, что влияет на эффективность управления функционированием МСС СН.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как правило, все, описанные выше, системы мониторинга достаточно эффективно решают задачи сбора и обработки данных в своей узкоспециализированной области, но не обладают возможностью взаимодействия друг с другом, что исключает использование в работе всего набора возможных первичных данных и средств их

интерпретации. Таким образом, для поддержки и оценки функционирования сети и её ресурсов необходимо поддерживать и работать со множеством различных специализированных информационных систем. Это создает очевидные ограничения и неудобства, которые приводят к снижению скорости реакции на возникающие инциденты и увеличения вероятности возникновения ошибки администратора при работе с большим числом инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буренин А. Н. Теоретические основы управления современными телекоммуникационными сетями: Монография. / А.Н. Буренин, В.И. Курносов // Под общей редакцией В.И. Курносова - М.: Наука, 2011. – 464 с.
2. Гребешков А. Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи / А.Ю. Гребешков – М.: ЭкоТрендз, 2003. – 288 с.:илл.
3. Голяков Д. А., Ковайкин Ю. В., Лебедев П.В. Структура протоколов управления и мониторинга // Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т., Воронеж, 2020 – С.353-360
4. Официальный сайт Zabbix. <https://www.zabbix.com/ru>, 6.09.2021.
5. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник для вузов. - 4-е изд. - СПб.: Питер, 2010. - С.943
6. Лихтциндер Б. Я. Анализ трафика мультисервисных сетей: Монография / Б. Я. Лихтциндер – Самара.: ПГУТИ 2015. – 164 с.

REFERENCES

1. Burenin AN Theoretical foundations of modern telecommunication networks management: Monograph. / A.N. Burenin, V.I. Kurnosov // Under the general editorship of V.I. Kurnosova - Moscow: Nauka, 2011 .-- 464 p.
2. Grebeshkov A. Yu. Standards and technologies for control of communication networks / A.Yu. Grebeshkov - M .: EcoTrends, 2003 .-- 288 p.: Ill.
3. Golyakov D. A., Kovaykin Yu. V., Lebedev P. V. The structure of management and monitoring protocols // Proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference, in 6 volumes, Voronezh, 2020 - pp. 353-360
4. Official site Zabbix. <https://www.zabbix.com/ru>, 6.09.2021.
5. Olifer V.G., Olifer N.A. Computer networks. Principles, technologies, protocols. Textbook for universities. - 4th ed. - SPb .: Peter, 2010. - p. 943
6. Likhtzinder B. Ya. Analysis of traffic of multiservice networks: Monograph / B. Ya. Likhtzinder - Samara .: PGUTI 2015. - 164 p.

БИОМЕТРИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАНИЕ С ДВОЙНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Д.А. Иванов¹, А.В. Аведян¹, В. Б. Сычужников²

¹ ФВУНЦ ВВС «ВВА», Челябинск, Россия

² ВАС им. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье авторами проведен анализ работы и особенностей функционирования устройства биометрического распознавания, использующего биометрию лица, базирующихся на принципах и алгоритмах искусственных нейронных сетей. Разобран принцип работы устройства распознавания, использующий различные способы аутентификации.

Ключевые слова: биометрические системы, система контроля доступа, алгоритм распознавания, искусственная нейронная сеть.

BIOMETRIC RECOGNITION WITH DOUBLE AUTHENTICATION BASED ON COMPUTER VISION

D.A. Ivanov¹, A.V. Avedyan¹, V.B. Sychuhnikov²

¹FVUNTS of the Air Force " VVA ", Chelyabinsk, Russia

²VAS named after Budennogo, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. In the article, the authors analyzed the operation and functioning features of a biometric recognition device using facial biometrics based on the principles and algorithms of artificial neural networks. The principle of operation of the recognition device using various authentication methods is analyzed.

Keywords: biometric systems, access control system, recognition algorithm, artificial neural network.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время распознавание личности стало неотъемлемой составной частью жизни общества, поскольку для многих видов человеческой деятельности необходимым условием является гарантия идентичности личности. Появились, интенсивно развиваются и широко используются различные автоматические системы контроля доступа людей в помещения и на территории, средства логического доступа в информационные системы, процедуры подтверждения проведения финансовых операций, идентификация и аутентификация при пользовании интернетом, электронной почтой, мобильными телефонами, различными электронными приборами и оборудованием и многое другое.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Все существующие способы идентификации-аутентификации личности делятся на 3 большие группы, в зависимости от того, что предъявляется личностью в качестве аутентификатора:

знание некоторой информации, которая должна храниться в секрете и которую знает только аутентифицирующая себя личность (пароль, пин-код, шифр замка, ответы на вопросы и т.п.)

владение некоторым физическим предметом, который может быть предъявлен аутентифицирующей себя личностью (паспорт, пропуск, смарт-карта, ключ и т.п.)

биометрия – уникальные анатомические (статические) или поведенческие (динамические) отличительные характеристики, которыми обладает аутентифицирующая себя личность (папиллярный рисунок пальцев рук, геометрия кисти руки, голос, рукопись, сетчатка и радужная оболочка глаза).

Способы аутентификации из первых двух групп слишком уязвимы: могут быть подделаны, украдены, утеряны, пострадать от человеческой забывчивости. В связи с этим все больший интерес вызывают методы биометрической идентификации.

Биометрические системы контроля доступа удобны для пользователей тем, что носители информации находятся всегда при них, не могут быть утеряны либо украдены. Биометрический контроль доступа считается более надежным, т.к. идентификаторы не могут быть переданы третьим лицам, скопированы.

Биометрические технологии применяются для верификации и идентификации личности и, как правило, включают в себя: регистрацию выборки БХЧ пользователя; формирование биометрического шаблона; сравнение биометрических шаблонов с эталонами; принятие решения о соответствии сравниваемых биометрических шаблонов; формирование результата при достижении идентификации; принятие решения о повторении, окончании или видоизменении процесса идентификации.

Среди БСА наиболее популярны системы, использующие в своей основе отпечаток пальца и распознавание лица. 2D-распознавание лица ввиду своей высокой способности к фальсификации применяется, в основном, в мультимодальной – перекрестной биометрии.

Среди всего многообразия биометрических характеристик человека, используемых для идентификации личности, особо стоит отметить изображение лица. Биометрия лица уникальна тем, что не требует создания специализированных сенсоров для получения изображения – его можно получить с обычной камеры системы видеонаблюдения. Компании «Рособоронэкспорт» и NtechLab, входящие в Госкорпорацию Ростех, представили уникальное решение на основе системы распознавания лиц FindFace для нужд вооруженных сил и спецподразделений. Демонстрация прошла на выставке технологических достижений в рамках VIII Московской конференции по международной безопасности MCIS 2019. По словам генерального директора «Рособоронэкспорт» Александра Михеева внедрение передовых технологий идентификации личности – одно из важных и востребованных направлений в развитии современной армии.

Однако, технологии идентификации личности требуют больших финансовых вложений. Учитывая вышеизложенное возникла необходимость разработки собственной системы двойной аутентификации личности, позволяющей повысить уровень безопасности объектов МО РФ, путем внедрения ее в систему контроля доступа.

Устройство (рис. 1 и 2) разработано как демонстрационная модель системы двойной аутентификации личности человека. Устройство позволило изучить особенности биометрической аутентификации и продемонстрировать возможности биометрической

системы аутентификации (БСА) по повышению уровня безопасности на объектах (сокращение возможностей несанкционированного проникновения).

Устройство состоит из следующих устройств и программного обеспечения:

- одноплатный компьютер *Raspberry Pi 3* (основной вычислительный блок);
- микросхема фирмы *Arduino nano* (вспомогательный модуль для вычисления, добавлен ввиду малой мощности *Raspberry Pi 3*);
- камера 5 мегапикселей (передает изображение);
- стабилизатор питания (стабилизирует питание в блоке);
- датчик распознавания отпечатка пальца (передача отпечатка в базу данных) Датчик имеет свой процессор, устройство памяти.

Биометрическая система аутентификации представляет собой законченное устройство, для работы которого необходимо лишь наличие источника питания.

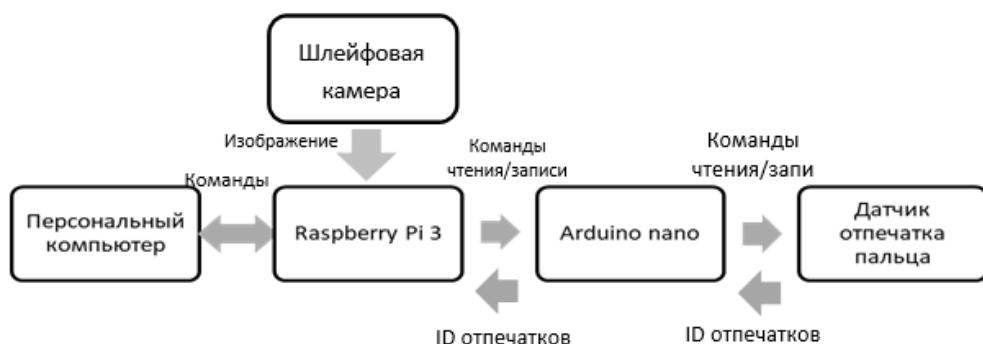


Рис.1 Схема блока аутентификации



Рис. 2 Устройство блока аутентификации

Блок аутентификации подключается через точку доступа к персональному компьютеру. В нашем случае компьютер выполняет лишь роль устройства вывода и устройства ввода команд; все вычислительные процессы выполняют *Arduino Raspberry pi*.

В качестве основного вычислительного блока используется одноплатный компьютер *Raspberry Pi*, который принимает изображение с камеры и с помощью свёрточных нейронных сетей проводит расчет биометрии человеческого лица и его сверку с имеющейся базой данных, тем самым устанавливает соответствие

принадлежности человека определенной группе людей, данном конкретном случае – группе людей с правом доступа к объекту.

После установления соответствия устройство дает команду системе контроля и управления доступом, а далее турникетам. БСА функционирует в двух режимах: регистрации и идентификации-аутентификации личности.

В режиме регистрации создаются биометрические эталоны всех легальных пользователей системы и записываются в базу данных. В режиме идентификации-аутентификации осуществляется сопоставление с образцами биометрических параметров, представленных личностью пользователя, проходящего аутентификацию.

Принцип работы БСА:

- 1) Оптический сенсор отпечатка пальца.

В режиме регистрации: приложить палец к сенсору несколько раз для сканирования отпечатки и его записи в память сенсора (максимальное количество отпечатков 256). Далее процессор сенсора выполняет обработку поступившего отпечатка, и каждому образцу ставит в соответствие свой *ID*. В режиме идентификации после снятия отпечатка устройство устанавливает корреляцию между поступившим отпечатком и уже имеющимся в памяти образцом. Если соответствие найдено, то устройство передает на *Arduino* *ID* данного отпечатка, а плата в свою очередь этот *ID* на *Raspberry pi*. Если соответствие не найдено, то передается сообщение об ошибке и на экране мы видим сообщение с просьбой о повторном сканировании.

- 2) Видеокамера

В режиме регистрации: одноплатный компьютер принимает изображение со шлейфовой камеры. Так как при записи и идентификации лицо может быть снято не точно фронтально (возможно под углом поворота, наклона и т.д.), необходимо таким образом видеоизменить поступившее изображение, чтобы глаза, нос, рот были на определённых местах. Для этого используются аффинные преобразования (движения, растяжения и т.д.). Далее для трансформирования изображение подается на вход нейронной сети, результатом работы которой является массив числовых значений. Полученные данные ставятся в соответствие *ID* отпечатка пальца и данные сохраняются в памяти компьютера как образец личности. В режиме идентификации поступившее с видеокамеры изображение обрабатывается помощью *HOG* дескриптора и далее найденные лица выделяются как отдельные изображения, после чего с ним так же выполняются аффинные преобразования, обработка нейронной сетью. Массив данных (чисел) на выходе сопоставляется с образцами в памяти устройства. Если совпадение массивов данных имеется, и идентификация отпечатка пальца прошла успешно, то аутентификация личности прошла успешно. Если же совпадение массивов данных с образцом не найдено, то на компьютер отправляется сообщение об ошибке.

После установления соответствия устройство дает команду системе контроля и управления доступом.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, система многофакторной аутентификации является крайне актуальной в наше время. Ввиду ого, что в основу нашей БСА лег алгоритм распознавания лица в двухмерном пространстве, во избежание фальсификации данных и

несанкционированного доступа на объект (например, с помощью распечатанной фотографии), нами было решено добавить модуль сканирования отпечатка пальца.

Функция двойной аутентификации личности в разы повышает надежность этой системы. В комбинированных системах для идентификации используется одновременно несколько идентификационных признаков. Такая интеграция позволяет воздвигнуть перед злоумышленником дополнительные преграды, которые он не сможет преодолеть, а если и сможет, то со значительными трудностями. Благодаря этому наша система смело может называться безопасной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Б. Методы приема и обработки сигнала на фоне белого шума. // Журнал, 2001, Т. 21, № 7. - С. 29-47.
2. Власенко М.А., Иванов Д.А., Кузнецов С.И., Лаута О.С. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сборник научных статей. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Бачевского. 2018. С. 167-171.
3. Коцыняк М.А., Иванов Д.А., Лаута О.С., Нечепуренко А.П., Муртазин И.Р. Методика прогнозирования воздействия таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационную сеть В сборнике: Региональная информатика и информационная безопасность. 2017. С. 109-111.
4. Коцыняк М.А., Иванов Д.А. Обеспечение безопасности управления роботизированных систем от воздействия таргетированных кибернетических атак В книге: Нейрокомпьютеры и их применение. Тезисы докладов. 2018. С. 108-А.
5. Коцыняк М.А., Лаута О.С., Иванов Д.А., Лукина О.М. Модель воздействия таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационную сеть Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 3-4 (129-130). С. 58-65.
6. Лаута О.С., Иванов Д.А., Нечепуренко А.П., Власенко М.А. Методика синтеза системы защиты информационнотелекоммуникационной сети в условиях информационного противоборства В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. В 5-и томах. 2018. С. 124-129.

REFERENCES

1. Ivanov A.B. Methods for receiving and processing a signal against a background of white noise. // Journal, 2001, T. 21, No. 7. - S. 29-47.
2. Vlasenko M.A., Ivanov D.A., Kuznetsov S.I., Lauta O.S. In the collection: Actual problems of information telecommunications in science and education (APINO 2018). VII International Scientific-Technical and Scientific-Methodological Conference. Collection of scientific articles. In 4 volumes. Edited by S.V. Bachevsky. 2018. S. 167-171.
3. Kotsynyak M.A., Ivanov D.A., Lauta O.S., Nechepurenko A.P., Murtazin I.R. Methods for predicting the impact of a targeted cyber attack on an information and telecommunications network In the collection: Regional informatics and information security. 2017. S. 109-111.
4. Kotsynyak M.A., Ivanov D.A. Ensuring the security of control of robotic systems from the impact of targeted cyber attacks In the book: Neurocomputers and their application. Abstracts of reports. 2018. S. 108-A.
5. Kotsynyak M.A., Lauta O.S., Ivanov D.A., Lukina O.M. A model of the impact of a targeted cyber attack on an information and telecommunications network. Questions of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism. 2019. No. 3-4 (129-130). S. 58-65.
6. Lauta O.S., Ivanov D.A., Nechepurenko A.P., Vlasenko M.A. Methods for the synthesis of the protection system of the information and telecommunication network in the conditions of information confrontation In the collection: Radar, navigation, communication. Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference. In 5 volumes. 2018. S. 124-129.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПАРНЫХ СЕТЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТАНДАРТАХ IEEE 802.15.3D-2017 И IEEE 802.15.3E-2017

К. Д. Титов, Ю. Г. Петров, Е. Э. Головацкая, В. А. Степкин, О. В. Бажанова

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (ВГУ), Воронеж, Россия

Аннотация. В работе исследованы особенности функционирования и организации широкополосных беспроводных сетей передачи данных, работающих в соответствии со стандартами IEEE 802.15.3d-2017 и IEEE 802.15.3e-2017. Рассмотрены режимы работы физического уровня и алгоритмы формирования сетей, определено их влияние на помехоустойчивость системы связи. Произведено сравнение с базовым стандартом IEEE 802.15.3-2016.

Ключевые слова: помехоустойчивость; беспроводные сети; широкополосный сигнал; IEEE 802.15.3; субтерагерцовый диапазон.

RESEARCH OF SPECIFICITIES OF PAIRNETS USED IN IEEE STANDARDS 802.15.3D-2017 AND 802.15.3E-2017

K. D. Titov, Yu. G. Petrov, E. E. Golovatskaya, V. A. Stepkin, O. V. Bazhanova

Voronezh State University (VSU), Voronezh, Russia

Abstract. The specificities of functioning and organization of wideband wireless networks which work with IEEE 802.15.3d-2017 and IEEE 802.15.3e-2017 are investigated. The modes of physical layer and algorithms of network organization are considered. Also influence of these factors on noise immunity of communication systems is studied. The comparison with basic standard IEEE 802.15.3-2016 is done.

Keywords: noise immunity, wireless networks, wideband signal, IEEE 802.15.3, subterahertz band.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перспективным направлением развития беспроводных сетей является использование широкополосных и сверхширокополосных сигналов. Это обусловлено тем, что они обеспечивают высокую помехоустойчивость канала связи, позволяют повысить скрытность и скорость передачи данных, а также допускают одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот [1].

В современных и перспективных стандартах беспроводной передачи данных важную роль в оценке радиоканала и синхронизации приёмо-передающих устройств занимает служебная информация, содержащаяся в заголовке передаваемого пакета. Искажение служебной информации может привести к невозможности декодирования принимаемых данных с требуемой достоверностью. Таким образом, одной из важнейших проблем теории передачи сообщений является влияние различного рода помех на элементы служебной информации.

В работе [2] была выполнена оценка помехоустойчивости системы связи стандарта IEEE 802.11n [3] при воздействии помех с учётом структуры пакета передаваемых данных. Полученные результаты показывают уязвимости рассматриваемого стандарта,

однако приведённая методика применима лишь к системам связи, работающим с использованием технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов – orthogonal frequency division multiplexing (OFDM).

Некоторые современные системы беспроводной передачи данных должны не только удовлетворять требованиям к высокой пропускной способности канала связи, но и обеспечивать возможность работы простых устройств с низким потреблением энергии и высокой помехоустойчивостью. Данным требованиям соответствует стандарт IEEE 802.15.3-2016 [4], а также ряд дополнений к нему [5-7]. Для удовлетворения предъявляемых требований в данном стандарте помимо технологии OFDM применяются широкополосные и сверхширокополосные импульсные сигналы (с одной несущей) с различными видами модуляции и кодирования. Использование подобных сигналов позволяет упростить конструкцию приёмника и повысить помехозащищённость канала связи, однако качественные и количественные оценки помехоустойчивости широкополосных и сверхширокополосных сигналов с одной несущей отсутствуют.

В настоящее время также ведутся активные исследования по подготовке технологической базы для сетей передачи данных нового поколения (6G). Одним из ключевых решений в этих сетях является использование частот выше 100 ГГц, а именно терагерцового диапазона (300 ГГц – 3 ТГц). Ассоциация IEEE также проводит работы в этой области, выделив рабочую группу для стандартизации терагерцового диапазона, одним из результатов работы которой стало дополнение IEEE 802.15.3d-2017, предлагающее использование широкополосных и сверхширокополосных сигналов с полосой до 69 ГГц в частотном диапазоне 252 – 325 ГГц [6, 8].

Целью данной работы является анализ режимов физического уровня, структуры пакетов передаваемых данных и алгоритмов работы парных сетей, работающих в соответствии с дополнениями IEEE 802.15.3e-2017 и IEEE 802.15.3d-2017 для получения качественных оценок помехоустойчивости и выявления уязвимостей, приводящих к нарушению функционирования беспроводных сетей, соответствующих данным стандартам, а также определения технического и алгоритмического облика перспективных систем радиосвязи, использующих нано- и пикосекундные импульсы, в интересах модернизации существующих систем с существенным повышением качества канала связи.

Последняя редакция стандарта IEEE 802.15.3, опубликованная в 2016 году, предназначена для описания работы пикосетей – беспроводных сетей передачи данных, организуемых при необходимости обмена информацией и расформировывающихся по окончанию работы, с дальностью связи в десятки метров. В нём установлено два варианта физического уровня (PHY layer) – для работы в диапазоне 2,4–2,48 ГГц и для работы в диапазоне миллиметровых волн от 57 до 66 ГГц. [4]

Первое дополнение стандарта, IEEE 802.15.3e-2017, описывает работу устройств в режиме парных сетей (pairnet) для достижения скорости передачи данных до 100 Гбит/с на небольших удалениях. В нём введены изменения в подуровень управления доступом

к среде (MAC-подуровень), а также новый вариант физического уровня с двумя режимами работы [5].

Второе дополнение, IEEE 802.15.3d-2017, расширяет возможность работы парных сетей ещё одним вариантом физического уровня для работы в субтерагерцовом диапазоне. Введённый физический уровень использует сигналы с шириной спектра до 69 ГГц в диапазоне 252–325 ГГц для достижения скоростей передачи данных 100 Гбит/с при дальности связи до нескольких километров [6, 8].

Третье дополнение, IEEE 802.15.3f-2017, увеличивает количество доступных частотных каналов, что расширяет верхнюю границу частотного диапазона физического уровня для работы в диапазоне миллиметровых волн с 66 до 71 ГГц [7].

Воздействие помех на системы связи, функционирующие в соответствии со стандартом IEEE 802.15.3-2016 с дополнением 802.15.3f-2017, имеющие дальность связи в несколько единиц-десятков метров маловероятно. Поэтому, в данной работе подробно изучены особенности, характеризующие помехоустойчивость парных сетей передачи данных, работающих в соответствии с дополнениями IEEE 802.15.3e-2017 и IEEE 802.15.3d-2017, а также произведено сравнение с сетями, работающими в соответствии с базовым стандартом IEEE 802.15.3-2016.

2. ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Дополнение IEEE 802.15.3e-2017 описывает физический уровень для высокоскоростной передачи данных на небольших удалениях – high rate close proximity physical layer (HRCP PHY), поддерживающий два режима работы:

1) HRCP single carrier mode PHY (HRCP-SC PHY) – высокоскоростной режим с одной несущей, основанный на режиме физического уровня для работы в диапазоне миллиметровых волн, подробно описанном в работе [9].

2) HRCP on-off keying mode PHY (HRCP-OOK PHY) – режим с двоичной амплитудной манипуляцией (ООК), предназначенный для компактных устройств и удовлетворяющий требованиям к энергоэффективности и простоте передатчика. Данный режим основан на подрежиме OOK/DAMI, также описанном в работе [9].

Оба режима используют одинаковые частотные каналы и ограничены одной спектральной маской, с шириной полосы сигнала до 1,88 ГГц. Также допустимо объединение до четырёх соседних частотных каналов в общую полосу, что повышает пропускную способность и, следовательно, скорость передачи данных. Список каналов приведён в таблице 1.

В дополнении IEEE 802.15.3d-2017, предназначенном для организации высокоскоростной передачи данных на больших расстояниях, вводится новый физический уровень для работы в субтерагерцовом диапазоне – Terahertz Physical Layer (THz PHY). Данный физический уровень использует радиоволны на границе миллиметрового и терагерцового диапазонов, от 252 ГГц до 325 ГГц, с шириной полосы сигнала от 2,16 до 69,12 ГГц. Взаимное расположение каналов показано на рисунке 1.

Таблица 1. Частотные каналы, используемые в режимах HRCP PHY

| Номер канала | Количество каналов в полосе сигнала | Нижняя граничная частота, ГГц | Центральная частота, ГГц | Верхняя граничная частота, ГГц |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 1 | 1 | 57,24 | 58,32 | 59,40 |
| 2 | | 59,40 | 60,48 | 61,56 |
| 3 | | 61,56 | 62,64 | 63,72 |
| 4 | | 63,72 | 64,80 | 65,88 |
| 5 | | 65,88 | 66,96 | 68,04 |
| 6 | | 68,04 | 69,12 | 70,02 |
| 7 | 2 | 57,24 | 59,40 | 61,56 |
| 8 | | 59,40 | 61,56 | 63,72 |
| 9 | | 61,56 | 63,72 | 65,88 |
| 10 | | 63,72 | 65,88 | 68,04 |
| 11 | | 65,88 | 68,04 | 70,02 |
| 12 | 3 | 57,24 | 60,48 | 63,72 |
| 13 | | 59,40 | 62,64 | 65,88 |
| 14 | | 63,72 | 66,96 | 70,02 |
| 15 | 4 | 57,24 | 61,56 | 65,88 |
| 16 | | 59,40 | 63,72 | 68,04 |

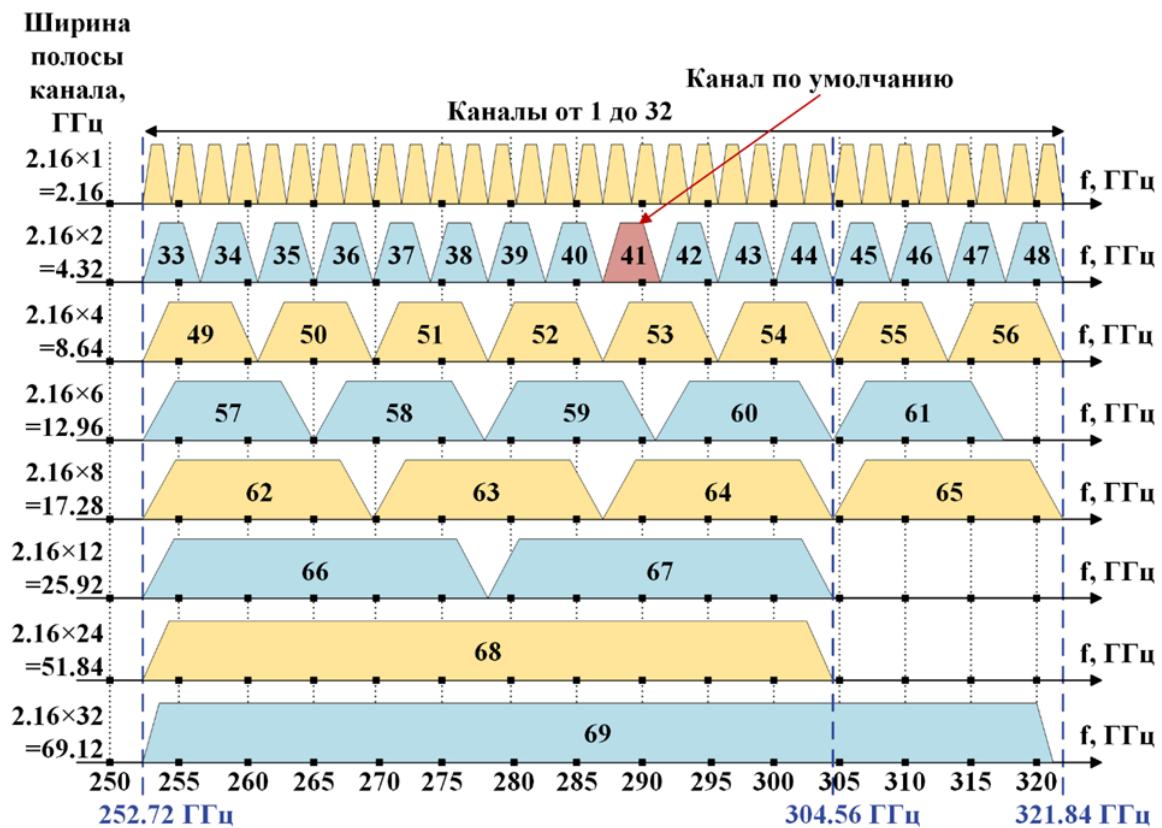


Рис. 1. Схема расположения частотных каналов для режимов THz PHY.

Физический уровень для работы в субтерагерцовом диапазоне также поддерживает два режима:

1) THz single carrier mode PHY (THz-SC PHY) – субтерагерцовый режим с одной несущей.

2) THz on-off keying mode PHY (THz-OOK PHY) – субтерагерцовый режим с двоичной амплитудной манипуляцией.

В целях исследования помехоустойчивости необходимо провести сравнительный анализ используемых в данных стандартах режимов.

a. Высокоскоростной режим с одной несущей (HRCP-SC PHY)

Данный режим поддерживает различные схемы модуляции и кодирования – modulation and coding scheme (MCS). Используемой по умолчанию является квадратурная фазовая манипуляция – quadrature phase-shift keying (QPSK) с постоянным межсимвольным фазовым сдвигом в $\pi/2$, обеспечивающая скорость передачи данных до 3,2 Гбит/с на один частотный канал. Для повышения скорости передачи может применяться квадратурная амплитудная модуляция – quadrature amplitude modulation (QAM) различных порядков: 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, обеспечивающая скорость передачи до 13,1 Гбит/с на один частотный канал.

В целях повышения надёжности и помехоустойчивости применяется прямая коррекция ошибок – forward error correction (FEC), в частности код с малой плотностью проверок на чётность – low-density parity-check (LDPC) [10, 11] со скоростью кодирования 14/15 или 11/15. Допустимые схемы модуляции и кодирования приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры схем модуляции и кодирования режима HRCP-SC PHY

| Номер MCS | Вид модуляции | Скорость кодирования LDPC | Максимальная скорость передачи, Гбит/с | |
|-----------|---------------|---------------------------|--|--------------------------|
| | | | на 1 канал | на 4 объединённых канала |
| 0 | $\pi/2$ QPSK | 11/15 | 2,58 | 10,32 |
| 1 | $\pi/2$ QPSK | 14/15 | 3,29 | 13,16 |
| 2 | 16-QAM | 11/15 | 5,16 | 20,64 |
| 3 | 16-QAM | 14/15 | 6,57 | 26,28 |
| 4 | 64-QAM | 11/15 | 7,74 | 30,96 |
| 5 | 64-QAM | 14/15 | 9,86 | 39,44 |
| 6 | 256-QAM | 14/15 | 13,14 | 52,56 |

Базовая скорость передачи символов соответствует режиму с одной несущей базового стандарта – $176 \cdot 10^7$ символов в секунду, с длительностью одного символа приблизительно 0,568 нс. Однако при использовании объединённых каналов скорость передачи возрастает, а длительность символа сокращается пропорционально количеству объединённых каналов, вплоть до $704 \cdot 10^7$ символов в секунду при длительности символа 0,142 нс.

Вне зависимости от вида модуляции полезных данных для передачи преамбулы и заголовка применяется двоичная фазовая манипуляция – binary phase-shift keying (BPSK) с постоянным межсимвольным фазовым сдвигом в $\pi/2$. Заголовок всегда кодируется обеспечивающим большую помехоустойчивость расширенным кодом Хэмминга – extended Hamming code (EH), со скоростью кодирования 1/2. Также для заголовка применяется расширение кода в четыре раза: каждый бит «0» кодируется последовательностью «1010», а бит «1» – последовательностью «0101». Перед кодированием часть заголовка и полезные данные скремблируются путём сложения по модулю два с последовательностью псевдослучайных чисел.

6. Субтерагерцовый режим с одной несущей (THz-SC PHY)

В данном режиме могут использоваться виды модуляции, аналогичные базовому стандарту: двоичная фазовая манипуляция (BPSK), квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) и восьмеричная фазовая манипуляция – 8 phase-shift keying (8-PSK). Также может применяться 8-позиционная амплитудно-фазовая манипуляция – 8 amplitude and phase-shift keying (8-APSK), обеспечивающая меньшую вероятность ошибки, чем 8-PSK, но требующая более сложной конструкции передатчика и приёмника. Все вышеперечисленные виды модуляции имеют постоянный межсимвольный фазовый сдвиг в $\pi/2$. Для достижения максимальных скоростей передачи определено использование модуляций 16-QAM и 64-QAM.

Аналогично HRCP-SC PHY, для полезных данных применяется прямая коррекция ошибок кодом LDPC со скоростью кодирования 14/15 или 11/15. Используемые схемы модуляции и кодирования и максимальные скорости передачи приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры схем модуляции и кодирования режима THz-SC PHY

| Номер MCS | Вид модуляции | Скорость кодирования LDPC | Максимальная скорость передачи, Гбит/с, при ширине полосы | | | | | | | |
|-----------|---------------|---------------------------|---|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 2,16 ГГц | 4,32 ГГц | 8,64 ГГц | 12,96 ГГц | 17,28 ГГц | 25,92 ГГц | 51,84 ГГц | 69,12 ГГц |
| 0 | BPSK | 11/15 | 1,29 | 2,58 | 5,16 | 7,74 | 10,33 | 15,49 | 30,98 | 41,30 |
| 1 | BPSK | 14/15 | 1,64 | 3,29 | 6,57 | 9,86 | 13,14 | 19,71 | 39,42 | 52,56 |
| 2 | QPSK | 11/15 | 2,58 | 5,16 | 10,33 | 15,49 | 20,65 | 30,98 | 61,95 | 82,60 |
| 3 | QPSK | 14/15 | 3,29 | 6,57 | 13,14 | 19,71 | 26,28 | 39,42 | 78,85 | 105,13 |
| 4 | 8-PSK | 11/15 | 3,87 | 7,74 | 15,49 | 23,23 | 30,98 | 46,47 | 92,93 | 123,91 |
| 5 | 8-PSK | 14/15 | 4,93 | 9,86 | 19,71 | 29,57 | 39,42 | 59,13 | 118,27 | 157,69 |
| 6 | 8-APSK | 11/15 | 3,87 | 7,74 | 15,49 | 23,23 | 30,98 | 46,47 | 92,93 | 123,91 |
| 7 | 8-APSK | 14/15 | 4,93 | 9,86 | 19,71 | 29,57 | 39,42 | 59,13 | 118,27 | 157,69 |
| 8 | 16-QAM | 11/15 | 5,16 | 10,33 | 20,65 | 30,98 | 41,30 | 61,95 | 123,90 | 165,21 |
| 9 | 16-QAM | 14/15 | 6,57 | 13,14 | 26,28 | 39,42 | 52,57 | 78,85 | 157,70 | 210,26 |
| 10 | 64-QAM | 11/15 | 7,74 | 15,49 | 30,98 | 46,46 | 61,95 | 92,93 | 185,86 | 247,81 |
| 11 | 64-QAM | 14/15 | 9,86 | 19,71 | 39,42 | 59,14 | 78,85 | 118,27 | 236,54 | 315,39 |

Модуляция и кодирование заголовка полностью соответствует режиму HRCP-SC PHY: используется модуляция BPSK, расширенный код Хэмминга и расширение кода в четыре раза. Также аналогичен алгоритм скремблирования части заголовка и полезных данных. Скорость передачи символов для каналов с полосой 2,16 ГГц не отличается от базового стандарта, однако в каналах с большей полосой возрастает, вплоть до $42 \cdot 10^9$ символов в секунду при длительности символа 0,024 нс для канала с полосой 69,12 ГГц.

в. Режимы с модуляцией ОOK (HRCP-OOK и THz-OOK PHY)

Данные режимы созданы для обеспечения работы компактных устройств, разработчиками которых предъявляются строгие требования к простоте передатчика и приёмника и высокой энергоэффективности. Для удовлетворения этим требованиям применяется двоичная амплитудная манипуляция как единственный допустимый вид модуляции как для полезных данных, так и для преамбулы и заголовка. В качестве FEC по умолчанию определён более простой код Рида-Соломона RS(240, 224), являющийся единственным для HRCP-OOK PHY. Для режима THz-OOK PHY также может быть использован код LDPC со скоростями кодирования 14/15 или 11/15. В случае использования объединённых каналов в HRCP-OOK PHY для полезных данных может применяться расширение кода в два раза путём повторения каждого бита. Параметры схем модуляции и кодирования приведены в таблицах 4 и 5, соответственно для режимов THz-OOK и HRCP-OOK PHY.

Таблица 4. Параметры схем модуляции и кодирования режима THz-OOK PHY

| Номер MCS | Вид FEC (скорость кодирования) | Максимальная скорость передачи, Гбит/с, при ширине полосы | | | | | | | |
|-----------|-----------------------------------|--|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 2,16 ГГц | 4,32 ГГц | 8,64 ГГц | 12,96 ГГц | 17,28 ГГц | 25,92 ГГц | 51,84 ГГц | 69,12 ГГц |
| 0 | RS (224/240) | 1,64 | 3,29 | 6,57 | 9,86 | 13,14 | 19,71 | 39,42 | 59,14 |
| 1 | LDPC (11/15) | 1,29 | 2,58 | 5,16 | 7,74 | 10,33 | 15,49 | 30,98 | 41,30 |
| 2 | LDPC (14/15) | 1,64 | 3,29 | 6,57 | 9,86 | 13,14 | 19,71 | 39,42 | 52,56 |

Таблица 5. Параметры схем модуляции и кодирования режима HRCP-OOK PHY

| Номер MCS | Вид FEC (скорость кодирования) | Коэффициент расширения кода | Максимальная скорость передачи, Гбит/с, при ширине полосы | | | |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | 2,16 ГГц (1 канал) | 4,32 ГГц (2 канала) | 6,48 ГГц (3 канала) | 8,64 ГГц (4 канала) |
| 0 | RS (224/240) | 2 | — | 1,64 | 2,46 | 3,29 |
| 1 | | 1 | 1,64 | 3,29 | 4,93 | 6,57 |

Для кодирования заголовка в HRCP-OOK PHY определён укороченный код Рида-Соломона ($n+16$, n), где n – длина заголовка в байтах. Также для заголовков используется расширение кода с коэффициентом 16 путём повторения каждого бита 16 раз и сложения по модулю два с последовательностью псевдослучайных чисел.

В заголовке режима THz-OOK PHY используется кодирование, аналогичное режимам с одной несущей: расширенный код Хэмминга со скоростью кодирования 1/2 и расширение кода в четыре раза: каждый бит «0» кодируется последовательностью «1010», а бит «1» – последовательностью «0101». В обоих режимах часть заголовка и полезные данные скремблируются перед кодированием аналогично режимам с одной несущей.

3. СТРУКТУРА СЛУЖЕБНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ СЕТИ

Заметной уязвимостью сетей передачи данных с открытой архитектурой является возможность воздействия на служебную информацию или нарушение работы заданных стандартом алгоритмов сети. При таком воздействии передача данных по каналу связи может быть сорвана, нарушена или затруднена. В рамках данной работы для оценки степени воздействия на служебную информацию исследована структура служебной информации. Для выявления уязвимостей процедур организации сети проанализированы определённые в стандартах алгоритмы.

Парные сети стандартов IEEE 802.15.3e-2017 и IEEE 802.15.3d-2017 состоят из двух устройств: координатора – pairnet coordinator (PRC), инициализирующего создание сети, и подключённого устройства – pairnet devise (RPDEV). Передаваемая информация разделена на кадры размером до 2 Мбайт полезных данных, не считая потерь на кодирование. Помимо полезной информации, кадр включает в себя служебную информацию: преамбулу и заголовок. Преамбула содержит заранее определённые последовательности для синхронизации и вычисления характеристик канала.

Заголовок состоит из подзаголовков физического уровня и MAC-подуровня, проверочной последовательности – header check sequence (HCS), которая формируется из обоих подзаголовков по алгоритму CRC-16, и незначащих бит для выравнивания длины сообщения. Заголовки режима HRCP-OOK PHY также содержат биты для проверки кодирования Рида-Соломона. Алгоритм формирования и обработки заголовка и полезных данных приведён на рисунке 2.

Параметры модуляции и кодирования заголовков для разных режимов работы приведены ранее в соответствующих разделах. После скремблирования, кодирования и разбиения на символы для модуляции данные разбиваются на блоки. В начало каждого блока могут быть вставлены пилотные слова, служащие для синхронизации приёмника во временной и частотной областях во время передачи. Для режимов HRCP-SC, THz-SC, THz-OOK PHY установлены блоки длиной 64 символа с пилотным словом длиной 8 символов, причём заголовок всегда должен иметь пилотные слова. Для режима HRCP-OOK PHY длина блока по умолчанию 512 символов, а пилотного слова – 4 символа, однако при использовании расширения кода в два раза длины блока и пилотного слова пропорционально возрастают, до 1024 и 8 символов соответственно. Пилотные слова в заголовках этого режима не используются. Для модуляции пилотных слов в режимах HRCP-SC и THz-SC PHY всегда применяется BPSK, в режимах HRCP-OOK и THz-OOK PHY – OOK.

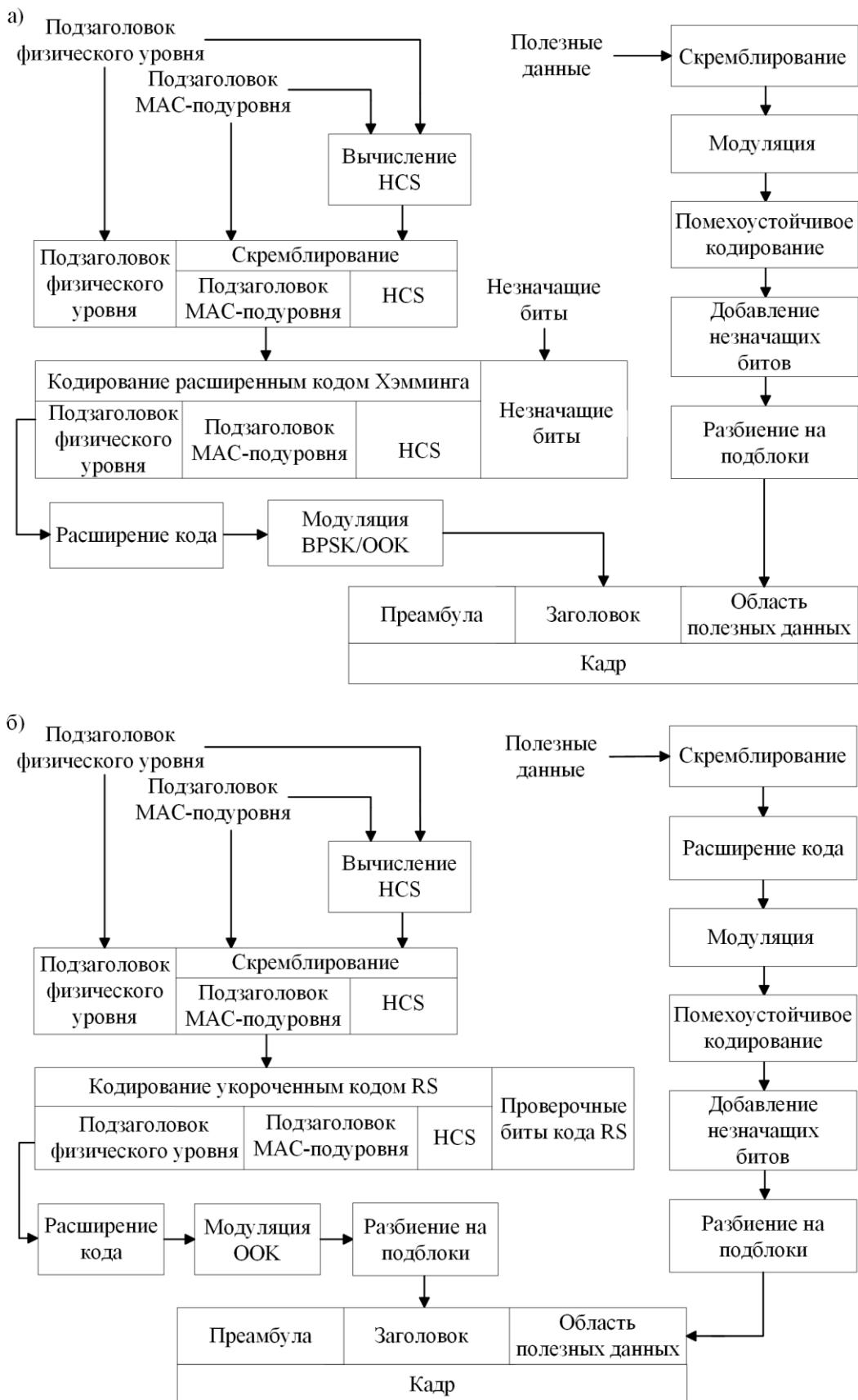


Рис. 2. Структура кадра стандартов IEEE 802.15.3e-2017 и IEEE 802.15.3d-2017:

а) структура кадра режимов HRCP-SC, THz-SC, THz-OOK PHY;

б) структура кадра режима HRCP-OOK PHY.

Помимо кадров для пикосетей базовый стандарт определяет более крупную служебную единицу – суперкадр. Каждый суперкадр начинается с передачи координатором пикосети кадра-маяка, который содержит информацию о режиме работы текущего суперкадра, порядок временных слотов для работы каждого устройства, а также служит для временной синхронизации устройств. После этого следуют период для подключения новых устройств и период для передачи полезных данных согласно установленному порядку.

В дополнениях для парных сетей также определён суперкадр, однако его структура и функциональное назначение отличаются и зависят от текущего состояния парной сети. В период организации сети – *raignet setup period* (PSP) каждый суперкадр начинается с передачи координатором парной сети кадра-маяка и длится не более 65,5 мс, как и в базовом стандарте. В каждом суперкадре выделяется несколько слотов доступа. Для подключения к сети второе устройство должно отправить в любой из выделенных слотов запрос об ассоциации, указав в нём идентификатор сети, содержащийся в кадре-маяке. Получив запрос об ассоциации, координатор временно прекращает передавать кадры-маяки на период ассоциации, длительность которого выбирается на усмотрение разработчиков устройств от 1 мс до 65,5 с. Однако значения более 500 мс не рекомендуются, а в случае корректного приёма всех служебных сообщений ожидаемый период ассоциации составляет не более 2 мс. Возможна передача кадров-маяков одновременно в двух режимах (HRCP-SC и HRCP-OOK PHY; THz-SC и THz-OOK PHY), с временным разнесением положения кадров-маяков и слотов доступа.

Прекратив отправку кадров-маяков, координатор передаёт ответ об ассоциации. Не получив подтверждения приёма, он повторяет передачу, пока не истечёт период ассоциации, а с его получением начинается период работы сети – *raignet associated period* (PAP). В данной период кадры-маяки не используются, вместо этого суперкадр начинается с ответа об ассоциации и не имеет ограничений по длительности – он завершается с окончанием передачи данных отправкой запроса об диссоциации или истечении периода ассоциации от последнего корректно принятого сообщения. В период PSP все сообщения передаются с использованием рекомендуемой по умолчанию схемы модуляции и кодирования, обладающей наибольшей помехоустойчивостью. В период PAP может использоваться любая схема, в том числе модуляции высокого порядка. Рассмотренный алгоритм представлен на рисунке 3.

В парных сетях используется специальная политика подтверждения приёма стека – *stack acknowledgment* (Stk-ACK). Она подразумевает разбиение полезных данных в одном кадре на части – субкадры. Каждый субкадр получает порядковый номер, начиная с первого субкадра в суперкадре. Подтверждение приёма производится только для последнего субкадра в принятом кадре, подразумевая успешный приём всех предыдущих субкадров. В случае, если не все субкадры были корректно приняты, производится повторная передача, начиная со следующего за последним корректно принятым субкадром.

Политики подтверждения приёма, определённые для пикосетей в базовом стандарте, предполагают повторную передачу целого кадра при некорректном приёме его части. Таким образом, политика Stk-ACK позволяет сократить количество повторно передаваемой информации при возникновении ошибок при приёме кадров.

В случае корректной передачи кадры разделяются коротким межкадровым интервалом – short interframe space (SIFS). Если подтверждение не было получено, передача кадра повторяется через интервал повторной передачи – retransmission interframe space (RIFS). Значения SIFS могут быть выбраны устройствами из приведённых в стандартах списков, а RIFS устанавливается исходя из выбранного SIFS.



Рис. 3. Алгоритм формирования и периоды работы парной сети стандартов IEEE 802.15.3e-2017 и IEEE 802.15.3d-2017.

Процесс подключения может быть нарушен, если множество устройств одновременно отправляют запрос об ассоциации. Для решения этой проблемы рекомендуется использовать не менее четырёх слотов доступа. Также возможен некорректный приём устройством ответа об ассоциации или координатором подтверждения приёма ответа об ассоциации. При увеличении периода ассоциации вероятность корректного приёма ответа об ассоциации возрастает, однако возрастает и время простоя сети в случае, если корректный приём невозможен.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были исследованы особенности физического уровня и структуры служебной информации стандартов IEEE 802.15.3e-2017 и IEEE 802.15.3d-2017, влияющие на помехоустойчивость систем связи, функционирующих в соответствии с данными стандартами. Выявленные особенности могут быть использованы для количественной оценки помехоустойчивости подобных систем связи и использованы при разработке перспективных систем сверхширокополосной радиосвязи.

Сравнение способов организации служебной информации в пикосетях базового стандарта IEEE 802.15.3-2016 и парных сетях, описанных в дополнениях к стандарту,

показывает, что заголовки парных сетей более помехоустойчивы за счёт использования расширенного кода Хэмминга и коэффициентов расширения кода 8 и 16. Однако, в дополнениях не предусмотрен аналог общего режима работы – common mode signaling (CMS), используемого в базовом стандарте и обеспечивающего повышенную помехоустойчивость за счёт расширения кода в 64 раза. Основным назначением CMS является совместимость между различными подрежимами базового стандарта. Совместимость между режимами парных сетей обеспечивается возможностью одновременной передачи кадров-маяков разных режимов. Другой областью применения данного режима является передача данных во время процедуры формирования луча, которая не используется в парных сетях. Передача кадров-маяков в пикосетях осуществляется в CMS, так как они используются для синхронизации всех устройств, подключённых к пикосети и передаются всё время работы. В парных сетях нет необходимости в синхронизации более двух устройств и кадр-маяк используется лишь в начале сеанса связи. В связи с рассмотренными особенностями отсутствие режима CMS не значительно влияет на помехоустойчивость парных сетей.

К достоинствам использования более простых сетей типа «точка-точка» в дополнениях IEEE 802.15.3e-2017 и IEEE 802.15.3d-2017 можно отнести снижение количества передаваемой служебной информации и сложности синхронизации устройств, а также уменьшение значимости роли координатора, нарушение функционирования которого приведёт к отказу всей сети. Недостатки используемого типа сети частично компенсируются за счёт возможности работы в субтерагерцовом диапазоне. Более чем десятикратное увеличение количества частотных каналов позволяет организовать большее число параллельно работающих сетей, а значительный рост (до 60 раз) скорости передачи данных – сократить длительность сеансов связи и увеличить их частоту.

Проведённый анализ показывает, что сети, работающие в соответствии с дополнениями IEEE 802.15.3e-2017 и IEEE 802.15.3d-2017 обладают не только большими скоростями и многоканальностью, но и повышенной помехоустойчивостью по сравнению с базовым стандартом IEEE 802.15.3-2016. Однако использование более простого типа сети накладывает ограничения на количество одновременно работающих устройств в определённой области пространства. Учитывая высокую дальность связи (до нескольких километров), наличие перекрывающихся каналов и отсутствие стандартизации алгоритмов формирования диаграммы направленности антенны, данные сети могут быть подвержены значительным взаимным помехам.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00323, <https://rscf.ru/project/21-19-00323/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барабашов Б. Г., М. М. Анишин. Широкополосные системы связи и сигналы. Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2008. - 36 с.

2. Титов К. Д., Липатов А. О., Завалишина О. Н. Оценка помехоустойчивости системы связи стандарта IEEE 802.11n при воздействии помех с учётом структуры пакета передаваемых данных // Теория и техника радиосвязи, 2019, № 4. - С. 95-107.
3. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, 2009. - 560 p.
4. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks, 2016. - 510 p.
5. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks – Amendment 1: High-Rate Close Proximity Point-to-Point Communications, 2018. - 178 p.
6. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks – Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer, 2018. - 55 p.
7. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks – Amendment 3: Extending the Physical Layer (PHY) Specification for Millimeter Wave to Operate from 57.0 GHz to 71 GHz, 2018. - 14 p.
8. Project IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs) – THz Communications – An Overview and Options for IEEE 802 Standardization, 2018. - 60 p.
9. Титов К. Д., Петров Ю. Г., Головацкая Е. Э. Исследование особенностей схем модуляции и кодирования, используемых в стандарте IEEE 802.15.3-2016 // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии и системы» (НИТИС-2021), 2021 (в печати).
10. Tu Z., Zhang S. Overview of LDPC Codes // Seventh International Conference on Computer and Information Technology, 2007. - Pp. 469-474.
11. Shokrollahi A. LDPC Codes: An Introduction. Fremont: Digital Fountain, 2003. -34 p.

REFERENCES

1. Barabashov, B. G., Anishin, M. M. Wideband communication systems and signals. Rostov-on-Don: USU, 2008. - 36 p.
2. Titov, K. D., Lipatov, A. O., Zavalishina, O. N. Estimation of noise immunity of IEEE 802.11n communication system in noise taking in considering structure of transmitted data // Radio communication and methodology, 2019, No. 4. - P. 95-107
3. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, 2009. - 560 p.
4. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks, 2016. - 510 p.
5. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks – Amendment 1: High-Rate Close Proximity Point-to-Point Communications, 2018. - 178 p.
6. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks – Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer, 2018. - 55 p.
7. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks – Amendment 3: Extending the Physical Layer (PHY) Specification for Millimeter Wave to Operate from 57.0 GHz to 71 GHz, 2018. - 14 p.
8. Project IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs) – THz Communications – An Overview and Options for IEEE 802 Standardization, 2018. - 60 p.
9. Titov, K. D., Petrov, Yu. G., Golovatskaya, E. E. Research of specificities of modulation and coding schemes used in IEEE Standard 802.15.3-2016 // Conference proceedings of XVIII International scientific-technical conference “New information technologies and systems-2021”, 2021 (in publishing).
10. Tu, Z., Zhang, S. Overview of LDPC Codes // Seventh International Conference on Computer and Information Technology, 2007. - Pp. 469-474.
11. Shokrollahi, A. LDPC Codes: An Introduction. Fremont: Digital Fountain, 2003. -34 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ОСНОД В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

, А. А. Мухопадов¹, А. М. Танвель¹

¹ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Аннотация. Проведены исследования эффективности функционирования ОСНОД в условиях воздействия заградительных и прицельных помех на имитационной модели. Получены зависимости вероятности ошибок на приеме от отношения сигнал/помеха, сформулированы рекомендации по повышению помехозащищенности.

Ключевые слова: ОСНОД, помехозащищенность, помехи.

RESEARCH IMMUNITY OF ISNDI IN CONDITIONS OF A DIFFICULTY ELECTROMAGNETIC FACILITIES

A. A. Mukhopadov¹, A. M. Tanvel¹

¹ MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Abstract. Investigations of the efficiency of ISNDI functioning under the influence of barrage and sighting interference on a simulation model have been carried out. The dependences of the probability of errors at reception on the signal-to-noise ratio are obtained, recommendations for increasing the noise immunity are formulated.

Keywords: ISNDI, noise immunity, jamming.

1. ВВЕДЕНИЕ

Многогранность задач информационного обмена, решаемых типовыми средствами радиосвязи всех видов и родов войск с одной стороны, и недостаточная эффективность и полнота их выполнения с другой, послужила предпосылкой для создания качественно новой системы связи, способной обеспечивать обмен и распределение данных в едином информационном поле для всех видов вооруженных сил Российской Федерации и в различных звеньях управления.

Объединенная система связи, навигации, обмена данными и опознавания (ОСНОД), принятая на снабжение в Министерстве обороны Российской Федерации, является унифицированной системой распределения и обмена тактической информацией в различных видах Вооруженных Сил, и помимо передачи данных поддерживает также специальные режимы, такие как автоматическое зависимое наблюдение и относительная навигация. Данная система обеспечивает выполнение специальных задач, задач боевой подготовки, в том числе и групповых действий, боевых задач при ведении боевых действий.

Несмотря на широкий спектр решаемых задач, в настоящее время возможности ОСНОД не используются в полной мере, поскольку система до сих пор не развернута и не функционирует в штатном режиме. Кроме того, на текущий момент, отсутствуют достоверные результаты о реальных уровнях помехозащищенности данной системы в условиях ведения противником радиоэлектронной борьбы (РЭБ). В этой связи возникает

своевременная и актуальная задача исследования помехозащищенности ОСНОД, что позволит в будущем выработать комплекс эффективных мер по обеспечению выполнения задач системой в условиях сложной электромагнитной обстановки на театре военных действий.

2. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ ПОМЕХОЗАЩЕННОСТИ

Оценка помехозащищенности системы проводилась с помощью единого информационного показателя, определяющего эффективность функционирования любой системы связи как инструмента передачи дискретной информации – вероятность появления ошибок при приеме информационных сообщений. Таким образом, основные цели исследований могут быть поставлены следующим образом.

В условиях существующих множеств параметров радиосигналов $\{\Pi_{\text{сигн}}\}$, параметров применяемых помехоустойчивых кодов $\{\Pi_{\text{пук}}\}$ и параметров помех противника $\{\Pi_{\text{рэп}}\}$, оценить вероятность появления ошибок на приеме в элементах передаваемой информации $P_{\text{ош инф}}(q)$ в зависимости от отношения сигнал/помеха q на входе приемника сигналов:

$$P_{\text{ош}}(\{\Pi_{\text{сигн}}\}, \{\Pi_{\text{пук}}\}, \{\Pi_{\text{рэп}}\}) \Rightarrow P_{\text{ош инф}}(q). \quad (1)$$

Полученное семейство зависимостей $P_{\text{ош инф}}(q)$ позволит провести оценку пороговых уровней (отношений сигнал/помеха) нормального функционирования аппаратуры ОСНОД в условиях воздействия помех различного вида и интенсивности.

Для достижения поставленной цели разработана имитационно-аналитическая модель, описывающая функционирование ОСНОД в условиях помеховой обстановки, которая включает ряд частных моделей:

- математическую модель радиолинии ОСНОД;
- математическую модель источника помех;
- блок расчета статистических характеристик.

При разработке моделей приемо-передатчика ОСНОД был проведен анализ сигнально-кодовых конструкций, применяемых в системе.

3. СТРУКТУРА СИГНАЛА В ОСНОД

Функционирование ОСНОД основано на комбинированном методе расширения спектра сигналов: за счет псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) несущей и внутриимпульсной частотной манипуляции [1, 3]. Сигналы системы представляют собой последовательность радиоимпульсов со скважностью 2 длительностью 6,4 мкс, каждый из которых обозначает информационный символ первичного алфавита системы. Режим ППРЧ реализуется в системе путем скачкообразного изменения несущей частоты сигнала от импульса к импульсу в выделенном для работы системы диапазоне частот 960-1215 МГц с шагом 2,5 МГц. Каждый радиоимпульс представляет собой информационную бинарную 32-элементную посылку с модуляцией несущей по методу частотной манипуляции с минимальным сдвигом (*MSK*). Обобщенная структура сигнала приведена на рисунке 1.

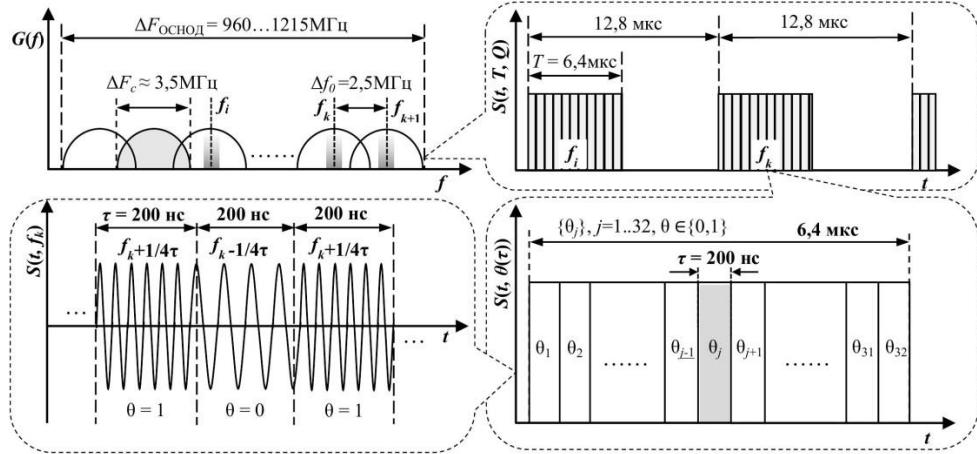


Рис. 1. Структура сигнала в ОЧНОД.

Для информационной окраски посылок используется метод манипуляции циклического сдвига внутриимпульсного кода, при котором различным значениям информационного параметра сигнала соответствуют различные значения циклического сдвига известной на приеме опорной псевдослучайной последовательности (ПСП). Количество возможных циклических сдвигов соответствует длине внутриимпульсного кода, что определяет объем первичного алфавита сигналов системы как $M = 32$. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов используется помехоустойчивое кодирование недвоичным кодом Рида-Соломона (31, 15) над 32-значным алфавитом информационных сигналов [1].

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛИНИИ ОЧНОД

Аналитическое представление радиосигнала ОЧНОД, лежащее в основе модели приемо-передатчика, включает в себя основные этапы преобразований циркулирующей в системе информации, от момента ее поступления на вход аппаратуры передачи данных до момента излучения передатчиком радиосигналов и обратно [2].

1. Разбиение входной последовательности произвольной длины Z информационных символов M -значного алфавита на блоки длиной K

$$\{I\}^K \Rightarrow \{\{I\}^{Z \text{ div } K}\}, I = 1..M, M = 32, K = 15 \quad (2)$$

2. Помехоустойчивое кодирование в недвоичном коде Рида-Соломона $RS(N, K)$ над полученными кодовыми комбинациями $\{I\}^K$, в результате чего образуется последовательность N -символьных кодовых комбинаций

$$\{\{I\}^N\}^{Z \text{ div } K} \Rightarrow \{RS_{(N, K)}[\{I\}^K]\}^{Z \text{ div } K}, N = 31 \quad (3)$$

3. Формирование из полученных N -значных кодовых комбинаций, последовательностей символьных информационных сигналов $I(T)$ длиной $Y = N \cdot (Z \text{ div } K)$ длительностью T с внутриимпульсной информационной окраской M -значной опорной последовательностью $M_{\text{оп}}$ двоичных элементов $\theta(\tau)$ длительностью τ с циклическим сдвигом на величину значения передаваемого информационного символа I

$$\{\{I\}^N\}^{Z \text{ div } K} \Rightarrow \{I(T)\}^Y, \quad (4)$$

$$I(T) \Rightarrow G_M(T, \theta(\tau), t) = M_{\text{ОП}}(T, t) \ggg I, T = 6,4 \text{ мкс}, \tau = T / M. \quad (5)$$

4. Формирование из последовательности информационных символов $\{G_M(T, \theta(\tau), t)\}^Y$ последовательности радиоимпульсов длительностью T с MSK-модуляцией на несущей частоте f_0

$$\{I(T)\}^Y = \{G_M(T, \theta(\tau), t)\}^Y \Rightarrow S_{\text{MSK}}[f_0, G_M, t], \quad (6)$$

где сигнал S_{MSK} можно представить как

$$S_{\text{MSK}}[f_0, G_M, t] = A_0 \left(\theta(\tau) \cos\left(2\pi f_0 t + \frac{1}{4\tau}\right) + (1 - \theta(\tau)) \cos\left(2\pi f_0 t - \frac{1}{4\tau}\right) \right). \quad (7)$$

При этом период следования MSK-радиоимпульсов определяется скважностью Q и равен $Q T$, а несущая частота f_0 меняется от импульса к импульсу по псевдослучайному закону. Таким образом, конечный радиосигнал системы ОСНОД можно представить как ППРЧ со скважностью $Q=2$

$$S(t) = \eta(\sin(2\pi t / (QT))) S_{\text{MSK}}[f_0, G_M, t], f_0 \in \{f_l\} \in \Delta F_{\text{ОСНОД}}, l = 1..L, \quad (8)$$

где $\{f_l\}$ номиналы частот, используемых при перестройке, L – количество частотных каналов в диапазоне частот $\Delta F_{\text{ОСНОД}}$ выделенных с шагом 2,5 МГц для работы ОСНОД (рис. 1).

На приемной стороне описанные выше операции производятся в обратном порядке. В демодуляторе сигналов происходит прием входной реализации, которая представляет собой аддитивную сумму полезного сигнала (7) и помеховой составляющей $H(t)$

$$\xi(t) = \eta(\sin(2\pi t / (QT))) S_{\text{MSK}}[f_0, G_M, t] + H(t), \quad (9)$$

выделение на псевдослучайных несущих частотах информационных радиоимпульсов, искаженных влиянием помехи $H(t)$, и снятие внутриимпульсной MSK-модуляции

$$\xi(t) \Rightarrow G'_M(T, \theta(\tau), t) \quad (10)$$

В результате получаются 32-элементные информационные бинарные последовательности, которые содержат информацию о передаваемом информационном символе $I'(T)$. Идентификация символов выполняется по правилу

$$I'(T) = \text{Arg}[\text{MAX}(R(J))], \forall J = 1..M, \quad (11)$$

$$R(J) = \int_0^T G'_M(T, \theta(\tau), t) \cdot (M_{\text{ОП}}(T, t) \ggg I) dt, \quad (12)$$

т.е. производится вычисление значений корреляционной функции (КФ) между принятой последовательностью и M -мерным массивом свинутых последовательно на $J=0..M-1$, опорных ПСП $M_{\text{ОП}}$, обозначающих двоичное представление информацион-

ных символов I первичного алфавита. Выделение информационных символов $I'(T)$ на приеме производится по значению аргумента (рис. 2) в точке экстремума графика КФ.

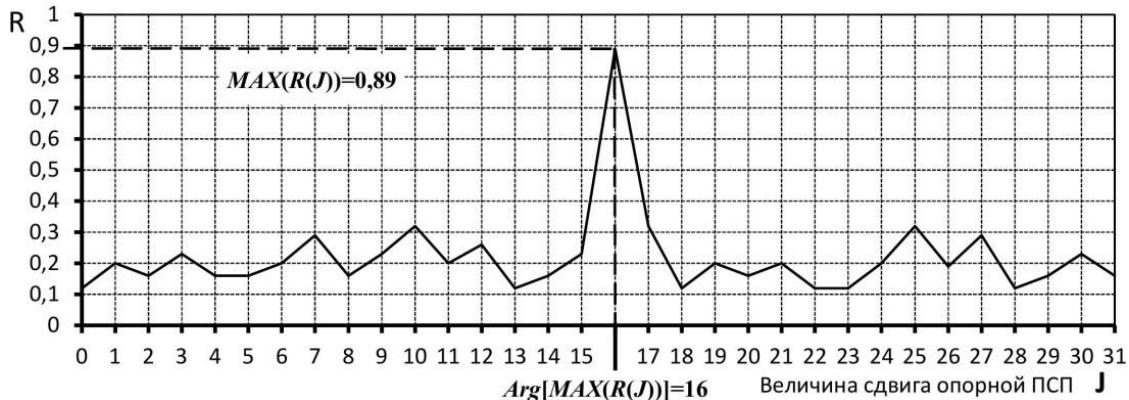


Рис. 2. График корреляционной функции между опорной и принимаемой внутриимпульсной ПСП.

Полученная последовательность информационных символов $\{I'(T)\}^Y$ группируется в N -элементные кодовые комбинации $\{I'(T)\}^Y \Rightarrow \{\{I'\}^N\}^{Z \text{ div } K}$ и подвергается декодированию, в результате чего получается последовательность K -элементных кодовых комбинаций

$$\{\{I'\}^K\}^{Z \text{ div } K} \Rightarrow \{\text{RS}_{(N,K)}^{-1}[\{I'\}^N]\}^{Z \text{ div } K}, \quad (13)$$

которые образуют принимаемое сообщение длиной Z

$$\{\{I'\}^K\}^{Z \text{ div } K} \Rightarrow \{I'\}^Z. \quad (14)$$

5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ПОМЕХ

При построении математической модели источника преднамеренных помех проведен анализ типовой электромагнитной обстановки на театре военных действий и установлено, что основными видами помех являются гауссовская шумовая широкополосная помеха (ГШП) и сигналоподобная прицельная помеха (СПП) [4].

ГШП является заградительной помехой, естественного и искусственного происхождения. Она, как правило, действует во всем диапазоне частот работы ППРЧ. Особенностью взаимодействия данного вида помехи с сигналом ОСНОД является то, что он действует на протяжении всего такта перестройки несущей частоты, т.е. ГШП является не сосредоточенной ни по времени ни по спектру. Ее можно описать аддитивным белым гауссовским шумом (БГШ) $N(t)$ с равномерным спектром и с постоянной спектральной плотностью мощности, равной дисперсии значений отсчетов.

СПП относится к классу прицельных по частоте помех, которая является сосредоточенной как по спектру, так и по времени. Данный вид помехи применяется преднамеренным и применяется для подавления сетей радиосвязи с ППРЧ методом «погони по частоте». Суть его заключается в перестройке рабочей частоты помехи синхронно с несущей частотой подавляемого радиосигнала. Такая перестройка будет происходить с небольшой временной задержкой τ_3 относительно изменения несущей частоты подавляемого радиосигнала. Сигналоподобная помеха, как следует из ее названия, должна быть

по структуре похожа на информационный сигнал системы, поэтому ее, действующую на входе приемника аппаратуры ОСНОД, на каждом такте перестройки на несущей частоте f_0 можно представить как

$$J(t) = \eta \left(\sin(2\pi(t - \tau_3)/(QT)) \right) S_{MSK}[f_\Pi, X_M, t], f_\Pi \in \{f_l\} \in \Delta F_{OSNOD}, \quad (15)$$

где f_Π – несущая частота помехи, $X_M = X_M(T, \theta(\tau), t - \tau_3)$ – случайная модулирующая бинарная ПСП, сдвинутая относительно принимаемого сигнала на случайную задержку τ_3 с равномерным распределением, τ_3 – время задержки накрытия помехой частотного элемента сигнала ОСНОД на каждом такте перестройки (рис. 3).

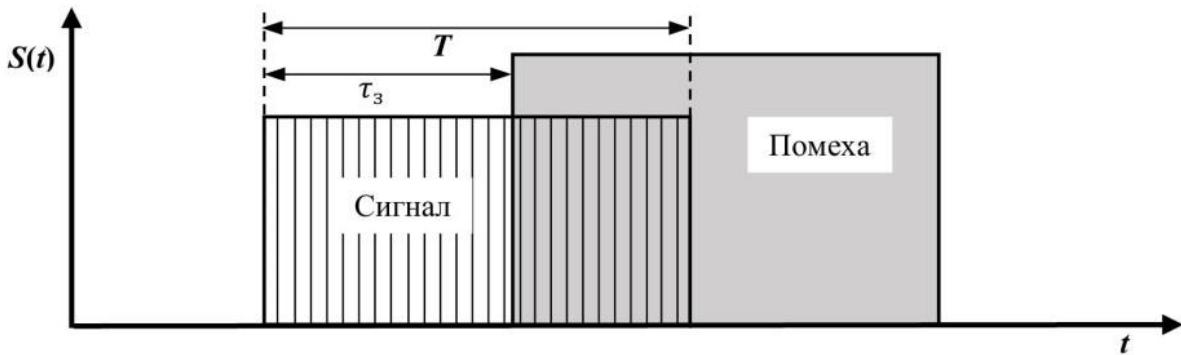


Рис. 3. Задержка накрытия помехой частотного элемента ППРЧ.

По своей структуре радиоимпульсы помехи $S_{MSK}[f_\Pi, X_M, t]$ можно представить следующим образом:

$$A_\Pi \left(\theta(\tau) \cos \left(2\pi f_\Pi (t - \tau_\Pi) + \frac{1}{4\tau} + \varphi \right) + (1 - \theta(\tau)) \cos \left(2\pi f_\Pi (t - \tau_\Pi) - \frac{1}{4\tau} + \varphi \right) \right), \quad (16)$$

где A_Π – амплитуда помехи, φ – случайная начальная фаза сигнала. То есть, случайный характер помехи определяется не только временем сдвига ПСП модулирующей X_M относительно информационных внутриимпульсных последовательностей G_M , но и случайной начальной фазой несущей помехи. Такая модель дает достаточно адекватное представление СПП и особенностей ее влияния на передаваемые радиосигналы ОСНОД. В модели не учитываются возможности несовпадения несущих частот помехи и сигнала, т.е. предполагается что $f_\Pi = f_0$, и воздействие помехи происходит по основному каналу приема, что вполне допустимо ввиду известной противнику сетки частот работы системы.

6. ИМИТАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ

Описанные выше частные модели объединяются в едином контуре статистического моделирования в обобщенную имитационно-аналитическую модель [2], представленную на рисунке 4.

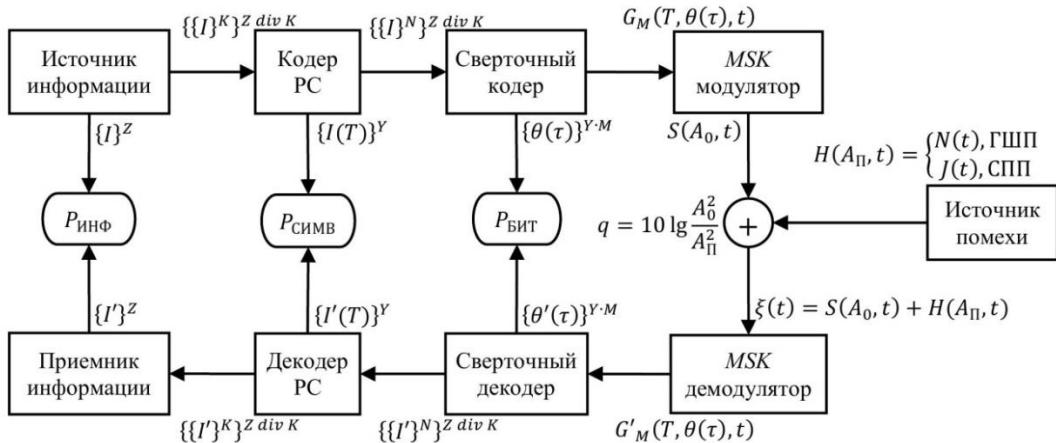


Рис. 4. Имитационно-аналитическая модель оценки помехозащищенности ОСНОД.

Блок расчета статистических характеристик определяет следующие основные вероятностные характеристики:

- $P_{\text{бит}}$ – вероятность ошибок в битах $\theta(\tau)$ внутриимпульсной бинарной M -элементной ПСП ($M=32$);
- $P_{\text{симв}}$ – вероятности ошибок в символах N -элементных кодовых комбинаций $\{I'\}^N$ Рида-Соломона ($N=31$);
- $P_{\text{инф}}$ – вероятность ошибок в символах K -элементных информационных групп $\{I'\}^K$ кода Рида-Соломона ($K=15$), она же является основным информационным показателем эффективности согласно критерия (1).

7. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований помехозащищенности аппаратуры ОСНОД представлены ниже. На рисунке 5 отражена зависимость вероятность ошибочного приема различных структурных информационных элементов сообщений, циркулирующих в системе, при воздействии гауссовской шумовой помехи (ГШП).

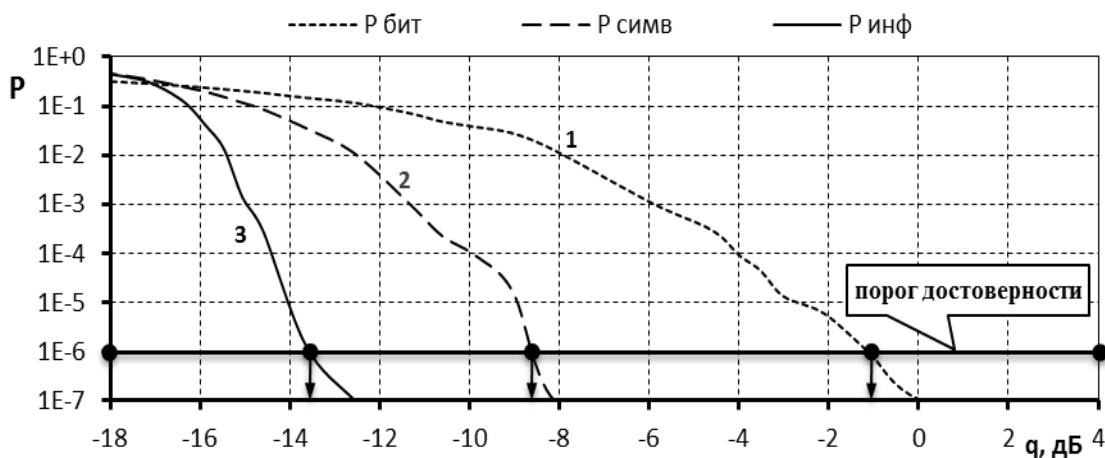


Рис. 5. Вероятности ошибочного приема при воздействии ГШП.

Из сравнения кривых 1, 2 и 3 видно, что примененные в ОСНОД методы повышения помехозащищенности достаточно эффективны. Ошибки на приеме в элементах 32-разрядных внутриимпульсных бинарных ПСП, передаваемых с помощью MSK-модуляции, появляются с вероятностью 10^{-6} , при отношении сигнал/помеха не менее -1 дБ, однако, благодаря внутриимпульсному сверточному кодированию, которым производится информационная окраска элементарных радиоимпульсов, система обладает устойчивостью к множественным ошибкам такого характера, что отражается кривой 2. Анализ кривой 2 показывает, что пороговые по отношению сигнал/помеха q уровни достоверного приема символов алфавита системы составляют около -8,7 дБ, при этом уровень элементарных ошибок достигает $P_{\text{бит}} \approx 0,02$. Таким образом, обеспечивается выигрыш в помехозащищенности не менее 7,7 дБ. Применение кода Рида-Соломона способствует еще большему увеличению устойчивости функционирования системы в условиях воздействия ГШП, что подтверждается кривой 3, отражающей вероятность появления ошибок в символах информационных групп. Пороговые уровни отношения сигнал / помеха составляют -13,6 дБ. Таким образом суммарный выигрыш составляет не менее 12 дБ.

Помехозащищенность системы в условиях воздействия сигналоподобных помех (СПП) значительно хуже, чем от ГШП, что подтверждается кривыми 1, 2 и 3 на графике, отображенном на рисунке 6.

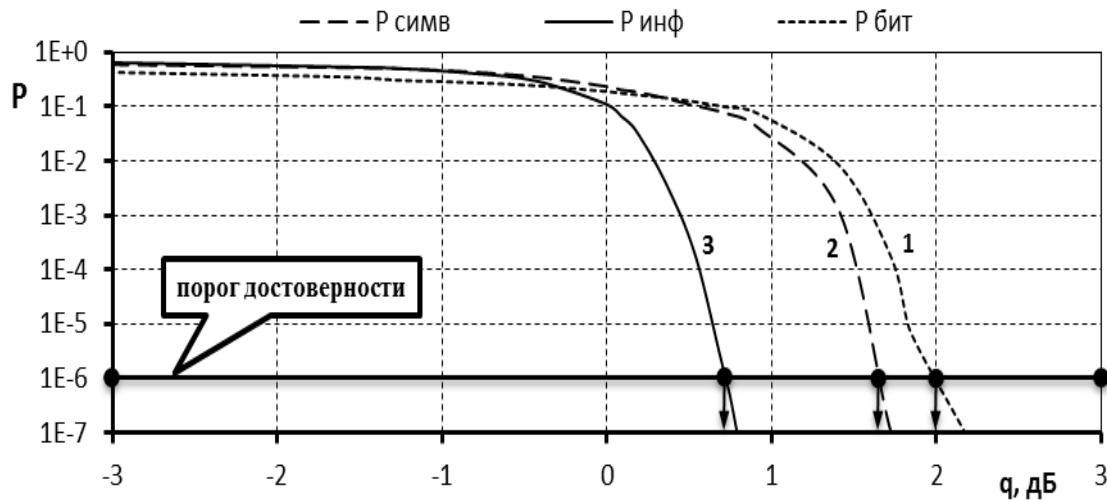


Рис. 6. Вероятности ошибочного приема при воздействии СПП.

Пороговые отношения сигнал / помеха q по уровню достоверности 10^{-6} составляют для ошибок: в битах около 2 дБ, в символах 31-элементных кодовых комбинаций 1,6 дБ, в символах информационных групп 0,7 дБ, а суммарный выигрыш в помехозащищенности не превышает 1,3 дБ.

При радиоподавлении сетей радиосвязи с ППРЧ методом «погони по частоте», существенным параметром, влияющим на эффективность СПП является коэффициент покрытия $D = (T - \tau_z)/T$, который отражает, какая часть частотного элемента по времени накрыта помехой, поскольку, как было сказано выше, перестройка несущей частоты

СПП вслед за подавляемым радиосигналом происходит с задержкой, и помеха действует только на части временного интервала существования сигнала.

На рисунке 7 отражены пороговые отношения сигнал / помеха для уровня достоверности 10^{-6} при различных значениях D .

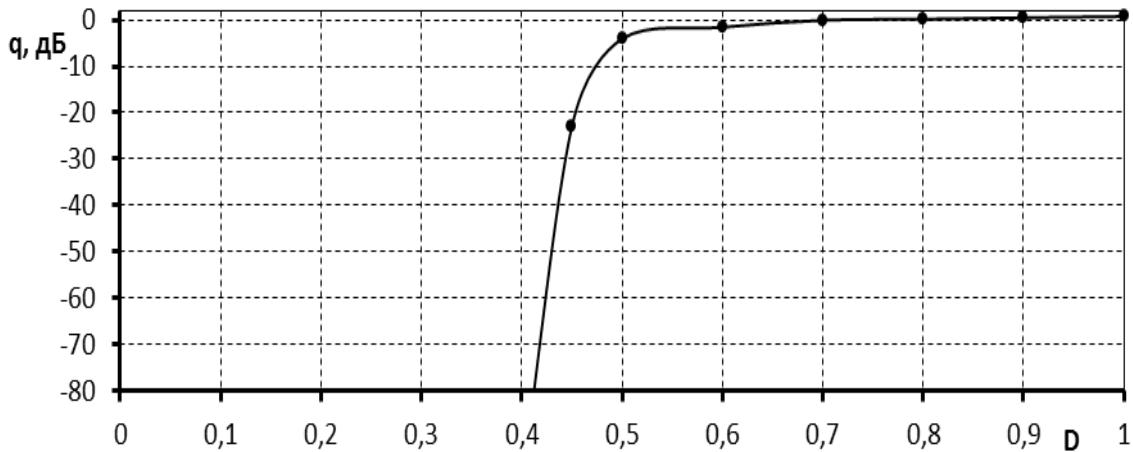


Рис. 7. Зависимость порогового отношения сигнал / помеха от коэффициент покрытия D .

Видно, что с уменьшением D эффективность СПП снижается и имеет пороговый характер, при значениях $D < 0,5$ кривые резко обрываются, что свидетельствует о потере эффекта воздействия СПП на сигналы при малых коэффициентах покрытия.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты исследований позволяют сделать выводы, что основную угрозу для системы представляют сигналоподобные прицельные помехи, эффективность которых, тем не менее, существенно зависит от коэффициента покрытия полезного сигнала, что предъявляет высокие требования к быстродействию аппаратуры постановки помех. В этих условиях основные усилия по повышению помехозащищенности ОСНОД должны быть направлены на увеличение соотношения сигнал/помеха на входе приемного устройства терминала системы, что позволяет уменьшить вероятности информационных ошибок на приеме. Основные пути решения данной проблемы заключаются в предварительной обработке принимаемых радиосигналов с целью увеличения отношений полезной составляющей к помехе. Основными методами в данном случае являются:

- пространственно-временная обработка принимаемых радиосигналов, которая может быть реализована за счет применения новых антенных систем;
- компенсация помехи в радиоприемном устройстве путем оценки неизвестных параметров помеховой составляющей с последующим воспроизведением копии помехи на приемной стороне и ее вычитанием из принимаемой реализации;
- реализация обнаружителя сигналов с постоянным уровнем ложных тревог (ПУЛТ).

Указанные методы целесообразно использовать в комплексе, что позволит добиться максимального увеличения помехозащищенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изделие АТМ-2Ж, описание и работа. Нижний Новгород: ОАО НПП «Полет». 2012. 89 с.
2. Мухопадов А.А., Пуговкин А.Н., Лихачев А.В. Исследование характеристик помехозащищенности аппаратуры ОСНОД в условиях воздействия преднамеренных помех / Теория и техника радиосвязи. Воронеж: изд. ОАО «Концерн «Созвездие», 2018. № 4. С. 67–75.
3. Чердынцев В.А. Системы передачи информации с расширением спектров сигналов: учеб.-метод. Пособие / Чердынцев В.А., Дубровский В.В. – Минск: БГУИР. 2009. 130 с.
4. Максименков А. Основные программы ВВС США по созданию средств радиоэлектронной борьбы // Зарубежное военное обозрение. 2010. № 1. С. 54-58.

REFERENCES

1. Product ATM-2Zh, description and operation. Nizhny Novgorod: JSC NPP Polet. 2012. 89 p.
2. Mukhopadov A.A., Pugovkin A.N., Likhachev A.V. Research the characteristics of ISNDI noise immunity in the conditions of influence of deliberate jamming / Theory and technology of radio communication. Voronezh: ed. JSC Concern Sozvezdie, 2018. No. 4. P. 67–75.
3. Cherdynsev V.A. Information transmission systems with spreading of signal spectra: study guide. Manual / Cherdynsev V.A., Dubrovsky V.V. - Minsk: BSUIR. 2009. 130 p.
4. Maksimenkov A. The main programs of the US Air Force to create means of radio-electronic warfare // Foreign military review. 2010. No. 1. P. 54-58

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЁННОЙ МОДЕЛИ СЕТИ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА

С. П. Гагарин

АО «НИИ «Масштаб», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В докладе рассматривается подход к решению задачи системного проектирования (синтеза структуры) сети абонентского доступа при использовании маргинального подхода. Предлагается задачу синтеза рациональной структуры сети абонентского доступа декомпозировать на ряд частных задач синтеза и анализа, обеспечивающих получение искомой структуры сети абонентского доступа с требуемыми характеристиками. Показано, что применение системной модели и, в частности, подхода, базирующегося на агрегативных системах, позволяет получить аппарат решения задачи меньшей размерности и отличающийся от существующего, оригинальностью и простотой реализации.

Ключевые слова: сеть абонентского доступа, системное проектирование, подсеть распределения, синтез сетевых структур, обобщённая модель формирования распределённой структуры сети, аппарат решения задачи меньшей размерности.

TO THE QUESTION OF BUILDING A GENERALIZED MODEL OF A SUBSCRIBER ACCESS NETWORK

S.P. Gagarin

JSC “Mashtab”, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The report considers an approach to solving the problem of system design (synthesis of the structure) of a subscriber access network using a marginal approach. The problem of synthesizing the rational structure of the subscriber access network is proposed to be decomposed into a number of partial synthesis and analysis problems that provide the desired structure of the subscriber access network with the required characteristics. It is shown that the use of a system model and, in particular, an approach based on aggregate systems, allows one to obtain an apparatus for solving a problem of a lower dimension and differing from the existing one in originality and ease of implementation.

Keywords: subscriber access network, system design, distribution subnetwork, synthesis of network structures, generalized formation model distributed network structure, apparatus for solving problems of a lower dimension.

1. ВВЕДЕНИЕ

По своему характеру задача синтеза структуры сети абонентского доступа (САД) с интеграцией услуг связи, представляющая разновидность задач системного проектирования, является оптимизационной и состоит в выборе такого набора внутренних первичных параметров (структурных и алгоритмических), при которых обеспечивается экстремум некоторого функционала полезности. На практике для большинства систем такого типа построить достаточно обоснованный функционал полезности весьма сложно. Ввиду этого находит применение так называемый маргинальный подход, суть которого состоит в оптимизации одного из внешних параметров системы при ограничениях на все остальные параметры [1]. Учитывая специфику функционирования САД, в качестве основного критерия оптимальности

предлагается использовать минимум суммарных затрат на её построение и эксплуатацию.

2. ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ САД

Задача системного проектирования (синтеза структуры) САД при использовании маргинального подхода выглядит следующим образом. Найти внутренние параметры САД, её структуру, алгоритмы функционирования, при которых для заданного множества абонентов (АП) выполняются требования по качеству доставки информации абонентам, живучести САД и минимизируются затраты по множеству возможных вариантов. Совокупность абонентов задаётся их координатами и характеристиками потоков сообщений.

В процессе решения задачи по разработке аппарата синтеза структуры САД с интеграцией услуг связи предполагается определить:

- число и состав групп абонентов, территориально тяготеющих друг – другу;
- число и координаты размещения узлов доступа (УД) в группах абонентов;
- структуру локальных подсетей групп абонентов, в совокупности составляющих подсеть абонентских линий (АЛ);
- структуру подсети распределения;
- алгоритмы функционирования;
- стоимость и основные технико-эксплуатационные характеристики САД;
- время и объём трудозатрат, необходимых на развёртывание САД, т.е. затраты ресурса.

Представленная задача относится к классу комбинаторных и может быть сформулирована в терминах дискретного математического программирования. Однако чрезмерно высокая размерность делает практически невозможным её прямое решение на базе существующих методов [1]. В связи с этим используются различные упрощения, основная суть которых состоит в декомпозиции общей задачи на совокупность частных. Исходя из этого, предлагается один из подходов решения задачи синтеза рациональной структуры САД.

Эффективным инструментом решения задач синтеза сетевых структур и их дальнейшего развития являются системные модели (СМ). От обычных моделей СМ отличаются большим числом учитываемых факторов, их взаимосвязью, широким набором критериев и ограничений, компактностью и простотой модификации.

САД занимает определённый уровень иерархии перспективной сети связи общего пользования (ССОП), к ресурсу которой она обеспечивает доступ, и, в свою очередь, имеет иерархическую структуру. Исходя из этого, предлагается использование СМ для решения задачи синтеза структуры САД в классе иерархических сетевых структур.

Если каждой операции, проводимой при синтезе и анализе САД, привести в соответствие некоторую частную (субмодель), то обобщённая модель представляется совокупностью взаимоувязанных между собой субмоделей (рисунок 1). Каждая субмодель выполняет определённую задачу.

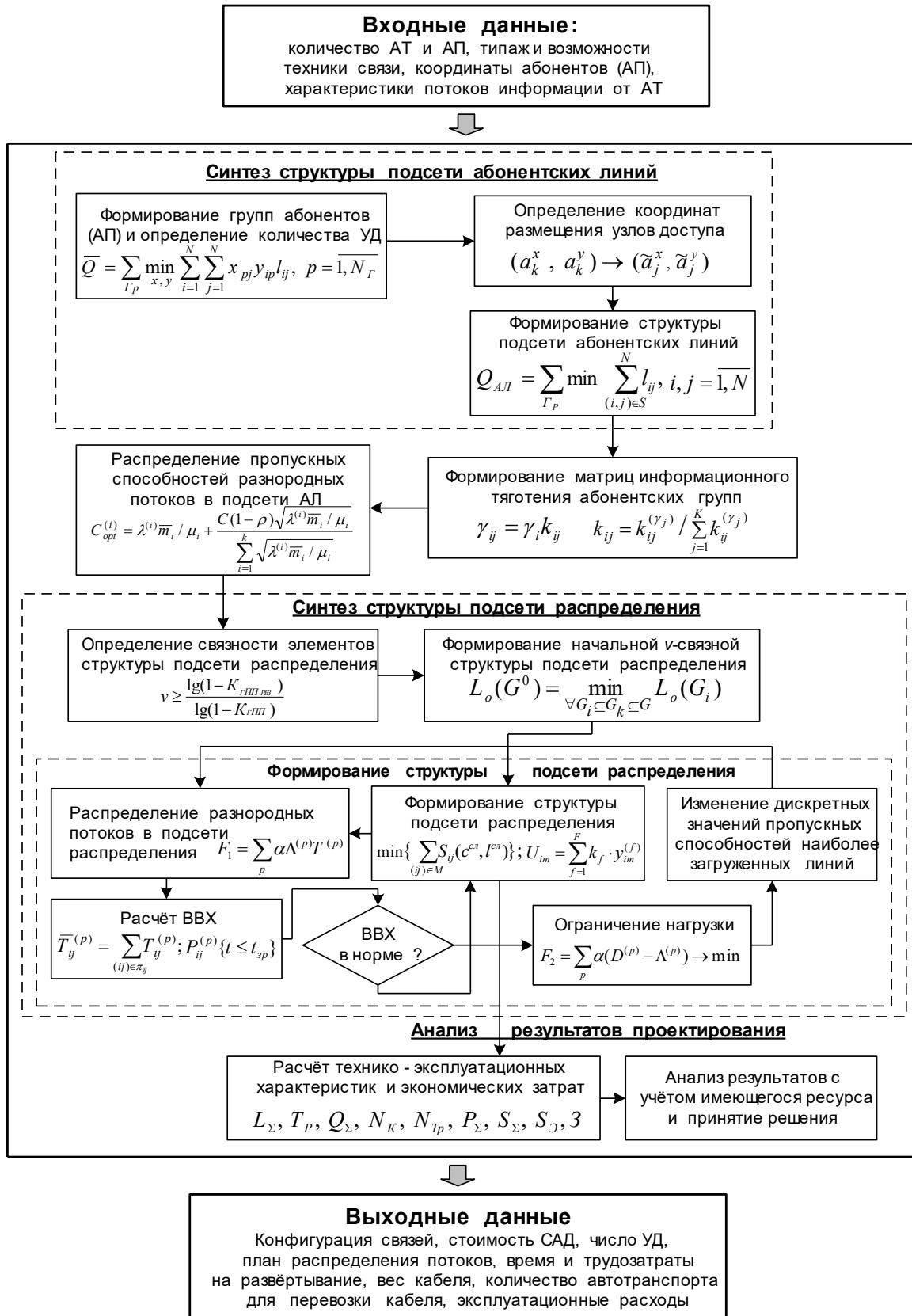


Рис. 1. Обобщённая модель формирования распределённой структуры сети абонентского доступа.

Таким образом, предлагаемая обобщённая модель формирования структуры САД, представляет собой модель, воедино увязывающую структурные параметры, показатели качества обслуживания абонентов (пользователей) (BVX процессов доставки информации), потоковые характеристики, технико-экономические показатели оборудования, технико-эксплуатационные характеристики САД, т.е. частные задачи, обеспечивающие решение поставленной задачи.

Предлагаемая обобщённая модель подобна “чёрному” ящику, преобразующему набор входов I , соответствующих исходным данным задачи синтеза рациональной структуры САД, в выходы, соответствующие заданным критериям и функциям – ограничениям задачи синтеза. Исходя из этого, выделяются следующие частные функциональные задачи и приведённые им в соответствие частные модели в составе обобщённой модели формирования распределённой структуры САД, представленной на рисунке 1.

Обобщённая модель формирования структуры САД агрегируется из субмоделей путём объединения соответствующих входов и выходов. Подход при построении обобщённой модели, основанный на объединении графо-матричных процедур синтеза структуры САД и анализа полученных реализаций (распределение потоков, выбор пропускных способностей, оценка BVX и т.д.) в единую итерационно-циклическую схему, в данном случае является неконструктивным из-за большой размерности и обилия обратных связей. Эти связи вынуждают после решения очередной процедуры проводить корректировку всех предыдущих. Трудности, связанные с объединением в рамках одной обобщённой модели всего многообразия способов реализации будущей модели, растут экспоненциально с ростом размерности, т.е. описывающих САД параметров. Учитывая это, задача синтеза рациональной структуры САД была декомпозирована на ряд частных задач синтеза и анализа, обеспечивающих получение искомой структуры САД с требуемыми характеристиками.

Таким образом применение СМ и, в частности, подхода, базирующегося на агрегативных системах [2], позволило получить аппарат решения задачи меньшей размерности и отличающейся от существующего, оригинальностью и простотой реализации.

С учётом вышесказанного в основу обобщённой модели положены следующие основополагающие принципы:

принцип иерархии, способствующий получению решений задачи синтеза в классе многоуровневых структур, являющихся наиболее экономичной структурной организацией сетей связи и учитывающий структурные составляющие САД (подсеть распределения и подсеть абонентских линий);

принцип функциональной полноты, предполагающий наличие частных моделей (задач) синтеза структуры САД и анализа полученных реализаций: распределения разнородных потоков, выбора пропускных способностей, оценки BVX, т.е. частных моделей, определяющих состав общей задачи синтеза структуры сети абонентского доступа;

принцип упрощения, основанный на исключении несущественных факторов, объединении, линеаризации и регуляризации менее существенных переменных;

принцип многоцелевой ориентации, позволяющий использовать обобщённую модель для синтеза структуры САД в ситуациях, различающихся степенью детализации исходных данных, классами синтезируемых структур, целевыми функциями и составом ограничений, моделируемыми протоколами доступа, обмена и управления;

принцип композиции модели синтеза многоуровневой структуры САД из некоторого набора известных типовых структур;

принцип надёжности вычислений, обеспечивающий устойчивую работу алгоритма, как в допустимой, так и в недопустимой областях и отодвигающий на второй план задачу выбора начальной точки.

3. КОМПОНЕНТЫ ОБОБЩЁННОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СТРУКТУРЫ СЕТИ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА

Приближённый характер исходных данных и пологость целевых функций в экстремальной области,ственные задачам планирования связи, послужили основанием к использованию эвристических алгоритмов синтеза структур подсетей САД в составе обобщённой модели. Относительно потоков передаваемой информации приняты следующие допущения: пуассоновские входные потоки; неравномерный характер информационного тяготения между абонентами (пользователями).

Обобщённая модель формирования распределённой структуры САД представляется как многофункциональный преобразователь входных данных в выходные показатели. Этот многофункциональный преобразователь выполняет отдельные операции синтеза структуры САД и её анализа: расчёта структурных и потоковых параметров, оценки качества обслуживания абонентов (оценки ВВХ процесса доставки), стоимости, технико-эксплуатационных характеристик. Исходя из этого, предлагается рассмотреть функциональное назначение отдельных компонентов обобщённой модели формирования структуры сети абонентского доступа.

Формирование групп абонентов представляет собой субмодель определения количества групп абонентов, территориальной тяготеющих друг – к другу и в соответствии с этим – требуемое количество УД.

Определение координат размещения УД в районах локализации абонентов (АП) позволяет выбрать такую точку, в которой обеспечивается минимум суммарных затрат на АЛ от подмножества абонентов данной группы.

Субмодель формирования структуры подсети АЛ представляет собой набор графо–матричных алгоритмических процедур. Она позволяет рассчитывать структурные параметры отдельных локальных подсетей АЛ каждого подмножества абонентов САД, зависящие от координат размещения абонентов и УД, в целом составляющие параметры подсети АЛ. Строится на основе графовых субмоделей. Вершины графа, представляют собой узлы доступа (учитывая узел коммутации), размещаемые в группах абонентов.

Три перечисленные субмодели в целом составляют частную методику синтеза структуры подсети абонентских линий.

Субмодель формирования матриц взаимного информационного тяготения представляется функцией, определяющей степень взаимного информационного тяготения абонентов в группе, групп абонентов между собой, транспортной составляющей ССОП и обеспечивает прогнозирование разнородного трафика, генерируемого абонентами той или иной группы.

Субмодель распределения пропускных способностей в подсети АЛ представляет набор аналитических формул, позволяющих определить пропускные способности АЛ к УД, в зависимости от интенсивности входного информационного потока в АП, что обеспечивает минимизацию задержки пакетов (ячеек) в локальных подсетях АЛ.

Совокупность следующих субмоделей образует частную методику синтеза структуры подсети распределения.

Субмодель определения связности элементов структуры подсети распределения обеспечивает получение требуемых надёжностных характеристик САД.

Субмодель формирования начальной v – связной структуры подсети распределения обеспечивает получение стартовой структуры, с учётом ряда критериев.

Субмодель синтеза подсети распределения представляет собой набор графо-матричных алгоритмических процедур. Позволяет рассчитывать структурные параметры подсети распределения, зависящие от координат размещения УД. Строится на основе графовых субмоделей. На основе полученной начальной v – связной структуры позволяет синтезировать искомую структуру подсети распределения.

Субмодель расчёта ВВХ представляет набор аналитических субмоделей, позволяющих производить оценку качества обслуживания абонентов (пользователей) – вычисление среднего времени и вероятности доставки пакета (ячейки).

Субмодель распределения приоритетных потоков предназначена для нахождения плана РП интенсивностей потоков в каналах связи подсети распределения.

Субмодель расчёта параметров ОН является дополнением к предыдущей модели и предназначена для расчёта ограничений по внешнему трафику в тех случаях, когда не выполнены ограничения по ВВХ.

Последние составные части обобщённой модели позволяют провести анализ полученных результатов проектирования с использованием следующих субмоделей.

Субмодель расчёта технико-эксплуатационных характеристик и экономических затрат включает подзадачи расчёта общей длины линейно-кабельного оборудования САД, времени развёртывания САД, объёма трудозатрат необходимых для развёртывания САД, количества автомобильного транспорта, необходимого для перевозки линейно-кабельного оборудования и т.д. Позволяет рассчитывать общую стоимость САД и эксплуатационных расходы.

Важное место в обобщённой модели формирования распределённой структуры САД занимают субмодели анализа и, в частности, субмодели расчёта качества обслуживания пользователей (ВВХ процесса доставки). Использование данных субмоделей напрямую не представляется возможным, так как необходимо учитывать особенности, присущие широкополосным ЦСИС.

4. Подход к решению задачи синтеза рациональной структуры САД

Задача системного проектирования (синтеза структуры) САД при использовании маргинального подхода выглядит следующим образом. Найти внутренние параметры САД, её структуру, алгоритмы функционирования, при которых для заданного множества абонентов (АП) выполняются требования по качеству доставки информации абонентам, живущести САД и минимизируются затраты по множеству возможных вариантов. Совокупность абонентов задаётся их координатами и характеристиками потоков сообщений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главной особенностью источников нагрузки САД, построенной на принципах широкополосной ЦСИС, является то, что они характеризуются различными скоростями передачи информации. Требуемая скорость передачи источника нагрузки может иметь случайный характер как в момент возникновения заявки на обслуживание, так и в процессе передачи информации. Это обстоятельство требуется учитывать на этапе разработки САД на основе перспективных сетевых и информационных технологий. Нагрузка, создаваемая этими источниками, уже не является обычной пуассоновской нагрузкой, как это обычно предполагается при анализе телефонных сетей и не является также маркированной пуассоновской нагрузкой, как это принимается при анализе узкополосной ЦСИС.

При описании моделей нагрузки, возникающей в САД, построенной на принципах широкополосной ЦСИС, обычно используется трёхуровневая модель источника нагрузки [2]. Первый уровень данной модели является уровнем вызовов и отбоев. Второй уровень – активной передачи информации. Третий уровень – передачи ячеек. Перечисленным уровням соответствуют три уровня управления: уровень вызова, уровень интервала активной передачи информации, уровень информационной ячейки.

Общая идеология исследования уровня передачи информационной ячейки, как правило базируется на предположении, что поток ячеек является непрерывным с заданной средней скоростью. Один из подходов к исследованию данной проблемы состоит в том, что предполагается [2]:

- малая ёмкость буферного накопителя и относительно малая скорость поступления информационных ячеек, при которых вероятность поступления двух ячеек на один путь была бы мала;

- вероятность перегрузки, с которой возникает большое число необслуженных ячеек в одно и то же время, пренебрежительно мала.

Эти предположения дают возможность моделировать уровень с помощью бернулиевского и пуассоновского случайных процессов с дискретным временем. Указанные допущения приводят к уже хорошо изученным моделям массового обслуживания с ограниченной ёмкостью буфера и детерминированным временем обслуживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барабаш П. А. Инфокоммуникационные технологии в Глобальной информационной инфраструктуре / Воробьев С. П., Курносов В. И., Советов Б. Я. под ред. Советова Б.Я. // – СПб.: Наука, 2008. – 552 с.
2. Воробьев С. П., Давыдов А. Е., Курносов В. И., Миньдюков Н. Н. Инфокоммуникационные сети: классификация, структура, архитектура, жизненный цикл, технологии / Энциклопедия «Инфокоммуникационные сети». Книга 1. М: Наука, 2015.–742 с.

REFERENCES

1. Barabash P.A. Infocommunication Technologies in the Global Information Infrastructure. / Vorobiev S.P., Kurnosov V.I., Sovetov B.Y., edited by Sovetov B.Y.// SPb.: Nauka, 2008. – 552 p.
2. Vorobiev S.P., Davidov A.E., Kurnosov V.I., Mindyukov N.N. Infocommunication networks: classification, structure, architecture, life cycle, technologies / Encyclopedia "Infocommunication networks". Book 1. M.: Nauka, 2015. – 742 p.

Научное издание

**РАДИОЛОКАЦИЯ,
НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ**

Сборник трудов

*XXVII Международной научно-технической конференции,
посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова
(г. Воронеж, 28 сентября – 30 сентября 2021 г.)*

Том 1

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 24.09.2021. Формат 60×84/16.
Усл. п. л. 25,6. Тираж 50. Заказ 513

Издательский дом ВГУ
394018 Воронеж, пл. Ленина, 10
Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательского дома ВГУ
394018 Воронеж, ул. Пушкинская, 3



Контакты для справок по работе конференции:

**Всю необходимую информацию
Вы можете найти на сайте конференции:
<https://rlnc.ru>**

**и в группе ВКонтакте:
<https://vk.com/rlnrcru>**

**e-mail конференции:
info@rlnc.ru**