

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

МАЙ-ИЮНЬ 2012

ВЫПУСК 3 (79)



ISSN 2226-1494

## ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Перестраиваемые и нелинейные метаматериалы

## ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом

Анализ совместимости фторсиликатных и боросиликатных слоев стекла для изготовления оптического волокна

## ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА

Цифровая hologрафическая микроскопия: современные методы регистрации голограмм микрообъектов

Генерация излучения кратных частот при возбуждении в газе плазмы сильным полем импульсов из малого числа колебаний

Интерференция излучения на утроенных и комбинационных частотах при одновременном нелинейном отражении от диэлектрика

двух фемтосекундных импульсов на основной и удвоенной частотах

Метод интерполяции цифровых изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования

Исследование внутренней микроструктуры материалов методом оптической когерентной микроскопии с перестраиваемой длиной волны

Анализ характеристик и оптимизация форматов представления изображений в оптической когерентной томографии

## ЛАЗЕРНЫЕ И БИОМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Перспективы индустриальных применений лазерной очистки материалов

Применение метода оптической когерентной томографии для изучения предметов искусства, выполненных в технике интарсии

Терагерцовые спектры поглощения 2,3-биfosfоглицерата в эритроцитах крови и их практическая значимость

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Управление нелинейными системами на основе гибридных моделей с адаптацией

Алгоритм управления по выходу с компенсацией синусоидального возмущения для линейного объекта с параметрическими и структурными неопределенностями

Одноконтурная система управления электропривода оси сканирования инфракрасного телескопа с пропорционально-дифференциальным регулятором скорости

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Метод оценки уровня клиппирования речевого сигнала

Проблемы инициализации систем сегментации дикторов на основе вариационного байесовского анализа

Использование словарной информации при анализе текста

Программный продукт MTBeam для визуализации динамики оптических волновых пакетов из малого числа колебаний

Динамические характеристики нейросетевой модели пространственной памяти

Метод сжатия трехмерных биомедицинских изображений на основе представления информации в форме октодерева

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Измерение динамической магнитной восприимчивости сталей в криогенных условиях

Источник поляризованных атомов дейтерия для эксперимента PolFusion

Термодинамический анализ процессов образования двухкомпонентных полимерных смесей

## ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Тепловой режим двухступенчатого поплавкового гироскопа

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Улучшение сходимости метода конечных разностей с помощью вычисления промежуточного решения

## МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Применение динамической байесовской сети в системах обнаружения вторжений Способ идентификации пользователя в сети Интернет

## ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ

Информационные технологии построения системно-динамических моделей региональных информационно-коммуникационных систем

Взаимодействие стейкхолдеров в ходе формирования и реализации торговой политики Санкт-Петербурга

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

SUMMARY

Киевшарь Ю.С., Орлов А.А.

1

Якушенков Ю.Г.

11

Коробейников А.Г., Гатчин Ю.А., Дукельский К.В., Ероньян М.А., Тер-Нерсесянц Е.В., Нестерова Н.А.

15

Гендин В.Г., Гуров И.П

19

Штумпф С.А., Королев А.А., Козлов С.А

27

Столповская О.А., Путилин С.Э., Беспалов В.Г., Козлов С.А.

31

Федоров Д.А.

37

Гуров И.П., Жукова Е.В., Маргарянц Н.Б.

40

Скаков П.С.

45

Вейко В.П., Кишалов А.А., Мутин Т.Ю., Смирнов В.Н.

50

Гуров И.П., Жукова Е.В., Левшина А.В.

55

Камышева Л.И., Грачев Я.В., Киселева Л.Б., Вашурин Н.С., Лопатинев О.А., Зелди И.П., Попов И.И., Беспалов В.Г.

59

Колюбин С.А., Ефимов Д.В., Никифоров В.О., Бобцов А.А.

64

Бобцов А.А., Колюбин С.А., Пыркин А.А.

68

Толмачев В.А., Субботин Д.А.

73

Алейник С.В., Матвеев Ю.Н., Раев А.Н., Кудашев О.Ю., Пеховский Т.С.

79

Боярский К.К., Каневский Е.А., Страфеев С.К.

87

Кислин Д.А., Князев М.А., Звягин В.Ф., Козлов С.А.

91

Ляговецкий В.А., Потапов А.С.

96

Жданов И.Н., Потапов А.С., Щербаков О.В.

100

Иванов И.Ю., Васильев А.А., Взнуздаев М.Е., Воробьев С.И., Геталов А.Л., Котов С.А., Кравцов П.А., Надточий А.В., Трофимов В.А.

105

Терехин С.Н., Васильев А.А., Микиртычянц М.С., Кравцов П.А., Взнуздаев М.Е.

109

Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В.

114

Громов Д.С.

119

Грищенцев А.Ю., Коробейников А.Г.

124

Арутюнян С.А., Дайнеко, В.Ю.

128

Бессонова Е.Е., Зикратов И.А., Колесников Ю.Л., Роксов В.Ю.

133

Датьев И.О., Маслобоев А.В.

138

Луговской Р.А., Соловьев Д.В., Сысоев В.Ю.

144

149

158



---

**Издание Санкт-Петербургского национального исследовательского университета  
информационных технологий, механики и оптики**

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР.....**

доктор технических наук, профессор В.О. Никифоров

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ .....**

доктор технических наук, профессор А.А. Бобцов

доктор технических наук А.В. Бухановский

доктор технических наук, профессор В.А. Валетов

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Т.А. Вартанян

доктор технических наук М.А. Ган

доктор технических наук, профессор Ю.А. Гатчин

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Н.Ф. Гусарова

доктор технических наук, профессор А.В. Демин

кандидат технических наук, доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора)

доктор физико-математических наук, профессор Ю.Л. Колесников

доктор физико-математических наук, профессор С.А. Козлов

доктор технических наук, профессор А.Г. Коробейников

доктор технических наук, профессор В.В. Курейчик

доктор технических наук, доцент Л.С. Лисицына

кандидат технических наук, доцент В.Г. Мельников

доктор технических наук, профессор Ю.И. Нечаев

доктор технических наук, профессор Н.В. Никоноров

доктор технических наук, профессор А.А. Ожиганов

доктор технических наук, профессор П.П. Парамонов

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Е.Ю. Перлин

доктор технических наук, профессор И.Г. Сидоркина

доктор технических наук О.А. Степанов

доктор технических наук, профессор В.Л. Ткалич

доктор технических наук, профессор А.А. Шалыто

доктор технических наук, профессор Ю.Г. Якушенков

Ответственный секретарь Г.О. Артемова

Редактор, верстка Н.Ф. Гусарова

Редактор Л.Н. Точилина

Перевод Н.Г. Лещикова

Графика М.В. Герасимова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, НИУ ИТМО, комн. 330

Телефон / факс (812) 233 45 51

<http://books.ifmo.ru/ntv/>

E-mail:karmanov@mail.ifmo.ru

## ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

УДК 537.876.23, 537.877

### ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Ю.С. Кившарь, А.А. Орлов



#### Юрий Семенович Кившарь

Ведущий специалист в области нелинейной оптики, нанофотоники, оптических солитонов и метаматериалов. В 1984 году защитил кандидатскую диссертацию по теоретической физике в Физико-техническом институте низких температур имени Б. И. Веркина в Харькове. С 1989 года занимает различные исследовательские позиции в Европе и Америке. В Германии получает стипендию Александра фон Гумбольдта. В 1993 переезжает в Австралию. В настоящий момент является заслуженным профессором Австралийского национального университета, занимает пост главы Центра нелинейной физики, состоит в Австралийской Академии наук (с 2002 года). В 2010 выигрывает мегагрант Правительства Российской Федерации на проведение исследований в области метаматериалов в НИУ ИТМО. Научный руководитель лаборатории «Метаматериалы».



#### Алексей Анатольевич Орлов

Магистрант НИУ ИТМО, сотрудник лаборатории «Метаматериалы». В 2009 защитил бакалаврскую работу «Эффекты пространственной дисперсии в слоистых металлоиэлектрических оптических метаматериалах». Автор 10 публикаций в ведущих научных журналах, таких как *Physical Review*, *Physics Letters*, *Applied Physics Letters*. Стипендиант Правительства Российской Федерации и фонда «Династия». Многократный обладатель стипендии международного общества SPIE. Выступал с докладами на международных конференциях.

Представлен обзор экспериментальных результатов в области перестраиваемых и нелинейных микроструктурированных метаматериалов с отрицательным показателем преломления. Предлагаются и описываются новые типы перестраиваемых метаматериалов, обладающих либо нелинейным магнитным, либо нелинейным электрическим откликом на микроволновых частотах. Посредством введения варикапа в каждый из резонаторов в качестве нелинейного элемента достигается сдвиг частоты магнитного или электрического резонанса при изменении мощности падающей волны. Обсуждаются подходы к эффективной перестройке передающих характеристик метаматериалов путем модуляции периода решетки. Показано, что некоторые механизмы перестройки, обсуждаемые в статье, могут быть применены в оптическом диапазоне длин волн. Показано ожидаемое применение перестраиваемых и нелинейных метаматериалов в широком частотном диапазоне.

**Ключевые слова:** метаматериалы, нелинейность, перестраиваемость, композиты, резонаторы

#### Введение

Теоретические работы [1–3], наряду с проведенными экспериментальными измерениями [4, 5], доказали возможность создания новых типов микроструктурированных метаматериалов<sup>1</sup> с уникальными свойствами, отсутствующими в природе, включая отрицательный показатель преломления. Одна из первых реализаций такого композитного материала представляла собой решетку проводов и разомкнутых кольцевых резонаторов. Такой образец обладает отрицательными вещественными частями магнитной и

<sup>1</sup> Метаматериал – композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой

дизелектрической проницаемостей на микроволнах, т.е. представляет из себя «левосторонний» материал<sup>2</sup> с отрицательным показателем преломления. Свойства таких материалов были проанализированы теоретически В.Г. Веселаго несколько десятков лет назад [6], однако объектом активных экспериментальных исследований они стали лишь недавно.

Метаматериалы выделяются исключительными свойствами, которые проистекают из макроскопических параметров материалов, изменяемых путем соответствующего выбора и расположения их структурных элементов [7, 8]. Таким образом, становится возможным не только конструирование метаматериала с требуемой функциональностью, но и осуществление дальнейшей его перестройки на уровне образующих метаматериал элеменитов. Это отличает метаматериалы от обычных материалов и открывает захватывающие возможности по управлению их свойствами.

Концепция перестраиваемых метаматериалов заключается в возможности плавного изменения их свойств при помощи определенного внешнего воздействия. Ключ к перестройке резонансных метаматериалов, как и следует ожидать, лежит в воздействии на систему таким образом, чтобы изменить параметры резонанса. Характеристики метаматериала могут варьироваться, позволяя настраивать «окно» пропускания на определенную частоту.

Можно выделить несколько способов реализации перестройки метаматериалов, в том числе:

1. Модификация образующих элементов композитной структуры, например, разомкнутых кольцевых резонаторов или спаренных стержней. На микроволновых частотах такая модификация заключается во введении варикапа как нелинейного или управляемого извне элемента, что ведет к сдвигу резонансной частоты разомкнутого кольца. Для композитной структуры это вызовет изменение магнитного или электрического отклика (или обоих одновременно) при изменении мощности падающей волны [9–12];
2. Подбор подложки, на которой располагаются слои элементов, такие, как разомкнутые кольцевые резонаторы. Возможно использование специфических свойств подложки для достижения перестройки отклика всей структуры [13–15]. Схожим образом подложка может менять свои свойства при освещении;
3. Контроль свойств метаматериала путем изменения геометрии структуры с целью модификации ближнепольного взаимодействия между образующими структуру элементами – так называемая структурная перестройка [16, 17].

Возможность контроля эффективных параметров метаматериала с использованием нелинейного отклика разомкнутых кольцевых резонаторов была предложена в ряде статей [18–20], однако только недавно эти идеи были реализованы экспериментально в новейшем типе нелинейных и перестраиваемых структур [21, 22]. Схожий подход может быть использован и при создании нелинейных электрических метаматериалов [23]. Тем не менее, реализовать такие идеи на более высоких частотах достаточно сложно. Некоторые другие подходы, разработанные совсем недавно, основываются на аналогии с природными материалами, где свойства зависят от кристаллической структуры материала [17]. Метаматериалы предоставляют замечательную возможность конструирования уникальных структур с заранее заданной функцией отклика при использовании подходящего механизма перестройки. Что более важно, диапазон перестройки заданного свойства может значительно превышать таковой у природных материалов, так как эффекты решетки могут быть усилены благодаря более высокой эффективности коллективных взаимодействий в решетке, что достигается соответствующим проектированием метаматериала.

Ниже в статье обсуждаются возможности перестройки уединенного разомкнутого кольцевого резонатора как базового элемента для создания перестраиваемых и нелинейных метаматериалов. В качестве нелинейного настраиваемого элемента в каждый резонатор вводится варикап<sup>3</sup>, в результате чего сдвиг частоты магнитного или электрического резонанса достигается либо изменением подаваемого обратного напряжения, либо изменением мощности падающей волны. Обсуждаются нелинейные магнитные и электрические метаматериалы в разомкнутых кольцевых резонаторах. Приводятся исследования по эффективной перестройке метаматериалов, базирующейся на изменении структуры решетки и модификации свойств, получаемых при ближнепольном взаимодействии соседних элементов.

### **Возможность перестройки разомкнутых кольцевых резонаторов**

Эффективный контроль резонанса разомкнутого кольцевого резонатора достигается добавлением емкостного диода (варикапа) на внешнем кольце резонатора в точке максимума электрических токов последовательно с емкостью кольца. Это обеспечивает простой механизм перестройки и позволяет достичь нелинейности свойств, обеспечивающих практическое применение метаматериалов, что особенно

<sup>2</sup> Среды, у которых  $\epsilon$  и  $\mu$  – одновременно отрицательные, называют «левыми». У таких сред электрический  $E$ , магнитный  $H$  и волновой векторы  $k$  образуют систему левых векторов.

<sup>3</sup> Варикап (от англ. *vari(able)* – «переменный», *cap(acity)* – «емкость») – полупроводниковый диод, работа которого основана на зависимости барьерной емкости  $p$ - $n$  перехода от обратного напряжения.

актуально в свете недавних достижений в разработке магнитных тонкопленочных и микроволновых нелинейных метаматериалов. Симметричность и простота таких систем также ведет к обширным возможностям масштабирования, позволяющим перенести идеи создания подобных структур в терагерцовую и оптическую частотную области.

Для изучения перестраиваемости и нелинейности метаматериалов рассмотрим уединенный разомкнутый кольцевой резонатор, расположенный на подложке из стекловолокна (FR4,  $\epsilon_r \approx 4,4$ ) с медной металлизацией [9], как показано на рис. 1, а. Радиус внутреннего кольца составляет 2,56 мм. Оба кольца имеют ширину 1,44 мм, расстояние между кольцами, так же как и величина щели размыкания, равно 0,32 мм. Простая цепь смещения состоит из соединенных параллельно проволочных индуктивностей ( $L_1$ ,  $L_2$ ) и развязывающего конденсатора ( $C_1$ ), что схематично проиллюстрировано на рис. 1, б.

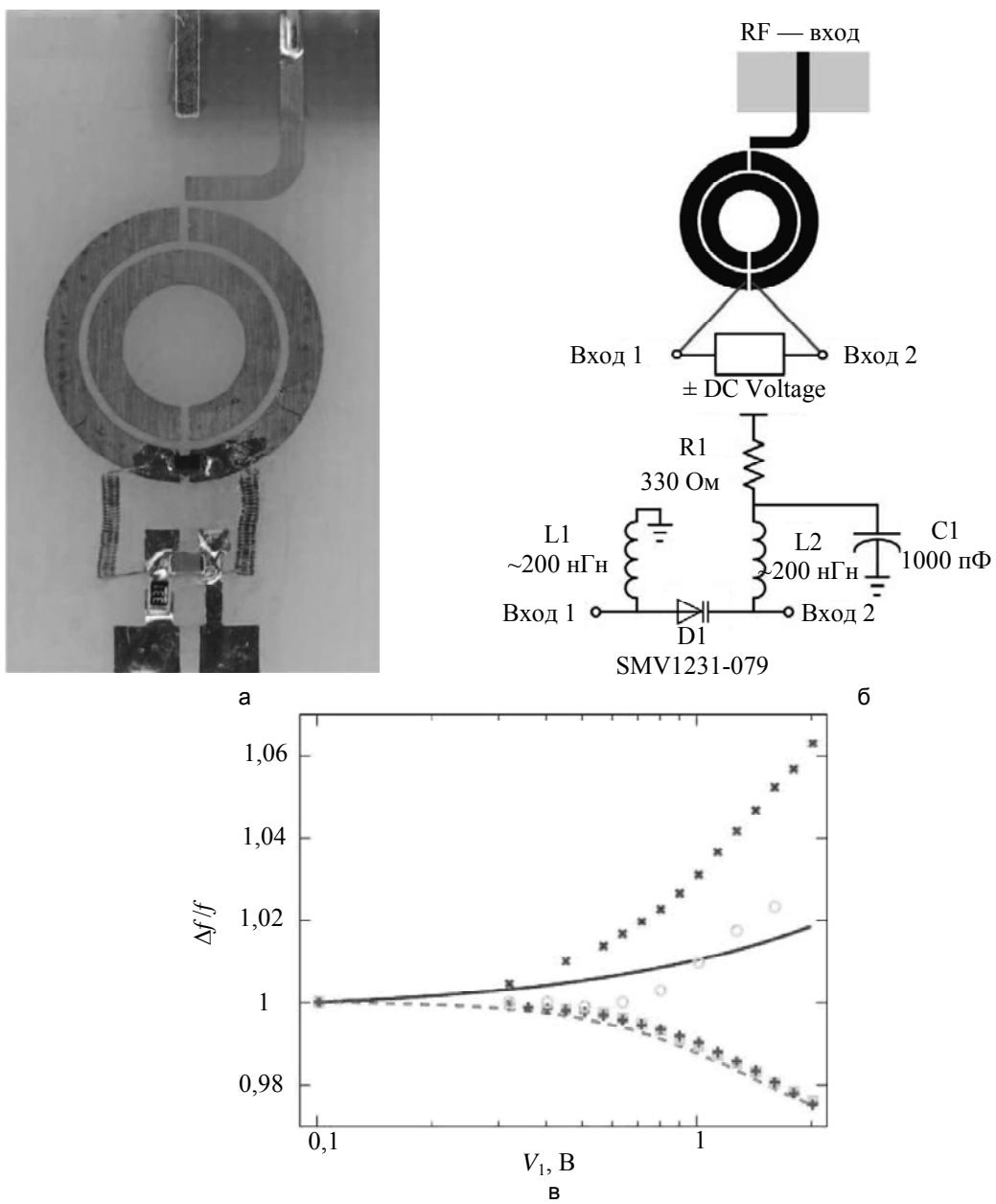


Рис. 1. Экспериментальный образец структуры, используемой для исследования перестраиваемости и нелинейности системы, состоящей из разомкнутого кольцевого резонатора, нагруженного варикапом: фотография изготовленного разомкнутого кольцевого резонатора и контура смещения для прямой настройки резонансной частоты (а); структура резонатор–диод и схема контура смещения (б); график сдвига резонансной частоты кольцевого резонатора в зависимости от напряжения на диоде, полученный из (\*), без индуктивности (—) и с индуктивностью (----), а также рассчитанный численно без индуктивности (○), с индуктивностью (++); измеренные значения без индуктивности (×) и с индуктивностью (□) (в)

Отметим, что для представленного образца при обратном напряжении смещения величиной около 10 В (на графике не показано) резонансная частота может быть смещена до 2,9 ГГц. При уменьшении напряжении смещения до 1 В резонансная частота снижается до 2,27 ГГц, то есть ширина полосы перестройки составляет 0,63 ГГц, что эквивалентно диапазону перестройки приблизительно 26%.

Различные режимы перестройки могут достигаться путем добавления индуктивности параллельно варикапу [10]. Индуктивность способна менять знак нелинейности и исключает эффект памяти, обусловленный накоплением заряда у варикапа. В дополнение к этому при более высоких мощностях нелинейный отклик разомкнутого кольцевого резонатора становится многозначным, открывая дорогу к созданию бистабильных перестраиваемых метаматериалов [10].

Варикап, подключенный к разомкнутому кольцевому резонатору, меняет резонансную частоту  $\omega_r$ , согласно закону

$$\omega_r = \omega_0 \left( 1 + \frac{C_{SRR}}{C_{eff}} \right)^{1/2}. \quad (*)$$

Здесь обозначения  $C_{eff}$  и  $C_{SRR}$  указывают на емкости варикапа и разомкнутого кольцевого резонатора соответственно, а  $\omega_0 = (L_{SRR} C_{SRR})^{1/2}$ , индекс «SRR» относится к разомкнутому кольцевому резонатору.

Обнаружено, что при отсутствии индуктивности варикап разряжается медленно. Следовательно, необходимо проводить плавное сканирование в частотной области, чтобы убедиться, что измерения на каждой частоте не затрагиваются эффектом детектирования, возникающим на другой частоте. Резонансная частота определялась из минимума коэффициента отражения, характер ее сдвига представлен на рис. 1, в, для случаев без индуктивности и с индуктивностью.

Конфигурация элемента без индуктивности показывает более сильную нелинейность, однако обладает упомянутым эффектом памяти, который замедляет отклик на изменение входной мощности. Также обнаружено, что резонатор без индуктивности крайне чувствителен к электромагнитным помехам [9]. Данная проблема почти полностью устраняется, как только резонатор помещается внутрь волновода. Эти результаты являются отправной точкой для создания нелинейных активных метаматериалов, состоящих из перестраиваемых разомкнутых кольцевых резонаторов.

### Нелинейные магнитные метаматериалы

Нелинейные магнитные метаматериалы, функционирующие на микроволновых частотах, могут быть изготовлены посредством модификации свойств разомкнутых кольцевых резонаторов и подключения варикапа к каждому элементу композитной структуры [9, 10], так что вся структура становится динамически перестраиваемой с изменением амплитуды распространяющихся электромагнитных волн. Далее будет показано зависящее от мощности пропускание магнитных метаматериалов при более высоких мощностях [21, 22], как это было предложено ранее теоретически [18]. Экспериментально было реализовано нелинейное усиление и ослабление пропускания в динамически перестраиваемом магнитном метаматериале.

Образец метаматериала был изготовлен из печатных плат Rogers R4003 толщиной 0,5 мм с nominalным значением диэлектрической постоянной 3,4. В диэлектрических платах должным образом размещены пазы с покрытыми оловом медными нелинейными кольцевыми резонаторами. Фотография одной из экспериментальных нелинейных структур представлена на рис. 2, а. Каждый разомкнутый кольцевой резонатор содержит варикап (диод с переменной емкостью – модель Skyworks SMV-1405), который вводит нелинейную зависимость от тока, что приводит к нелинейности магнитного дипольного момента каждого из разомкнутых кольцевых резонаторов [9]. В терминах эффективных параметров среды изготовленная структура обладает нелинейным намагничиванием и нелинейной магнитной проницаемостью [18]. Массивы разомкнутых кольцевых резонаторов образуют двумерную прямую решетку из 29×4×1 элементарных ячеек размером 10,5 мм.

Для обнаружения нелинейных эффектов проводились измерения пропускания перестраиваемого магнитного метаматериала при различных значениях входной мощности. При измерении рассеяния на исследуемых образцах метаматериал был размещен в плоскопараллельном волноводе. Плоскости разомкнутых кольцевых резонаторов были перпендикулярны пластинам волновода. Входная антенна располагалась посередине нижней пластины волновода на расстоянии 2 мм от блока метаматериала напротив центральной элементарной ячейки. Антenna состояла из проводника с тефлоновым напылением диаметром 1,26 мм и длиной 11 мм. Тефлоновое покрытие обеспечивает лучшую эффективность возбуждения волновода на используемой длине волны. Так как антenna располагалась перпендикулярно нижней пластине волновода, а возбужденное электрическое поле поляризовано перпендикулярно пластине, поляризация возбужденного поля оказывалась параллельной проводам. Магнитное поле волны имеет, главным образом, компоненты, лежащие в плоскости пластины, благодаря чему оно эффективно возбуждает ра-

зомкнутые кольцевые резонаторы. Близость расположения антены-источника к метаматериалу необходима для просачивания высокой электромагнитной мощности в образец с целью наблюдения нелинейных эффектов. Отметим, что изменение положения антены-источника относительно центральной элементарной ячейки вносит незначительные количественные изменения в результаты измерений пропускания, однако качественно результаты оказываются идентичными. Это находит объяснение в изменении импедансного согласования антенны с образцом. Такая же антenna помещена и в центр верхней пластины, являясь приемником при измерениях спектра и растровом сканировании распределения электрического поля в горизонтальной плоскости. Входная антenna возбуждается векторным анализатором цепей Agilent E8364A, выход которого подключен к усилителю HP 83020A (уровень 38 дБ). В измерениях пропускания антenna-приемник располагалась на расстоянии 2 см сзади блока метаматериала напротив центральной элементарной ячейки метаматериала и также подключалась к векторному анализатору. Электрическое поле внутри волновода вычислялось по полученным амплитуде и фазе коэффициента пропускания  $S_{21}$  между входом источника и выходом приемника. Вследствие двухмерности плоскопараллельного волновода, а также ввиду симметричности используемого образца ожидается, что электрическое поле в сканируемой области будет оставаться поляризованным главным образом перпендикулярно плоскости пластин.

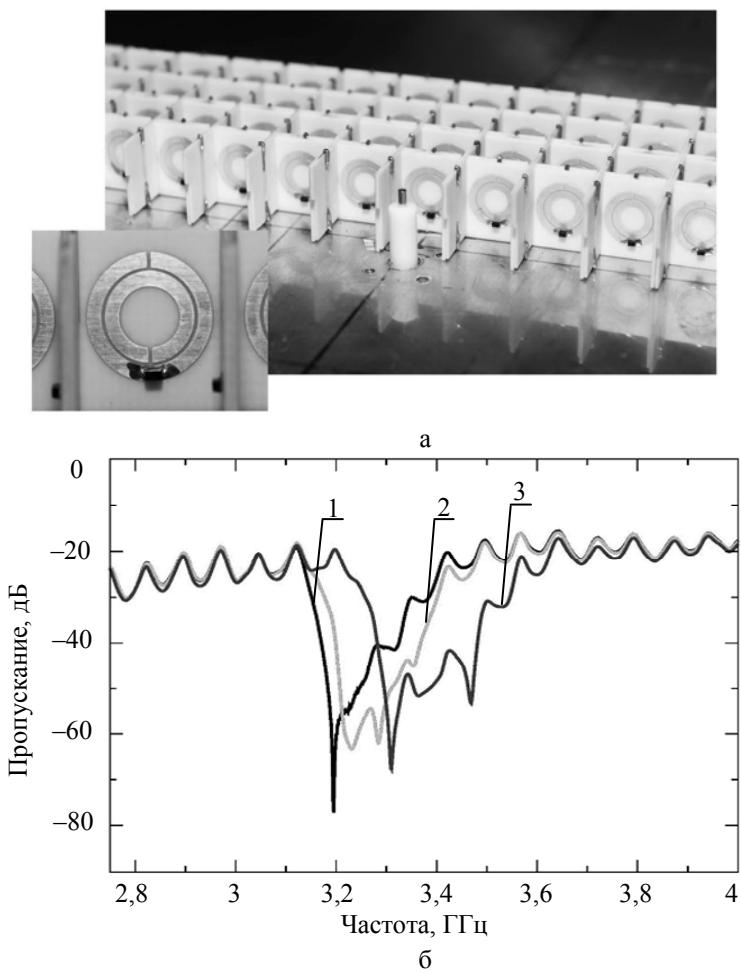


Рис. 2. Фотография нелинейного перестраиваемого магнитного метаматериала, образуемого прямой решеткой нелинейных разомкнутых кольцевых резонаторов. Каждый разомкнутый кольцевой резонатор содержит варикап с зависящим от мощности нелинейным откликом (а); измеренные коэффициенты пропускания нелинейного магнитного метаматериала при различных значениях уровнях мощности: 1 — (-40) дБм, 2 — (-15) дБм, 3 — (-5) дБм (б)

С целью анализа индуцируемого сдвига магнитного резонанса как результата действия варикапов, введенных в разомкнутые кольцевые резонаторы, было измерено пропускание магнитного метаматериала для различных значений входной мощности. Рис. 2 б показывает зависимость коэффициента пропускания от частоты для трех значений входной мощности. Как и в случае единичного разомкнутого кольцевого резонатора [9, 10], резонансная частота сдвигается вправо с ростом входной мощности. Получен-

ные результаты показывают, что при выборе рабочей частоты вблизи резонанса становится возможным динамически изменять свойства пропускания метаматериала изменением входной мощности.

Если параметры метаматериала меняются и пересекают границу между положительными и отрицательными значениями эффективной магнитной проницаемости, то свойства структуры, такие как пропускание, будут также переключаться так, что материал может становиться как непрозрачным, так и прозрачным. Интенсивность электромагнитных волн, генерируемых точечным источником, неравномерна, следовательно, сдвиг резонансов каждого из разомкнутых кольцевых резонаторов неоднороден внутри метаматериала. Резонаторы, более близкие к источнику, будут взаимодействовать с более сильными полями, и тогда следует ожидать, что только центральная часть метаматериала будет становиться прозрачной. Экспериментальные результаты подтверждают это предположение, показывая узкую апертуру пучка, выходящего из метаматериала [22]. В таком же образце метаматериала может проявляться и обратный эффект, когда пропускание подавляется нелинейностью. В то время как метаматериал прозрачен для низких мощностей, рост амплитуды волны усиливает непрозрачность метаматериала, препятствуя распространению излучения через образец.

### **Нелинейные электрические метаматериалы**

Зная, что нелинейный сдвиг резонанса приводит к относительно сильному нелинейному магнитному отклику, получаемому от разомкнутых кольцевых резонаторов, схожий подход можно использовать при создании нелинейных электрических резонаторов для получения сильного нелинейного электрического отклика [23]. Исследуемая структура показана на рис. 3, а, где введены два перпендикулярных набора плат с относительно изотропным откликом. Внутри каждого резонатора произведено дополнительное размыкание для размещения варикапа, вводящего дополнительную последовательную емкость, предназначенную для перестройки резонансной частоты. Период решетки составляет 11 мм, резонаторы расположены на плакированном медью FR4, имеют ширину и высоту 8 мм с шириной ленты кольца 1 мм и зазором размыкания 0,4 мм, длиной 2,4 мм.

Измерения передаточного отклика производились при значениях входной мощности 10, 20 и 30 дБм, как показано на рис. 3, б–г. На самой низкой входной мощности (10 дБм) возможности перестройки падающей волной существенно ограничены, т.е. передаточный отклик в этом случае почти лишен. Большие потери вдали от резонанса возникают по причине умышленного рассогласования принимающей пробы, которая сконструирована так, чтобы вносить минимальные возмущения в поля внутри структуры.

Рис. 3, б, показывает, что высокочастотная мода не сдвигает свою частоту при изменении падающей мощности. Данная мода состоит из двух контуров токов, текущих в одном направлении. Таким образом, их магнитные дипольные моменты аддитивно складываются. Так как скапливаемые по сторонам зазоров заряды имеют противоположные направления, это приводит к исчезновению дипольного момента. Вследствие того, что через центральный проводник не течет никакого тока, нелинейный отклик варикапа не играет роли. Модовые конфигурации и положения запрещенной зоны подтверждаются численным моделированием пропускания в CST Microwave Studio с использованием одного элемента, где электрические границы расположены вертикально, а магнитные границы – горизонтально.

Для сравнения были отдельно исследованы две ориентации печатных плат – когда они расположены нормально к направлению распространения и когда их положение параллельно к направлению распространения. Нелинейные передаточные отклики этих структур представлены на рис. 3, в, г. В обоих случаях сохраняется существенный нелинейный отклик.

В случае плат, перпендикулярных к направлению распространения, высокочастотной запрещенной зоны не существует. Это является следствием симметрии полей поперек зазоров и отсутствия какой-либо компоненты магнитного поля, нормальной к кольцам. Отметим, что, так как в эксперименте применяется источник с цилиндрической симметрией, имеется некоторая компонента волнового вектора, нормальная к номинальному направлению распространения, а, значит, по-прежнему имеется незначительная часть второго резонанса. Также следует отметить тот факт, что оба резонанса значительно модифицируются в изотропной конфигурации по сравнению с тем, когда они измеряются независимо. По всей вероятности, это происходит ввиду сильного электрического взаимодействия соседних плат в ортогональных направлениях, так как их зазоры оказываются в непосредственной близости друг от друга.

### **Структурная перестройка метаматериалов**

Ниже обсуждается и демонстрируется экспериментально более новый подход к эффективному контролю характеристик пропускания метаматериалов, основанный на структурной перестройке. Это концепция довольно общая, и она применима к различным метаматериалам ровно до тех пор, пока корректно описывает их параметры с помощью модели эффективной среды.

Рассмотрим анизотропный метаматериал на базе разомкнутых кольцевых резонаторов, представленный на рис. 4, а. Для существенно густых массивов взаимодействие между элементами значительно

отличается от дипольного приближения, поэтому была разработана специальная процедура для расчета эффективной магнитной проницаемости [24]. Последняя корректно сходится к приближению Клаузуса–Мосотти только в пределе сильно разреженной решетки. Следовательно, эффект взаимосопряжения по сравнению с обычными материалами радикально усиливается, что является крайне подходящим для демонстрации эффективности перестройки решетки.

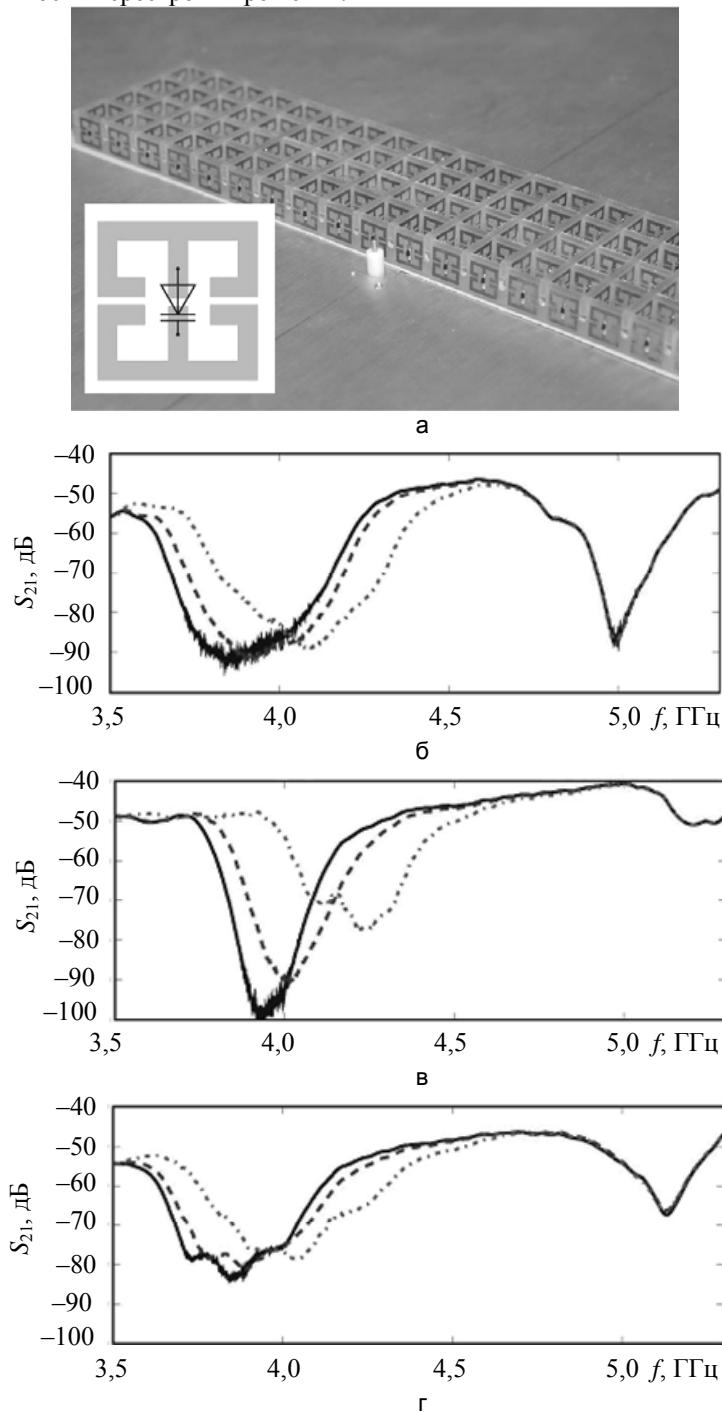


Рис. 3. Блок нелинейного электрического метаматериала, используемый в описываемых экспериментах  
(a). На вставке представлен структурный элемент. Экспериментально измеренное нелинейное пропускание при входных мощностях 10 (сплошная), 20 (пунктир) и 30 дБм (точки) при различных положениях плат: (б) – полный набор плат, (в) – платы перпендикулярны  $k$ , (г) – платы параллельны  $k$

Прямым подходом к перестройке решетки служит изменение постоянной решетки  $b$ . Было показано [24], что подобным образом резонансная частота может быть заметно сдвинута. Это предположение было подтверждено в микроволновых экспериментах [16]. Так, блок метаматериала может быть настроен

последовательно на пропускание, поглощение и отражение с возможностью возврата к режиму пропускания.

Очевидным недостатком такого метода является то, что изменение  $b$  будет вести к соответствующему изменению полного размера метаматериала вдоль оси  $z$ , а для некоторых применений это может быть нежелательно.

Следуя недавней работе [17], обсудим основные принципы структурной перестройки посредством изменения периодического продольного смещения слоев в плоскости  $xy$  так, чтобы резонаторы смещались вдоль оси  $x$  (или  $y$ , или двух сразу) на некоторую часть постоянной решетки  $\pm a$  для каждого  $b$  от слоя отсчета относительно первоначального положения. Это уменьшает полную взаимную индуктивность в системе и ведет к заметному постепенному увеличению резонансной частоты, при этом максимальный эффект достигается при смещении 0,5 $a$ . Очевидно, что дальнейший сдвиг будет эквивалентен меньшим значениям сдвига до тех пор, пока решетка полностью транслирует себя с периодом  $a$ . Как следствие, резонанс среды может «двигаться» при постоянстве частоты сигнала, ведя к глубоким изменениям характеристик пропускания. Ясно, что для какого-либо частного применения может потребоваться не весь диапазон сдвигов решетки: в примере выше наиболее существенным являлось функционирование между 0,1 $a$  и 0,3 $a$ , где происходят наиболее сильные смещения резонанса.

Для доказательства концепции мы остановились на небольшой реконфигурируемой системе, состоящей из колец с одним размыканием (средний радиус 2,25 мм, толщина кольца 0,5 мм, зазор 1 мм), нанесенных с периодом  $a = 7$  мм на печатных платах толщиной 1,5 мм.

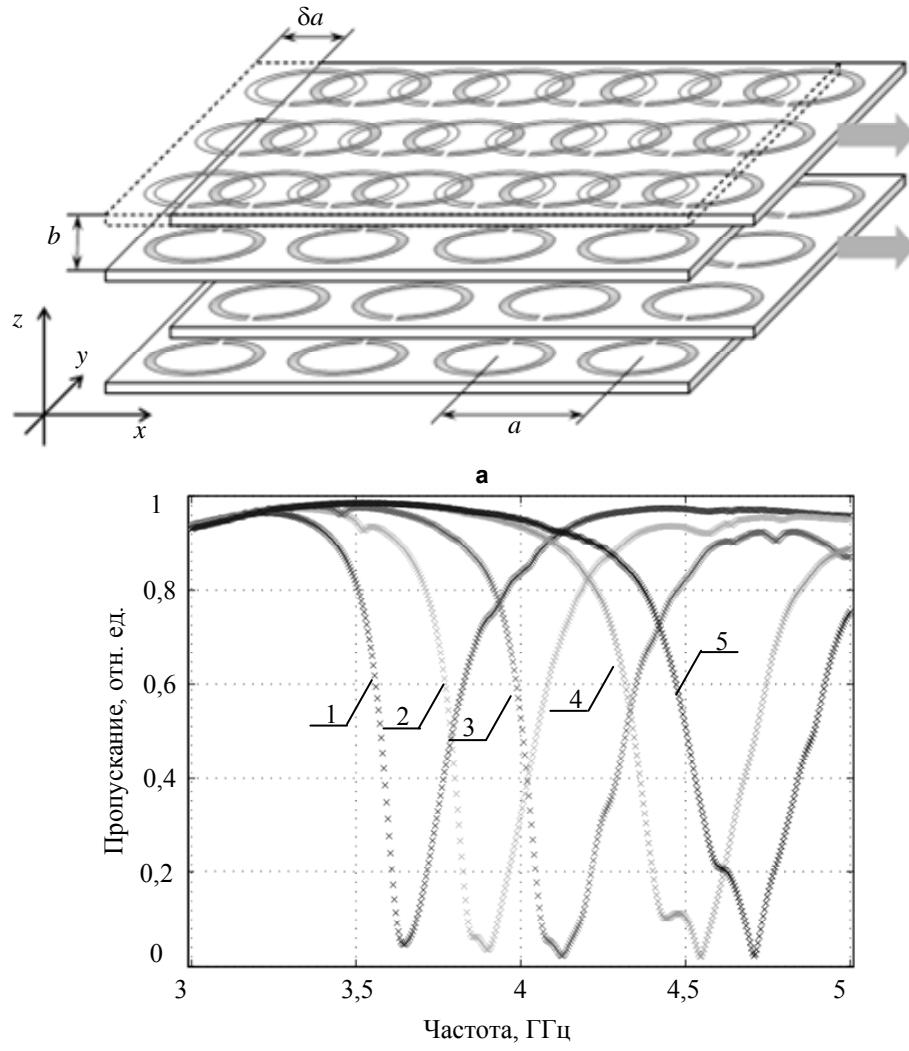


Рис. 4. Схематическое изображение одной из реализаций концепции перестраиваемой решетки в метаматериалах (а). Полученные экспериментально значения пропускания в волноводе с блоком метаматериала при различных сдвигах (1 — 0,0; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,4; 5 — 0,5) (б). Слои ориентированы для сопряжения по широкой стенке. Кривые с провалами слева направо соответствуют увеличивающемуся сдвигу решетки

В направлении распространения  $x$  имеется 5 резонаторов, вдоль оси  $y$  только один период; 30 плат сложены вместе по направлению  $z$  с минимально возможной постоянной решетки  $b = 1,5$  мм, используемой в измерениях. Оценка резонансной частоты уединенного резонатора (в диэлектрическом окружении) дает величину около 4,9 ГГц, однако резонанс массива резонаторов сдвигается к более низким частотам. Чтобы минимизировать нежелательные эффекты бианизотропии, связанные с единожды разомкнутыми кольцами, платы собирались так, чтобы размыкания колец в соседних слоях были сориентированы противоположно (рис. 4, а), аналогично разомкнутым кольцевым резонаторам с сопряжением по широкой стороне платы [25]. Измерения пропускания (с помощью анализатора цепей Rohde and Schwarz ZVB) были произведены для различных сдвигов решетки в прямоугольном волноводе WR-229.

Экспериментально измеренные спектры пропускания показаны на рис. 4, б. Они замечательно демонстрируют перестройку резонансной частоты. Более того, сравнение экспериментального сдвига резонанса с теоретическими предсказаниями показывает [17], что экспериментальная система демонстрирует еще большую эффективность. Это может быть объяснено образованием взаимной емкости между резонаторами, которыми мы пренебрегаем в теоретических расчетах. Действительно, для конфигурации колец с сопряжением по широкой стороне взаимная емкость между ними распределена вдоль всей окружности [25]. Очевидно, когда резонаторы продольно смешены, взаимная емкость уменьшается, таким образом данный эффект прибавляется к эффекту увеличения резонансной частоты, обусловленному уменьшением индуктивного сопряжения.

### **Заключение**

В работе представлен краткий обзор основных экспериментальных результатов по конструированию, изготовлению и изучению характеристик перестраиваемых и нелинейных метаматериалов, функционирующих на микроволновых частотах. Такие структуры обладают как нелинейным магнитным, так и нелинейным электрическим откликом на микроволновых частотах. Они изготавливаются при помощи введения в структуру варикапов в качестве внешних перестраиваемых и нелинейных элементов. Возможность модификации резонанса разомкнутого кольцевого резонатора позволяет изменять усредненный отклик композитной структуры, делая ее параметры зависящими от внешнего напряжения смещения и падающей мощности. Обсужден предложенный новый подход к эффективной перестройке характеристик метаматериалов посредством плавного изменения структуры решетки – структурной перестройки. Некоторые из механизмов перестройки, обсуждаемые здесь, могут быть пригодными для масштабирования в оптический диапазон длин волн.

Авторы благодарят Правительство Российской Федерации за предоставленный мегагрант для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования; руководителя лаборатории «Метаматериалы» НИУ ИТМО П.А. Белова. Выражаем благодарность членам и посетителям Центра нелинейной физики в Канберре, а также соавторам оригинальных результатов, обобщенных в настоящей статье, в частности М.В. Горкунову, А.Б. Козыреву, М. Лапину, С. Моррисону, Д. Пауэллу и И.В. Шадрикову.

### **Литература**

1. Pendry J.B., Holden A.J., Stewart W.J., and I. Youngs. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 4773.
2. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., and Stewart W.J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1999. V.47. P.2075.
3. Markos P. and Soukoulis C.M. Transmission studies of left-handed materials // Phys. Rev. E. 2002. V. 65. P. 036622.
4. Smith D.R., Padilla W., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., and Shultz S. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 4184.
5. Parazzoli C.G., Gregor R.B., Li K., Koltenbah B.E.C., and Tanielian M., Experimental Verification and Simulation of Negative Index of Refraction Using Snell's Law // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. P. 107401.
6. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // УФН. 1967. Т. 8. С. 2854.
7. Lapine M. and Tretyakov S. Contemporary notes on metamaterials // IET Microwaves Antennas & Propagation. 2007. V. 1. P. 3.
8. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic // Metamaterials. 2007. V. 1. P. 2.
9. Shadrivov I.V., Morrison S.K., and Kivshar Yu.S. Tunable split-ring resonators for nonlinear negative-index metamaterials // Optics Express. 2006. V. 14. P. 9344.
10. Powell D.A., Shadrivov I.V., Kivshar Yu.S., and Gorkunov M.V. Self-tuning mechanisms of nonlinear split-ring resonators // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 144107.

11. Wang B., Zhou J., Koschy T., and Soukoulis C.M. Nonlinear properties of split-ring resonators // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 16058.
12. Boulais K.A., Rule D.W., Simmons S., Santiago F., Gehman V., Long K., and Rayns-Keller A. Tunable split-ring resonator for metamaterials using photocapacitance of semi-insulating GaAs // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 043518.
13. O'Brien S., McPeake D., Ramakrishna S.A., and Pendry J.B. Near-infrared photonic band gaps and nonlinear effects in negative magnetic metamaterials // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. P. 241101.
14. Sheng Z. and Varadan V.V. Tuning the effective properties of metamaterials by changing the susbstrate // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 014909.
15. Shen N.-H., Kafesaki M., Koschny T., Zhang L., Economou E.N., and Soukoulis C. Broadband blue-shift tunable metamaterials and dual-band switches // Phys. Rev. B. 2009. V. 79. P. 161102(R).
16. Shadrivov I.V., Powell D.A., Morrison S.K., Kivshar Yu.S., and Milford G.N. Scattering of electromagnetic waves in metamaterial superlattices // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 201919.
17. Lapine M., Powell D., Gorkunov M., Shadrivov I., Marques R., and Kivshar Yu.S. Structural tunability in metamaterials // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 084105.
18. Zharov A.A., Shadrivov I.V., and Kivshar Yu.S. Nonlinear properties of left-handed metamaterials // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 037401.
19. Lapine M., Gorkunov M., and Ringhofer K.H. Nonlinearity of a metamaterial arising from diode insertions into resonant conductive elements // Phys. Rev. E. 2003. V. 67. P. 065601.
20. Gorkunov M. and Lapine M. Tuning of a nonlinear metamaterial band gap by an external magnetic field // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 235109.
21. Shadrivov I.V., Kozyrev A.B., van der Weide D.W., and Kivshar Yu.S. Tunable transmission and harmonic generation in nonlinear metamaterials // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 161903.
22. Shadrivov I.V., Kozyrev A.B., van der Weide D.W., and Kivshar Yu.S. Nonlinear magnetic metamaterials // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 20266.
23. Powell D.A., Shadrivov I.V., and Kivshar Yu.S. Nonlinear electric metamaterials. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 084102.
24. Gorkunov M., Lapine M., Shamonina E., and Ringhofer K.H. Effective magnetic properties of a composite material with circular conductive elements // Eur. Phys. J. B. 2002. V. 28. P. 263.
25. Marques R., Mesa F., Martel J., and Medina F. Comparative Analysis of Edge- and Broadside- Coupled Split Ring Resonators for Metamaterial Design — Theory and Experiments // IEEE Trans. Anten. Propag. 2003. V. 51. P. 2572.

**Кившарь Юрий Семенович**

— Австралийский Национальный университет, Центр нелинейной физики, профессор, ysk@internode.on.net

**Орлов Алексей Анатольевич**

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, alexey.orlov@phoi.ifmo.ru

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.384.3

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ СИСТЕМ 3-ГО ПОКОЛЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ АКТИВНО-ПАССИВНЫМ МЕТОДОМ

Ю.Г. Якушенков

Рассматриваются основные тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения. Приводятся примеры разработок таких систем, базирующихся на использовании многоэлементных фотоприемных устройств, чувствительных в ближневолновом, коротковолновом и длинноволновом инфракрасных диапазонах оптического спектра.

**Ключевые слова:** инфракрасная система, спектральный диапазон, матричное фотоприемное устройство.

### Введение

Инфракрасными системами (ИКС) 3-го поколения (ИКС-3) принято называть оптико-электронные системы, работающие в двух или нескольких спектральных инфракрасных (ИК) диапазонах и использующие матричные фотоприемные устройства (ФПУ) достаточно большого формата [1]. Большинству ИКС-3 свойственно хорошее энергетическое, пространственное, спектральное и временное разрешение, что позволяет осуществлять автоматическое или полуавтоматическое распознавание и идентификацию различных источников излучения при наличии помех. В таких системах эффективно используются различия в характере собственного и отраженного оптического излучения разных объектов в различных спектральных диапазонах. Иногда к ИКС-3 относят системы, в которых один из спектральных каналов работает в видимой области спектра, а остальные – в инфракрасной.

### Рабочие спектральные диапазоны ИКС-3

Наиболее распространеными рабочими спектральными диапазонами современных ИКС являются:

- ближний ИК-диапазон (NWIR с длинами волн 0,7–0,9 мкм);
- коротковолновый ИК-диапазон (SWIR – 0,9–3,0 мкм);
- средневолновый ИК-диапазон (MWIR – 3–5 мкм);
- длинноволновый ИК-диапазон (LWIR – 8–14 мкм).

При работе в NWIR-диапазоне используется излучение, создаваемое естественными или искусственными источниками. Отраженное от объектов наблюдаемой сцены излучение принимается неохлаждаемыми ФПУ на базе сравнительно дешевых приборов с зарядовой связью или комплементарных структур металл–оксид–полупроводник, обладающих хорошим пространственным разрешением.

При работе в SWIR-диапазоне часто используется освещенность, создаваемая свечением ночного неба, вызванного фотохимической реакцией гидроксидов в верхней атмосфере на высотах около 85 км. Она в несколько раз превышает освещенность, созданную звездным небом, что позволяет ИКС работать в безлунные ночи. Здесь возможно применять неохлаждаемые ФПУ, которые могут работать при температурах окружающей среды с использованием сравнительно простой системы их терmostабилизации. В этом диапазоне, по сравнению с видимым, меньше ослабление проходящего излучения из-за дымки, тумана и пыли. Кроме того, здесь используется не собственное излучение объектов сцены, а отраженное от них излучение, создаваемое посторонними естественными или искусственными источниками. Если сравнить диапазон SWIR с MWIR- или LWIR-диапазонами, то необходимо отметить, что контрасты между объектами сцены в MWIR- и LWIR-диапазонах заметно отличаются от контрастов в видимом диапазоне, где, как и в SWIR-диапазоне, используется отраженное излучение, что может заметно повлиять на распознавание, классификацию и идентификацию объектов человеком-наблюдателем.

Средневолновый MWIR-диапазон часто используется в качестве рабочего для систем обнаружения излучения ракетных двигателей, вспышек боеприпасов артиллерии и стрелкового вооружения, обнаружении очагов возгорания, в термографии при контроле строительных конструкций, различных материалов, пищевых продуктов и т.д. Важно отметить, что для работы многих ФПУ, чувствительных в этом диапазоне, не требуется их охлаждение до криогенных температур, что заметно снижает габариты, массу, энергопотребление, время выхода на рабочий режим после включения питания, а также стоимость ИКС на их основе.

При работе в длинноволновом LWIR-диапазоне по собственному (тепловому) излучению объектов используются как охлаждаемые до криогенных температур фотоприемники, так и неохлаждаемые ФПУ, чаще всего на базе микроболометров. Такие ИКС работают на сравнительно больших дальностях обнаружения и распознавания объектов (целей). При этом используется контраст между целью и фоном (ок-

ружающей средой). Круг их применения чрезвычайно широк – от разнообразных военных применений до термографии, используемой в медицине, промышленном контроле и многих других областях науки и техники [1–3].

Применение двух- и многодиапазонных матричных ФПУ, в которых выделение рабочих участков спектра (спектральных диапазонов) осуществляется непосредственно в приемнике излучения, позволяет упростить оптико-механическую схему современных ИКС, заметно уменьшить их габариты, массу и энергопотребление, увеличить быстродействие. Наряду с такими системами в настоящее время успешно функционируют двух- и многоканальные ИКС, в которых разделение на отдельные спектральные каналы происходит в оптической системе [2].

### **Направления совершенствования ИКС-3 активно-пассивного типа**

Отдельным направлением развития ИКС-3 является совершенствование систем активно-пассивного типа, в которых активный канал включает генератор излучения (обычно – лазер), облучающий сцену (обнаруживаемые или наблюдаемые объекты) и работающий, как правило, в ближнем ИК-диапазоне. В пассивном канале обычно принимается собственное излучение объектов в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах. Часто пассивный канал используется для предварительного обнаружения целей, а активный, обладающий принципиально более высоким пространственным разрешением, – для распознавания и идентификации целей. Кроме того, активный канал используется для локации объектов, что позволяет получать трехмерную информацию в «смотрящем» режиме, т.е. без механического сканирования. Хорошо известными системами такого типа являются лазерные локаторы (ладары).

Основные узлы ИКС, работающих активно-пассивным методом:

- осветитель (система подсветки сцены), как правило, на основе лазера;
- оптическая приемо-передающая система;
- фотоприемное устройство.

На примерах недавних разработок ряда ведущих фирм можно рассмотреть основные тенденции развития ИКС-3, работающих в активно-пассивном режиме, как в целом, так и отдельных их каналов.

Компания Raytheon Vision Systems (RVS) разрабатывает ряд ИКС активного типа, работающих в NWIR-диапазоне с использованием импульсной лазерной подсветки (длина волны излучения 1,55 мкм) при частоте импульсов 60 Гц. Приемный канал построен на базе быстродействующих КРТ (кадмий–рутуть–теллур) лавинных фотодиодов (КРТ-ЛФД) форматов 256×4 пикселей (сканирующая линейка) и 256×256 пикселей (ИКС «смотрящего» типа) [4]. Размеры пикселей ФПУ равны 60 мкм, коэффициент усиления лавинных фотодиодов – порядка 20, а квантовая эффективность – 0,7. Полоса приема частот у опытного образца составила 1 ГГц, а динамический диапазон принимаемых сигналов – 12 бит. Используется термоэлектрическая схема стабилизации рабочей температуры ФПУ на уровне температуры окружающей среды. Для опытного образца чувствительность на приеме составила более 15 А/Вт, а пороговая чувствительность – менее 0,5 нВт.

Система разрабатывается в рамках проекта NASA для осуществления автономной посадки спускаемого аппарата на поверхность Луны и других небесных тел. Ожидается, что трехмерный импульсный ладар должен работать на расстояниях от 20 км до 100 м, обеспечивая просмотр поверхности и обнаружение препятствий в зоне посадки с радиусом 204 м с погрешностью определения расстояний в 5–10 см, что соответствует погрешности измерения времени прихода отраженных импульсов в десятые доли наносекунды.

Можно привести в качестве еще одного примера ИКС-3 компании CEA-Leti, созданную для получения двух- и трехмерных изображений (2D- и 3D-режимы) с помощью импульсного ладара и работающую в MWIR-диапазоне [5]. Высокая чувствительность при работе в 3D-режиме была получена за счет использования ФПУ на базе КРТ-ЛФД с линейно изменяющимся коэффициентом усиления, охлаждаемых до 80 К. Формат ФПУ составил 320×256 пикселей размером 30 мкм. Схема считывания и накопления зарядов имела емкость ячеек порядка  $3,6 \cdot 10^6$  электронов и низкий уровень шума. Границная длина волны равнялась 4,6 мкм. В качестве источника подсветки в системе используется импульсный лазер с рабочей длиной волны 1,57 мкм и энергией 8 мДж в импульсе длительностью 8 нс. Частота кадров составляет 7 Гц, расходимость лазерного пучка – 65 мрад. Такая ИКС-3 позволяет осуществлять как тепловизионный 2D-режим, так и локационный 3D-режим работы. Однако дальность действия описанной в [5] системы невелика – несколько десятков метров.

Известны и другие разработки ИКС, работающих в активном режиме, в том числе и в LWIR-диапазоне, однако практически все они используют мощные лазеры и охлаждаемые до криогенных температур ФПУ, т.е. их габариты, масса и энергопотребление велики [6].

В настоящее время малогабаритные и экономичные лазеры достаточной мощности созданы только для работы в видимом, NWIR- и SWIR-диапазонах. По этой причине представляется целесообразным разрабатывать приемо-передающий канал малогабаритных ИКС-3 активно-пассивного типа для использования в этих спектральных областях (коротковолновый канал), а пассивный (только приемный) тепло-

визионный канал строить для работы в MWIR- и LWIR-диапазонах. В первом из этих каналов можно использовать существующие в настоящее время неохлаждаемые ФПУ, например, на базе InGaAs, InSb, HgCdTe и SiGe [1, 7–9]. Для второго канала наиболее приемлемыми представляются неохлаждаемые микроболометрические приемники [1–3, 10–12].

При использовании ФПУ на базе InGaAs, работающих в SWIR-диапазоне, можно заметно улучшить ряд параметров и характеристики ИКС. В них можно использовать термоэлектрические охладители (ТЭО), поддерживающие рабочую температуру ФПУ такой, чтобы не возникали большие темновые токи. Энергопотребление ТЭО, зависящее от перепада температур между ФПУ и окружающей средой, у них гораздо меньше, чем в криогенных охладителях, используемых для обеспечения работоспособности большинства ФПУ, работающих в MWIR- и LWIR-диапазонах. При температуре ФПУ 298 К и температуре окружающей среды 338 К мощность, потребляемая типовой ТЭО, составляет всего несколько ватт [3].

Системы подсветки (осветители) в ИКС активно-пассивного типа могут работать в нескольких режимах, а именно:

- без использования ТЭО, когда помимо естественной освещенности не требуется дополнительной подсветки, например, в дневных условиях;
- с использованием ТЭО, когда естественной освещенности недостаточно;
- без использования ТЭО, но с подсветкой.

При работе в этих режимах для оценки чувствительности ИКС, в частности, достижимого отношения сигнал/шум, важно учитывать следующие факторы:

- темновые токи ФПУ;
- шумы схем считывания сигналов с пикселей ФПУ и их последующей обработки;
- энергетическую эффективность системы подсветки.

Для оценки возможностей применения в ИКС-3 фотоприемников на базе InGaAs следует отметить, что уже сейчас разрабатываются такие ФПУ с форматами  $1280 \times 1024$  пикселей и  $640 \times 512$  пикселей, работающие в коротковолновом ИК-диапазоне (SWIR). Сегодня без использования ТЭО в матричных ФПУ на InGaAs с пикселями размером 25 мкм достигнуты уровни плотности темнового тока менее  $1,5 \text{ нA}/\text{см}^2$  при температурах 293 К, при температуре 280 К – менее  $0,5 \text{ нA}/\text{см}^2$ . Размеры пикселей предполагается довести до  $8,5\text{--}10 \text{ мкм}$  [7].

Если проанализировать многочисленные сообщения ведущих зарубежных фирм-производителей микроболометрических ФПУ, то можно привести некоторые усредненные на сегодня их параметры:

- питание постоянным напряжением порядка 4–5 В (до 17 В в отдельных случаях);
- эквивалентная шума разность температур – менее 50 мК при температуре фона 300 К, диафрагменном числе объектива K=1 и частоте кадров 60 Гц;
- диапазон окружающих температур – от 233 К до 343 К;
- время выхода на рабочий режим после включения – менее 10 с;
- потребляемая мощность – менее 2,0–2,4 Вт (при форматах  $384 \times 288$  пикселей и  $640 \times 480$  пикселей для частоты кадров 30 Гц).

В большинстве современных и перспективных ИКС алгоритмы обработки сигналов, снимаемых с ФПУ и используемых для визуализации изображения, включают в себя такие операции, как коррекция напряжения смещения и коэффициента усиления, коррекция неоднородности и замещение дефектных пикселей ФПУ, динамическое сжатие, сегментирование, гамма-коррекция, управление контрастом в различных участках изображения просматриваемой сцены, т.е. адаптивное локальное динамическое сжатие сигналов в реальном масштабе времени или от кадра к кадру, и ряд других. В ИКС-3 к ним добавляются алгоритмы управления масштабом изображений, получаемых в различных спектральных диапазонах, и их совмещение, т.е. управление форматом изображения и размерами пикселей. Учитывая непрестанное увеличение формата ФПУ и уменьшение его пикселей, эти задачи заметно усложняются.

С точки зрения уменьшения габаритов, массы и энергопотребления ИКС-3, работающих активно-пассивным методом, большой интерес представляют попытки создать такую конструкцию системы, в которой используются единая приемо-передающая оптическая система и интегрированное ФПУ. В первых образцах ИКС-3 передающая и приемная оптические системы были разнесены. Затем появились совмещенные приемо-передающие оптические системы, что устранило возникновение параллакса при работе на различных расстояниях. В приемной системе для разделения рабочих спектральных диапазонов использовалось цветоделение и два или более приемника излучения [3]. В последнее время появились опытные образцы систем с единой для всех диапазонов приемной оптической системой и интегрированным ФПУ [7, 8].

С 2009 г. Агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским работам США (DARPA) спонсирует разработку интегрированного двухдиапазонного ФПУ, проводимую совместно компаниями DRS и Sensor Unlimited, Inc. Goodrich Corporation, ISR Systems при участии университета Дюка (Duke University) [8]. Система на основе этого ФПУ состоит из светосильного зеркального объектива с малыми продольными габаритами, работающего в широком спектральном диапазоне, следующего

за ним микроболометра на основе  $\text{VO}_2$ , поглощающего длинноволновое ИК-излучение (7–14 мкм) и пропускающего на расположенный ниже фотоприемник на базе InGaAs коротковолновое ИК-излучение (0,4–1,6 мкм). Последний вместе с кремниевой схемой накопления и считывания зарядов с пикселяй ФПУ выполнен в гибридном исполнении. Формат разрабатываемого устройства равен  $640 \times 512$  пикселей размером 20 мкм.

Со схемы считывания и накопления сигналы поступают на аналого-цифровой преобразователь с динамическим диапазоном 14 бит. Предусмотрена коррекция неоднородности и замены дефектных пикселей, автоматический контроль уровня сигналов, их обработка в реальном масштабе времени. В сигнальном процессоре могут быть предусмотрены контроль движения, обработка локальных участков изображения сцены, ввод специальных символов, а также объединения изображений, получаемых в каждом спектральном диапазоне. Такая конструкция удобна для применения в ИКС-3, работающих активно-пассивным методом, поскольку может работать как в дневных, так и вочных условиях; обладает небольшими габаритами, массой и потребляемой для обработки сигналов мощностью; не нуждается в раздельной юстировке каждого из спектральных каналов; упрощает алгоритмы обработки сигналов в электронном тракте и системе отображения ИКС.

Компания DRS разрабатывает также ФПУ с короткофокусным (на 30% короче, чем в первом варианте) объективом для спектрального диапазона 0,7–14 мкм.

Программа DARPA рассматривает возможность создания двухдиапазонных ФПУ с отношениями размеров пикселей, чувствительных в SWIR- и LWIR-диапазонах, 1:1 при формате  $640 \times 512$  и 4:1 при форматах  $1280 \times 1024$  пикселей и  $2048 \times 1536$  пикселей.

### Заключение

К основным тенденциям развития малогабаритных ИК систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом, можно отнести:

- использование в передающем канале малогабаритных и экономичных полупроводниковых лазеров, работающих в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах;
- применение в ближнем и коротковолновом ИК диапазонах неохлаждаемых фотоприемных устройств с термостабилизацией рабочей температуры, а в длинноволновом ИК диапазоне – микроболометров;
- стремление интегрировать как приемо-передающую оптическую систему, так и фотоприемное устройство, работающее одновременно во всех спектральных рабочих диапазонах.

### Литература

1. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы 3-го поколения. – М.: Логос, 2011. – 240 с.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы. – М.: Логос, 2007. – 192 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
4. McKeag W., Veeder T., Wang J. et al. New development in HgCdTe APDS and LADAR receivers // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 801230-1...14.
5. de Borniol E., Castelen P., Guellec F. et al. A  $320 \times 256$  HgCdTe avalanche photodiode focal plane array for passive and active 2D and 3D imaging // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 801232-1...7.
6. Breiter R., Wendler J., Lutz H. et al. High operating temperature IR-modules with reduced pitch for SWaP sensitive applications // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80122V-1...14.
7. MacDougal M., Hood A., Geske J. et al. InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 801221-1...10.
8. Dixon P., Hess C.D., Chuan L. et al. Dual-band technology on indium gallium arsenide focal plane arrays // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80121V-1...7.
9. Sood A.K., Richwine R.A., Sood A.W. et al. Characterization of SiGe-detector arrays for visible-NIR imaging sensor applications // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80124D-1...10.
10. Mounier E. Technical and market trends for microbolometers for thermography and night vision // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80121U-1...6.
11. Fritze J., Munzberg M. The new megapixel thermal imager family // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 801205-1...8.
12. Li C., Skidmore G.D., Han C.J. Uncooled VOx infrared sensor development and application // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80121N-1...8.

**Якушенков Юрий Григорьевич** – Московский государственный университет геодезии и картографии, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, yakush@miigaik.ru

**УДК 681.7**

## **АНАЛИЗ СОВМЕСТИМОСТИ ФТОРСИЛИКАТНЫХ И БОРОСИЛИКАТНЫХ СЛОЕВ СТЕКЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

**А.Г. Коробейников, Ю.А. Гатчин, К.В. Дукельский, М.А. Ероньян,  
Е.В. Тер-Нерсесянц, Н.А. Несторова**

Представлены результаты исследований MCVD процесса получения заготовок оптического волокна из фторборосиликатного стекла и совместимости слоев кварцевого стекла легированного фтором и  $B_2O_3$ . Результаты исследований свидетельствуют о взаимной несовместимости этих добавок.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, волоконные световоды, MCVD.

### **Введение**

Для отечественных производителей волоконных световодов (ВС) приобретение исходных материалов и реагентов за рубежом с каждым годом становится все сложнее – цена на них растет, а таможенные процедуры не способствуют возрождению отечественного производства ВС из кварцевого стекла. Выход из сложившейся ситуации диктует необходимость существенной модернизации и упрощения технологического процесса изготовления ВС с тем, чтобы на основе ограниченного количества отечественных материалов и реагентов изготавливать световоды, не уступающие аналогам ведущих зарубежных производителей по качеству, но выгодно отличающиеся стоимостью.

В настоящее время потребление ВС в России превышает отметку 3,5 млн км в год, в то время как потребление 1 млн км в год является «критической точкой», после которой экономически целесообразно производить световоды на собственных заводах. Такая ситуация заставила вернуться к вопросу создания производства ВС в России. Отсюда следует актуальность разработок таких технологий изготовления кварцевых ВС, которые реализуются с минимальным ассортиментом используемых реагентов. Наиболее перспективными направлениями в этом отношении являются световоды с фторсиликатной оболочкой и сердцевиной из чистого кварцевого стекла, а также микроструктурированные световоды [1].

Прорыв в области изготовления световодов был совершен в семидесятых годах прошлого века. Он был связан с освоением методов парофазного синтеза при высокотемпературном взаимодействии  $SiCl_4$  с  $O_2$  или  $H_2O$ . Не прошло и десяти лет, как темп разработок позволил освоить их производство и использование в волоконно-оптических линиях связи. Методология производства кварцевых световодов путем химического парогазового осаждения подробно освещена в [2].

Оптическое волокно, как известно, состоит из сердцевины и отражающей оболочки. Сердцевина легируется оксидами фосфора или германия для повышения показателя преломления (ПП), а отражающая оболочка может состоять из чистого кварцевого стекла или легироваться оксидом бора или фтором для понижения ПП. Радиальный профиль показателя преломления в ВС формируется в соответствии с конкретными задачами.

Уникальность стеклообразного  $SiO_2$  для производства оптического волокна определяется его высокой прозрачностью, а также тем, что чистота кварцевого стекла достигается за счет синтеза его из газовой фазы, удаление примесей из которой не составляет особого труда.

Производство ВС на основе кварцевого стекла можно разделить на два основных этапа. Первый – это получение заготовки, представляющей собой стержень длиной в один метр, а в диаметре около 10–80 мм. На втором этапе заготовки помещаются в плавильные печи, и из них тянут стеклянное волокно с нанесением защитного полимерного покрытия. При этом соотношение диаметров внутренних слоев в полученном волокне остается таким же, как в заготовке.

Вытяжка волокна происходит в чистых помещениях, исключающих осаждение мелких частиц пыли из окружающей среды на поверхность заготовки или стекловолокна. Обычно защитной оболочкой ВС служит слой полимера, но для эффективной защиты от влаги и других воздействий на волокно применяются также металлическое и углеродное покрытия.

Существует три основных парофазных метода изготовления заготовок световодов:

1. осаждение из газовой фазы на внешнюю поверхность цилиндрической подложки (Outer vapor deposition – OVD);
2. осевое осаждение из газовой фазы на торце стержня (Chemical vapor deposition – CVD);
3. модифицированное химическое осаждение из газовой фазы на внутреннюю поверхность кварцевой трубы (Modified chemical vapor deposition – MCVD).

В работе рассмотрены результаты исследований MCVD процесса получения фторсодержащих кварцевых световодов.

### **Легирование кварцевого стекла фтором совместно с $B_2O_3$**

В модифицированном методе химического парофазного осаждения при изготовлении кварцевых волоконных световодов с целью направленного изменения их свойств широко используются различные

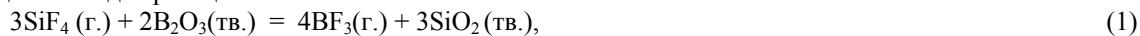
легирующие компоненты. Они, в основном, приводят к увеличению ПП стеклообразного диоксида кремния. И только две добавки приводят к его понижению:  $B_2O_3$  и фтор.

Боросиликатное стекло существенно отличается от фторсилликатного как по вязкости, так и по коэффициенту термического расширения. В зависимости от функционального назначения ВС эти добавки могут использоваться как индивидуально, так и совместно. Кварцевое стекло с низким показателем преломления, разными оптическими, вязкостными и теплофизическими свойствами необходимо для разработки ВС, обладающих особыми свойствами: малыми оптическими потерями в коротковолновой области спектра, повышенной надежностью и поляризационной устойчивостью.

Отличительной особенностью боросиликатного стекла, также как и фторсилликатного, является его радиационно-оптическая устойчивость [3, 4]. Обусловлено это тем, что, в отличие от других стеклообразующих оксидов ( $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $GeO_2$ ), химическая связь атомов бора с кислородом много прочнее. По этой причине радиационное воздействие на B-O связи в меньшей степени, чем для других стеклообразующих элементов, приводит к его разрыву и образованию оптически активных дефектов.

Результаты расчетов равновесного давления кислорода при образовании этих оксидов на основании справочных данных [5–7] подтверждают высокую прочность связи бора с кислородом по сравнению с другими стеклообразующими оксидами ( $SiO_2$  и  $GeO_2$ ). Другими словами, введение оксида бора в матрицу из кварцевого стекла не должно привести к ослаблению радиационно-оптической устойчивости.

Известно, что попытки уменьшения ПП при совместном легировании кварцевого стекла этими компонентами не дают ожидаемого суммарного эффекта [8], а совместимость фторсилликатных и боросиликатных слоев стекла до настоящего времени не исследовалась. В связи с этим проведены исследования MCVD процесса получения фторборосиликатного стекла и совместимости слоев кварцевого стекла, легированного фтором и  $B_2O_3$ . Для этого методом равновесной химической термодинамики были рассчитаны давления для реакции



где (г.) и (тв.) – газообразное и твердое состояния вещества соответственно.

Проведены также экспериментальные исследования по совместному легированию кварцевого стекла F и  $B_2O_3$ . Практически весь оксид бора превращается в  $BF_3$ , причем степень этого превращения увеличивается с температурой и уменьшением фторсодержащего реагента в газовой фазе (рис. 1).

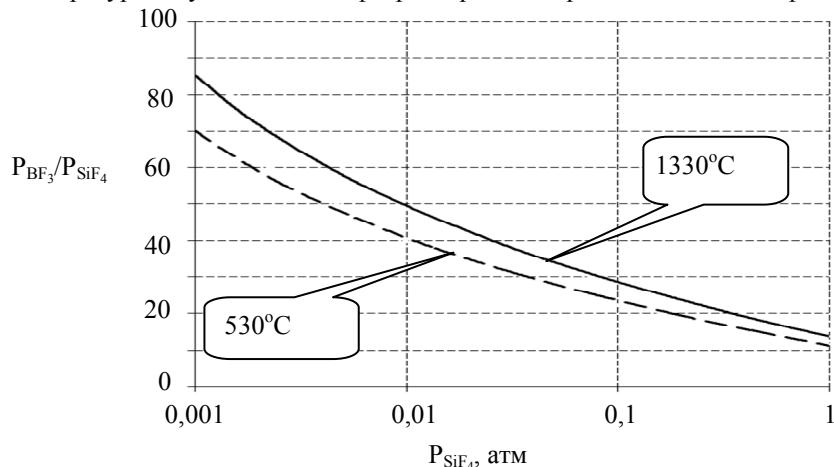


Рис. 1. Соотношение равновесных давлений газообразных фторидов для реакции  
 $3SiF_4 + 2B_2O_3 = 4BF_3 + 3SiO_2$

Результаты исследований свидетельствуют о взаимной несовместимости этих добавок. Введение фторирующего реагента в парогазовую смесь снижает степень превращения исходного борсодержащего вещества ( $BBr_3$ ) в  $B_2O_3$  из-за образования  $BF_3$  (рис. 1), в то время как образующийся оксид бора снижает температуру спекания пористого слоя на 100–250°C, блокируя тем самым процесс диффузионного насыщения частиц кремнезема фтором.

Превращение тетрафторида кремния в трифторид бора по реакции (1) свидетельствует о более высокой прочности связи фтора с бором, чем с кремнием. В связи с этим равновесное давление атомов фтора в реакционной смеси с увеличением содержания бора будет уменьшаться, что приведет к снижению содержания фтора в стекле. В этом случае эффекта от вклада фтора в изменение показателя преломления боросиликатного стекла на рис. 2 не наблюдается. Однако добавка бромида бора в парогазовую смесь при осаждении фторсилликатного стекла, если и не влияет на величину ПП, то имеет другой положительный результат, заключающийся в снижении температуры спекания пористого слоя.

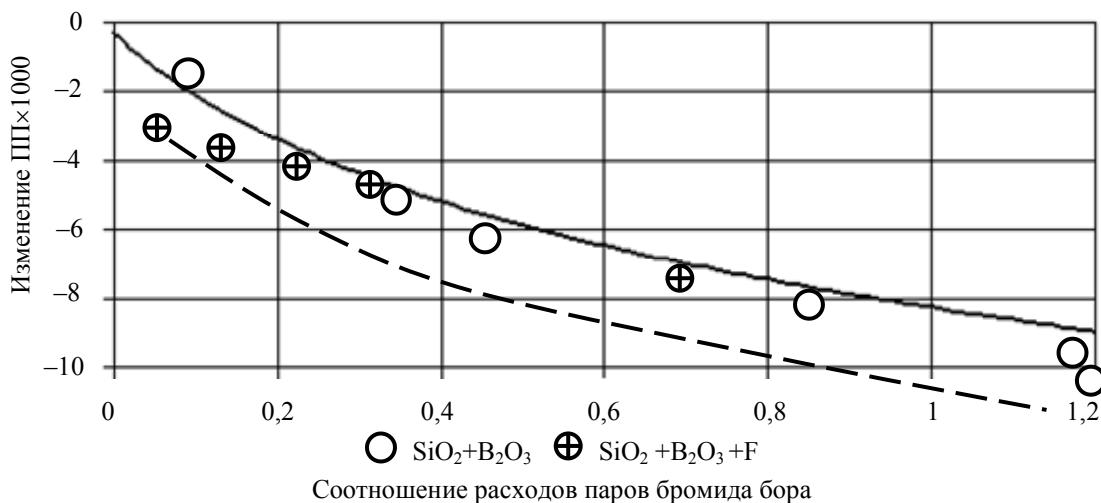


Рис. 2. Изменение ПП при легировании кварцевого стекла B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> без фтора и при его расходе 35 мл/мин.  
Пунктирная линия соответствует предполагаемому суммарному вкладу легирующих компонентов

Второй полезный практический вывод из расчетных результатов (рис. 1) заключается в том, что на границе боросиликатного и фторсиликатного стекла равновесное давление BF<sub>3</sub> не должно превышать 10 атм. В этом случае сферическая пора диаметром менее 1 мкм будет сжиматься за счет сил поверхностного натяжения [9]:

$$P_{\sigma} = 4\sigma/d,$$

где  $P_{\sigma}$  – давление, создаваемое силами поверхностного натяжения;  $d$  – диаметр пузыря;  $\sigma$  – поверхностное натяжение.

Средний размер пор в газофазно-осажденных слоях стекла не превышает 100 нм. В этом случае, как показали наши эксперименты, пузыри на границе слоев фторсиликатного и боросиликатного стекла не образуются. Такой результат свидетельствует о возможности изготовления радиационно-стойких анизотропных одномодовых ВС с сердцевиной из чистого кварцевого стекла, конструктивной фторсиликатной матрицы и боросиликатной эллиптической напрягающей оболочки.

Таким образом, исследования процесса получения фторборосиликатного стекла свидетельствуют о несовместимости бора и фтора в качестве легирующих добавок для кварцевого стекла.

### Заключение

На основании результатов исследования физико-химических основ MCVD процесса получения фторсодержащих кварцевых световодов можно сделать вывод, что наличие фтора в парогазовой смеси слабо препятствует легированию кварцевого стекла фосфором, в то время как исследования процесса получения фторборосиликатного стекла свидетельствуют о несовместимости бора и фтора в качестве легирующих добавок.

Полученные результаты, однако, имеют практическое значение для случаев сопряжения фторсиликатного и боросиликатного стекла, в частности, для технологии радиационно-стойких анизотропных световодов.

### Литература

- Коробейников А.Г., Дукельский К.В., Тер-Нерсесянц Е.В. Методы уменьшения оптических потерь в фотонно-кристаллическом оптическом волокне // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3 (67). – С. 5–11.
- Beales K.J., Day C.R. A review of glass fibers for optical communications // Physics and Chemistry of Glass. – 1980. – V. 21. – № 1. – P. 6–21.
- Camlibel I., Pinnow D.A., Dabby F.W. Optical aging characteristics of borosilicate clad fused silica core fiber optical waveguides // Appl. Phys. Lett. – 1975. – V. 26. – № 4. – P. 185–187.
- Дианов Е.М., Корниенко Л.С., Никитин Е.П., Рыбалтовский А.О., Сулимов В.Б., Чернов П.В. Радиационно-оптические свойства волоконных световодов на основе кварцевого стекла (обзор) // Кванто-вая электроника. – 1983. – Т. 10. – № 3. – С. 473–496.
- Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. / Под ред. Глушко В.П. – М.: Наука, 1978. – Т. 1. – Кн. 2. – 326 с.
- Уикс К.Е., Блок Ф.Е. Термодинамические свойства 65 элементов, их окислов, галогенидов, карбидов и нитридов. – М.: Металлургия, 1965. – 240 с.

7. Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. Глушко В.П. – М.: Наука, 1979. – Т. 2. – Кн. 2. – 340 с.
8. Ероньян М.А., Кузуб С.Г., Жахов В.В., Иванцовский П.П., Карпов Л.Г., Хотимченко В.С., Лукин А.Ф. Легирование кварцевого стекла фтором методом газофазного осаждения // Тезисы III Всес. конф. по технологии волоконных световодов. – Горький, 1982. – С. 51–52.
9. Боганов А.Г., Руденко В.С., Черемисин И.И. Механизм образования и роста пузырей в кварцевом стекле // Физика и химия стекла. – 1984. – Т. 10. – № 2. – С. 208–216.

*Коробейников Анатолий Григорьевич*

– Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, доктор технических наук, профессор, зам. директора, Korobeynikov\_A\_G@mail.ru

*Гатчин Юрий Арменакович*

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, Gatchin@mail.ifmo.ru

*Дукельский Константин Владимирович*

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, KDukel@GOI.ru

*Ероньян Михаил Артемьевич*

– Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

*Тер-Нерсесянц Егише Вавикович*

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, volokno@goi.ru

*Нестерова Наталья Анатольевна*

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, младший научный сотрудник, natkorspb@mail.ru

УДК 535.4

## ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ГОЛОГРАММ МИКРООБЪЕКТОВ

В.Г. Гендин, И.П. Гуров

Рассмотрены принципы цифровой голографии и голографической микроскопии и особенности регистрации голограмм. Представлены основные схемы записи цифровых голограмм микрообъектов, методы повышения разрешения в цифровой голографии и новые методы использования цифровой голографии для исследования микрообъектов.

**Ключевые слова:** цифровая голографическая микроскопия, разрешающая способность голограммы, нулевой порядок дифракции, биологический объект.

### Введение

Цифровая голография применяется во многих областях науки и технологий для неразрушающих исследований различных объектов, в том числе физических неоднородностей, деформаций, трехмерной структуры объектов различной физической природы и др.

Методы наблюдения и анализа состояния трехмерной микроструктуры биологических объектов на клеточном микроуровне исключительно важны для различных областей исследований в биологии и медицине, где допускается только неинвазивная диагностика. Современные неинвазивные методы цифровой голографии имеют высокое разрешение и являются наиболее важными и перспективными для развития биомедицины. Они особенно активно развиваются в ведущих научных лабораториях мира в течение последних лет [1–7]. Использование современных видеокамер обеспечивает возможность регистрировать голограммы в электронной форме с повышенным разрешением и обрабатывать их на компьютере. При этом с помощью компьютера возможно получение точных количественных данных как об амплитуде, так и о фазе предметной волны, отраженной от исследуемого объекта или прошедшей через объект.

Методы цифровой голографической микроскопии (ЦГМ) позволяют значительно сократить затраты на дорогостоящие оптико-механические узлы, поскольку при использовании ЦГМ не требуется точная фокусировка на объекте исследования: запись голограммы производится при фиксированном положении объектива, а фокусировка на различных расстояниях осуществляется при использовании специальных вычислительных алгоритмов. Поскольку современное развитие вычислительной техники позволило при высоких вычислительных мощностях значительно сократить стоимость компьютеров по сравнению со стоимостью оптико-механических узлов, а также ввиду отсутствия в ЦГМ необходимости записи большого числа изображений различных слоев объекта указанные преимущества особенно важны при использовании ЦГМ для исследования объектов биологической природы.

В работе рассматриваются основные особенности цифровой регистрации и анализа голограмм, принципы, на которых основываются технологии записи голограмм микрообъектов, проблемы, возникающие при регистрации голограмм микрообъектов, и современные варианты их решения.

### Теоретические основы цифровой голографии

Запись голограмм в цифровой голографии осуществляется при регистрации результирующего поля с помощью видеокамеры в форме суммы предметной волны, взаимодействующей с исследуемым объектом, и опорной волны. Объектная и опорная волны интерферируют в плоскости записи голограммы. Голограмма содержит полную информацию о трехмерном распределении оптического поля объектной волны в виде микроинтерференционных полос. При восстановлении изображения исходного объекта в классической голографии зарегистрированная интерференционная картина освещается таким же опорным пучком, как и при записи. В результате дифракции восстанавливается изображение объекта. Для реконструкции изображения из голограммы в цифровой голографии используются вычислительные методы, позволяющие в результате обработки голограммы определить значения амплитуды и фазы предметной волны [8–10].

Распределение интенсивности  $I(x, y)$  в плоскости записи голограммы  $(x, y)$  есть квадрат модуля суммы комплексных амплитуд объектной  $O(x, y)$  и опорной  $R(x, y)$  волн, т.е.

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + R(x, y)O^*(x, y), \quad (1)$$

где  $R^*(x, y) = R(x, y) \exp(i\varphi_R(x, y))$  – комплексно-сопряженная величина для объектной волны;  $O^*(x, y) = O(x, y) \exp(i\varphi_O(x, y))$  – комплексно-сопряженная величина для опорной волны.

Поскольку комплексная амплитуда объектной волны  $R(x,y)$  заранее известна, восстановление изображения из голограммы осуществляется при вычислении произведения  $R(x,y)$  и распределения интенсивности в голограмме  $I(x,y)$ , а именно

$$R(x,y)I(x,y) = R(x,y)|R(x,y)|^2 + R(x,y)|O(x,y)|^2 + O(x,y)|R(x,y)|^2 + R^2(x,y)O^*(x,y). \quad (2)$$

Первые два слагаемых в правой части уравнения (2) составляют нулевой порядок дифракции, или фоновую составляющую. Третье слагаемое представляет собой точную копию исходного поля  $O^*(x,y) = O(x,y)\exp(i\phi_O(x,y))$  и называется мнимым изображением объекта. Четвертое слагаемое относится к еще одному изображению объекта, «изображению-двойнику», которое называется действительным изображением. При этом их пространственное расположение зависит от угла между направлениями распространения опорной и объектной волн. Поскольку размер пикселя матрицы накладывает ограничение на максимальный допустимый угол, нулевой порядок дифракции частично перекрывает изображение объекта. Эта проблема решается различными способами.

### Устранение нулевого порядка дифракции

Для устранения нулевого порядка дифракции известно четыре основных подхода. Первый из них основан на цифровом устранении нулевого порядка дифракции, например, с применением фильтра высоких частот с малой частотой среза [8]. Второй метод состоит в вычитании средней яркости из исходной голограммы [8, 11]. Третий метод основывается на записи нескольких голограмм, зарегистрированных с заданными сдвигами фазы опорной волны. После совместной обработки набора голограмм можно реконструировать изображение, не содержащее нулевой порядок дифракции [4, 11, 12]. Четвертый метод основан на том, что можно зарегистрировать раздельно объектную и опорную волны и через известные преобразования получить голограмму нулевого порядка дифракции, который затем вычитается из голограммы [11].

Первые два метода устранения нулевого порядка дифракции применимы только для внеосевых голограмм, т.е. в случае, когда при регистрации голограммы существует некоторый угол между направлениями распространения предметной и опорной волн. Типичная схема записи внеосевых голограмм представлена на рис. 1 [1].

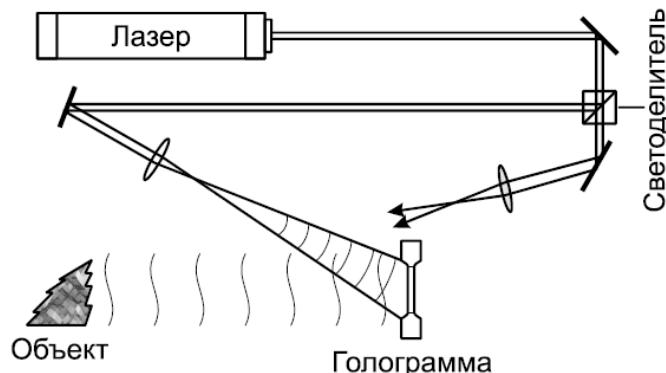


Рис. 1. Схема процесса записи голограмм

Однако при использовании внеосевой схемы регистрации голограмм появляется проблема неполного использования поля матрицы видеокамеры, на которую производится запись, что приводит к снижению разрешения реконструированного изображения [4, 12]. Способы устранения нулевого порядка дифракции на основе фазового сдвига и метода раздельной записи объектной и опорной волн обеспечивают более полное использование поля матрицы, однако для реконструкции голограммы требуется запись двух и более видеокадров, что накладывает некоторые ограничения при практическом использовании, например, оказывается затрудненной или невозможной регистрация голограмм быстропротекающих процессов.

На рис. 2 представлена схема регистрации голограмм пропускающих свет микрообъектов с использованием алгоритма фазового сдвига [13].

Здесь зеркало 32 закреплено на пьезоэлектрическом преобразователе, с помощью которого задаются малые изменения разности оптических длин путей опорной и объектной волн. Представленная на рисунке схема предлагается авторами для исследования микротрещин и дефектов под воздействием механических нагрузок, однако она может использоваться и для исследований биологических объектов.

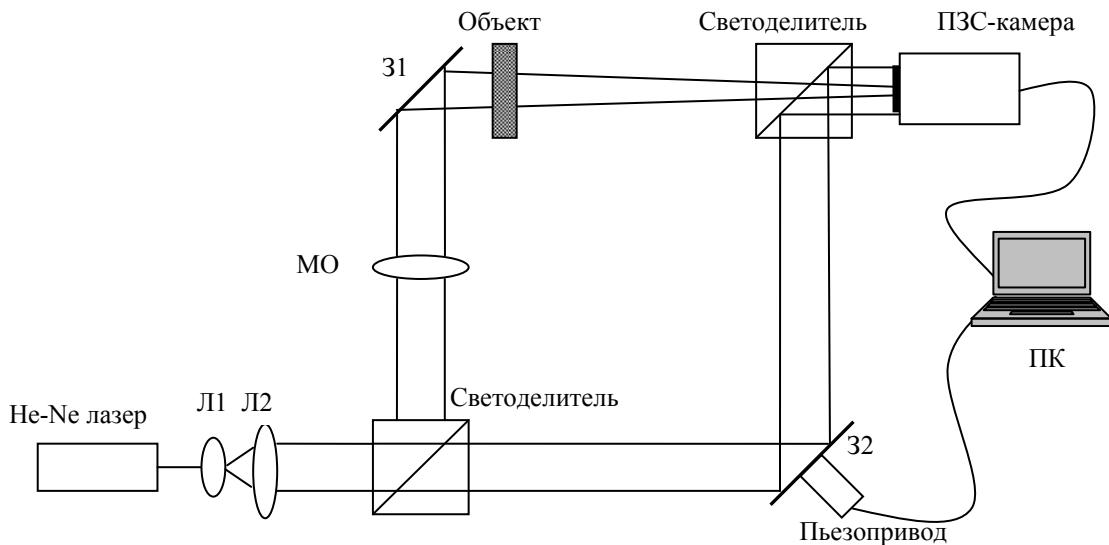


Рис. 2. Схема записи цифровых голограмм с фазовым сдвигом: Л1, Л2 – линзы; 31, 32 – зеркала; МО – микрообъектив; ПК – персональный компьютер

Авторы работы [11] наряду с другими методами предлагают альтернативный метод устранения нулевого порядка дифракции. Проанализировав уравнение (1), можно показать, что голограмма, которая не содержит нулевой порядок дифракции, описывается выражением

$$I_h(x, y) = I(x, y) - |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2.$$

Значения  $R(x, y)$  и  $O(x, y)$  можно получить при записи двух видеокадров с перекрытой соответственно измерительной и опорной ветвью в оптической системе. При этом требуется зарегистрировать на видеокамеру три изображения в различные моменты времени, что накладывает ограничения на регистрацию быстропротекающих процессов.

На рис. 3 представлен результат устранения нулевого порядка дифракции вышеописанным методом и методом фазового сдвига.

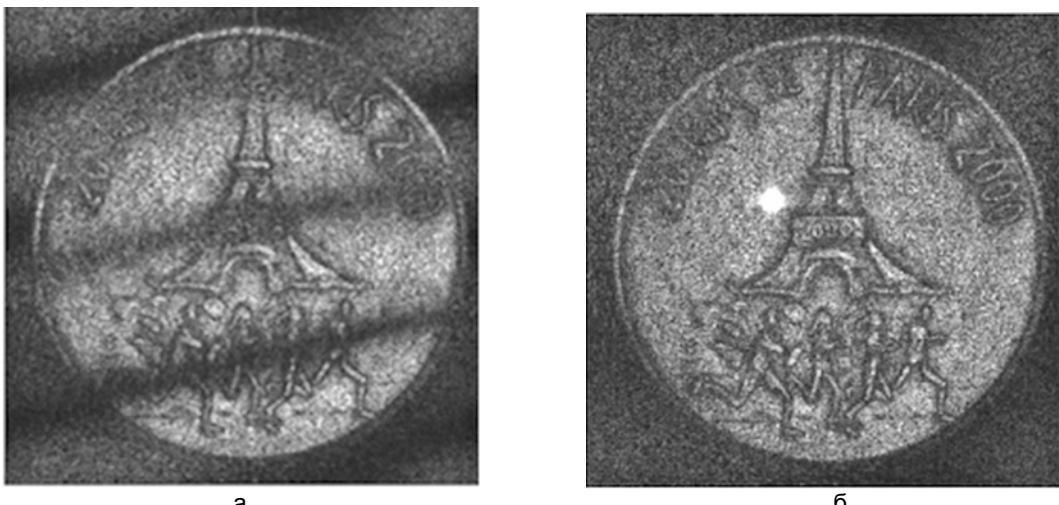


Рис. 3. Реконструированное изображение медали диаметром 50 мм с остаточным влиянием нулевого порядка дифракции (а) и с устраниенным нулевым порядком дифракции (б)

На рис. 3, б, видно, что нулевой порядок устранен почти полностью, в отличие от изображения на рис. 3, а, где наблюдаются полосы, перекрывающие часть изображения, которые вызваны непараллельностью смещения опорного отражателя в методе фазового сдвига. Эти результаты позволяют сделать вывод о преимуществе в простоте реализации метода устранения нулевого порядка при записи раздельно объектной и опорной волн.

Нулевой порядок дифракции вносит искажения как в реконструированную амплитуду, так и в фазу исследуемого объекта, что может привести к снижению точности при исследовании различных объектов. Так, например, в работе [14] исследуется точность определения малого смещения объекта методом

цифровой голограмии и сравнивается влияние метода устранения нулевого порядка дифракции на точность определения смещения объекта.

Для определения малого смещения объекта достаточно записать две голограммы в исходном и конечном состоянии. Далее восстанавливаются фазы обеих голограмм в виде

$$\phi(\xi, \eta) = \arctg \left( \frac{\operatorname{Re}(Q(\xi, \eta))}{\operatorname{Im}(Q(\xi, \eta))} \right).$$

После этого вычисляется разность фаз

$$\Delta\phi(\xi, \eta) = \phi_1(\xi, \eta) - \phi_2(\xi, \eta).$$

Расчет величины смещения в метрах производится с учетом того, что при смещении объекта оптическая длина пути увеличивается на величину, равную удвоенному смещению:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi.$$

Таким образом, удалось установить, что среднее квадратическое отклонение определения смещения для различных методов устранения нулевого порядка дифракции различно. Так, для метода с использованием фильтрации среднее квадратическое отклонение полученных смещений от заданных составляет 3,28 нм, а для метода фазового сдвига – 2,31 нм.

Все описанные методы устранения нулевого порядка дифракции пригодны как для традиционной цифровой голограмии, так и для ЦГМ.

### Схемы регистрации голограмм микрообъектов

В цифровой голограмии можно выделить несколько различных видов голограмм. Основным из них являются голограммы Френеля и голограммы Фурье, которые, в свою очередь, могут быть осевыми и внеосевыми.

Голограмму Фурье можно определить как голограмму плоского объекта, записываемую с помощью опорного точечного источника, расположенного в плоскости объекта, параллельной плоскости голограммы. Голограмма Френеля – пропускающая голограмма, при записи которой регистрирующая среда находится в области дифракции Френеля рассеянного объектом излучения. Голограмма образуется как результат интерференции объектной волны в зоне дифракции Френеля с опорной плоской волной.

Оевые голограммы отличаются от внеосевых наличием угла между опорной и объектной волнами, т.е. в случае записи осевой голограммы опорная и объектная волны распространяются в одном и том же направлении, а в случае внеосевой голограммы – под некоторым малым углом. На значения угла между опорной и объектной волнами накладываются некоторые ограничения. В соответствии с критерием Найквиста, на каждый период интерференционной картины должны приходиться не менее двух отсчетов, т.е. светочувствительных ячеек (пикселей) оцифрованного изображения. Размер пикселя  $\Delta x$  ограничивает значение максимального угла  $\alpha_{\max}$  при интерференции сферических вторичных волн от каждой точки объекта и опорной волны согласно условию [8]

$$\alpha_{\max} = \frac{\lambda}{2\Delta x}.$$

Следовательно, необходимо выбрать угол между опорной и предметной волнами так, чтобы, с одной стороны, выполнялся критерий Найквиста, а с другой – порядки дифракции были максимально отделены друг от друга.

Основная идея ЦГМ состоит в наличии дополнительной оптической системы (микрообъектива) между объектом и видеокамерой с формированием увеличенного изображения области, освещаемой объектной волной. Наличие микрообъектива является основной отличительной особенностью ЦГМ.

На рис. 4 представлена схема регистрации голограмм Фурье на основе интерферометра Маха-Цендера [15]. На этой схеме в качестве источника использован Не-Не лазер с длиной волны 632,8 нм, излучение которого ослабляется нейтральным светофильтром. В объектном плече установлен исследуемый образец, а в опорном – микрообъектив с диафрагмой, находящейся в его фокусе, которые совместно формируют сферическую волну, интерферирующую в плоскости ПЗС-матрицы с объектной волной. Пара полуволновых пластинок и поляризующий светофильтр позволяют варьировать соотношение интенсивностей в опорном и объектном плечах.

На основе интерферометра Маха-Цендера возможна также запись голограмм Френеля. Например, в работе [16] авторы представили схему внеосевой записи голограмм с использованием 4f-системы (рис. 5). Использование такой системы для исследования микрообъектов позволяет избежать aberrаций, которые возникают при использовании микрообъектива, а также значительно расширить поле зрения.

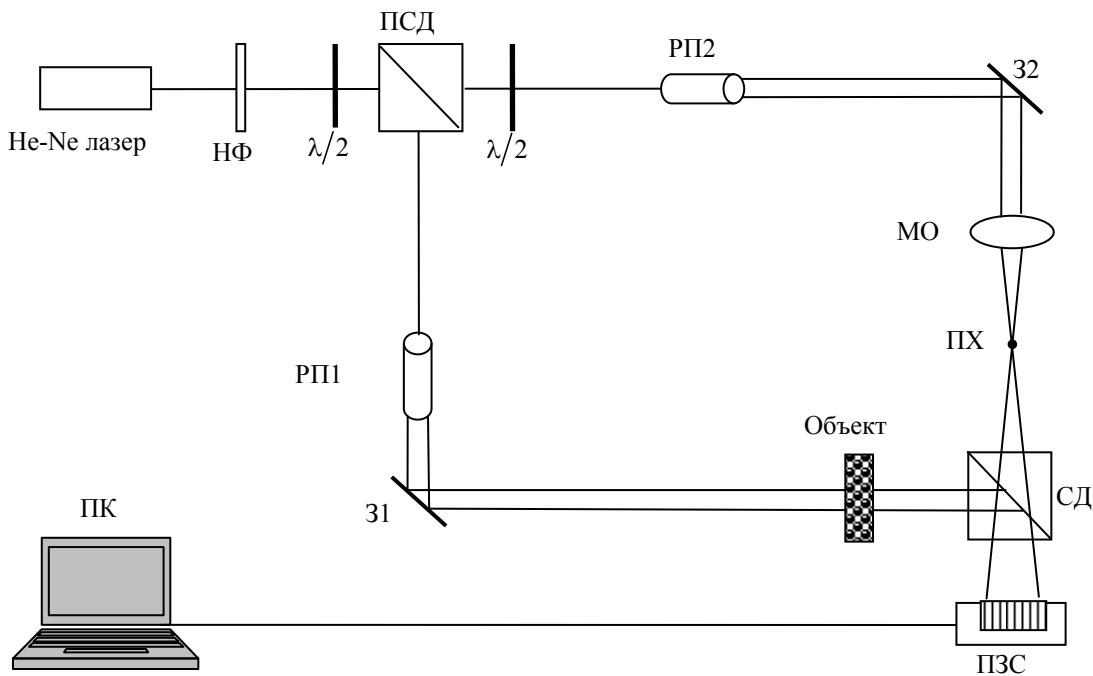


Рис. 4. Схема записи голограмм Фурье [15]: НФ – нейтральный светофильтр; ПСД – поляризующий светоделительный кубик;  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка; РП1, РП2 – расширители пучка; 31, 32 – зеркала; МО – микрообъектив; ПХ – пинхол; СД – неполяризационный светоделительный кубик; ПЗС – ПЗС-видеокамера; ПК – компьютер

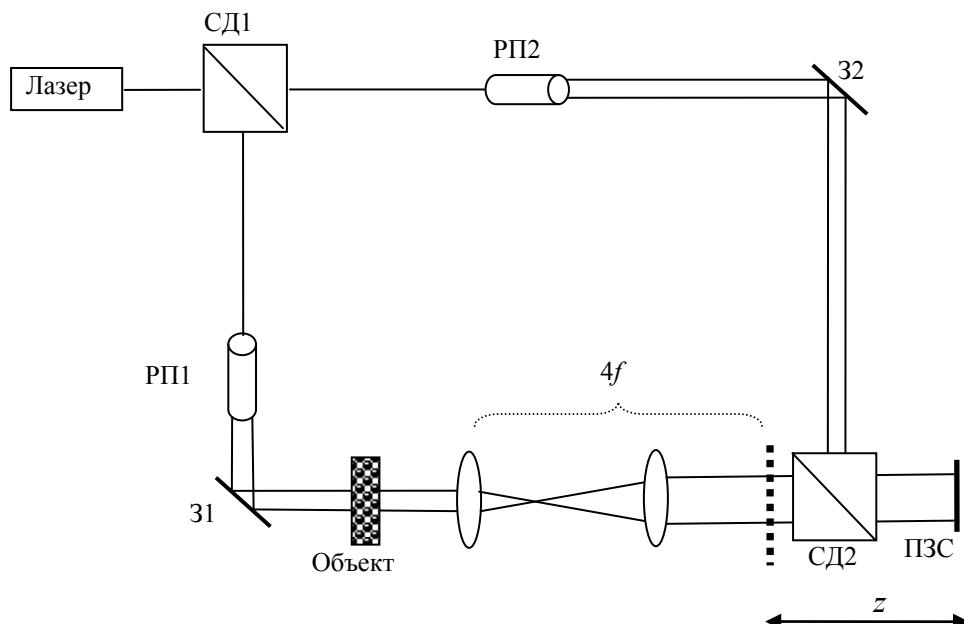


Рис. 5. Схема регистрации голограмм Френеля с 4f-системой: СД1, СД2 – светоделители; 31, 32 – зеркала; РП1, РП2 – расширители; 4f – 4f-система; ПЗС – ПЗС-видеокамера

Объект помещается в фокальную плоскость  $4f$ -системы и освещается плоской волной, которая формирует геометрически увеличенное изображение, аналогичное положению самого объекта на расстоянии  $z$ . Результирующее поле голограммы формируется в плоскости ПЗС-матрицы в результате интерференции увеличенной области объектной волны с опорной волной.

Помимо интерферометра Маха–Цендера, широко используются системы регистрации голограмм на основе интерферометра Майкельсона [6, 7]. Пример реализации схемы записи голограмм на основе интерферометра Майкельсона представлен на рис. 6.

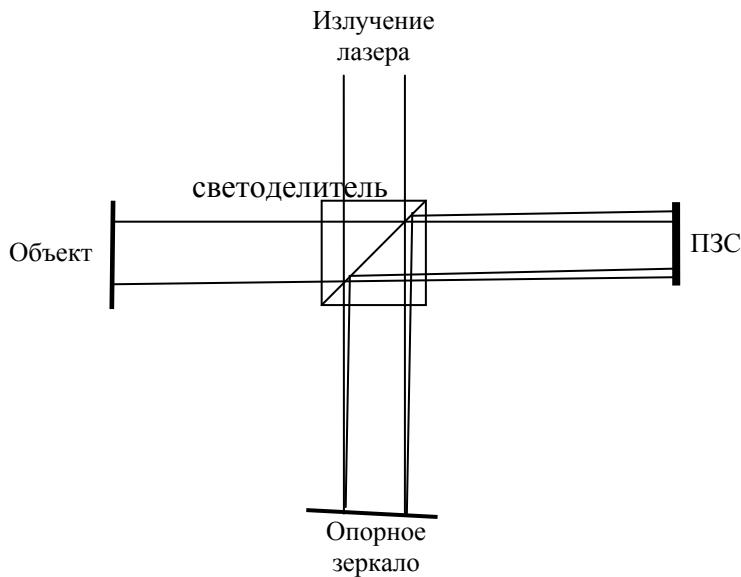


Рис. 6. Схема записи голограмм на основе интерферометра Майкельсона

Важное отличие схем на основе интерферометров Маха–Цендера и Майкельсона в цифровой голограммии состоит в возможности исследования образцов различных видов. В первом случае удобнее исследовать прозрачные образцы в проходящем свете, а во втором – в отраженном свете.

В цифровой голограммии могут использоваться не только лазерные источники излучения, но также источники с малой степенью когерентности [5, 17, 18]. На рис. 7 представлена схема записи голограмм с использованием суперлюминесцентного диода.

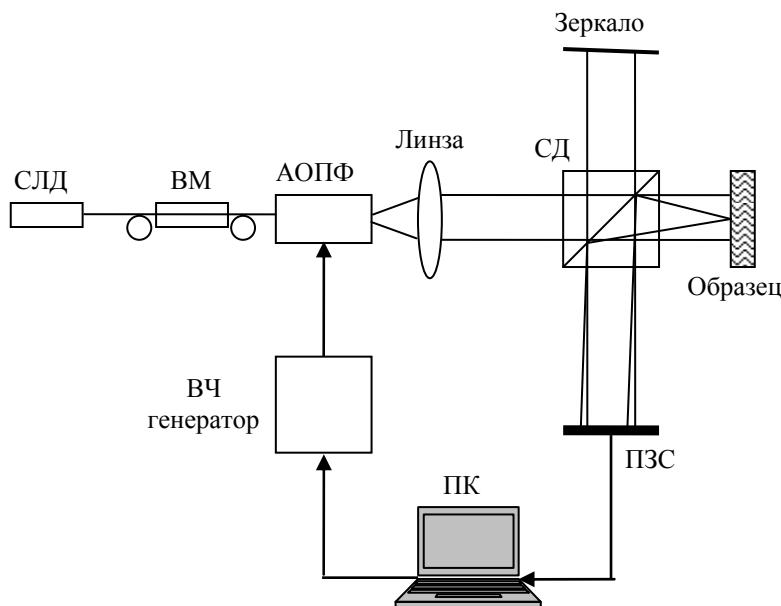


Рис. 7. Схема регистрации голограмм Френеля: СЛД – суперлюминесцентный диод; ВМ – волоконнооптический соединитель; АОПФ – акустооптический перестраиваемый фильтр; СД – светоделительный кубик; ПЗС – ПЗС-видеокамера; ПК – компьютер

Изображенная на рис. 7 схема предоставляет возможность получать томографические изображения методом цифровой голограммии. Акустооптический модулятор позволяет выделять требуемые длины волн и записывать серию голограмм за малый промежуток времени. Методика получения трехмерного изображения внутренней микроструктуры объекта основывается на поперечном сканировании объекта, записи серии двумерных голограмм, их реконструкции и последующем совмещении. При этом каждая из голограмм содержит информацию о внутренней структуре объекта в поперечном сечении в текущем продольном положении.

На рис. 8 представлен пример трехмерного изображения среды, полученного с помощью цифровой голограммии.

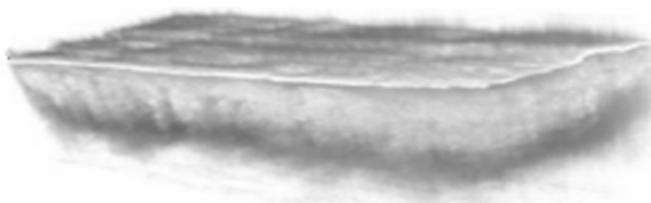


Рис. 8. Результат реконструкции томографического изображения методом цифровой голограмии с источником излучения малой когерентности ( $1,5 \times 15$  мм) [18]

#### Повышение разрешения в цифровой голограмии

Одно из основных направлений исследований в области цифровой голограмии в настоящее время состоит в повышении разрешающей способности. Предложен ряд методов повышения разрешения реконструированных изображений как на этапе записи цифровых голограмм, так и на этапе реконструкции изображений [1–3, 19].

Известно, что рассеянный объектом свет лишь частично попадает в поле регистрирующей матрицы, что снижает разрешение при записи голограмм. Применение дифракционной решетки позволяет большему количеству рассеянного объектом света попадать на светочувствительную матрицу. При этом обеспечивается более высокое разрешение.

На рис. 9 представлена схема для получения цифровых голограмм Фурье со сверхразрешением [19]. Для этого используется дифракционная решетка, размещенная после объекта.

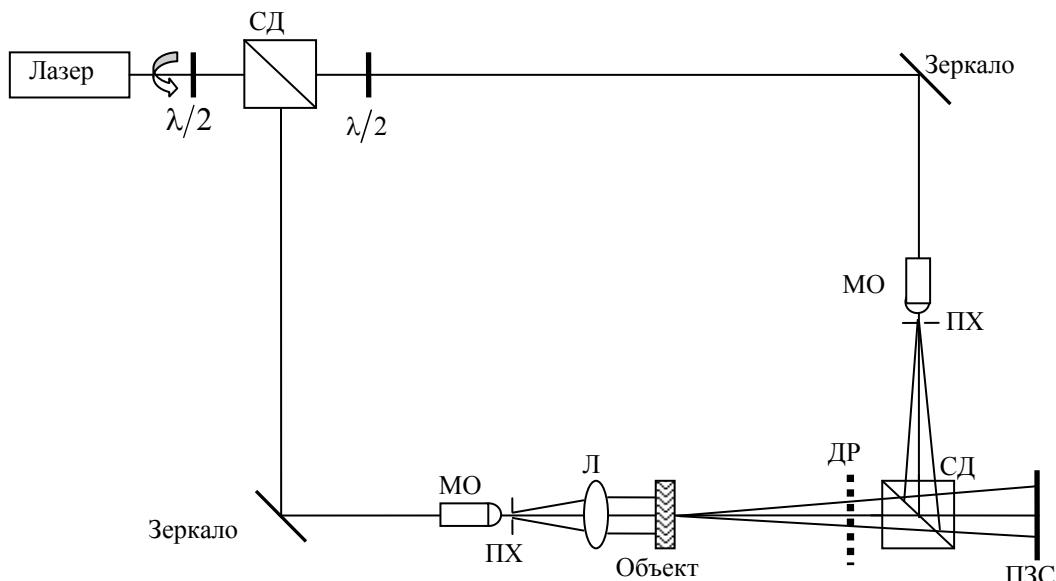


Рис. 9. Схема записи голограмм со сверхразрешением: СД – светоделитель;  $\lambda/2$  – полуволновые пластинки; МО – микрообъектив; ПХ – пинхол; Л – линза; ДР – дифракционная решетка; ПЗС – ПЗС-видеокамера

Дифракционная решетка устанавливается между образцом и плоскостью регистрации. Известно, что свет, проходящий через дифракционную решетку, разлагается на три составляющие (порядка дифракции), одна из которых сохраняет свое направление (нулевой порядок), а две другие (в первых порядках дифракции) направлены под углом к исходному направлению, примерно равным  $\pm\lambda/p$ , где  $p$  – период дифракционной решетки. На рис. 10 представлен ход лучей без дифракционной решетки и с использованием дифракционной решетки. Из рис. 10 видно, что без использования дифракционной решетки (рис. 10, а) только малая часть света, рассеянного объектом, попадает в плоскость матрицы, тогда как в случае использования дифракционной решетки (рис. 10, б) большая часть света попадает в область регистрации.

Предлагается использовать два вида решеток – одномерные и двумерные. В первом случае может быть улучшено только латеральное разрешение. Во втором случае можно улучшить разрешение по всем координатам. Таким образом, использование двумерных дифракционных решеток для повышения разрешения в цифровой голограмии является более эффективным.

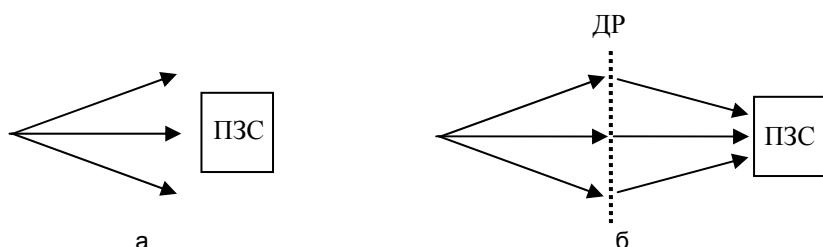


Рис. 10. Ход лучей объектной волны без использования дифракционной решетки (а) и с использованием дифракционной решетки (ДР) (б)

### Заключение

Методы цифровой голограмии и голографической микроскопии позволяют эффективно исследовать биологические и другие объекты с разрешающей способностью, определяемой длиной волны оптического излучения, параметрами оптической системы и регистрирующей среды.

В последние годы проведены активные исследования, направленные на совершенствование методов и средств цифровой голограмии. Перспективные исследования в области цифровой голограмии направлены на повышение разрешения и достоверности получаемых результатов. Как видно из ряда публикаций, созданы методы повышения разрешения в цифровой голограмии [1–3] вплоть до 40 линий на миллиметр [19]. Методы устранения нулевого порядка дифракции также активно совершенствуются, становятся менее ресурсоемкими и более эффективными [11], что позволяет получать более достоверные изображения исследуемых объектов без мешающего влияния нулевого порядка дифракции.

Большой интерес представляет также использование цифровой голографической микроскопии для реконструкции томографических изображений микрообъектов. Совместное использование голографического и томографического подходов позволяет достигнуть нового качества в исследовании биообъектов, т.е. получать амплитудную и фазовую информацию о различных слоях объекта, не прибегая к длительному сканированию образцов в аксиальной плоскости [18].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### Литература

1. Swoger J., Corral M.M., Huisken J., Stelzer H.K. Optical scanning holography as a technique for high-resolution three-dimensional biological microscopy // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – V. 19. – P. 1910–1918.
2. Mico V., Zalevsky Z., García-Martínez P., García J. Synthetic aperture superresolution with multiple off-axis holograms // J. Opt. Soc. Am. A. – 2006. – V. 23. – P. 3162–3170.
3. Hillman T.R., Gutzler T., Alexandrov A.S., David D.D. High-resolution, wide-field object reconstruction with synthetic aperture Fourier holographic optical microscopy // Opt. Express. – 2009. – V. 17. – P. 7873–7892.
4. Zhang Y., Lu Q., Ge B., Zhao H., Sun Y. Digital holography and its applications // Proc. of SPIE. – 2005. – V. 5636. – P. 200–211.
5. Dubois F., Debeir O., Kiss R. Digital holographic microscopy for the three-dimensional dynamic analysis of in vitro cancer cell migration // Journal of Biomedical Optics. – 2006. – V. 11 – № 5. – P. 054032.
6. Zhou W., Yu Y., Duan Y., Asundi A. Phase reconstruction of live Human Embryonic Kidney 293 cells based on two off-axis holograms // Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7375. – P. 737502.
7. Kim M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy // SPIE Rev. – 2010. – V. 1. – P. 018005-1-50.
8. Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голограмии // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – С. 91–117.
9. Schnars U., Jüptner W. Digital recording and numerical reconstruction of holograms // Meas. Sci. Technol. – 2002. – V. 13. – R85–R101.
10. Lingfeng Yu, Yingfei An and Lilong Cai. Numerical reconstruction of digital holograms with variable viewing angles // Opt. Express. – 2002. – V. 10. – P. 1250–1257.
11. Junchang L., Qinghe S., Patrice T., Pascal P. Eliminating Zero-order Diffraction in the Digital Holography Wavefront Reconstruction with Adjustable Magnification // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7848. – P. 78481Y.
12. Dong E., Kang X., Chi J., He X. Phase shifting technique in digital holography // Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7375. – P. 73749.
13. Sakaue K., Suzuki S., Takashi M. Recording caustic images by phase-shifting digital holography // Optical Engineering. – 2006. – V. 45. – № 11. – P. 115802.

14. Гендин В.Г. Определение малых смещений объектов методом цифровой голографии с использованием метода фазового сдвига и метода фильтрации высоких частот // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 28–32.
15. Chen Zh., Liu F., Gong W., Wang H. Microscopy based on digital lensless Fourier transforms holography // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7848. – P. 784834.
16. Lu Q., Ge B., Chen Y., Zou J. Microstructure Testing with Digital Holography // Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7511. – P. 751105.
17. Sheoran G., Dubey S., Anand A., Mehta D.S., Shakher C. Swept-source digital holography to reconstruct tomographic images // Opt. Lett. – 2009. – V. 34. – № 12. – P. 1879–1881.
18. Yu L., Chen Zh. Multi-wavelength digital holographic tomography based on spectral interferometry // Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7184. – P. 1840.
19. Paturzo M., Merola F., Grilli S. De Nicola S., Ferraro P. Digital holography in combination with diffraction grating to get super-resolution // Proc. of SPIE. – 2008. – V. 6995. – P. 699505.

- Гендин Владислав Геннадьевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vlad.gendin@gmail.com
- Гуров Игорь Петрович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gurov@mail.ifmo.ru

**УДК 535.3, 535:530.182**

## **ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ КРАТНЫХ ЧАСТОТ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В ГАЗЕ ПЛАЗМЫ СИЛЬНЫМ ПОЛЕМ ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ**

**С.А. Штумпф, А.А. Королев, С.А. Козлов**

Рассмотрена генерация высокочастотного излучения при оптическом пробое неона фемтосекундными импульсами из малого числа колебаний светового поля. Показано, что при уменьшении числа колебаний в импульсе, вплоть до всего одного, происходит сильное смещение кратных гармоник в коротковолновую область спектра. Плазменная нелинейность диэлектриков приводит к увеличению перераспределения энергии излучения в коротковолновую область.

**Ключевые слова:** предельно короткие импульсы, плазменная нелинейность, генерация кратных гармоник.

### **Введение**

Развитие нелинейной оптики импульсов из малого числа колебаний светового поля, экспериментально получаемых сегодня уже во многих научных лабораториях [1, 2], ставит новые задачи по созданию теории взаимодействия таких предельно коротких импульсов (ПКИ) с веществом. Одной из таких задач является построение математической модели распространения в диэлектрических средах настолько сильных полей ПКИ, что оптические электроны вещества становятся квазисвободными, но разрушение среды из-за скоротечности взаимодействия и малой энергии ПКИ не происходит.

К настоящему времени разработан ряд моделей генерации плазмы в диэлектрических средах в поле фемтосекундного излучения, содержащего большое число колебаний оптического поля. Эти модели, основанные на рассмотрении динамики огибающих световых волн, позволили изучить процессы зарождения филаментов, локализации плазменного канала и т.п. в поле длинных импульсов (например, [3, 4]). Однако применение метода медленно меняющейся огибающей импульса для ПКИ, например, содержащего всего одно полное колебание поля, становится неплодотворным, поскольку понятие огибающей для ПКИ теряет свое физическое содержание (например, [5–7] и обзоры в них).

В работе [8] авторами было выведено уравнение динамики сильного поля ПКИ в диэлектрической среде, которое учитывает электронную нелинейность, обусловленную изменением населенностей высоковозбужденных энергетических состояний и движением электронов в квазисвободном состоянии. В работе [9] на основе анализа решений этого уравнения изучены условия доминирования различных физических факторов при самовоздействии ПКИ и приведены иллюстрации диапазонов интенсивности, длительности и спектрального состава излучения, когда плазменная нелинейность среды становится преобладающей. Показано, что модель корректно описывает возрастание коэффициента нелинейного показателя преломления оптической среды в фиолетовой части видимого спектра излучения и ближнем УФ диапазоне. В работах [10, 11] с помощью этой модели объяснен ряд особенностей генерации низкочастотного терагерцового излучения при оптическом пробое воздуха двуцветным фемтосекундным излучением, в частности, квазипериодическая зависимость длины плазменного филамента от исходной временной расстройки между фемтосекундными импульсами на основной и удвоенной частотах.

В настоящей работе методами численного моделирования выведенного в [8, 9] полевого уравнения определены особенности генерации излучения высоких частот при оптическом пробое газа сильными полями световых импульсов из малого числа, вплоть до всего одного, колебаний поля.

**Уравнение динамики сильного поля импульса из малого числа колебаний  
в диэлектрической среде**

Уравнение динамики поля светового импульса высокой интенсивности из малого числа колебаний в диэлектрической среде было выведено в [8] на основе формализма матрицы плотности в приближении трехзонной энергетической модели среды [12]. При описании плазменной нелинейности третье энергетическое состояние рассматривалось как зона квазисвободного движения электронов [10, 11]. Результатом вывода явилась система волнового и динамических материальных уравнений, учитывающая как инерционную часть электронной кубической нелинейности, так и генерируемую в сильном поле плазменную нелинейность. В приближении одностороннего распространения светового импульса [5, 6] (при пренебрежении самоотражаемым излучением) эта система может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial z} - a \frac{\partial^3 E}{\partial \tau^3} + g \frac{\partial E^3}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \tau} \left( g^{(1)} E \left( \frac{\partial E}{\partial \tau} \right)^2 + g^{(2)} E^2 \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} \right) + \frac{2\pi}{cn_0} j = 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\tau_p} = \alpha E^2 \\ \frac{\partial}{\partial \tau} j + \frac{j}{\tau_c} = \beta \rho E^3, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E$  – электрическое поле излучения;  $z$  – направление его распространения;  $\tau = t - \frac{n_0}{c} z$  – время в сопровождающей системе координат;  $c$  – скорость света в вакууме;  $n_0$  и  $a$  характеризуют зависимость линейного показателя преломления  $n$  диэлектрической среды от частоты  $\omega$  вида

$$n(\omega) = n_0 + ca\omega^2, \quad (2)$$

которую несложно при необходимости уточнить слагаемыми более высокого порядка по  $\omega$  [4]; коэффициенты  $g$ ,  $g^{(1)}$ ,  $g^{(2)}$  описывают дисперсию коэффициента нелинейного показателя преломления диэлектрика [9] вида

$$n_2(\omega) = n_2^0 + A\omega^2,$$

где  $n_2^0 = \frac{3}{2}cg$ ;  $A = \frac{1}{2}c(g^{(1)} - 3g^{(2)})$ ; коэффициенты  $\alpha = \frac{n_0^2 - 1}{4\pi T_{21}\hbar\omega_{21}}$ ,  $\beta = \frac{e^2}{m_e^*} \frac{p_{23}^2}{(\hbar\omega_{32})^2}$  характеризуют инерционную плазменную нелинейность диэлектрика [10],  $p_{ij}$  и  $\omega_{ij}$  – дипольные моменты и частоты, соответствующие переходам  $i \rightarrow j$  в трехзонной модели;  $T_{21}$ ,  $\tau_p$  – времена поперечной релаксации и релаксации населеностей в паре состояний (1), (2),  $m_e^*$  – эффективная масса электрона в зоне проводимости диэлектрика;  $\tau_c$  – среднее время столкновительной релаксации свободных электронов.

Первое уравнение системы (1) описывает самовоздействие поля излучения в среде в условиях ее кубичной по полю нелинейной поляризации, в том числе с учетом возрастания нелинейного показателя преломления в высокочастотной области спектра. Второе уравнение описывает динамику генерации квазисвободных электронов в веществе в поле высокоинтенсивного излучения, а третье – ускоренное движение этих электронов под действием электромагнитных волн.

**Генерация излучения кратных частот высоких порядков при распространении  
высокоинтенсивного импульса из малого числа колебаний в газе**

На рис. 1, 2 приводятся результаты численного моделирования изменения спектра ПКИ высокой интенсивности вида

$$E = E_0 e^{-\frac{(t-t_u)^2}{t_u^2}} \sin(\omega_0 t),$$

где  $E_0$  – амплитуда;  $t_u$  – длительность;  $\omega_0$  – центральная частота излучения, при его распространении в неоне. При моделировании использованы значения линейного показателя преломления  $n_0 = 1,000067$  [11] и коэффициента нелинейного показателя преломления неона  $n_2 = 0,006 \cdot 10^{-22} \text{ м}^2/\text{Вт}$  [12].

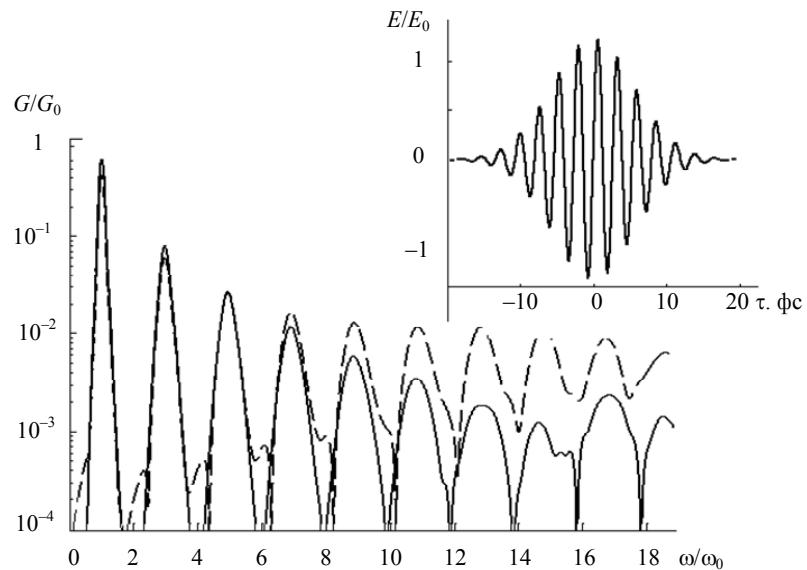


Рис. 1. Спектр излучения в нелинейной среде (неоне) после распространения на расстояние  $z = 5$  см (пунктирная линия – при учете в расчете только безынерционной кубической нелинейности среды, сплошная линия – при дополнительном учете инерционности электронной нелинейности).

Вставка на графике показывает общий вид импульса на входе в среду

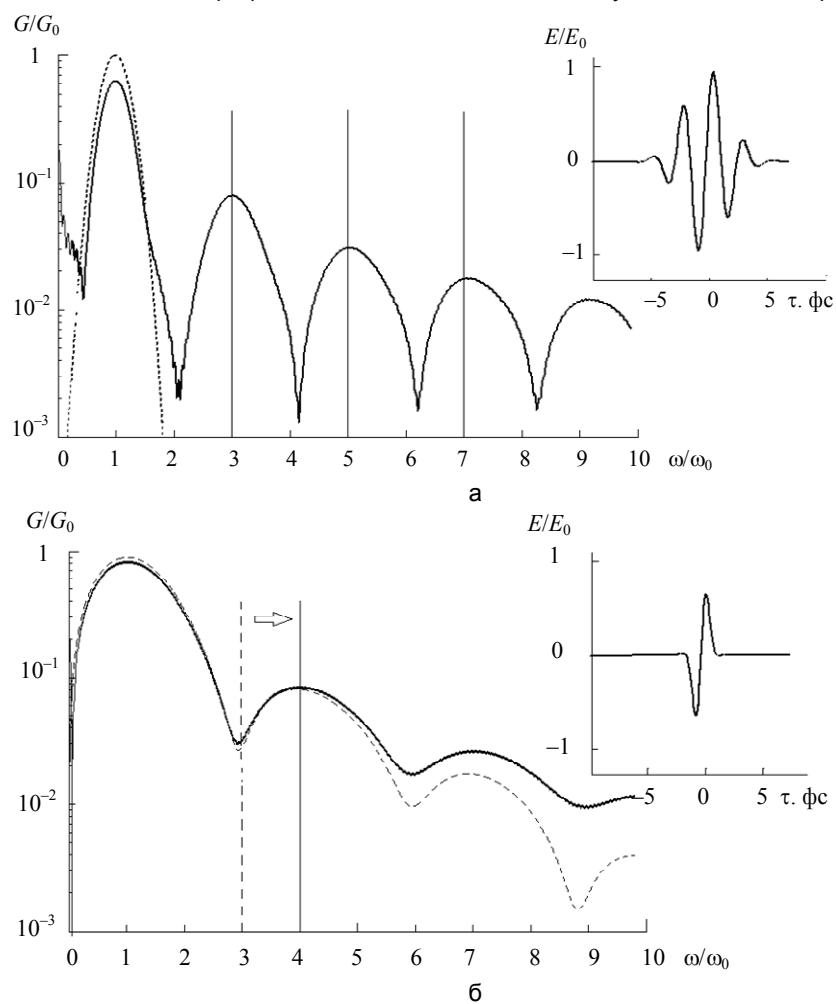


Рис. 2. Спектр излучения в нелинейной среде (неоне) после распространения на расстояние  $z = 5$  см импульса из трех полных колебаний поля (пунктирная линия – спектр импульса на входе в среду) (а); одного колебания светового поля (пунктирная линия – спектр импульса при тех же условиях без учета плазменной нелинейности) (б). Вставка на графике показывает общий вид поля входных импульсов

На рис. 2 показано, что высокоинтенсивный импульс всего из одного полного колебания светового поля при нелинейном распространении в диэлектрической среде генерирует второй максимум спектра излучения не в области третьей гармоники основной частоты излучения (как для более длинных импульсов), а в области четвертой (что отмечалось также в работе [14]). Аналогично смещаются и прочие компоненты спектра, соответствующие кратным гармоникам более высоких порядков (рис. 2, б). Видно, что процесс носит характер, близкий к пороговому; генерация кратных гармоник для импульса из двух полных колебаний светового поля (спектр приведен на рис. 2, а) носит, напротив, вполне традиционный для изучаемого явления характер (генерируются гармоники нечетных порядков, картина аналогична представленной на рис. 1). Влияние ионизационных компонент модели (1) проявляется в усилении перераспределения спектра излучения в высокочастотную область, что также можно видеть из иллюстрации рис. 2, б: амплитуда излучения в области 6-й гармоники увеличивается при учете плазменных компонент приблизительно в 2 раза, а в области 9-й гармоники – уже примерно в 10 раз.

Рис. 1 демонстрирует сверхуширение спектра импульса длительностью  $t_u = 10 \text{ фс}$  с центральной длиной волны излучения  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0 = 780 \text{ нм}$  при его входной интенсивности  $I = 1 \cdot 10^{15} \text{ Вт}/\text{см}^2$ , на расстоянии распространения в неоне  $z = 5 \text{ см}$  (генерация гармоник в этой среде, вплоть до 103-й, описана, например, в [13]). Из рисунка видно, что сверхуширение спектра излучения реализуется в виде генерации гармоник нечетных порядков. При учете инерционности электронной нелинейности в указанных параметрах импульса происходит ослабление амплитуды каждой последующей гармоники по отношению к предыдущей в 2–5 раз. Учет только безынерционной части кубичной по полю нелинейности позволил бы реализовать формирование «плато» с 9-й по 17-ю гармонику практически без относительного убывания их интенсивности.

### Заключение

В работе продемонстрирован эффект сильного смещения частоты генерируемых кратных гармоник в высокочастотную область при распространении в неоне высокоинтенсивного импульса из всего одного полного колебания светового поля (например, второй максимум спектра излучения наблюдается в области четвертой гармоники, а не третьей). Показано усиление перераспределения энергии в высокочастотную область при генерации квазиводных электронов в диэлектрической среде сильным полем светового излучения.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки Российской Федерации 16.740.11.0459 и РФФИ 11-02-01346а.

### Литература

1. Brabec Th., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // Rev. Mod. Phys. – 2000. – V. 72. – № 2. – P. 545–591.
2. Paul P.M., Toma E.S. et al. Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation // Science. – 2001. – V. 292. – P. 1689–1692.
3. Панов Н.А., Косарева О.Г., Кандидов В.П., Акозбек Н., Скалора М., Чин С.Л. Локализация плазменного канала при множественной филаментации в воздухе // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – № 12. – С. 1153–1158.
4. Kosareva O.G., Panov N.A., Uryupina D.S., Kirilova M.V., Mazhorova A.V., Savel'ev A.B., Volkov R.V., Kandidov V.P., Chin S.L. Optimization of a femtosecond pulse self-compression region along a filament in air // Applied Physics B. – 2008. – V. 91. – P. 35–43.
5. Козлов С.А., Сазонов С.В. Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах // ЖЭТФ. – 1997. – Т. 111. – В. 2. – С. 404–418.
6. Bespalov V.G., Kozlov S.A., Shpolyansky Yu.A., Walmsley I.A. Simplified field wave equations for nonlinear propagation of extremely short light pulses // Phys. Rev. A. – 2002. – V. 66. – № 1. – P. 013811–013821.
7. Шполянский Ю.А. Комплексная огибающая произвольного оптического сигнала для описания взаимодействия импульсов с континуумными спектрами и различными центральными частотами в прозрачных нелинейных средах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 3. – С. 26–34.
8. Штумпф С.А., Королев А.А., Козлов С.А. О природе и инерционности нелинейной поляризованности диэлектриков в поле световых импульсов из малого числа колебаний // Известия РАН. Серия физическая. – 2006. – Т. 70. – № 1. – С. 118–125.
9. Штумпф С.А., Королев А.А., Козлов С.А. Распространение сильных полей световых импульсов из малого числа колебаний в диэлектрических средах // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. – Т. 71. – № 2. – С. 158–161.

10. Андреев А.А., Беспалов В.Г., Козлов С.А., Штумпф С.А. и др. Генерация сверхширокополосного тегерцового излучения при оптическом пробое воздуха двумя разночастотными фемтосекундными импульсами // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107. – № 4. – С. 569–576.
11. Leonard P.J. Refractive Indices, Verdet Constants, and Polarizabilities of the Inert Gases // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1974. – V. 14. – P. 21–37.
12. Shaw M.J., Hooker C.J. and D.C. Wilson. Measurement of the non- linear refractive index of air and other gases at 248 nm // Opt. Commun. – 1993. – V. 103. – P. 153–160.
13. Miyazaki K., Takada H. High order harmonic generation in the tunneling regime // Phys. Rev. A. – 1995. – V. 52. – P. 3007–3021.
14. Kozlov S.A., Drozdov A.A., Suchorukhov A.A., Kivshar Y.S. On peculiarities of self-action of one-period light waves // Book of Abstracts, Int. Workshop Nonlinear Photonics. – 24–26 Aug. – 2011. – P. 37.

**Штумпф Святослав Алексеевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, stumpf@rain.ifmo.ru

**Королев Александр Александрович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, korolev@phd.ifmo.ru

**Козлов Сергей Аркадьевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, декан, kozlov@mail.ifmo.ru

**УДК 535.1**

## **ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА УТРОЕННЫХ И КОМБИНАЦИОННЫХ ЧАСТОТАХ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ НЕЛИНЕЙНОМ ОТРАЖЕНИИ ОТ ДИЭЛЕКТРИКА ДВУХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВНОЙ И УДВОЕННОЙ ЧАСТОТАХ**

**О.А. Столповская, С.Э. Путилин, В.Г. Беспалов, С.А. Козлов**

Представлены теоретические и экспериментальные результаты одновременного нелинейного отражения от диэлектрика двух фемтосекундных импульсов на основной  $\omega_1$  и удвоенной  $\omega_2 = 2\omega_1$  частотах при падении света на границу раздела сред, близком к нормальному. Показано, что при отражении такого двухкомпонентного излучения происходит генерация импульсов на утроенных и комбинационных частотах. При этом спектр излучения, отраженного на утроенных частотах, представляет собой наложение двух компонент: утроенной  $3\omega_1$  и комбинационной  $2\omega_2 - \omega_1$ . Интерференция этих двух компонент приводит к модуляции спектра излучения, отраженного на утроенных частотах, при изменении временной задержки между падающими импульсами.

**Ключевые слова:** нелинейное отражение, утроенные и комбинационные частоты, фемтосекундный импульс.

### **Введение**

Распространение фемтосекундного излучения в прозрачных твердых телах без оптического пробоя вещества оказывается возможным при значительно больших интенсивностях, чем для более длинных оптических импульсов [1]. Это позволяет при взаимодействии в нелинейных оптических средах двух или более фемтосекундных импульсов разных спектральных составов эффективно генерировать излучение на кратных и комбинационных частотах. Обзор работ по взаимодействию в нелинейных средах с направленных и встречных фемтосекундных импульсов можно найти в [2], а также, например, в [3, 4]. В настоящей работе рассмотрено взаимодействие двух разночастотных фемтосекундных импульсов при нелинейном отражении.

В работах [5–7] были получены соотношения, связывающие параметры поля отраженного излучения с характеристиками падающего на нелинейный диэлектрик света, спектр которого может занимать значительную часть диапазона прозрачности диэлектрической среды, для случая нормального падения плоской поперечно однородной волны. Особенностью этих работ было использование непосредственно полевых уравнений при выводе зависимостей. В работе [8] также на основе полевых уравнений были получены аналоги формул Френеля для случая отражения от нелинейного диэлектрика поперечно слабо-неоднородной (параксиальной) волны со сверхшироким временным спектром. В этой работе была выведена зависимость пространственно-временного спектра светового импульса, отраженного от диэлектрической среды с нерезонансной дисперсией и нелинейностью, от параметров пространственно-временного спектра падающего параксиального пучка, временной спектр которого в общем случае рассматривается сверхшироким, вида

$$G_{ref}(\omega, k_x, k_y) = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \left( 1 + \frac{c^2}{n_1 n_2} \frac{k_x^2 + k_y^2}{\omega^2} \right) G_{inc} - \frac{g c S}{3(n_1 + n_2)}, \quad (1)$$

где  $G_{inc}$  и  $G_{ref}$  – пространственно-временные спектры падающего и отраженного излучения соответственно;  $n_1(\omega)$  и  $n_2(\omega)$  – линейные показатели преломления граничащих сред, для которых зависимость от частоты имеет вид

$$\begin{cases} n_i(\omega) = N_i + \Delta n_i(\omega), \\ \Delta n_i(\omega) = c a_i \omega^2 - c \frac{b_i}{\omega^2}, \end{cases}$$

где  $N_i$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  – константы, характеризующие нерезонансную дисперсию линейного показателя преломления среды;  $g = 2\tilde{n}_2/c$  – описывает безынерционную нелинейность поляризационного отклика среды,  $\tilde{n}_2$  – коэффициент нелинейного показателя преломления среды;  $c$  – скорость света в воздухе,

$$\begin{aligned} S(\omega, k_x, k_y) &= \int \int \int \int \int E_{inc}^3(t, x, y) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt dx dy = \\ &= \frac{1}{(2\pi)^6} \int \int \int \int \int G_{inc}(\omega - \omega', k_x - k'_x, k_y - k'_y) G_{inc}(\omega' - \omega'', k'_x - k''_x, k'_y - k''_y) \times \\ &\quad \times G_{inc}(\omega'', k''_x, k''_y) d\omega' dk'_x dk'_y d\omega'' dk''_x dk''_y, \end{aligned}$$

где  $E_{inc}$  – напряженность электрического поля падающей волны.

В работах [8, 9] были рассмотрены сценарии нелинейного отражения одиночных импульсов из малого числа колебаний, а также экспериментально исследовано отражение высокointенсивного фемтосекундного излучения от поверхности диэлектрика.

Теоретический анализ одновременного нелинейного отражения от диэлектрической среды двух фемтосекундных импульсов разных частот и генерации при этом излучения кратных и комбинационных частот в настоящей работе проведен на основе формулы (1).

#### **Теоретический анализ нелинейного отражения от диэлектрика двух фемтосекундных импульсов на основной и удвоенной частотах**

Применим (1) для анализа нелинейного отражения нормированной суперпозиции двух фемтосекундных гауссовых импульсов:

$$\begin{aligned} E_{inc}(t, x, y) &= e^{-2\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2} \cdot e^{-2\left(\frac{x}{\rho_1}\right)^2} \cdot e^{-2\left(\frac{y}{\rho_1}\right)^2} \cdot \sin(\omega_1(t - \alpha_1 \cdot t^2)) + \\ &+ \frac{E_2}{E_1} \cdot e^{-2\left(\frac{t+\Delta t}{\tau_2}\right)^2} \cdot e^{-2\left(\frac{x}{\rho_2}\right)^2} \cdot e^{-2\left(\frac{y}{\rho_2}\right)^2} \cdot \sin(\omega_2(t + \Delta t - \alpha_2 \cdot t^2)), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – амплитуды первого и второго импульсов соответственно;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – их временные длительности;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – поперечные размеры;  $\omega_1 = 2\pi c / \lambda_1$  и  $\omega_2 = 2\pi c / \lambda_2$  – центральные частоты импульсов;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – их центральные длины волн;  $\Delta t$  – временная задержка второго импульса относительно первого;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты фазовой модуляции.

Рассмотрим вначале особенности отражения суперпозиции двух гауссовых импульсов без фазовой модуляции ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ ) с амплитудами  $E_1 = 2E_2$ , центральными длинами волн  $\lambda_1 = 800$  нм и  $\lambda_2 = 400$  нм, пространственно-временными параметрами  $\rho_1 = \rho_2 = 10 \cdot \lambda_1$  и  $\tau_1 = \tau_2 = 26$  фс и пиковой интенсивностью  $I = 5 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, которые падают из воздуха ( $N_1 = 1$ ,  $a_1 = b_1 = 0$ ) на кварцевое стекло ( $N_2 = 1,4508$ ,  $a_2 = 2,7401 \cdot 10^{-44}$  с<sup>3</sup>/см,  $b_2 = 3,9437 \cdot 10^{17}$  1/(с · см),  $\tilde{n}_2 = 2,9 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт [10]) с временной задержкой  $\Delta t = 20$  фс. На рис. 1 представлены нормированные поле и спектр падающего излучения.

На рис. 2 изображены нормированные поле и спектр отраженного излучения. Можно показать, что дифракционно-дисперсионным изменением поля и спектра при указанных параметрах излучения и вещества можно пренебречь, и основными эффектами, как видно из рисунка, являются нелинейные, заключающиеся в генерации импульсов на кратных и комбинационных частотах  $3\omega_1$  (совпадающей с  $2\omega_2 - \omega_1$ ),  $2\omega_1 + \omega_2$ ,  $2\omega_2 + \omega_1$  и  $3\omega_2$ . На утроенных частотах отраженного излучения наблюдается провал спектральной плотности, который объясняется наложением комбинационной частоты  $2\omega_2 - \omega_1$  на утроенную частоту  $3\omega_1$ .

На рис. 3 проиллюстрирован волновой пакет, отраженный на утроенной частоте. Из рисунка видно, что этот импульс имеет меньшую длительность по сравнению с импульсами, отраженными на основных частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (в  $\sqrt{3}$  раз).

Введем в падающее излучение (2) фазовую самомодуляцию, которая может возникнуть в оптическом тракте лазерной системы. Положим  $\alpha_1 = 6 \cdot 10^{-4} \omega_1$ ,  $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-4} \omega_1$ . Тогда излучение, отраженное на утроенных частотах, будет иметь вид, который представлен на рис. 4. Из рисунка видно, что спектр третьей гармоники уширяется, провал в спектральной плотности увеличивается и смещается.

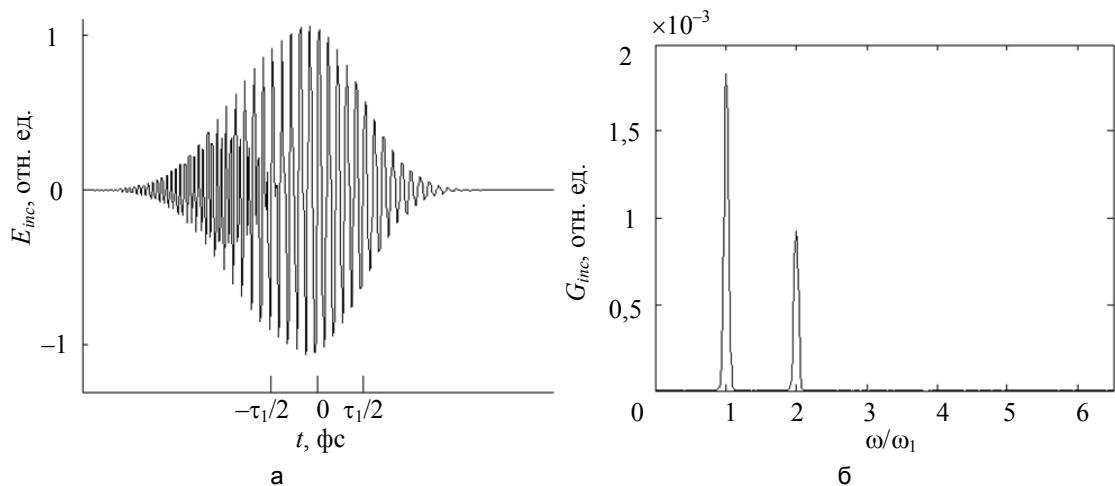


Рис. 1. Нормированные поле (а) и спектр (б) падающего излучения – суперпозиции двух гауссовых импульсов разной частоты и амплитуды с временной задержкой между ними, равной 20 фс

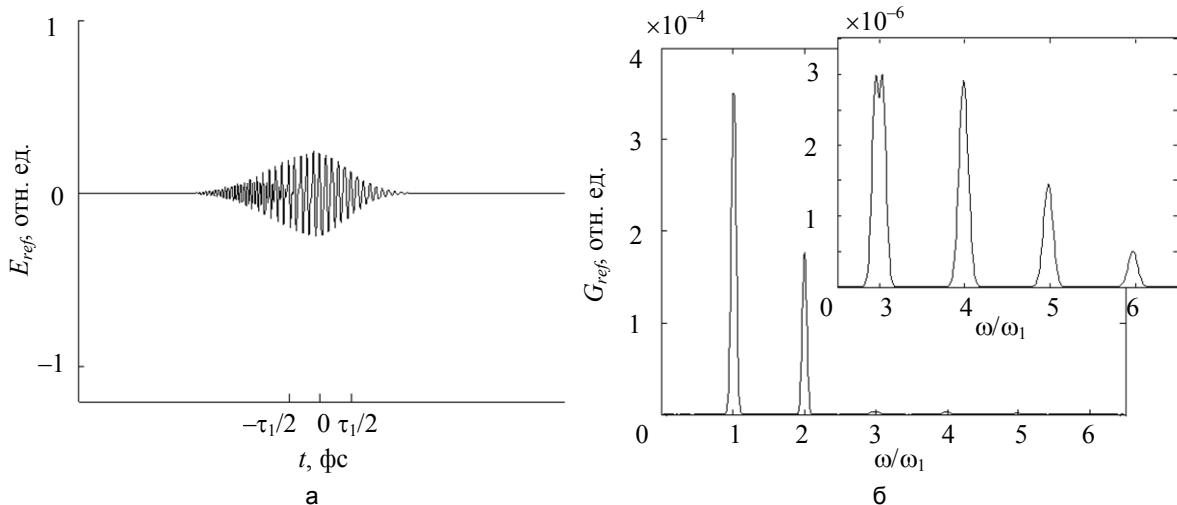


Рис. 2. Нормированные поле (а) и спектр (б) отраженного излучения, включающего импульсы на кратных и комбинационных частотах  $3\omega_1$  (совпадающей с  $2\omega_2 - \omega_1$ ),  $2\omega_1 + \omega_2$ ,  $2\omega_2 + \omega_1$  и  $3\omega_2$ . На вставке изображен спектр кратных и комбинационных частот отраженного излучения (увеличенный)

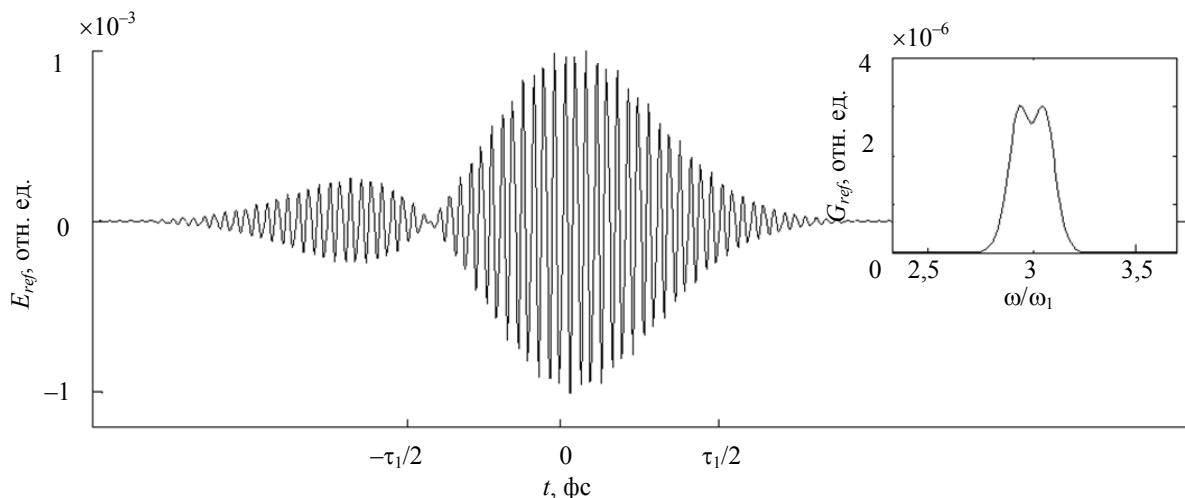


Рис. 3. Нормированное поле импульса, отраженного на утроенной частоте  $3\omega_1$ .  
На вставке показан его спектр

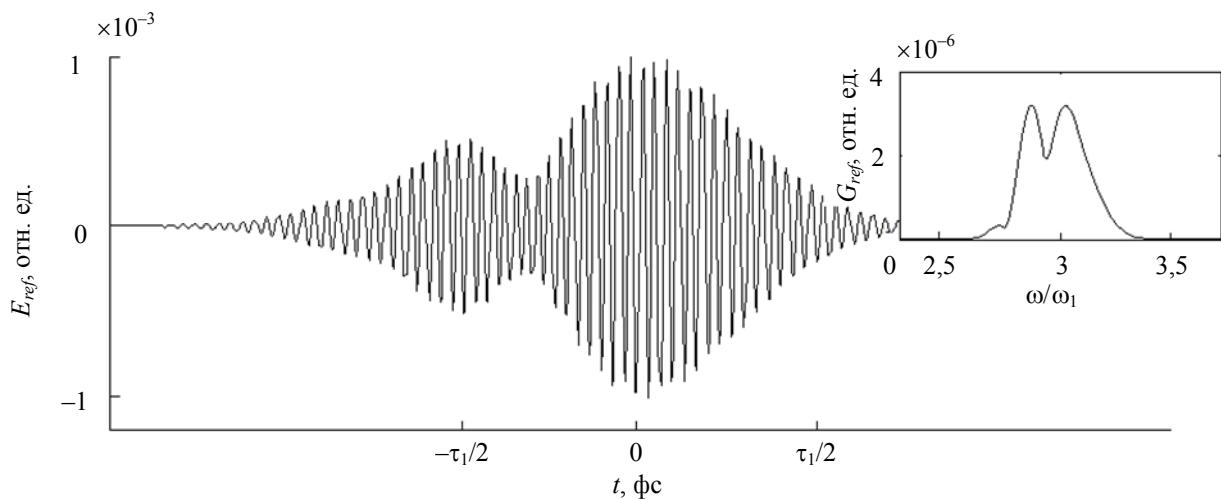


Рис. 4. Нормированное поле импульса, отраженного на утроенной частоте  $3\omega_1$ , при фазовой модуляции падающего излучения. На вставке показан его спектр

Рассмотрим теперь излучение, отраженное на утроенных частотах, при изменении временной задержки между падающими импульсами. Пусть  $\Delta t$  изменяется от 15 фс до 25 фс с шагом 0,5 фс. На рис. 5 продемонстрировано изменение спектра третьей гармоники при увеличении временной задержки  $\Delta t$ . Из рисунка видно, что провал в спектральной плотности смещается в зависимости от временной задержки между импульсами. При этом изменяется ширина и амплитуда спектральной плотности.

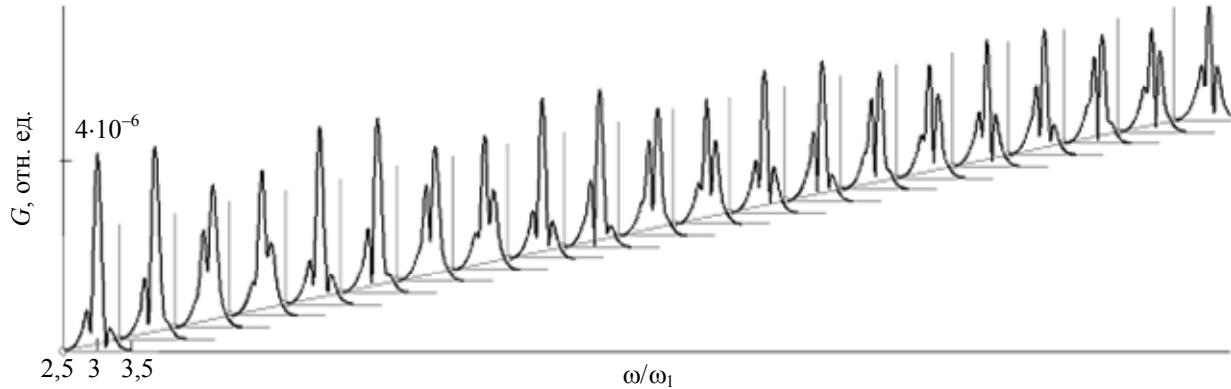


Рис. 5. Спектр импульса, отраженного на утроенной частоте, при изменении задержки между падающими импульсами на 0,5 фс

#### Экспериментальное исследование интерференции излучения, генерируемого при нелинейном отражении на утроенных и комбинационных частотах

В экспериментах нами была использована фемтосекундная лазерная система на кристаллах титан-сапфира с усилением чирпованного импульса с пиковой мощностью 30 ГВт [11]. Система имела следующие параметры: длительность импульса 40 фс, энергия одиночного импульса до 1,5 мДж, частота повторения импульсов 50 Гц.

Излучение от фемтосекундной системы, пройдя линзу  $L$  (рис. 6) с фокусным расстоянием 51 см, попадало на кристалл второй гармоники SHG, установленный на подвижку, с помощью которой можно было изменять положение кристалла вдоль оси распространения пучка. Далее излучение основной частоты и второй гармоники падало на переднюю грань образца кварцевого стекла  $C$ . Чтобы избежать влияния излучения, отраженного от задней грани, образец был наклонен относительно падающего луча (угол падения составлял  $5,5^\circ$ ), а область взаимодействия была максимально приближена к матовой боковой грани образца. Фокальная плоскость линзы была расположена в 6 см за передней гранью кристалла. Плотность мощности была близка к энергии пробоя, но не превышала ее и составляла около  $4 \text{ ТВт}/\text{см}^2$ .

Отраженное от образца излучение проходило через ультрафиолетовые стекла (УФС-5)  $F$  суммарной толщиной 10 мм. За фильтрами на линейный транслятор с шаговым двигателем  $MTS$  был установлен спектрограф  $ASP100 SD$ . Работа шагового двигателя линейного транслятора и спектрографа управлялись

при помощи компьютера PC. На рис. 7 представлен зарегистрированный на спектрографе спектр отраженного излучения без внесения кристалла второй гармоники в схему. Из рисунка видно, что спектр третьей гармоники имеет плавный контур.

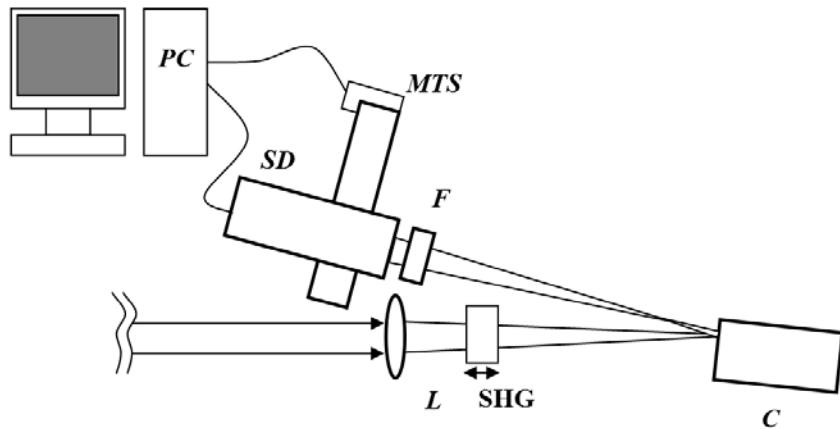


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

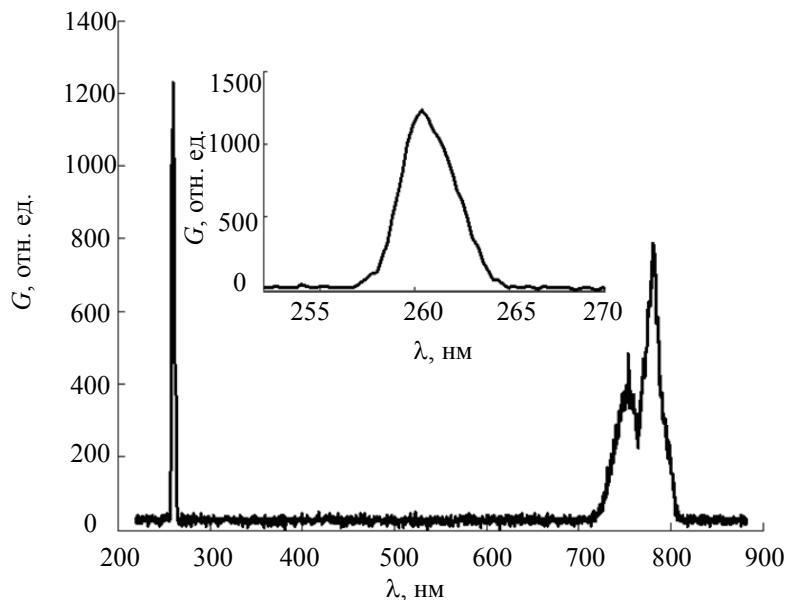


Рис. 7. Спектр отраженного излучения, прошедшего через УФС-фильтры. На вставке изображен спектр излучения, отраженного на утроенных частотах, имеющий плавный контур

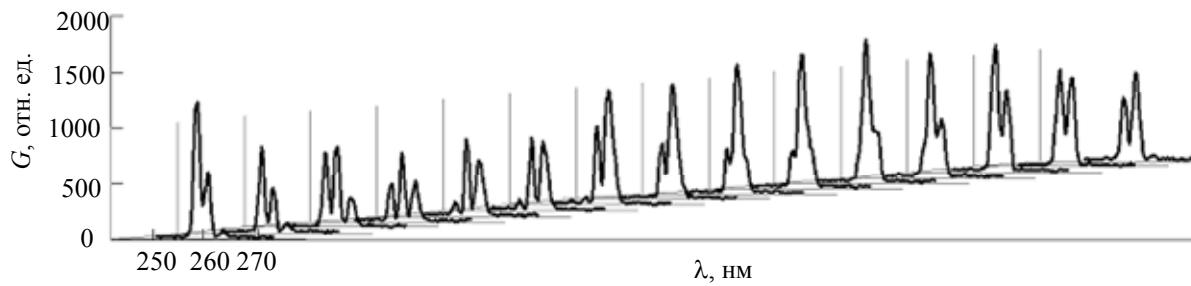


Рис. 8. Спектр импульса, отраженного на утроенной частоте, при изменении положения кристалла второй гармоники с шагом 2 мм

Установим кристалл второй гармоники так, как показано на схеме (рис. 6), на расстоянии 7,5 см от линзы L, и с помощью подвижки будем изменять его положение по оси распространения пучка с шагом 2 мм в сторону линзы. Изменяя положение кристалла второй гармоники, мы можем управлять временной задержкой между импульсами основной частоты и второй гармоники вследствие дисперсии воздуха.

На рис. 8 проиллюстрировано изменение спектра третьей гармоники в зависимости от положения кристалла второй гармоники. Как видно из рисунка, в спектре отраженного на утруеной частоте излучения присутствуют провалы, вызванные наложением двух спектральных компонент – утруеной и комбинационной, что доказывает генерацию более высоких комбинационных частот в спектре отраженного излучения. Также из рисунка видно, что провалы в спектральной плотности излучения, отраженного на утруеной частоте, смещаются в зависимости от временной задержки между импульсами основной частоты и второй гармоники, что подтверждает вышеприведенные теоретические результаты.

### **Заключение**

Рассмотренный случай одновременного нелинейного отражения от диэлектрика двух фемтосекундных импульсов на основной и удвоенной частотах расширяет теорию нелинейного отражения, полученную в работе [8], а также экспериментально демонстрирует возможность эффективной генерации утруеных и комбинационных частот. Интерференция между сгенерированными спектральными компонентами на утруеной частоте позволяет качественно изменять отраженное излучение. В частности, изменения положение кристалла второй гармоники по оси распространения падающего пучка, можно управлять спектральной шириной импульса, отраженного на утруеной частоте.

Работа поддержана грантами Министерства науки и образования Российской Федерации 16.740.11.0459 и РФФИ 11-02-01346а.

### **Литература**

1. Von der Linde D., Schuler H. Breakdown threshold and plasma formation in femtosecond laser-solid interaction // J. Opt. Soc. Am. B. – 1999. – V. 13. – № 1. – P. 216–222.
2. Козлов С.А., Самарцев В.В. Основы фемтосекундной оптики. – М.: Физматлит, 2009. – 292 с.
3. Сазонов С.В., Устинов Н.В. Резонансно-параметрический механизм оптического выпрямления и генерации высших гармоник // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106. – № 3. – С. 473–480.
4. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Взаимодействие встречных световых импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах и генерация излучения на комбинационных частотах в этом процессе // Оптика и спектроскопия. – 2011. – Т. 111. – № 2. – С. 325–332.
5. Bespalov V.G., Kozlov S.A., Oukrainski A.O., Sazonov S.V., Shpolyanskiy Yu.A. Self-action of femtosecond pulses with continuum spectrum // Proc. of SPIE. – 1999. – V. 3735. – P. 43–54.
6. Розанов Н.Н. Отражение сверхкоротких импульсов от границы среды Друде–Лоренца // Оптика и спектроскопия. – 2003. – Т. 94. – № 3. – С. 449–452.
7. Ястребова Н.В., Шполянский Ю.А., Козлов С.А. Нелинейное отражение импульсов из малого числа колебаний светового поля от просветленной границы раздела // Оptический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 6. – С. 78–83.
8. Мохнатова О.А., Козлов С.А. Нелинейное отражение фемтосекундного лазерного суперконтинуума // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 260–270.
9. Мохнатова О.А., Путилин С.Э., Беспалов В.Г., Козлов С.А. Генерация третьей гармоники при отражении от кристалла фемтосекундного излучения высокой мощности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4 (68). – С. 11–15.
10. Berkovsky A.N., Kozlov S.A., Shpolyansky Yu.A. Self-focusing of few-cycle light pulses in dielectric media // Phys. Rev. A 72. – 2005. – V. 72. – P. 043821.
11. Беспалов В.Г., Киселев В.М., Кисляков И.М. и др. Антистоксов самосдвиг и уширение спектра излучения фемтосекундного лазера в сильно поглощающей среде // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106. – № 4. – С. 670–679.

**Столповская Ольга Александровна**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, o.stolpovskaya@gmail.com

**Путилин Сергей Эдуардович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, seputilin@yandex.ru

**Беспалов Виктор Георгиевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, victorbespaloff@gmail.com

**Козлов Сергей Аркадьевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, декан, kozlov@mail.ifsmo.ru

УДК 621.397

## МЕТОД ИНТЕРПОЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Д.А. Федоров

Представлены результаты исследования метода масштабирования цифровых изображений. Получены оценки искажений при интерполяции изображений с использованием дискретного вейвлет-преобразования. Исследовано влияние выбора базиса вейвлетов на погрешности преобразования изображений при масштабировании.

**Ключевые слова:** масштабирование, интерполяция изображений, дискретное вейвлет-преобразование.

### Введение

Развитие информационных технологий обусловило важность цифровых методов масштабирования при обработке изображений. Существуют различные методы интерполяции изображений при масштабировании, наиболее известные из них – полиномиальные методы интерполяции и sinc-интерполяция [1]. При масштабировании желательно не ухудшать качество изображения, т.е. сохранять диапазон яркости, форму и границы объектов. Интерполяция сопровождается различными артефактами, такими как размытие границ, блочность, а при уменьшении изображений возможен элайзинг, который часто проявляется в виде волны возле границ объектов.

В настоящей работе представлены результаты исследования алгоритма масштабирования изображений с помощью дискретного вейвлет-преобразования (ДВП), которое успешно применяется для сжатия изображений.

### Метод дискретного вейвлет-преобразования

Метод основан на использовании субполосной фильтрации, т.е. обработке сигналов в различных диапазонах частот (рис. 1). Для выполнения низкочастотной фильтрации (НЧФ) используется свертка с материнским вейвлетом  $\varphi(x)$ , представимым в форме линейной комбинации масштабированных и сдвинутых функций в соответствии с масштабирующим соотношением

$$\varphi(x) = \sum_k a_k \varphi(2x + k), \quad (1)$$

где  $a_k$  – весовые коэффициенты;  $k$  – целое число. Высокочастотная фильтрация (ВЧФ) обеспечивается сверткой с вейвлетом вида (1), в котором весовые коэффициенты рассчитываются, исходя из значений коэффициентов  $a_k$  в (1), с обеспечением возможности восстановления исходного сигнала из низкочастотной и высокочастотной составляющих [2–5].

В схеме рис. 1 после разделения сигнала на две частотные полосы осуществляется прореживание с коэффициентом 2 полученных последовательностей (обозначено на рис. 1 как  $\downarrow 2$ ), что обеспечивает двукратное уменьшение масштаба. Для восстановления сигнала в исходном масштабе прореженные отсчеты заменяются нулями (этот операции обозначена на рис. 1 как  $\uparrow 2$ ), после чего осуществляется интерполяция этих значений при помощи фильтров восстановления (обозначены на рис. 1 как  $\sim\text{НФЧ}$  и  $\sim\text{ВФЧ}$ ).

При интерполяции изображений вейвлет-преобразование можно рассматривать как разделимое преобразование, при котором ДВП выполняется как одномерное, независимо по строкам и столбцам. При преобразовании изображений в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, при  $n = 1$  формируются составляющие LL, HL, LH, HH. Составляющая LL представляет результат низкочастотной фильтрации изображения по строкам и столбцам, HL – высокочастотной фильтрации по строкам и низкочастотной по столбцам, LH – низкочастотной фильтрации по строкам и высокочастотной по столбцам, HH – высокочастотной фильтрации по строкам и столбцам. Составляющая LL соответствует уменьшенной копии изображения, а три другие составляющие характеризуют мелкие высокочастотные детали на изображении. Алгоритм, в общем случае, позволяет масштабировать изображение по каждому направлению с коэффициентом  $2^n$ , где  $n$  – целое число.

Для уменьшения масштаба изображения в 2 раза следует:

- применить свертку по строкам с материнским вейвлетом;
- провести прореживание по строкам;
- применить свертку по столбцам с материнским вейвлетом;
- провести прореживание по столбцам.

Для увеличения масштаба изображения требуется:

- провести вставку нулей вместо ранее прореженных отсчетов по строкам;
- применить свертку по строкам с вейвлетом, обратным материнскому;
- провести вставку нулей по столбцам;
- применить свертку по столбцам с вейвлетом, обратным материнскому.

Для масштабирования изображения в  $2^n$  раз при  $n > 1$  указанную последовательность операций необходимо соответственно повторить.

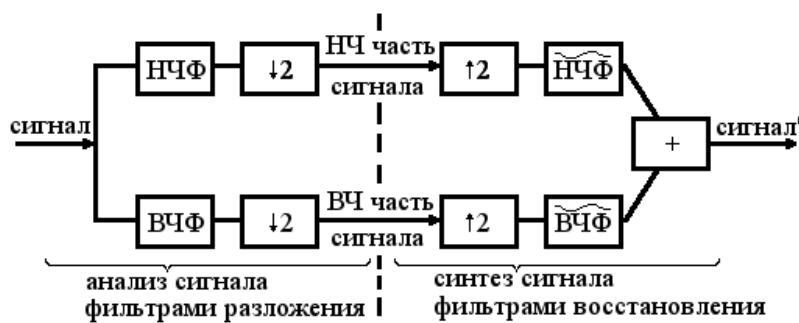


Рис. 1. Схема ДВП для одномерного случая



Рис. 2. Исходное изображение (а) и восстановленные изображения с использованием всех составляющих вейвлет-преобразования (б), при отбрасывании составляющих HL и LH (в) и без учета информации на высоких частотах (г)

Из рис. 2 видно, что обнуление коэффициентов в составляющих LH и HL вносит искажения, сопоставимые со случаем отбрасывания всех высокочастотных составляющих. Ошибка восстановления изображения без учета высокочастотной информации тем больше, чем больше информации выделяется при исходной ВЧФ. Для получения оценок погрешностей требуется выполнить прямое и обратное ДВП изображения и сравнить исходное и восстановленное изображения при учете и без учета высокочастотной информации.

#### Результаты экспериментов

В экспериментах осуществлялось уменьшение и последующее увеличение изображения до первоначального размера, и далее полученное изображение сравнивалось с оригиналом. Использовались тестовые изображения (рис. 3), выбранные из известных баз изображений [6, 7].



Рис. 3. Примеры тестовых изображений: №3 – Lena; №5 – Peppers; №6 – Goldhill; №10 – Mandril; №1 – Zelda; №4 – Golden ball; №9 – Frog; №2 – Hats; №8 – Motocross; №7 – Light house

Искажения при масштабировании оценивались применительно к восьмиразрядным изображениям с использованием критерия пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ)

$$\text{ПОСШ} = 20 \lg(255/\text{СКО}), \text{ дБ},$$

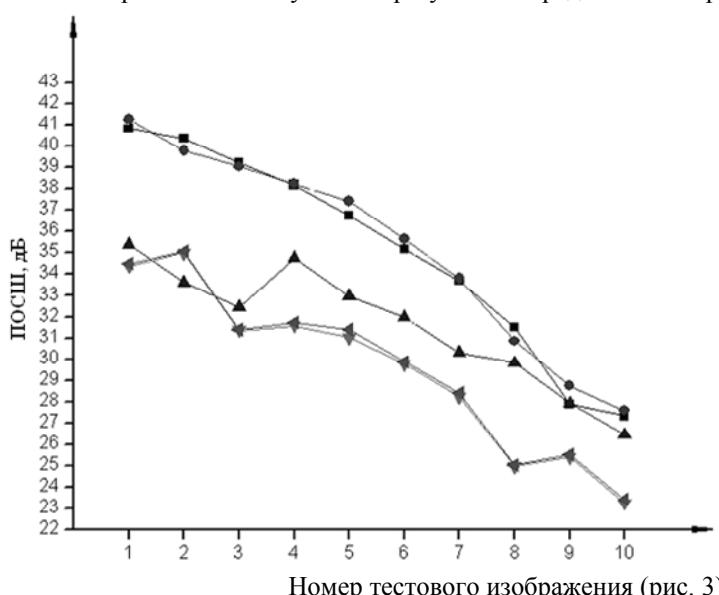
где  $\text{СКО} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y (a_{i,j} - b_{i,j})^2\right)/(XY)}$  – среднее квадратическое отклонение;  $a_{i,j}$  и  $b_{i,j}$  – отсчеты исходного и дважды масштабированного изображения размером  $X \times Y$ .

В таблице представлены результаты оценки ПОСШ для фильтра Коэн–Добеши–Фово 5/3 при различных вариантах не обнуленных коэффициентов преобразования (их обозначения указаны во второй строке заголовка таблицы) для тестовых изображений рис. 3. Из анализа данных, приведенных в таблице, следует, что при увеличении масштаба изображений на основе ДВП использование высокочастотной информации позволяет повысить качество интерполяции.

Название изображения	ПОСШ, дБ		
	LL, HL, LH	LL, HH	LL
Hats	52,3	40,7	40,1
Zelda	49,2	42,3	41,3
Lena	48,4	39,8	39,0
Golden ball	48,3	38,9	38,2
Goldhill	46,0	36,2	35,6
Light house	45,0	34,5	33,9
Peppers	44,4	38,8	37,5
Motocross	42,9	31,5	30,9
Mandril	37,3	28,4	27,7
Frog	34,2	30,4	28,7

Таблица. Оценка ПОСШ при выполнении обратного ДВП (фильтр Коэн–Добеши–Фово 5/3)

Проведено сравнение фильтров Добеши 2, Добеши 9, Коэн–Добеши–Фово 5/3 и 17/11 на десяти указанных выше тестовых изображениях. Полученные результаты представлены кривыми на рис. 4.



Номер тестового изображения (рис. 3)

Рис. 4. Оценка ПОСШ при интерполяции на основе ДВП в зависимости от вейвлет-базиса  
 (◆ – cdf5/3, Коэн–Добеши–Фово 5/3; ▲ – cdf17/11, Коэн–Добеши–Фово 17/11; ▼ – db2, Добеши 2;  
 ▲ – db9, Добеши 9) в сравнении с интерполяцией глобальным кубическим сплайном (■ – gl.cub.spline)

В зависимости от контекста изображения ПОСШ изменяется в широких пределах (в частности, от 34 до 23 дБ для фильтра Добеши 2). Из графиков также видно, что для одного и того же изображения значение ПОСШ существенно зависит от выбора вида вейвлета. Например, для изображения № 1 ПОСШ изменяется от 34 дБ для вейвлета Добеши 2 до 41 дБ при использовании вейвлета Коэн–Добеши–Фово 5/3.

### Заключение

Проведенные исследования искажений при масштабировании цифровых изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования с использованием критерия пикового отношения сигнал/шум показали, что качество интерполяции зависит от видов изображения и вейвлета. Из анализа влияния выбора вида вейвлета следует, что при увеличении масштаба биортогональные фильтры Коэн–Добеши–Фово 5/3 дают лучший результат, чем ортогональные фильтры Добеши и другие рассмотренные фильтры.

Автор выражает признательность научному руководителю Т.Ю. Фисенко за помощь в выполнении настоящей работы и профессору И.П. Гурову за полезное обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### Литература

1. Сугак Р.А. Исследование эффективности алгоритмов интерполяции цифровых изображений при варьируемой разрешающей способностью регистрирующей системы / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова // Труды научно-исследовательского центра фотоники и оптоинформатики. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – С. 382–386.
2. Чуи Ч.К. Введение в вейвлеты. – М.: Мир, 2001. – 412 с.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 464 с.
4. Воробьев В.И., Грибунин В.У. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб: Военный университет связи, 1999. – 203 с.
5. Asamwar R.S., Bhurchandi K.M., Gandhi A.S. Interpolation of images using discrete wavelet transform to simulate image resizing as in human vision //Int. Journal of Automation and Computing. – 2010. – V. 7. – № 1. – P. 9–16.
6. Photo Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.petitcolas.net/fabien/watermarking/image\\_database/](http://www.petitcolas.net/fabien/watermarking/image_database/), свободный. Яз. англ. (дата обращения 16.01.2012).
7. Kodak Lossless True Color Image Suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://r0k.us/graphics/kodak/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 16.01.2012).

**Федоров Дмитрий Александрович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, End-ik@ya.ru

**УДК 53.086**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ МИКРОСКОПИИ С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ**

**И.П. Гуров, Е.В. Жукова, Н.Б. Маргарянц**

Обсуждаются возможности изучения внутренней микроструктуры материалов методом оптической когерентной томографии с перестраиваемой длиной волны ( $1305\pm75$  нм) на примере изучения тканей биологического и искусственного происхождения. Приводятся изображения томограмм (В-сканов) и 3D-изображения областей исследования.

**Ключевые слова:** оптическая когерентная микроскопия, томограмма, микроструктура материалов, диагностика, 3D-изображение.

### Введение

Методы оптической когерентной микроскопии или оптической когерентной томографии (ОКТ) с повышенной разрешающей способностью относятся к современному и интенсивно развивающемуся направлению исследований внутренней микроструктуры материалов и веществ [1]. Успехи в использовании ОКТ-технологий обусловлены появлением новой элементной базы фотоники и электроники, прежде всего источников излучения и видеокамер, и использованием преимуществ современных компьютерных технологий для обработки, анализа и визуализации томограмм.

Традиционная область применения методов ОКТ – это изучение внутренней микроструктуры биологических объектов и сред. В настоящее время происходит расширение области применения ОКТ, например, для обеспечения контроля различных характеристик слоистых материалов, в частности, в целлюлозно-бумажной промышленности и микроэлектронике, и повышения качества продукции [2]. Неоценимую помощь методы ОКТ оказывают в неразрушающих исследованиях предметов искусства, прежде всего живописи, поскольку позволяют визуализировать внутреннюю микроструктуру для оценки необходимости последующей реставрации [3]. Применение ОКТ-технологий включает необходимость разработки специального программного обеспечения, предназначенного для управления системой регистра-

ции и визуализации изучаемых областей с высоким разрешением, без артефактов и с минимальными искажениями.

Перспективы развития ОКТ связывают не только с совершенствованием возможностей аппаратуры и повышением быстродействия вычислительных систем, но и с расширением круга задач, решаемых с помощью методов ОКТ-диагностики. Большинство научных публикаций по тематике ОКТ сосредоточены на конкретных областях применения, преимущественно для решения диагностических задач в биологии и медицине [4].

В настоящей работе представлены результаты поисковых исследований и изучения микроструктуры различных материалов с использованием современного оборудования. Показаны возможности применения метода ОКТ с перестраиваемой длиной волны в изучении сред различного происхождения – биологического (растительного, природного) и искусственного – для выявления возможностей диагностики их микроструктуры.

#### **Метод оптической когерентной микроскопии с перестраиваемой длиной волны**

Принято различать методы ОКТ во временной области и в частотной области [5]. В методах первой группы используется двухлучевой интерферометр с изменяемой оптической длиной пути в опорном плече, что позволяет селектировать слои среды по глубине, по критерию максимума видности интерференционных полос. Поскольку изменению оптической длины пути соответствует изменяется временная задержка, метод принято называть ОКТ во временной области (ОКТВ).

В методах второй группы регистрируется отраженное от объекта излучение для отдельных длин волн (методика подобна использованию набора шкал с различной ценой деления для определения расстояний). Искомой величиной в ОКТ является интенсивность излучения, отраженного от каждого слоя среды. Необходимую информацию можно извлечь, применяя преобразование Фурье к зарегистрированным сигналам в спектральной области, поэтому метод часто называют ОКТ в частотной области (ОКТЧ). Подробное сравнительное описание методов ОКТВ и ОКТЧ приведено в [5].

В системах ОКТ с перестраиваемой длиной волны исследуемый объект освещают последовательно на различных длинах волн с быстрой перестройкой длины волны, что позволяет обеспечить необходимое быстродействие при высокой мощности освещющего пучка и повышает качество получаемых томограмм.

Следует отметить, что наиболее высокое разрешение в боковом направлении (в плоскости поверхности объекта) достигается в системах ОКТ, оснащенных микрообъективами с повышенной апертурой (числовой апертурой более 0,4). Такие системы получили название оптических когерентных микроскопов (ОКМ). Для выполнения исследований нами использовалась модель ОКМ EX1301 производства фирмы Michelson Diagnostics (Великобритания). Конструкция прибора включает лазерный источник излучения HLS-2000-MDL производства фирмы SANTEC (Япония) с перестраиваемой длиной волны зондирующего излучения. Максимум мощности излучения достигает 15 мВт и соответствует длине волны  $1305 \pm 15$  нм при диапазоне перестройки длины волны в пределах 150 нм.

Преимущество данной модели ОКМ состоит в использовании многоканальной оптической системы фокусировки лазерного излучения, которая включает четыре микрообъектива с одновременной фокусировкой на разных глубинах по толщине образца. Томограмма исследуемой области формируется за счет информации, поступающей одновременно со всех каналов. Общая глубина фокусировки равна примерно 1 мм, при этом каждый канал обеспечивает фокусировку в пределах 0,25 мм. Оптическое разрешение ОКМ по глубине исследуемого образца (аксиальное разрешение) составляет около 10 мкм, а боковое (латеральное) разрешение не хуже 7,5 мкм. С помощью микроскопа можно получать томограммы в пределах участка шириной до 7 мм.

На рис. 1 показано, как ориентирован исследуемый образец при сканировании. Размер В-скана зависит от выбранной ширины области сканирования (0,1–7 мм), а отображаемый на экране монитора диапазон глубин достигает 2 мм. Информативность экспериментальных данных, регистрируемых в пределах изучаемого объема ( $XYZ$ ), зависит от шага бокового сканирования по второй координате ( $\Delta Y$ ), минимальное значение которого равно 1 мкм при использовании специальных микропозиционеров, управляемых от компьютера. Быстродействие регистрирующей системы позволяет выполнять запись информации со скоростью до 5 кадров в секунду при ширине исследуемого участка 5 мм. Уменьшая ширину В-скана до 0,1 мм, можно вести запись со скоростью до 35 кадров в секунду при изучении динамических процессов.

#### **Результаты экспериментальных исследований**

Для демонстрации возможностей метода оптической когерентной микроскопии при изучении микроструктуры случайно-неоднородных и слоистых сред вначале был использован образец растительной ткани *перикарпия* плода сладкого перца. В фармацевтической промышленности используют методы классической микроскопии при диагностике состояния тканей этого плода для последующего технологического применения.

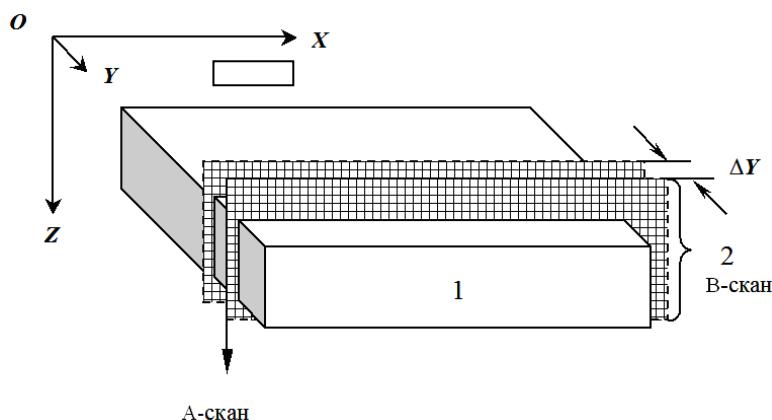


Рис. 1. Позиционирование исследуемого образца в процессе сканирования: 1 – образец; 2 – В-скан; система координат XYZ определяет положение образца и ориентацию восстановленного 3D-изображения

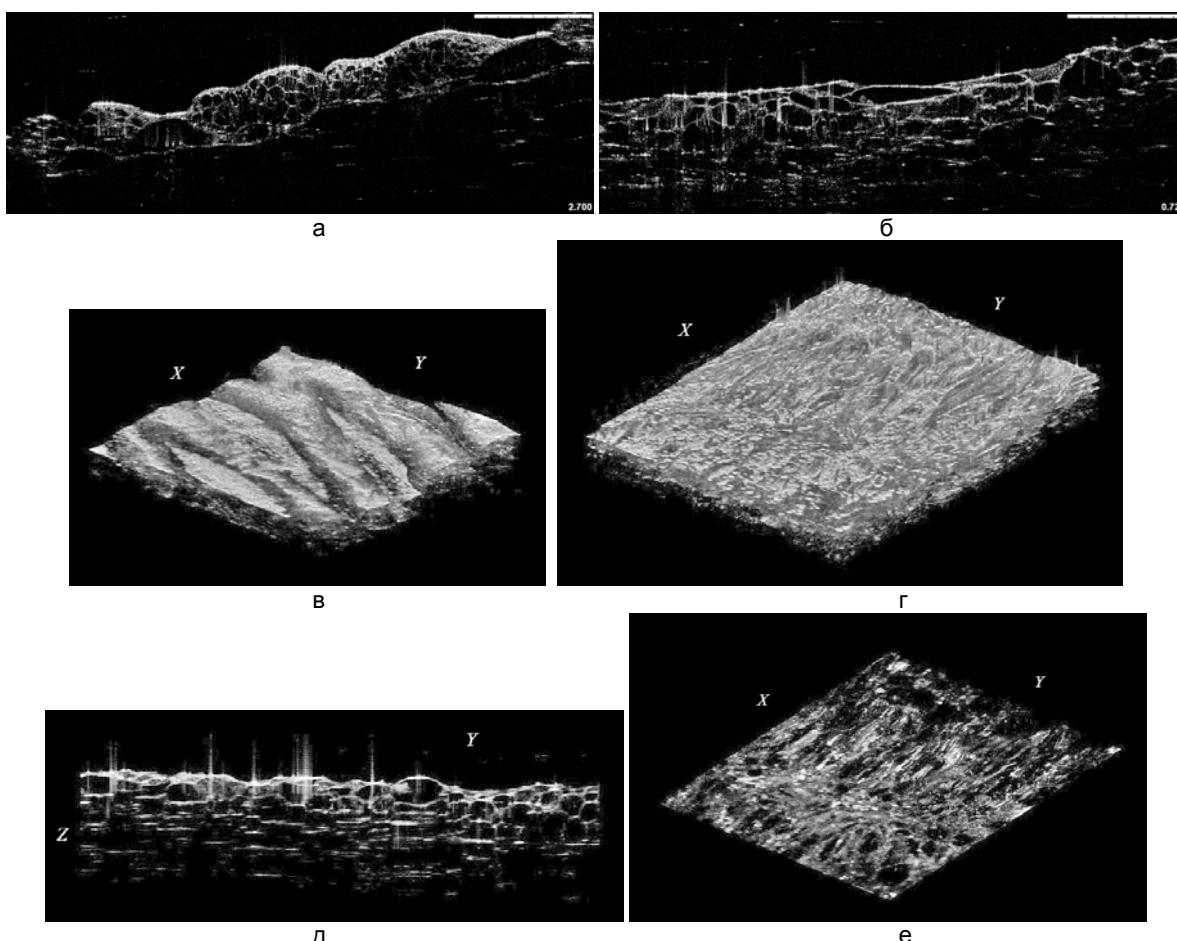


Рис. 2. Строение тканей перикарпия плода сладкого перца: томограмма (В-скан) ткани эндокарпия (а); томограмма (В-скан) ткани экзокарпия (б); 3D-изображение ткани эндокарпия ( $x=2,53$  мм;  $y=2,99$  мм;  $z=1,35$  мм) (в); 3D-изображение ткани экзокарпия ( $x=3,73$  мм;  $y=2,99$  мм;  $z=1,71$  мм) (г); изображение сечения ткани экзокарпия ( $x=0,06$  мм;  $y=2,99$  мм;  $z=1,71$  мм) (д); 3D-изображение слоя ткани экзокарпия ( $x=3,73$  мм;  $y=2,99$  мм;  $z=0,06$  мм) (е). Размер В-сканов – 5×2 мм

С помощью метода оптической когерентной микроскопии были изучены наружный слой (экзокарпий) и внутренний слой (эндокарпий), которые выполняют разные функции и имеют соответственно разное строение ткани. В спектральной области исследования ткани перикарпия прозрачны для зондирующего лазерного излучения, и оно проникает на значительную глубину. Благодаря эффектам отражения от внутренних микронеоднородностей строение ткани наглядно визуализируется, и получаемые данные пригодны для анализа.

На рис. 2 приведены результаты исследования перикарпия. Микроструктура ткани хорошо видна на В-сканах (рис. 2, а, б). Из сравнения томограмм тканей экзокарпия и эндокарпия видно, что размеры

клеток для эндокарпия можно отнести к диапазону значений 125–800 мкм, именно они содержат необходимые для развития плода и семян питательные вещества. Клетки экзокарпия первыми начинают терять влагу в процессе высыхания, строение их клеток отличается от клеток внутреннего слоя перикарпия.

О форме строения клеток можно судить по реконструированным 3D-изображениям исследуемых областей (рис. 2, в, г). Восстановление трехмерного изображения выполнено при сканировании поверхности площадью  $5 \times 3$  мм с шагом регистрации В-сканов  $\Delta y = 0,01$  мм с использованием программного обеспечения ОКМ. Ценность реконструированного 3D-изображения состоит в том, что получаемая информация дает возможность изучать строение тканей в разных сечениях. Так, на рис. 2, д, показано сечение ткани экзокарпия в направлении оси ( $OY$ ), т.е. в направлении бокового сканирования (рис. 1, б). Изображение показано для слоя толщиной примерно 60 мкм.

Другой пример – это изображение сечений в горизонтальной плоскости ( $XOY$ ) (или С-скан) (рис. 2, е). На этом сечении ткани экзокарпия видно, что имеются участки, которые сильно переотражают и рассеивают лазерное излучение. Из анализа изображений, полученных методом оптической когерентной микроскопии, видно, что поверхностные клетки экзокарпия извилистые, многоугольчатые и с утолщенными стенками, а внутренние клетки эндокарпия узкие, вытянутые, стенки утолщены благодаря содержанию влаги. Экзокарпий имеет кожистое строение эпидермиса, а эндокарпий содержит у поверхности волокнистую структуру.

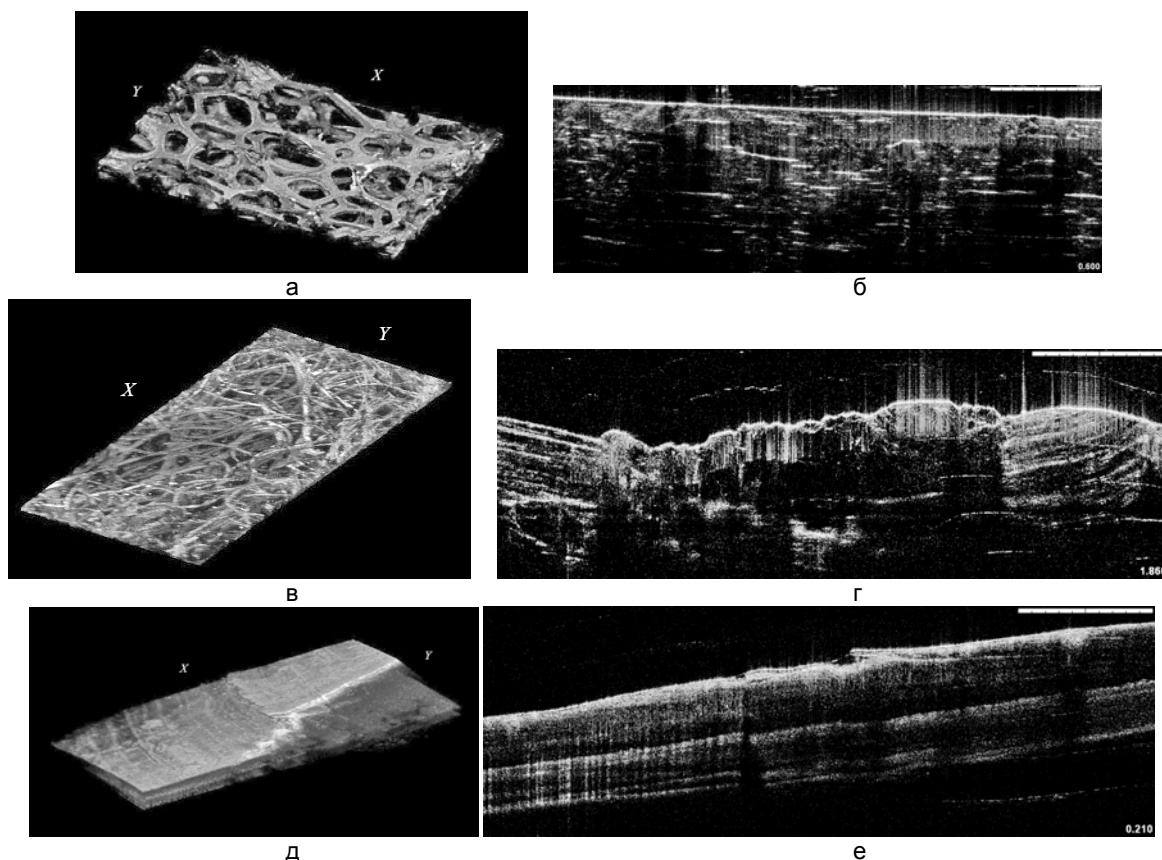


Рис. 3. 3D-изображения и томограммы материалов разного происхождения: 3D-изображение поролона ( $x=2,86$  мм;  $y=2,01$  мм;  $z=0,92$  мм) (а); томограмма (В-скан) поверхности гранита (б); 3D-изображение технической вискозной ткани ( $x=3,20$  мм;  $y=1,49$  мм;  $z=0,10$  мм) (в); томограмма (В-скан) поверхности пирита (г); 3D-изображение раковины речной жемчужницы (*Anodonta cygnea L.*) ( $x=4,99$  мм;  $y=2,99$  мм;  $z=1,07$  мм) (д); томограмма (В-скан) строения раковины моллюска (е). Размер В-сканов –  $5 \times 2$  мм

Были также выполнены экспериментальные исследования микроструктуры сред искусственного происхождения. На рис. 3, а, приведено 3D-изображение образца поролона, который получают путем вспенивания полиуретана. Материал широко используется в технике и производстве благодаря его мягкости, а также хорошим показателям эластичности. Однако поролон имеет свойство желтеть под действием УФ лучей, а при длительной эксплуатации материал теряет упругость, начинает крошиться и слипаться. Размеры пор влияют на впитывающие и теплоизоляционные свойства материала.

Видно, что структура материала имеет тонкостенную ячеистую структуру, диаметр пор в данном образце изменяется от 100 мкм до 550 мкм. Информация, получаемая методом оптической когерентной микроскопии, позволяет оптимизировать технологические режимы производства материала.

На рис. 3, в, показано изображение трехмерного слоя технического вискозного волокна, смоченного водой. Можно наблюдать эффект отражения излучения на участках волокон, которые хорошо впитывают влагу. Эти участки характеризуются на изображении большей яркостью. Толщина волокон в данном образце составляет около 60 мкм.

Особый интерес представляют исследования природных минералов. Известно, что метод оптической когерентной микроскопии успешно использовался для изучения нефрита [6]. В наших исследованиях были исследованы два минерала: широко распространенный камень – гранит и образец пирита, который образуется в осадочных горных породах черных глинистых сланцев. Карельский гранит имеет зернистую структуру, образец имел розовую окраску с небольшими вкраплениями черного биотита. В состав изучаемого образца гранита, как показали исследования, входит по всей толще в значительной части мусковит, или калиевая слюда, которая характеризуется слоистой структурой. Биотит, важнейший породообразующий минерал, также имеет слоистое строение. Лазерное излучение проникает в образец почти на всю глубину, доступную для наблюдения, что видно из строения минерала на томограмме (рис. 3, г). Образец пирита состоял из мелкозернистых кристаллических агрегатов сульфида железа. Изображение на томограмме в левой части рис. 3, г, указывает на присутствие достаточно большого кристалла кубического строения – сульфида железа с гранью размером около 1000 мкм.

Были выполнены также эксперименты по изучению строения материала раковины речной жемчужницы (моллюска). 3D-изображение показано на рис. 3, д. На внешней стороне раковины просматриваются годовые кольца, а на внутренней стороне, обращенной к телу моллюска – слой перламутра, толщина которого изменяется по сечению раковины и составляет около 350 мкм.

### Заключение

В результате выполнения экспериментальных исследований можно сделать выводы о ряде возможных и перспективных применений метода оптической когерентной микроскопии с перестраиваемой длиной волны.

Регистрация томограмм в области  $1305 \pm 75$  нм позволяет визуализировать внутреннюю структуру веществ и тканей, которые принадлежат искусственным материалам и тканям естественного природного происхождения. В каждом конкретном случае результат зависит от оптических свойств веществ, входящих в состав образца, а именно – от коэффициентов поглощения и рассеяния. Учитывая разрешающую способность данного ОКМ, можно визуализировать структурные элементы с размерами более 10 мкм. Имеется возможность исследовать внутреннюю микроструктуру промышленных материалов, оценить взаимное расположение пустот, их размеры и толщину стенок, что видно на примере материала поролона и вискозной технической ткани.

Перспективной представляется задача изучения микроструктуры минералов, как это показано на примере изображений микроструктуры гранита и пирита. Камни природного происхождения применяются при изготовлении предметов монументального искусства, а также в декоративном искусстве, и выявление их внутренней микроструктуры вблизи поверхности очень полезно на этапах оценки их состояния и принятия решения о методах реставрации. Изучение сложных слоистых тканей животного происхождения в ряде случаев затруднено из-за их хрупкости, при этом использование методов оптической когерентной микроскопии обеспечивает неразрушающую диагностику таких материалов.

Таким образом, круг задач, в которых целесообразно использовать метод оптической когерентной микроскопии, достаточно широк. Приведенные выше результаты показывают возможности эффективного применения ОКМ в материаловедении, для изучения предметов искусства, визуализации внутренней микроструктуры материалов различной физической природы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### Литература

1. Fercher A.F. Optical coherence tomography – development, principles, applications // J. Med. Phys. – 2010. – V. 20. – № 4. – P. 251–276.
2. Гуров И.П. Компьютерная фотоника: принципы, проблемы и перспективы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2005. – № 21. – С. 5–20.
3. Adler D.C., Stenger J., Gorczynska I., Lie H., Hensick T., Spronk R., Wolohojian S., Khandeka N., Jiang J.Y., Barry S., Cable A.E., Huber R., Fujimoto J.G. Comparison of three-dimensional optical coherence tomography and high resolution photography for art conservation studies // Opt. Expr. – 2007. – V. 15. – № 24. – P. 15972–15985.
4. Zysk A.M., Nguyen F.T., Oldenburg A.L., Marks D.L., Boppart S.A. Optical coherence tomography: a review of clinical development from bench to bedside // J. Biomed. Opt. – 2007. – V. 12. – № 5. – P. 051403–1–051403–21.

5. Васильев В.Н., Гуров И.П. Сравнительный анализ методов оптической когерентной томографии // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 30–40.
6. Chang S., Mao Y., Flueraru C., Chang G. Optical coherence tomography used for jade industry // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7855. – P. 785514–1–785514–9.

**Гуров Игорь Петрович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gurov@mail.ifmo.ru

**Жукова Екатерина Владимировна**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, zhukova-ifmo@mail.ru

**Маргарянц Никита Борисович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, старший преподаватель, fosp@grv.ifmo.ru

**УДК 004.33.07/08; 004.33; 004.08**

## **АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМАТОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ**

**П.С. Скаков**

Рассматривается выбор оптимального формата представления изображений, получаемых методами оптической когерентной томографии при исследованиях микроструктуры случайно-неоднородных сред. Проведен анализ форматов, удовлетворяющих требованиям предметной области, и рассмотрены результаты экспериментальной проверки эффективности представления изображений в различных форматах. Приводятся рекомендации по использованию форматов и выбору их параметров.

**Ключевые слова:** оптическая когерентная томография, обмен данными, кодирование, представление изображений.

### **Введение**

При использовании методов оптической когерентной томографии (ОКТ) обеспечивается получение информации о внутренней микроструктуре исследуемых объектов с высокой разрешающей способностью. В системах широкопольной ОКТ, когда регистрация излучения, отраженного от объекта, осуществляется при помощи видеокамеры, требуется обрабатывать и хранить сотни видеокадров, при этом объем данных может достигать сотен мегабайт и более. При получении информации о трехмерной микроструктуре объектов необходимо обеспечивать эффективное сжатие при хранении таких данных. С другой стороны, применение в медицинской диагностике накладывает существенные ограничения на возможные методы сжатия томограмм, так как алгоритмы сжатия с потерями приводят к искажению изображения и появлению различного вида артефактов, которые могут быть ошибочно интерпретированы как наличие или отсутствие каких-либо существенных признаков проводимого медицинского исследования. Таким образом, до проведения подробного изучения предметной области на допустимые искажения изображений в качестве возможных форматов хранения следует рассматривать только форматы сжатия без потерь.

Необходимо отметить, что внутренний формат хранения изображений в системе может отличаться от предоставляемого пользователям формата. Это связано с различиями в требованиях к внутреннему хранению данных и обмену данными с другими системами. При внутреннем хранении решающее значение имеют степень сжатия для максимального уменьшения объема данных и скорость обработки, обеспечиваемая, в частности, при использовании специализированных аппаратных блоков. При обмене с другими системами уровень сжатия и скорость обработки остаются важными, но на первый план выходит требование обеспечения совместимости при переносе данных. Для медицинских исследований это особенно важно, так как может потребоваться доступ к данным с самого разнообразного и заранее неизвестного оборудования, причем возможность легкой и правильной интерпретации представления должна обеспечиваться в течение длительного периода до нескольких десятков лет.

Далее будем рассматривать форматы представления изображений для обмена данными с другими системами.

### **Описание рассматриваемых форматов файлов**

Из стандартных форматов хранения изображений без потерь были рассмотрены широко распространенные форматы PNG, TIFF (со сжатием packbits, lzw, deflate), несколько менее известные JPEG 2000, JPEG LS, а также вариант сжатия последовательности кадров как видеоданных с использованием формата H.264.

Формат PNG [1] является в настоящее время одним из самых распространенных форматов представления изображений без потерь. Поддерживаются изображения с числом каналов от 1 до 4 (предполагается модель RGB) и точностью от 1 до 16 бит на компонент каждого из каналов. Данные сжимаются по алгоритму Deflate, представляющим собой комбинацию LZ77 и кодирования Хаффмана. Перед сжатием есть возможность проведения предварительной фильтрации с целью улучшения сжимаемости. В качестве вычитаемого предиктора можно выбрать один из пяти вариантов: 0 – нет фильтрации, 1 – сосед слева, 2 – сосед сверху, 3 – среднее арифметическое соседей слева и сверху, 4 – фильтр Paeth: сосед слева (A), сверху (B) или слева-сверху (C) в зависимости от того, какое значение ближе к  $A+B-C$ . Фильтрацию можно выбирать независимо по каждой линии изображения, что породило различные эвристики, называемые в программах вариантами фильтрации 5, 6 и т.д. Кроме хранения информации непосредственно об изображении, возможно внедрение в файл дополнительной метаинформации, в том числе текстовой, что, тем не менее, поддерживается конкретными реализациями весьма редко.

Формат TIFF [2] следует скорее считать контейнером, чем некоторым конкретным форматом представления, так как формат хорошо расширяем, спецификация описывает большое число поддерживаемых цветовых пространств, форматов значений, вариантов сжатия и представления метаинформации. Кроме того, на практике часто можно встретить специфические форматы изображений, построенные на основе TIFF, но использующие собственные нестандартные методы сжатия – например, многие RAW-файлы цифровой фотографии. Из описанных в спецификации TIFF 6.0 нас будут интересовать форматы сжатия packbits, LZW, а также Deflate из TIFF Specification Supplement 2. Перед сжатием перечисленными универсальными алгоритмами есть возможность провести один из видов фильтрации: 1 – нет фильтрации, 2 – горизонтальное предсказание (подобно методу 1 в PNG), 3 – предсказание для данных в формате с плавающей точкой (Specification Supplement 3).

Необходимо отметить, что TIFF является единственным из рассмотренных форматов представления изображений, который поддерживает многостраничные изображения и был протестирован как в варианте отдельного файла на каждый кадр, аналогично другим форматам, так и в виде одного многостраничного файла на все изображение (обозначенного как TIFF-M). Однако крайне обширная спецификация формата привела на практике к тому, что полностью весь стандарт практически никем не реализуется, и заранее трудно оценить, какой процент реализаций поддерживает выбранные возможности.

Формат JPEG 2000 [3] был разработан Joint Photographic Experts Group в 2000 г. в качестве замены JPEG, но до сих пор не получил широкого распространения и практически неизвестен на фоне своего крайне популярного предшественника, разработанного той же группой в 1992 г. По своему внутреннему формату JPEG 2000 отличается от JPEG весьма радикально: используется вейвлет-преобразование вместо дискретного косинусного преобразования, контекстное арифметическое сжатие вместо кодирования Хаффмана, поддерживается режим без потерь и множество дополнительных возможностей, таких как масштабируемость (возможность представления изображения в разных разрешениях), произвольный доступ к кодовому потоку и т.д. Необходимо отметить, что, несмотря на добавление в стандарт JPEG режима без потерь и арифметического сжатия, эти возможности не получили распространения и практически никем не поддерживаются в настоящее время, что исключает его из кандидатов для формата обмена изображениями.

Формат JPEG LS [4] был разработан в 1999 г. для кодирования изображений без потерь в качестве замены неудачного режима без потерь стандарта JPEG. Формат не получил широкого распространения, но заслуживает рассмотрения как имеющий несколько аппаратных и открытых программных реализаций и используемый в отдельных разработках медицинской техники. Кодирование состоит из декорреляции на основе LOCO-I предсказания, контекстного моделирования и финального кодирования комбинацией кодов Голомба и RLE.

Кроме форматов представления непосредственно изображений, была также проверена возможность кодирования изображений как видеоданных в формате H.264 [5]. Стандарт H.264 представляет собой способ кодирования видео, использующий современные технологии для повышения степени и качества сжатия; хорошо поддерживается как программно, так и аппаратно; имеет варианты сжатия без потерь и точность более 8 бит на компонент, но поддерживаются такие возможности существенно реже, особенно если рассматривать аппаратные реализации. Отличительной особенностью данного представления является возможность кодировщика не просто обрабатывать каждое изображение отдельно, но еще и ссылаться на информацию в соседних кадрах. Данный подход заметно замедляет не только кодирование, но и декодирование, так как для получения данных некоторого кадра может потребоваться также декодировать еще и десятки других кадров, но, как правило, позволяет получить существенно лучшее сжатие.

### Экспериментальные результаты

В качестве тестовых изображений были выбраны несколько изображений, полученных различными методами. На рис. 1 представлены кадры изображений «Лист» и «Личинка», полученных при использовании метода спектральной ОКТ.

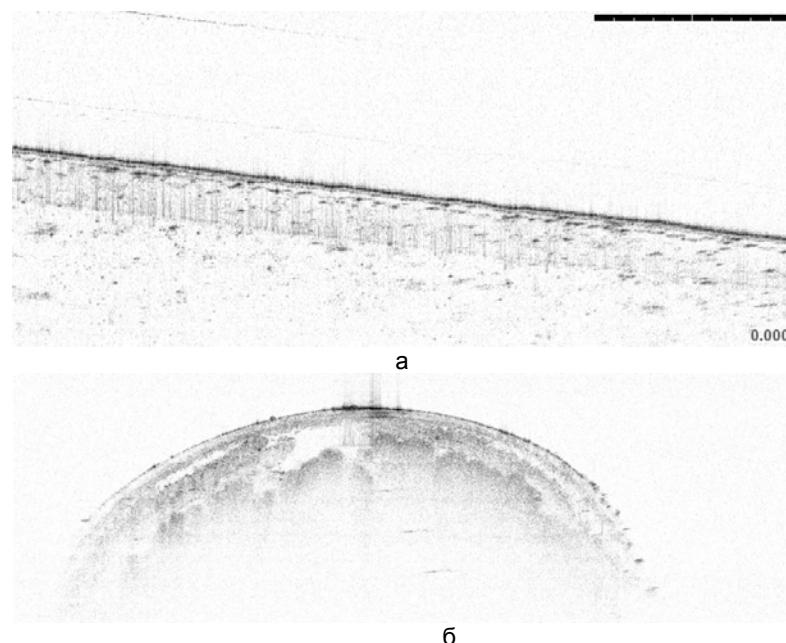


Рис. 1. Первый кадр изображения «Лист», 971x416 пикселей, 400 кадров, 8 бит (а); пятисотый кадр изображения «Личинка», 1300x416 пикселей, 1069 кадров, 8 бит (б)

На рис. 2 представлены кадры из изображений, полученных методом корреляционной ОКТ для различных видов бумаги.

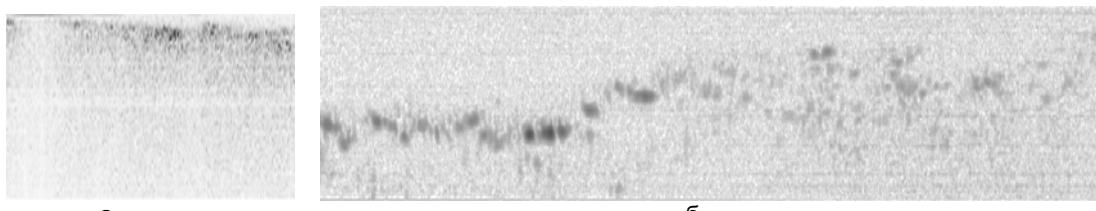


Рис. 2. Первые кадры изображений «Бумага 1», 640x1000 пикселей, 1069 кадров, 8 бит (а), и «Бумага 2» 1280x277 пикселей, 640 кадров, 8 бит (б)

Результаты кодирования тестовых изображений в соответствии с рассматриваемыми форматами приведены в табл. 1. Необходимо учитывать, что большинство современных форматов сжатия стандартизированы через спецификацию алгоритма декодирования, что означает возможность изменения алгоритма сжатия и получаемой степени сжатия при одинаковом соответствии некоторому стандарту. В случаях, когда формат поддерживал несколько видов фильтрации или реализация предоставляла расширенные возможности по настройке алгоритма сжатия, выбирался наилучший результат.

По полученным данным можно сделать вывод, что самое компактное представление в большинстве случаев обеспечивает формат PNG, однако в зависимости от используемой реализации размер результата может отличаться до 17% даже при оптимальном выборе всех параметров. Формат стандартизирован и широко распространен, что означает хорошую совместимость и простоту реализации преобразований при работе с этим форматом.

Из остальных форматов необходимо выделить многостраничный TIFF со сжатием Deflate, как обеспечивающий представление в виде одного файла в сочетании с довольно компактным представлением и невысокой вычислительной сложностью. Кроме этого, в связи с использованием алгоритма, подобного применяемому в PNG, можно ожидать уменьшения размера еще до нескольких десятков процентов при более точной настройке параметров алгоритма сжатия.

Из недостатков TIFF Deflate следует отметить описание Deflate лишь в расширенном стандарте формата, что может привести к несовместимости с оборудованием, реализующим только базовую спецификацию TIFF 6.0. К недостаткам TIFF следует отнести также недостаточный выбор вариантов предварительной фильтрации, что обусловило большой проигрыш формату PNG на изображениях корреляционной ОКТ: на рассмотренных изображениях оптимальной фильтрацией является, как будет показано далее, предсказание на основе соседа сверху – режим, присутствующий в PNG, но не в TIFF. При пово-

роте изображений на 90° появляется возможность использовать оптимальный предиктор слева, и TIFF Deflate дает близкую к PNG степень сжатия аналогично изображениям спектральной ОКТ.

	«Лист»	«Личинка»	«Бумага 1»	«Бумага 2»
Без сжатия TIFF-M	157 863	565 420	319 451	221 749
TIFF-M packbits	126 497	435 663	321 503	180 810
TIFF packbits	126 352	435 671	321 525	180 585
TIFF-M lzw	85 564	285 524	268 369	58 221
TIFF lzw	101 349	285 532	268 391	66 050
TIFF-M deflate	77 324	259 050	210 450	58 270
TIFF deflate	84 845	259 059	210 472	63 062
PNG 7zip	70 006	231 997	86 632	43 054
PNG kzip	<b>67 643</b>	<b>224 685</b>	86 494	<b>42 877</b>
PNG zlib	68 044	225 109	88 576	50 140
JPEG-LS	88 691	298 756	80 842	107 104
JPEG 2000	104 626	360 432	<b>57 387</b>	145 007
H.264	78 134	269 537	84 212	65 339

Таблица 1. Размер файлов для различных форматов сжатия, КБ

Неожиданно плохо показало себя сжатие последовательности кадров как видеоданных в формате H.264. Несмотря на межкадровое сжатие и более сложные алгоритмы по сравнению с другими рассмотренными форматами, на проанализированных образцах значительного выигрыша в степени сжатия обнаружено не было.

#### Оптимизация параметров формата PNG

Формат PNG показал в среднем наилучшие результаты, и целесообразно более подробно остановиться на его параметрах. Как уже упоминалось, формат поддерживает различные варианты предварительной фильтрации, кроме того, реализации часто предоставляют возможность настроить отдельные параметры алгоритма Deflate. В зависимости от выбранных значений разница в размерах получаемых файлов может достигать нескольких раз, превышая разницу между различными форматами с оптимальным выбором параметров.

В табл. 2 приведены результаты выбора различных видов фильтрации при оптимальном выборе стратегии Deflate из библиотеки zlib. Хорошо видно, что оптимальный тип фильтрации связан с видом метода ОКТ: для изображений, полученных в результате спектральной ОКТ, наилучшим вариантом является отсутствие предварительной фильтрации (тип 0), тогда как для корреляционной ОКТ наилучшим получилось предсказание на основе соседа сверху (тип 2), что при другой ориентации изображения будет соответствовать соседу слева (тип 1).

	«Лист»	«Личинка»	«Бумага 1»	«Бумага 2»
0 (нет)	<b>68 044</b>	<b>225 109</b>	215 094	53 718
1 (слева)	90 990	311 511	206 048	61 252
2 (сверху)	88 581	299 784	<b>88 576</b>	<b>50 140</b>
3 (слева и сверху)	94 041	322 788	168 349	89 613
4 (Paeth)	94 355	326 124	88 758	51 804

Таблица 2. Размер файлов в зависимости от типа фильтрации PNG, КБ

Влияние стратегии сжатия Deflate на размер приведено в табл. 3, тип фильтрации был выбран оптимальным. Библиотека zlib в качестве реализации Deflate была выбрана по причине ее популярности в практических применениях. Наилучшее сжатие достигалось при выборе стратегии Huffman only, причем для всех изображений. Необходимо отметить, что стратегия Huffman only превзошла остальные варианты не только по степени сжатия, но по скорости: в 3 раза быстрее обычно используемых стратегий Default/Filtered и Fixed на минимальном сжатии, в 6,5 раз – на максимальном, незначительно быстрее RLE.

Из различных реализаций Deflate наилучшее сжатие было получено при использовании варианта kzip, но из-за закрытости и недоступности данной реализации даже в виде отдельной библиотеки полученные результаты представляют лишь общий интерес с малой вероятностью встретить их на практике.

	«Лист»	«Личинка»	«Бумага 1»	«Бумага 2»
Default, min	75 595	252 459	96 068	54 585
Default, max	74 507	248 084	92 923	51 290
Filtered, min	72 849	243 696	94 711	54 771
Filtered, max	72 243	240 877	91 698	51 549
Huffman only	<b>68 044</b>	<b>225 109</b>	<b>88 576</b>	<b>50 140</b>
RLE	71 068	238 102	92 257	53 507
Fixed, min	87 471	293 115	125 103	66 236
Fixed, max	86 166	288 037	120 685	63 174

Таблица 3. Размер файлов в зависимости от стратегии алгоритма Deflate, КБ

**Заключение**

На основании полученных результатов можно рекомендовать в качестве формата обмена данными для медицинских систем ОКТ следующие форматы:

1. PNG – самое компактное представление, очень хорошая совместимость, простота реализации;
2. многостраничный TIFF со сжатием Deflate – по степени сжатия и совместимости несколько проигрывает PNG, но дает возможность хранения изображения в одном файле вместо нескольких сотен для варианта 1;
3. PNG-файлы, упакованные в ZIP-архив без сжатия – альтернативный вариант для представления изображения одним файлом с сохранением всех достоинств варианта 1 и лишь незначительным усложнением реализации.

При выборе формата PNG для изображений, полученных в результате спектральной ОКТ, не следует использовать фильтрацию (тип 0), для корреляционной ОКТ – использовать фильтрацию с предсказанием соседом слева (тип 1) или сверху (тип 2) в зависимости от ориентации изображения. Если реализация Deflate позволяет выбрать стратегию, следует выбирать Huffman only, что даст выигрыш как в степени сжатия, так и в скорости.

При выборе формата TIFF Deflate для изображений корреляционной ОКТ поворот изображения на 90° может дать выигрыши или проигрыши в сжатии в несколько раз.

И PNG, и TIFF поддерживают внедрение произвольных метаданных, но для хранения дополнительной информации (о пациенте, условиях проводимого исследования, и т.д.) в целях совместимости все же не рекомендуется использовать данную возможность как редко реализуемую на практике. Представление такой информации в простом текстовом виде обеспечит наилучшую переносимость, доступность и понятность для пользователей системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Литература**

1. World Wide Web Consortium (W3C). PNG Portable Network Graphics (PNG) Specification (Second Edition) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/PNG/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).
2. Adobe TIFF Resources page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://partners.adobe.com/public/developer/tiff/index.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).
3. JPEG Committee. Final JPEG 2000 ISO/IEC 15444 drafts page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jpeg.org/jpeg2000/CDs15444.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).
4. JPEG Committee. JPEG-LS home page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jpeg.org/jpeg/jpeqls.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).
5. ITU-T publication page: H.264: Advanced video coding for generic audiovisual services [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.264>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).

**Скаков Павел Сергеевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, pavelsx@gmail.com

**3****ЛАЗЕРНЫЕ И БИОМЕДИЦИНСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 621.375.826

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ****ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ МАТЕРИАЛОВ****В.П. Вейко, А.А. Кишалов, Т.Ю. Мутин, В.Н. Смирнов**

Изложены основные механизмы лазерной очистки металлических поверхностей. Приведены результаты экспериментов по лазерной очистке с применением двух типов лазеров: лазера на длине волны 1,07 мкм с длительностью импульса 200 нс и энергией импульса 1 мДж и лазера на длине волны 1,064 мкм с длительностью импульса 10 нс и энергией импульса 20 мДж. Показаны области применения лазерной очистки и ее перспективы.

**Ключевые слова:** лазерная очистка, волоконный лазер, YAG:Nd лазер, гигантский импульс.

**Введение**

В процессе производства и эксплуатации машин и механизмов их детали подвергаются металлургическим, механическим, химическим и термическим воздействиям, которые приводят к значительным изменениям в поверхностном слое. Под влиянием технологических процессов сварки, прокатки, волочения, кузнечно-прессовой обработки, течения, фрезерования, шлифования и других видов механической обработки, а также в процессе эксплуатации на поверхности появляются различного рода загрязнения, как неорганические – окисные пленки, ржавчина, окалина, так и органические – остатки смазочных и охлаждающих жидкостей (СОЖ), масляные пятна и т.д. Все это оказывает неблагоприятное влияние на физико-химические, механические, трибологические и другие эксплуатационные характеристики поверхности и поверхностного слоя, ухудшая механические свойства, уменьшая коррозионную стойкость, снижая мало- и многоцикловую усталостную прочность и другие характеристики деталей машин и механизмов [1].

Если на поверхность детали должны наноситься покрытия (гальванические, лакокрасочные, защитно-декоративные, газотермические и др.), то неудовлетворительное состояние поверхности приводит к резкому уменьшению адгезионной прочности нанесенного покрытия с поверхностью детали и его отслаиванию в процессе эксплуатации.

Традиционно дефекты поверхности и поверхностного слоя металла, органические и неорганические загрязнения удаляются механической, ультразвуковой, химической и электрохимической обработками. К ним относятся шлифование, полирование, крацевание, струйно-абразивная обработка, обезжиривание, травление, активирование.

Химические методы очистки поверхности от загрязнений органического характера имеют такие недостатки, как низкая производительность, потребность в расходных материалах, а также создают экологические проблемы. Кроме того, химические методы очистки позволяют удалять не все виды загрязнений и не позволяют удалять дефекты поверхностного слоя. Основными способами механической обработки поверхности являются шлифование, полирование, крацевание, виброобработка, струйная абразивная и гидроабразивная обработка. Недостатками этих технологий являются остатки абразивов на поверхности обрабатываемых деталей, а также, зачастую, высокие энергозатраты.

Технология лазерной очистки лишена подобных недостатков, так как является бесконтактным, безабразивным, высокопроизводительным и экологически чистым способом очистки поверхностей перед проведением различных технологических операций, в том числе покраски, нанесения защитных покрытий, сварки и т.д. Однако до недавнего времени применение лазерной очистки ограничивалось высокой стоимостью лазеров и их недостаточной надежностью. Ситуация коренным образом изменилась с появлением волоконных лазеров, чьи срок службы и надежность, высокий КПД, стабильность параметров и удобство использования с лихвой окупают издержки на их приобретение и эксплуатацию.

Цель представленной работы состоит в том, чтобы на основе анализа механизма лазерной очистки выявить ее основные возможности и разновидности, опробовать и рекомендовать предпочтительные области ее применения в приборо- и машиностроении.

**Механизм лазерной очистки**

Рассмотрим действие лазерного импульса на загрязненную металлическую поверхность. В большинстве случаев поверхность металла загрязнена неметаллическими веществами, такими как ржавчина, оксидные пленки, масло и остатки СОЖ. Распространение света в веществе, как правило, описывается законом Бугера–Ламберта–Бера:

$$q(x) = q_0(1 - R) \exp(-\lambda x), \quad (1)$$

где  $q_0$  – плотность мощности излучения, падающего на поверхность материала;  $q(x)$  – плотность мощности излучения на глубине  $x$ ;  $R$  – коэффициент отражения вещества;  $\lambda$  – показатель поглощения вещества.

Показатель поглощения металлов на длине волны 1,06 мкм составляет  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  см $^{-1}$ , тогда как показатель поглощения неметаллических веществ на несколько порядков ниже и составляет  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  см $^{-1}$ . Из соотношения (1) следует, что металлы на этой длине волны поглощают излучение лазера в тонком поверхностном слое, тогда как неметаллические вещества имеют объемное поглощение. Таким образом, для толщин в несколько сотен микрометров допустимо считать, что слой загрязнения относительно прозрачен.

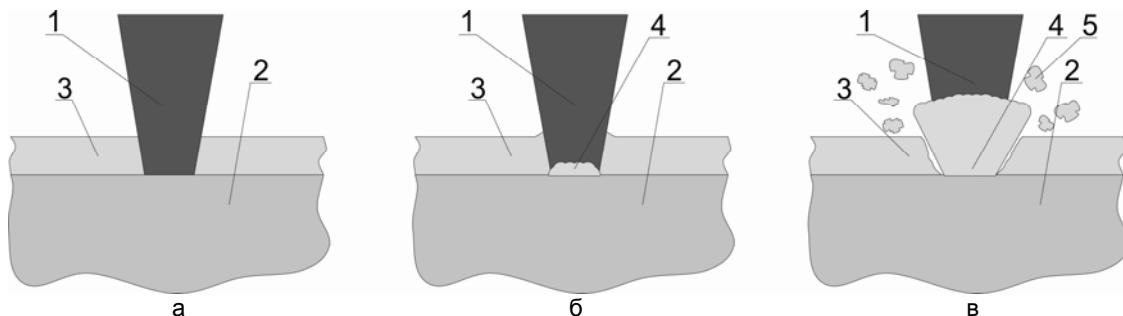


Рис. 1. Механизм лазерной очистки: 1 – лазерный луч; 2 – загрязненный материал; 3 – загрязнение; 4 – облако испаренного вещества; 5 – частицы загрязнения, удаленные с поверхности материала.

Лазерный луч, проходя через пленку загрязнения и попадая на поверхность материала (а), испаряет часть материала на обрабатываемой поверхности (б). Под давлением горячих паров слой загрязнения разрушается (в)

Опираясь на изложенное выше, опишем механизм лазерной очистки. Будем считать, что лазерный импульс, попадая на загрязненную поверхность, проходит сквозь загрязнение без ослабления и поглощается в приповерхностном слое материала (рис. 1, а). В случае, когда плотность мощности лазерного излучения достаточна для того, чтобы разогреть материал до температуры кипения, на границе раздела загрязнение – основной материал начинается испарение материала (рис. 1, б). Под давлением разогретых до высоких температур паров слой неметаллического загрязнения разрушается и удаляется с поверхности материала (рис. 1, в). Кроме того, во многих случаях давление разогретого газа разрушает слой загрязнения не только в области прямого лазерного воздействия, но и в близлежащей зоне, что повышает производительность лазерной очистки.

С энергетической точки зрения задача выбора оптимального режима работы лазера при очистке сводится к обеспечению минимального порога испарения вещества основного металла. Известно, что таковой обеспечивается в импульсном режиме воздействия [2]. Кроме того, чем меньше длительность воздействия, тем меньше глубина прогретого слоя вещества и, следовательно, меньше количество образующегося расплава и пара (т.е. меньше повреждение основного вещества) при большем давлении последнего. Глубина прогретого слоя вещества определяется соотношением

$$x_{\text{пр}} \sim \sqrt{\alpha \tau}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – температуропроводность материала;  $\tau$  – длительность импульса. Так, согласно соотношению (2), при воздействии гигантского импульса длительностью 10 нс глубина прогретого слоя в стали  $x_{\text{пр}}$  составляет  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  см, при этом испарение происходит практически без образования расплава на поверхности вещества, и модификация исходной поверхности минимальна.

Таким образом, с позиций оптимизации режима очистки предпочтительным является использование для этой цели импульсного лазерного воздействия.

### Очистка при помощи импульсного волоконного лазера

Рассмотрим возможность применения для очистки волоконного импульсного лазера ИЛМИ-1-50 производства IPG Photonix, имеющего следующие характеристики: длина волны излучения 1,064 мкм; частота следования импульсов 50–100 кГц; средняя мощность 50 Вт; энергия импульса до 1 мДж; длительность импульса 200 нс.

Излучение данного лазера фокусировалось в пятно диаметром 50–100 мкм, а лазерный луч сканировался по загрязненной поверхности при помощи гальваносканера. Таким образом, максимальная плотность мощности лазерного излучения составляла 200 МВт/см $^2$ . Для обеспечения меньшей плотности мощности либо уменьшалась энергия импульса, либо увеличивалось фокусное расстояние фокусирующей системы (увеличивался диаметр пятна в фокальной плоскости).

С использованием волоконного импульсного лазера ИЛМИ-1-50 были реализованы следующие режимы лазерной очистки.

- Очистка с минимальной модификацией поверхности. Для обеспечения данного режима плотность мощности лазерного излучения была подобрана таким образом, чтобы давления, созданного испарен-

ным материалом, хватало для удаления слоя загрязнения, но было недостаточно для вытеснения расплава к краям зоны воздействия (рис. 2, а). Данный режим лазерной очистки подходит для очистки материала от тонких оксидных пленок, легких видов загрязнения, а также в тех случаях, когда недопустимо увеличение шероховатости поверхности после очистки.

- Очистка и создание микроструктуры на поверхности материала. Для обеспечения такого режима необходимо подобрать плотность мощности излучения так, чтобы давления испаренного вещества было достаточно для вытеснения расплава к краям зоны воздействия. Таким образом, при правильном выборе скорости сканирования на поверхности материала образуется регулярная структура, представленная на рис. 2, б. Обработка в режиме микроструктурирования обеспечивает наилучшие адгезионные свойства и исключает необходимость применения жидких реагентов для обезжиривания поверхности перед покраской или нанесением защитного покрытия.
- Глубокая очистка. Это режим очистки с максимальной энергией импульса и плотностью мощности. Данный режим отличается наличием наибольшего количества испаренного вещества и самой большой зоной расплава (рис. 2, в). Тем самым режим подходит для удаления глубоких загрязнений, в том числе окалины. Следует заметить, что после глубокой лазерной очистки поверхность приобретает большую шероховатость ( $Rz$  20 и более).

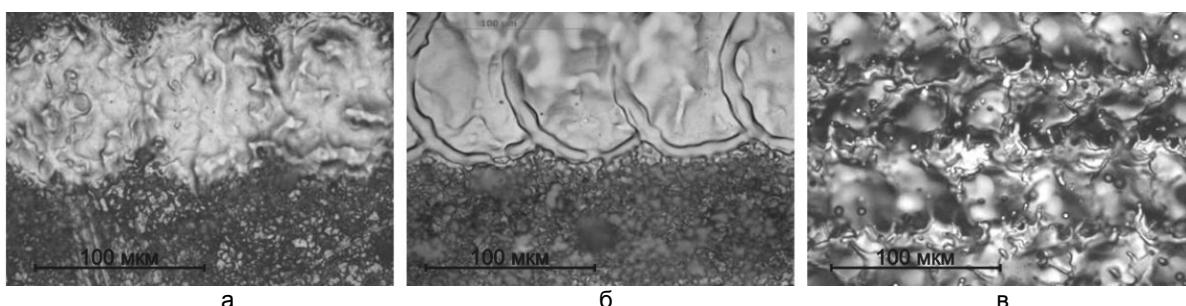


Рис. 2. Режимы лазерной очистки: очистка с минимальной модификацией поверхности (а); очистка в режиме микроструктурирования (б); глубокая очистка с максимальной долей испаренного материала (в)

Как правило, очистка поверхности осуществляется либо с целью подготовки к консервации или переработке изделий, либо для удаления эксплуатационных загрязнений, либо перед нанесением защитных покрытий. Если в первых двух случаях требуется только удаление загрязнений, то в последнем случае очень важную роль в выборе технологии могут играть адгезионные свойства поверхности, которые можно повысить при помощи лазерной обработки.

#### **Очистка с применением твердотельных лазеров в режиме генерации гигантских импульсов**

Для исследования процесса лазерной очистки импульсами меньших длительностей был собран YAG: Nd лазер, работающий в режиме генерации гигантских импульсов, имеющий следующие характеристики: длина волны излучения 1,064 мкм; частота следования импульсов до 200 Гц; энергия импульса 20 мДж; длительность импульса 10 нс. С использованием данного лазера были проведены эксперименты по очистке ржавчины со стальной пластины. Для этого лазерный импульс фокусировался в пятно диаметром 0,2 мм. Сканирование пучка по образцу осуществлялось при помощи двухкоординатной системы с шагом между импульсами 0,2 мм. В результате слой ржавчины был полностью удален, изменения шероховатости поверхности не выявлено.

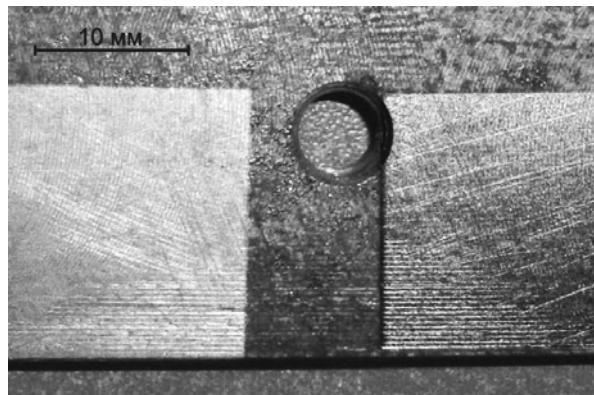


Рис. 3. Лазерная очистка стальной пластины от ржавчины при помощи лазера, работающего в режиме генерации гигантских импульсов (слева), и при помощи волоконного лазера (справа)

На рис. 3 изображена стальная пластина, очищенная от ржавчины при помощи лазера, работающего в режиме генерации гигантских импульсов (слева) и при помощи волоконного лазера (справа).

#### **Применение лазерной очистки в промышленности**

На базе изложенных исследований по запросам промышленности были проведены эксперименты по исследованию возможностей применения лазерной очистки на следующих операциях в различных производствах:

- очистка турбинных лопаток от эксплуатационных загрязнений (рис. 4);
- дезактивация узлов и агрегатов атомных энергетических установок;
- очистка внутренних поверхностей труб теплообменников от солевых отложений;
- очистка растированных полиграфических валов (анилоксов) от различных типов красок;
- очистка режущего инструмента;
- очистка железнодорожных вагонов от старой краски;
- очистка изделий двойного назначения от многослойных лакокрасочных покрытий;
- очистка ступеней эскалаторов в метрополитене;
- очистка кромок деталей перед сваркой;
- очистка изделий от изношенных гальванических покрытий;
- очистка поверхностей алюминиевых сплавов от окисных пленок перед нанесением олеофобных покрытий;
- очистка памятников и произведений искусства от биологических и других видов загрязнений [3].

Некоторые результаты этих экспериментов приведены на рис. 4–7.

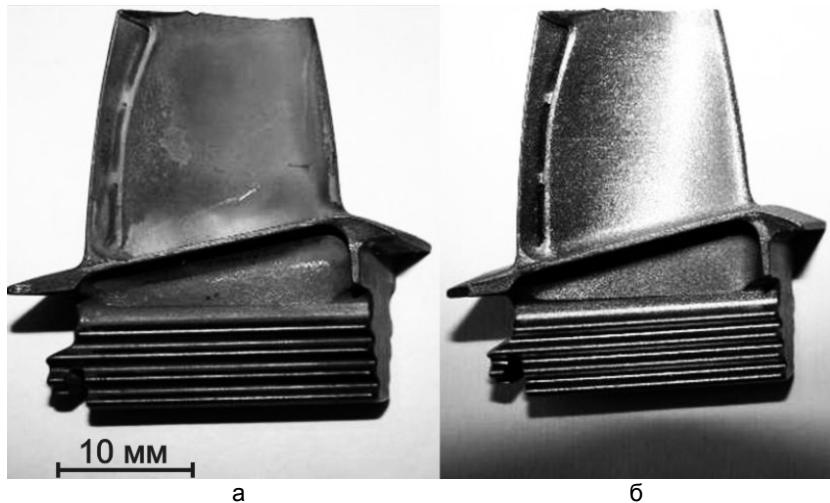


Рис. 4. Лазерная очистка турбинной лопатки от эксплуатационных загрязнений при помощи импульсного волоконного лазера. Внешний вид лопатки до (а) и после (б) лазерной очистки

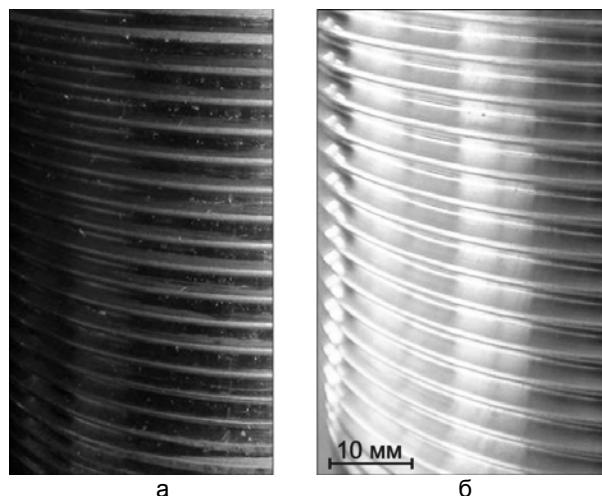


Рис. 5. Лазерная очистка поверхности резьбы труб при помощи импульсного волоконного лазера. Внешний вид поверхности резьбы трубы до (а) и после (б) лазерной очистки

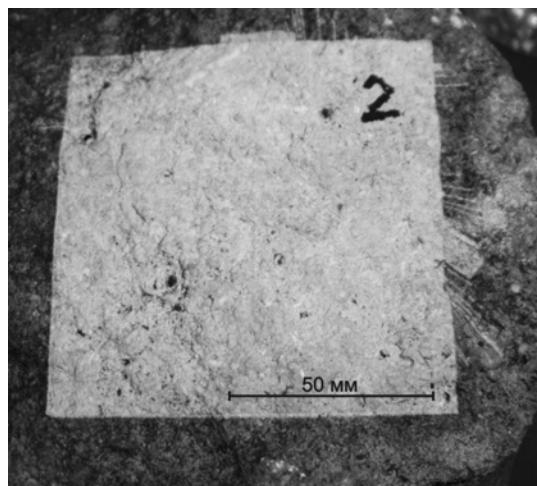


Рис. 6. Очистка известняка от биологических загрязнений при помощи импульсного волоконного лазера

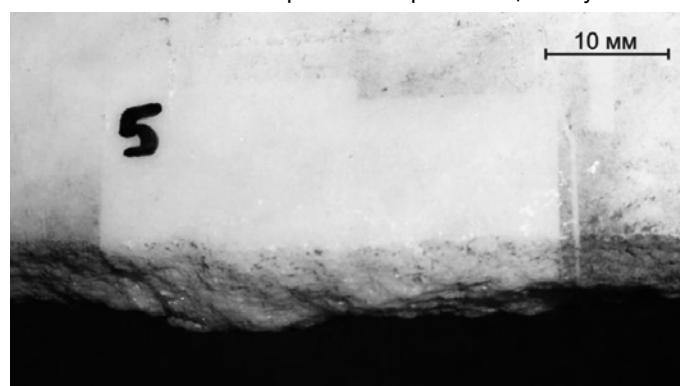


Рис. 7. Очистка мрамора при помощи лазера, работающего в режиме генерации гигантских импульсов (длительность импульса 10 нс, энергия импульса 20 мДж)

### Заключение

В настоящей работе описаны две группы экспериментов по лазерной очистке поверхности с применением лазеров микронного диапазона длин волн. При помощи импульсного волоконного лазера ИЛ-МИ-1-50 реализованы три режима очистки: с минимальной модификацией поверхности, с созданием микрорельефа на поверхности металла и режим глубокой очистки. При помощи импульсного твердотельного лазера, работающего в режиме генерации гигантских импульсов, реализован режим очистки без модификации поверхности. Кроме того, показаны возможные области применения лазерной очистки материалов в промышленности.

Работа выполнена при поддержке госконтракта РФ №11.519.11.4017, гранта Президента РФ по поддержке ведущей научной школы НШ-619.2012.2 и гранта РФФИ 10-02-00208.

### Литература

- Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
- Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 248 с.
- Парфенов В.А., Геращенко А.Н., Геращенко М.Д., Григорьева И.Д. Лазерная очистка исторических памятников // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 2 (66). – С. 11–17.

**Вейко Вадим Павлович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, veiko@lastech.ifmo.ru

**Киshalov Антон Александрович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, grinfo@mail.ru

**Мутин Тимофей Юрьевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, timofeymutin@yandex.ru

**Смирнов Валентин Николаевич**

– ООО «НПП «Лазерные технологии», кандидат технических наук, генеральный директор, valentin56@mail.ru

**УДК 681.787, 745.512**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ ИСКУССТВА, ВЫПОЛНЕННЫХ  
В ТЕХНИКЕ ИНТАРСИИ**

**И.П. Гуров, Е.В. Жукова, А.В. Левшина**

Рассматриваются возможности применения метода оптической когерентной томографии с перестраиваемой длиной волны ( $1305\pm75$  нм) для изучения предметов декоративно-прикладного искусства, изготовленных с применением техники деревянной интарсии. Приводятся изображения В-сканов и 3D-изображения областей исследования.

**Ключевые слова:** оптическая когерентная микроскопия, 3D-изображение, инкрустация, интарсия, декоративно-прикладное искусство.

**Введение**

Сохранение культурного наследия нуждается в применении неразрушающих методов диагностики ценных предметов искусства. Известно, что метод оптической когерентной томографии (ОКТ) в последнее десятилетие стал широко использоваться в изучении живописи и разнообразных объектов культурного наследия. Инновационные научные центры, работающие с такими бесценными объектами, оборудованы самой современной техникой, включая спектральные, рентгеноскопические, микроскопические и ОКТ-комплексы. Результаты исследования живописных слоев старинных работ методами ОКТ представлены, например, в [1]. Изучению свойств лаковых слоев масляной живописи посвящена работа [2]. ОКТ-приборы успешно применяются в диагностике старинных образцов стекла и природных минералов [3–5].

Разнообразие материалов, из которых выполнены предметы искусства или входящие в их состав отдельные элементы, весьма велико. Особое место при изготовлении изделий, представляющих художественную ценность, занимает такой доступный и широко используемый материал, как дерево. Известны результаты применения метода ОКТ к исследованию материала древесины [6]. Однако на современном этапе использования ОКТ в музейном деле недостаточное внимание уделено изучению предметов декоративного искусства и народных промыслов, изготовленных из разных пород дерева, имеющих лаковые покрытия и роспись. Ранее нами были выполнены эксперименты по изучению методами спектральной и корреляционной ОКТ разнообразных материалов, в том числе поверхности древесины [7]. Цель настоящей работы – продемонстрировать возможности применения метода ОКТ для диагностики микроструктуры поверхности деревянных объектов, выполненных в технике инкрустации, на примере исследования конкретного изделия декоративно-прикладного искусства.

**Объект исследования**

Инкрустация – это известный способ украшения изделий узорами и изображениями поверхностей различных предметов. В качестве материала вставок в инкрустации используют кусочки металлов, минералов, кости, перламутра, ценных пород дерева, драгоценные камни. Отличаясь по фактуре и цвету, материалы создают причудливые орнаменты на основе геометрического и природного рисунков. Такой способ отделки однотонных материалов позволяет улучшить потребительские свойства и создает особое эстетическое впечатление об изделии.

Разновидность инкрустации – интарсия, технологический прием декорирования деревянных изделий вставками других пород дерева. Разнообразие растительной флоры издревле используется в технике украшения деревянных поверхностей разного назначения. Мастерами созданы бесценные шедевры – образцы домашней утвари, интерьера, декоративных панно. Интарсия и маркетри – это две технологии, которые успешно использовались ранее при создании предметов искусства. Отличие техники маркетри от интарсии состоит в том, что украшается вставками вся поверхность изделия. Для изготовления вставок при инкрустации используются листы шпона разных пород дерева, которые особым образом закрепляются на поверхности декорируемого предмета.

В качестве объекта исследования была выбрана деревянная ваза, изготовленная в 70-х г.г. XX в. Этот объект представляет собой образец кустарного производства. Внешний вид вазы и изучаемая область на ее поверхности показаны на рис. 1. Ваза изготовлена методом точения из бруска березы. Внешняя сторона вазы дополнительно подвергалась тонированию морилкой. Далее вручную мастером выполнена инкрустация кусочками шпона по поверхности нижней части вазы. В качестве материала, вероятно, использовалась мягкая светлая порода деревьев, например, клена или ясеня. В раппорте орнамента в ряде случаев нарушено расстояние между ромбами как в отдельных рядах, так и между рядами, что указывает на кустарный способ отделки изделия. Трудность выполнения интарсии на этом изделии обусловлена округлостью формы основы поверхности, вставки имеют небольшие размеры и изготовлены из листового шпона.

Основными исследовательскими задачами работы были изучение технологического приема крепления вставок на окружной поверхности и анализ возможностей применения технологий ОКТ для исследования объектов, выполненных в технике интарсии.

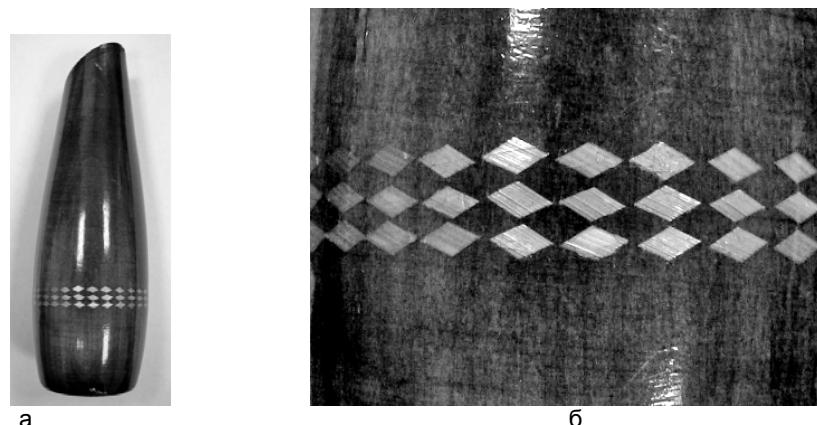


Рис. 1. Предмет декоративно-прикладного искусства, выполненный с использованием технологии интарсии: внешний вид изделия (а); геометрический орнамент на поверхности вазы (б)

#### Экспериментальное оборудование

Для изучения свойств области интарсии был использован оптический когерентный микроскоп (ОКМ), модель EX1301 производства фирмы Michelson Diagnostics (Великобритания), принцип работы которого основан на методе спектральной оптической когерентной микроскопии. Микроскоп конструктивно выполнен в виде микроинтерферометра [8]. В состав прибора входит лазерный источник с возможностью перестройки по длинам волн относительно максимума излучения на длине волны  $1305 \pm 75$  нм. Излучение в процессе сканирования проникает в толщу изучаемого образца, рассеивается на микронеоднородностях и, отражаясь от внутренних слоев, попадает на фотодиод, который служит приемником излучения. Четырехлинзовая система фокусировки позволяет выполнять регистрацию предметной волны, отраженной на разной глубине, которая, интерферируя с опорной волной, формирует интерференционные картины на различных длинах волн. Микроскоп обеспечивает регистрацию томограмм (В-сканов) в диапазоне глубин до 2 мм. Оптическое аксиальное разрешение (по глубине сканирования) составляет 10 мкм, а боковое разрешение – не хуже 7,5 мкм. Возможно исследовать область образца размерами до  $7 \times 12 \times 2$  мм, при этом минимальный шаг бокового сканирования равен 1 мкм. Программное обеспечение ОКМ обеспечивает возможность реконструкции 3D-изображения, выделение в нем отдельных сечений и микрообъемов с целью детального анализа изучаемой области, что и было использовано при экспериментальных исследованиях.

#### Экспериментальные результаты

На первой стадии эксперимента были оценены условия применения метода ОКТ к изучению микроструктуры деревянной поверхности. На рис. 2 представлены реконструированные 3D-изображения поверхности объекта, покрытого слоем лака. Направление  $X$  соответствует боковому движению зондирующего пучка при сканировании, а направление  $Y$  – смещению объекта при измерении, т.е. направлению сканирования по поверхности. Видно, что на изображении рис. 2, а, хорошо просматривается слой лака, оценка толщины которого, полученная при анализе томограмм, составила около 200 мкм. Возможность выделения отдельных сегментов объема при работе с 3D-изображением позволила рассмотреть поверхность древесины, находящуюся под слоем лака. Довольно хорошо видны волокна и трещины на поверхности слоя дерева. Это указывает на то, что изучаемый объект в процессе хранения состарился, древесина вазы рассохлась, возникли трещины внутри древесной ткани, которые и привели к появлению трещин в лаковом слое.

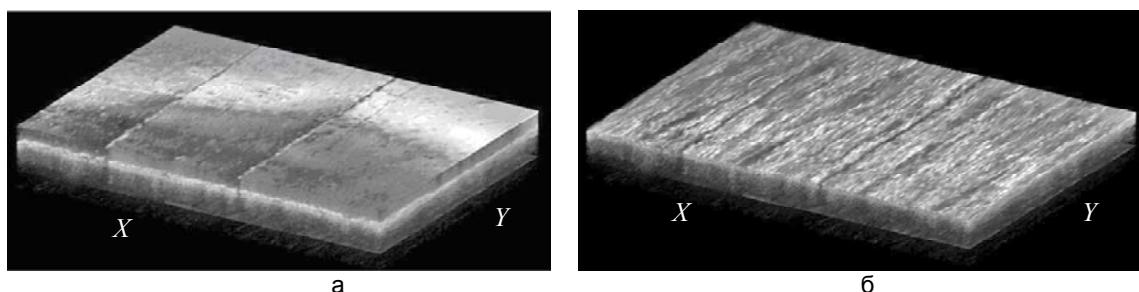


Рис. 2. Восстановленное 3D-изображение поверхности дерева с лаковым покрытием: поверхности с лаковым слоем ( $x=2,10$  мм;  $y=1,41$  мм;  $z=1,10$  мм) (а); поверхности после выделения на изображении слоя древесины ( $x=2,10$  мм;  $y=1,41$  мм;  $z=0,88$  мм) (б)

Для изучения технологии интарсии было выполнено сканирование по поверхности вставки. Ширина сканирования составила 5 мм, а шаг сканирования по поверхности объекта – 0,01 мм. Присутствие лакового слоя, обладающего сильными отражающими свойствами, уменьшает интенсивность зондирующего излучения, которое должно проникать вглубь изучаемого объекта. Но, как показали ранее выполненные нами эксперименты по исследованию лаковых слоев, все же сохраняются условия для эффективного применения ОКМ в изучении материалов под лаковым слоем.

На рис. 3 приведены трехмерные изображения поверхности в области вставки. Работа с 3D-изображением позволяет ориентировать в пространстве цифровую модель изучаемой области, выделять необходимые области для детального исследования. Из рис. 3, а, видно, что почти нет зазоров между основой и вставкой по ее периметру, на поверхности лакового слоя, оставшегося над частью элемента инкрустации, видна сеть трещин. На рис. 3, б, показан этот же участок, но уже без лакового слоя.

Для выявления способа крепления элемента инкрустации в пазе основы исходное 3D-изображение было специальным образом сегментировано (рис. 4, а), и этот прием позволил визуализировать области соединения. Видно, что шпон вставки выступает над поверхностью основы. С учетом информации, имеющейся в трехмерном изображении, получена оценка высоты около 200 мкм. Выступы вставки наблюдались со всех сторон ромба, т.е. исходная технология крепления заключалась в создании рельефной интарсии. Последующее покрытие изделия лаком выравнивало высоты поверхностей, и в готовом изделии интарсия становилась художественной, одноуровневой.

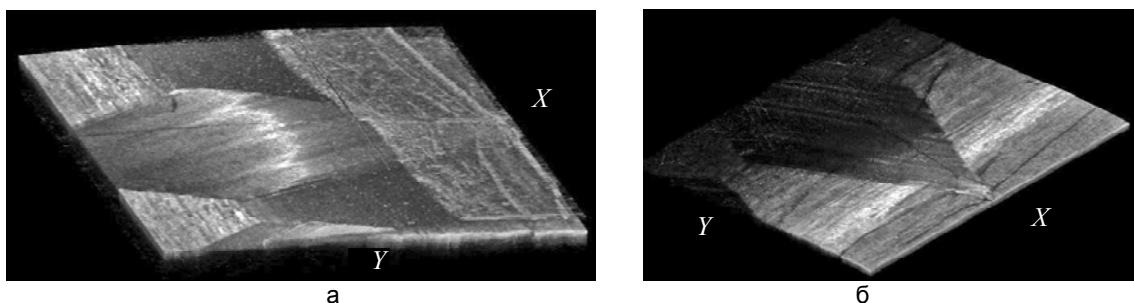


Рис. 3. Восстановленное 3D-изображение поверхности в области вставки: поверхности с частью лакового слоя ( $x=5,0$  мм;  $y=4,65$  мм;  $z=0,9$  мм) (а); поверхности после выделения слоя древесины ( $x=5,0$  мм;  $y=4,65$  мм;  $z=0,47$  мм) (б)

На рис. 4, б, в, приведены изображения томограмм (В-сканов) для разных сечений в пределах крепления вставки в выемке основы. На томограммах хорошо просматриваются пузырьки в лаке, высота которого над вставкой составляет не более 150 мкм, над основой 290 мкм. На поверхности древесины вазы по обе стороны от вставки виден дефектный слой (рис. 4, б). Его появление вызвано нарушением структуры поверхности древесных тканей в процессе обработки при вытачивании изделия, а также последующим тонированием морилкой поверхности дерева. Можно оценить глубину этого слоя величиной в 30–50 мкм. На томограммах не видна переходная область между лаком и поверхностью древесины, что связано с недостаточной разрешающей способностью ОКМ.

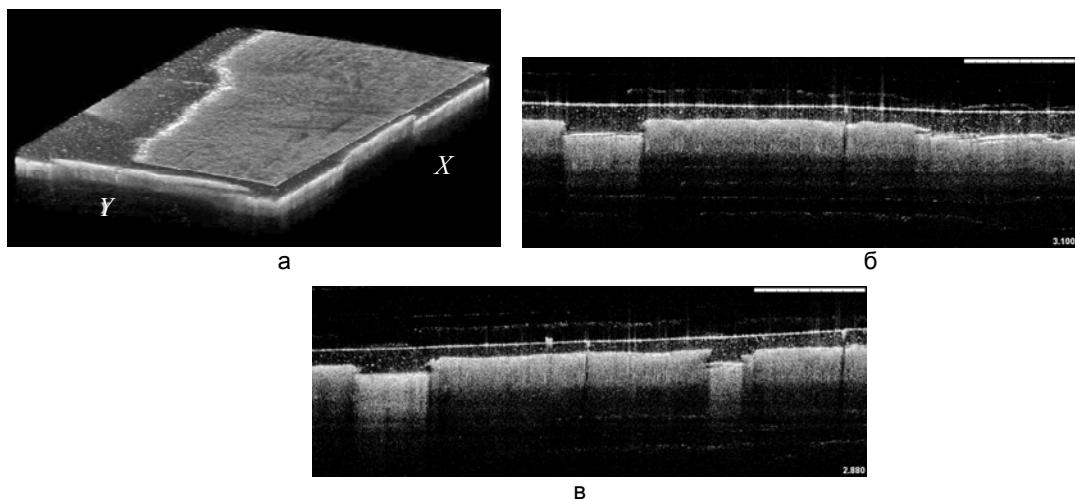


Рис. 4. Анализ 3D-изображения поверхности в области вставки: 3D-изображение поверхности с лаковым слоем ( $x=5,0$  мм;  $y=2,81$  мм;  $z=1,33$  мм); томограммы (В-сканы) (б–в). Размер В-сканов – 5×2 мм

Традиционно в технике интарсии вставка изготавливается с нижней расширенной частью и в сечении имеет трапециoidalную форму. Выемка для вставки на поверхности декорируемого изделия выполняется с пазами по бокам, и при креплении вставки возникает соединение типа «ласточкина хвоста». В данном случае мастер не использовал такой прием соединения элементов интарсии, что, вероятно, связано с округлой формой основы, на которую крепились близко расположенные вставки.

На рис. 5 приведено 3D-изображение, полученное при сканировании элемента поверхности интарсии, с которого удален лак.

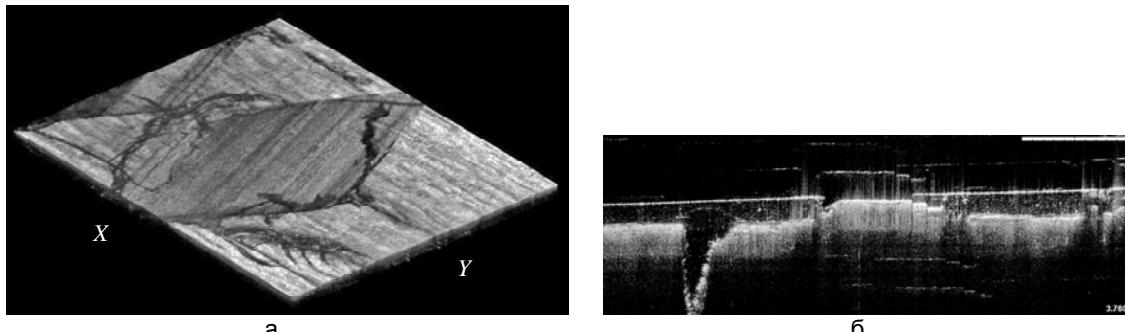


Рис. 5. 3D-изображение поверхности дерева вставки без лакового слоя: 3D-изображение поверхности ( $x=5,0$  мм;  $y=4,65$  мм;  $z=0,70$  мм) (а); томограмма (В-скан) размером  $5\times2$  мм (б)

Отсутствие лака на древесине позволило лучше визуализировать поверхность при сканировании. В частности, после удаления остатков слоя лака на трехмерном изображении поверхности и выделения слоя древесины (рис. 5, а) удалось наблюдать трещины на деревянной основе и самом элементе вставки. На рис. 5, б, приведена томограмма в одном из сечений. Видно, что слой лака на момент изготовления был тонкий, около 70 мкм, и со временем был утрачен. Причиной отслоения лака послужило образование трещины, которая по ширине составляет не менее 600 мкм при глубине более 900 мкм. На поверхности основы видна также разветвленная структура трещин, что подтверждается изучением отдельных В-сканов в местах их обнаружения. Это пример влияния растрескивания древесины на стыках и зазорах, приводящих к разрушению элементов интарсии.

### Заключение

Изучение методом спектральной оптической когерентной микроскопии деревянного предмета декоративного искусства, выполненного в технике интарсии, позволило получить новую и интересную информацию, раскрывающую особенности технологии мастеров, работающих с деревом. Различие в природных свойствах вставок, изготавливаемых из разных пород дерева, хорошо визуализируется при изучении изделий с помощью ОКМ. Слой лакового покрытия, микроструктура деревянного фона, стыки между основой и вставкой, ее форма – это наблюдаемые участки на цифровом 3D-изображении объекта, они подлежат анализу при детальных исследованиях. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования метода ОКТ для диагностики структуры интарсии у таких объектов.

При помощи метода оптической когерентной микроскопии можно выявить точные геометрические параметры вставок, отдельных участков и элементов, определить технологию крепления вставки, оценить состояние ее поверхности, сохранность материала, определить толщину лака и даже клея, который иногда используют при работе с древесиной, так как многие клеи прозрачны на данной длине волн.

Важным результатом выполнения подобных исследований может стать воссоздание трехмерной модели изучаемого участка в интарсии. При работе с особо ценностными предметами искусства необходимо тщательно подходить к организации реставрационных работ, и послойное изучение 3D-изображения позволит уточнить геометрические объемы вставок, выявить направление волокон в труднодоступных для реставрации местах, оценить характер дефектов, размеры элементов и толщину отдельных слоев.

Методы оптической когерентной микроскопии могут быть применимы не только для изучения традиционной техники интарсии, но и для исследования объектов из дерева, украшенных маркетри, инкрустацией другими материалами, полезны в диагностике сохранности микросоединений, элементов узора резьбы, степени разрушения и загрязненности углублений и отверстий, и тут особая роль отводится работе с трехмерными цифровыми моделями изучаемых участков.

Неразрушающий метод контроля, реализуемый при помощи технологий оптической когерентной томографии, исключительно важен при изучении разнообразных ценных предметов искусства, инкрустированных различными материалами. Сочетание высокой разрешающей способности метода оптической когерентной микроскопии с вычислительными возможностями современных компьютерных технологий обеспечивает дальнейшее развитие методов диагностики состояния исторических памятников и предметов культурного наследия, возможности идентифицировать старинные изделия и сохранить ценные предметы искусства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### **Литература**

1. Liang H. En-face optical coherence tomography – a novel application of non-invasive imaging to art conservation // Opt.Expr. – 2005. – V. 13. – № 16. – P. 6133–6144.
2. Latour G., Georges G., Siozade L., Deumié C., Echard J.P. Study of varnish layers with optical coherence tomography in both visible and infrared domains // Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7391. – 73910J–1 –73910J–9.
3. Targowski P., Iwanicka M. Optical Coherence Tomography: its role in the non-invasive structural examination and conservation of cultural heritage objects – a review // Appl. Phys. A. – 2012. – V. 106. – № 2. – P. 265–277.
4. Chang S., Mao Y., Flueraru C., Chang G. Optical coherence tomography used for jade industry // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7855. – P. 785514–1–785514–9.
5. Adler D.C., Stenger J., Gorczynska I., Lie H., Hensick T., Spronk R., Wolohojian S., Khandeka N., Jiang J.Y., Barry S., Cable A.E., Huber R., G. Fujimoto J.G. Comparison of three-dimensional optical coherence tomography and high resolution photography for art conservation studies // Opt. Expr. – 2007. – V. 15. – № 24. – P. 15972–15985.
6. Latour G., Echard J.P., Soulier B., Emond E., Vaiedelich S., Elias M. Structural and optical properties of wood and wood finishes studied using optical coherence tomography: application to an 18th century Italian violin // Appl. Opt. – 2009. – V. 48. – № 33. – P. 6485–6491.
7. Волынский М.А., Гуров И.П., Жукова Е.В., Левшина А.В., Маргарянц Н.Б., Семов А.А. Исследование трехмерной микроструктуры материалов на основе методов оптической когерентной томографии // Фотография. Изображение. Документ. – 2011. – Вып. 1. – № 1. – С.81–85.
8. Гуров И.П. Компьютерная фотоника: принципы, проблемы и перспективы // Научно-технический вестник. – СПбГУ ИТМО. – 2005. – № 21. – С. 5–20.

**Гуров Игорь Петрович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gurov@mail.ifmo.ru

**Жукова Екатерина Владимировна**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, zhukova-ifmo@mail.ru

**Левшина Анна Викторовна**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, l\_a\_v\_sun@mail.ru

**УДК 535-34, 535-14, 573.6**

## **ТЕРАГЕРЦОВЫЕ СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ 2,3-БИФОСФОГЛИЦЕРАТА В ЭРИТРОЦИТАХ КРОВИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ**

**Л.И. Камышева, Я.В. Грачев, Л.Б. Киселева, Н.С. Ващурин,  
О.А. Лопатиев, И.П. Зелди, И.И. Попов, В.Г. Беспалов**

Работа посвящена исследованию диагностики 2,3-бифосфоглицерата – важного фосфорорганического соединения в эритроцитах крови млекопитающих. Представлены экспериментально полученные спектры пропускания крови с добавлением рибоксина, являющимся ингибитором мутазы 2,3-бифосфоглицерата, в диапазоне 0,1–1 ТГц.

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, спектр пропускания, кровь, эритроциты, гемоглобин, 2,3-бифосфоглицерат.

### **Введение**

Среди фосфорорганических соединений в эритроцитах крови млекопитающих 2,3-бифосфоглицерат (2,3-БФГ) занимает особое место, так как регулирует сродство гемоглобина к кислороду. Соединение в 26 раз снижает прочность связывания кислорода, что делает возможным его диффузию из эритроцитов и поступление в клетки-потребители организма, в том числе и в нейроны головного мозга.

Первые эксперименты по количественному определению этого соединения методом ультрафиолетовой (УФ) спектроскопии были проведены еще в 70-х г.г. XX в. Было установлено, что хромофором (химической группой, максимально поглащающей ультрафиолетовое излучение спектра) служит фосфатная группа. Однако при проведении исследований этим методом возник целый ряд проблем. Во-первых, кроме 2,3-БФГ в эритроцитах и плазме крови содержатся такие фосфорилированные углеводы, как группа фосфогексоз, 2-фосфоглицерат, 3-фосфоглицерат, фосфоэнолпируват и др. Более того, доля этих соединений в общем фосфоуглеводном пуле намного выше, чем доля 2,3-БФГ, количество которого изменяется от нуля до максимума в каждом полном обороте кровотока. В отличие, например, от глюкозы и других шестиугле-

родных сахаров, которые поступают в эритроциты крови извне и там подвергаются ферментативному фосфорилированию, 2,3-БФГ является продуктом влияния фермента БФГ-фосфомутазы. В ходе этой реакции фосфогруппа в 1,3-бифосфоглицерате переносится с C<sub>1</sub> на C<sub>2</sub>. Срок жизни образовавшегося из 1,3-бифосфоглицерата 2,3-БФГ измеряется долями секунд. Указанная реакция в эритроцитах имеет место только тогда, когда эти клетки находятся в артериальном отделе капиллярной сети органа. Во всех других кровеносных сосудах образование 2,3-БФГ отсутствует. Более того, после поступления эритроцитов из артериальной капиллярной сети в венозную начинается ферментативный распад этого соединения до 3-фосфоглицерата и частичная его диффузия в плазму крови [1, 2].

В связи с наличием одного и того же хромофора (фосфатная группа) во всех семи фосфоуглеводах гликолитического цикла использование метода УФ спектроскопии предполагает предварительное разделение этих соединений или выделение из них 2,3-БФГ. Поскольку это соединение, в отличие от остальных шести, является крайне нестабильным и короткоживущим, необходимо принятие специальных мер его внутриклеточной стабилизации, т.е. защита от воздействия бифосфороглицерат-фосфатазы (БФГ-фосфатазы), которая катализирует его распад.

Разделение фосфоуглеводов, выделенных из эритроцитов, тем более – выделение даже стабилизированного 2,3-БФГ, кроме огромной технической сложности, дороговизны и длительности, всегда сопровождается значительными потерями искомого соединения.

Процесс образования и распада 2,3-БФГ [3] представлен на рис. 1. В связи с этим авторы сочли целесообразным провести предварительное измерение содержания суммы фосфоуглеводов в эритроцитах и плазме венозной крови человека (донора), включая 2,3-БФГ, в терагерцовом (ТГц) диапазоне электромагнитного излучения.

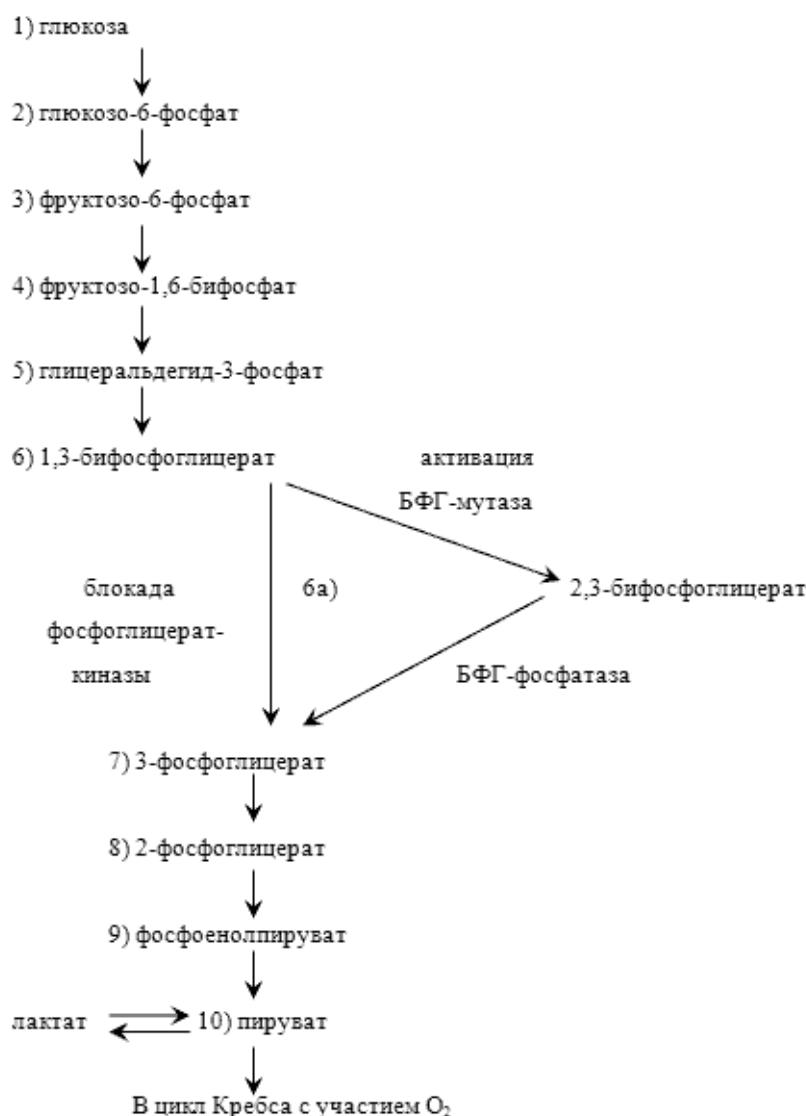


Рис. 1. Схема синтеза и распада 2,3-бифосфоглицерата в эритроцитах

Исследования проводились с помощью метода ТГц спектроскопии с разрешением во времени, подробно описанного в работах [4, 5]. Описание спектрографа можно найти в работах [6–8]. В таблице приведены параметры ТГц спектрографа.

Средняя мощность ТГц излучения, мкВт	$48 \pm 4$
Длительность импульса, пс	3
Частота повторения импульсов, МГц	75
Спектральный диапазон, ТГц	0,02–1,5
Отношение сигнал/шум в спектре	100
Погрешность определения пропускания, %	2,5

Таблица. Параметры ТГц спектрографа

#### Методика приготовления проб

За основу авторами была взята гипотеза, что среди фосфоуглеводов (фосфоглюкоза и фосфофруктоза) и шести фосфорилированных 3-х углеродных фрагментов их распада в эритроцитах находится и 2,3-бифосфоглицерат. В связи с тем, что цитоплазма этих клеток на 80% состоит из воды, поглощающей ТГц излучение, а искомое нами соединение крайне нестабильно, был принят ряд мер, включающих высушивание образцов и стабилизацию 2,3-БФГ.

Исследование подлежали следующие пробы:

- влажная эритроцитарная масса;
- сухая эритроцитарная масса;
- влажная эритроцитарная масса, содержащая рибоксин;
- сухая эритроцитарная масса, содержащая рибоксин;
- цельная плазма крови, содержащая рибоксин;
- высушенная плазма крови, содержащая рибоксин;
- цельная плазма крови без рибоксина;
- высушенная плазма крови без рибоксина.

В исследовании использована донорская кровь человека. За один час до забора крови донору внутривенно вводили 2 мл фармакопейного препарата – рибоксина, продукты биотрансформации которого являются ингибиторами БФГ-мутазы, тем самым предотвращается преждевременный распад 2,3-БФГ и его стабилизация.

Отделение эритроцитов от плазмы крови проводили стандартными методами клинической биохимии, а высушивание эритроцитарной массы и плазмы – методом лиофильной сушки.

#### Результаты исследования

Согласно полученным данным, поглощение ТГц излучения нативными образцами эритроцитов, их гемолизатов и плазмы крови с применением и без применения рибоксина в диапазоне 0,1–1 ТГц колеблется в широких пределах.

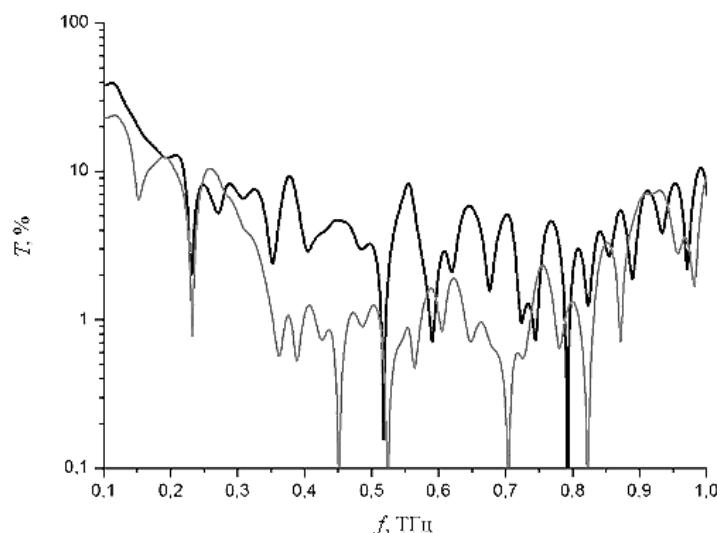


Рис. 2. ТГц спектры пропускания эритроцитарной массы с рибоксином (серый) и контрольной эритроцитарной массы с физраствором (черный)

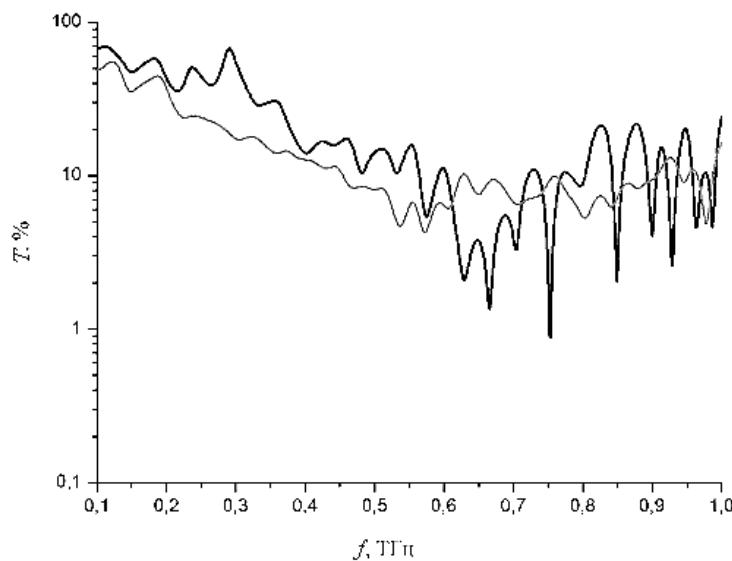


Рис. 3. ТГц спектры пропускания высушенной эритроцитарной массы с рибоксином (серый) и контрольной эритроцитарной массы (черный)

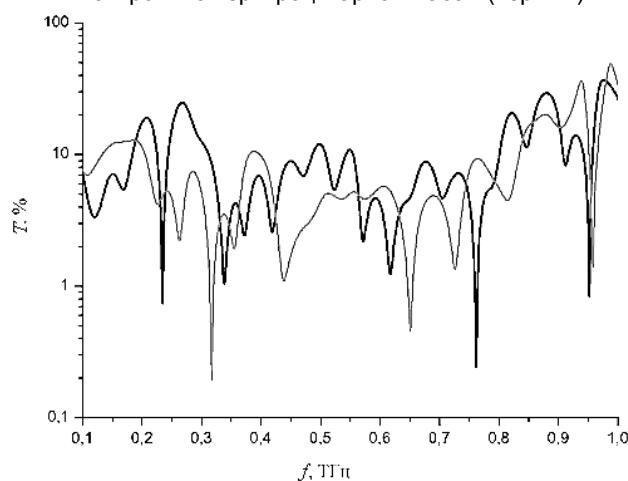


Рис. 4. ТГц спектры пропускания гемолизата с рибоксином (серый) и гемолизата с физраствором (черный)

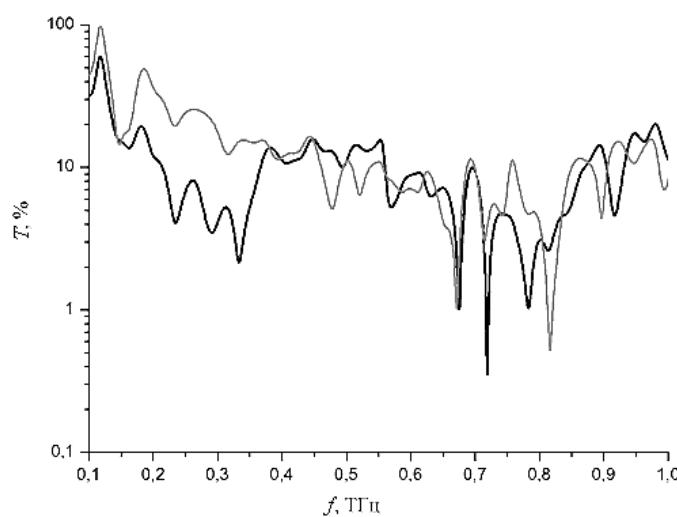


Рис. 5. ТГц спектры пропускания плазмы с рибоксином (серый) и контрольной плазмы с физраствором (черный)

Так, максимум пиков поглощения образца с нативными эритроцитами приходится на следующие частоты: 0,23; 0,52; 0,59 и 0,79 ТГц, гемолизатом эритроцитов – на 0,24; 0,55 и 0,79 ТГц, а плазмой – на 0,33; 0,67; 0,72 и 0,78 ТГц (рис. 2–5). На рисунках по оси абсцисс отложена частота излучения в ТГц, по оси ординат – пропускание образца в процентах. Данные позволяют предположить, что, во-первых, высокая степень поглощения ТГц излучения влажными (нативными) образцами связано с наличием в них воды, особенно связанной. Во-вторых, наличие большого количества пиков поглощения может свидетельствовать о присутствии в образцах нескольких видов фосфоуглеводов, а не одного 2,3-БФГ.

Применение рибоксина для стабилизации 2,3-БФГ оказывает принципиальное влияние на частотную характеристику поглощения ТГц спектра излучения. Так, под действием препарата происходит увеличение числа и величины пиков поглощения (рис. 2). В плазме и гемолизате процесс выражен в меньшей степени, чем в эритроцитах (рис. 4, 5). Лиофильная сушка всех образцов приводит к резкому снижению степени поглощения (рис. 3) излучения образцом.

### **Заключение**

Проведенные исследования позволяют считать, что для обеспечения корректности результатов необходимо полное удаление из образцов воды, включая химически связанную, что может быть достигнуто путем кристаллизации биомолекул. Необходим дальнейший поиск фармакологических препаратов, ингибирующих активность фермента бифосфороглицерат-фосфатазы и стабилизацию 2,3-бифосфоглицерата во всех трех средах. Наличие множества пиков поглощения, указывающих на наличие в исследуемых образцах целой группы фосфоуглеводов, а не только одного 2,3-бифосфоглицерата, подчеркивает необходимость предварительного определения каждого из семи фосфоуглеводных соединений гликолиза раздельно для идентификации линий поглощения каждого из этих соединений, включая 2,3-бифосфоглицерат.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК №14.740.12.0841, ГК №16.513.11.3070).

### **Литература**

1. Benesch R.E., Benesch R. The Mechanism of Interaction of Red Cell Organic Phosphates with Hemoglobin // Adv. Protein Chem. – 1974. – № 28. – P. 211–217.
2. Rose Z.B. Enzymes controlling 2, 3-diphosphoglycerate in human erythrocytes // Fed. Proc. – 1970. – № 23. – P. 1105–1111.
3. Страйер Л. Биохимия: В 3-х томах. – М.: Мир, 1985. – Т. 2. – 312 с.
4. Wu Q., Zhang X.-C. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams // Appl. Phys. Lett. – 1995. – V. 67. – P. 3523–3525.
5. Yun-Shik Lee. Principles of terahertz science and technology // Springer Science+Business Media, LLC. – 2009. – XII. – 340 p.
6. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Денисюк И.Ю., Козлов С.А., Крылов В.Н., Лукомский Г.В., Петров Н.В., Путилин С.Э. Методы генерации сверхширокополосных терагерцовых импульсов фемтосекундными лазерами // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 10. – С. 34–41.
7. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Путилин С.Э., Стаселько Д.И. Генерация излучения в дальнем ИК-диапазоне спектра при фемтосекундном оптическом возбуждении полупроводника InAs в магнитном поле // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93. – № 1. – С. 158–162.
8. Bespalov V.G., Gorodetsky A.A., Grachev Y.V., Kozlov S.A., Smolyanskaya O.A. Influence of THz broadband pulse radiation on some biotissues // Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7547. – P. 754707.

**Камышева Людмила Ивановна**

– Министерство образования и науки Республики Марий Эл, ведущий специалист, kamilaiva@mail.ru

**Грачев Ярослав Владимирович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, grachev\_y@mail.ru

**Киселева Людмила Борисовна**

– Марийский государственный университет, кандидат биологических наук, доцент, zeldiwe@gmail.com

**Вашурина Никита Сергеевич**

– Марийский государственный университет, студент, Nickita\_Vashurin@mail.ru

**Лопатин Олег Анатольевич**

– В/ч 31265, командир, porov@marsu.ru

**Зелди Иван Петрович**

– Марийский государственный университет, кандидат биологических наук, доцент, zeldiwe@gmail.com

**Попов Иван Иванович**

– Марийский государственный университет, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой, porov@marsu.ru

**Беспалов Виктор Георгиевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, victorbespaloff@gmail.com

**4****АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

УДК 681.5.015, 681.51

**УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ  
ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ С АДАПТАЦИЕЙ<sup>1</sup>****С.А. Колюбин, Д.В. Ефимов, В.О. Никифоров, А.А. Бобцов**

Решается задача синтеза гибридной модели, аппроксимирующей динамику нелинейной системы с достаточной точностью и имеющей удобную структуру для разработки соответствующих алгоритмов управления. Предложенный подход обеспечивает возможность адаптации результирующей модели в режиме реального времени. Рассматривается схема комбинированного управления.

**Ключевые слова:** нелинейная система, гибридная модель, комбинированное управление, идентификация.

**Введение**

Для нелинейных систем задача синтеза алгоритмов управления, особенно в условиях возмущений, является крайне нетривиальной (например, [1, 2]). В то же время множество реальных технических систем, если не прибегать к существенным модельным упрощениям, являются таковыми. Если в качестве математических моделей для подобных систем использовать системы дифференциальных уравнений, построенных на основании физических закономерностей, то точность воспроизведения динамики будет высока, однако такое описание является весьма громоздким, что заметно усложняет его использование при синтезе алгоритмов управления.

Альтернативным подходом является использование аппроксимирующих моделей с заранее определяемой структурой, что удобно для разработки регуляторов. В этом случае ключевым моментом является компромисс между точностью модели и ее простотой. Одним из естественных решений могут быть гибридные модели. Основная идея подхода состоит в том, что нелинейная динамика системы для каждого отдельного режима может быть достаточно точно описана упрощенной локальной моделью. Результирующая гибридная модель в этом случае определяется как совокупность локальных моделей, объединенных соответствующим правилом переключения.

Наиболее распространенными формами аппроксимации нелинейной динамики являются кусочно аффинные и смешанные логическо-динамические системы. Эквивалентность различных классов гибридных моделей и методы преобразований между ними анализируются в работах [3, 4].

Результирующая модель, получаемая в настоящей работе, близка по своей структуре к кусочно аффинным системам. Предлагаемый подход отличается тем, что в качестве локальных используются нелинейные авторегрессионные модели, для разделения по режимам учитываются только значения характерных переменных, а не всех векторов состояния и входов. С другой стороны, представляемая работа имеет общие точки с другим методом аппроксимации нелинейных систем с помощью моделей Такаги-Сугено на основе нечеткой логики [5].

Отдельной задачей является выбор алгоритма переключения между локальными моделями. Будем условно выделять два типа переключения: «жесткое» и «смешанное». Под «жестким» переключением имеются в виду два метода, получившие распространение в современной теории управления: с задержкой по времени или с гистерезисом [6, 7]. В обоих случаях в момент переключения происходит скачок управления, реакция на который снижает качество регулирования. С целью избежать подобного негативного эффекта в настоящей работе рассматривается «смешанное» переключение [8, 9].

В большинстве современных систем управления используются цифровые электронные компоненты, составляющие сенсорные блоки и непосредственно управляющий контроллер, что ведет к дискретизации процессов в системе в целом. Далее, в настоящей работе математические модели и алгоритмы управления приводятся в дискретном времени, так как подобная форма представления более соответствует практике.

Итак, пусть задачей управления является стабилизация выходной переменной системы. Это может быть formalизовано в виде следующего целевого неравенства:

$$|y(k) - y^*| \leq \varepsilon, \forall k > T,$$

где  $y(k)$  – значение выходной переменной на  $k$ -ом шаге;  $y^*$  – желаемое значение выходной переменной;  $\varepsilon$  – точность стабилизации;  $T$  – время настройки регулятора.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.1264 от 17.06.2011).

### Разработка гибридной модели системы

В качестве локальных используются нелинейные авторегрессионные модели:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{j=0}^p \mathbf{b}_j^T \mathbf{d}(k-j), \quad (1)$$

где коэффициенты  $a_i$  и векторы коэффициентов  $\mathbf{b}_j$  предполагаются неизвестными, порядки полиномов  $n \geq 1$ ,  $p \geq n-1$ , а  $\mathbf{d}(k)$  обозначает вектор внешних входов.

Если среди всех сигналов выделяется сигнал управления и требуется сохранить линейность модели относительно него, то из вектора входов необходимо исключить все компоненты, содержащие его в степени больше единицы. В этом случае для вектора входов в (1) можно записать:

$$\mathbf{d}(k) = [\mathbf{d}_1^T(k) \ \mathbf{d}_2^T(k)]^T, \quad (2)$$

где  $\mathbf{d}_1(k) = \tilde{\mathbf{d}}(k)u(k)$ ,  $\tilde{\mathbf{d}}(k) = [1 \ \tilde{d}_2(k) \ \dots \ \tilde{d}_r(k)]$ ,  $u(k)$  – сигнал управления.

Уравнение (2) показывает, что для вектора внешних входов можно провести декомпозицию на две составляющие, одна из которых,  $\mathbf{d}_1(k)$ , включает в себя входы системы, зависящие линейно от сигналов управления  $u(k)$ . Для такого типа систем задачи анализа управляемости полученной модели и непосредственно синтеза алгоритмов управления имеют значительно более простое решение. Для синтеза локальных моделей для каждого  $j$ -го режима может быть использован следующий алгоритм.

1. Задать диапазоны допустимых значений для каждого из параметров  $n_j$ ,  $p_j$  и сформировать соответствующий вектор входов.
2. Для модели в форме (1) при текущих значениях  $n_j$  и  $p_j$  и векторе входа провести идентификацию неизвестных параметров  $a_{i,j}$  и  $\mathbf{b}_{m,j}$ .
3. Оценить качество аппроксимации.
4. Если используемый набор параметров модели обеспечивает лучшее качество аппроксимации по сравнению с предыдущими итерациями, зафиксировать текущие вектор входов  $\mathbf{d}$ , порядки полиномов  $n_j$  и  $p_j$  и оценки параметров  $a_{i,j}$  и  $\mathbf{b}_{m,j}$  как оптимальные.
5. Повторить предыдущие пункты до осуществления полного перебора параметров модели.

Для идентификации неизвестных параметров  $a_{i,j}$  и  $\mathbf{b}_{m,j}$  модели (1) может быть использован любой из известных методов [10, 11]. Для этого предварительно перепишем модель (1) в форме

$$y_j(k) = \theta_j^T \phi_j(k), \quad (3)$$

где  $\theta_j = [a_{1,j} \dots a_{n_j,j} \ \mathbf{b}_{0,j}^T \dots \mathbf{b}_{p_j,j}^T]^T$ ,  $\phi_j(k) = [y_j(k-1) \dots y_j(k-n_j) \ \mathbf{d}_j^T(k) \dots \mathbf{d}_j^T(k-p_j)]^T$ .

Идентификация проводится на основе имеющихся массивов из  $N_j$  измерений  $\mathbf{Y}_j = [y_j(1) \dots y_j(N_j)]^T$ . Метод наименьших квадратов для оценки параметров модели (3) дает решение

$$\hat{\theta}_j = (\Phi_j^T \Phi_j)^{-1} \Phi_j^T \mathbf{Y}_j. \quad (4)$$

Для оценки точности аппроксимации вводятся следующие показатели:

- среднеквадратичная ошибка:  $J = \sqrt{N^{-1} \sum_{k=1}^N e^2(k)}$ , где  $e(k) = y^*(k) - y(k)$ ;  $y^*(k)$  – реальный выход моделируемой системы, например, записанный в результате экспериментов;  $y(k)$  – текущий выход аппроксимирующей модели;
- максимальная ошибка:  $e_m = \max_{1 \leq k \leq N} |e(k)|$ .

Далее, пусть для характерной переменной  $x(k)$  определены граничные значения для каждого из интервалов  $Z_j, j = \overline{1: N_z - 1}$ , где  $N_z$  – общее число интервалов, тогда для одномерного разбиения в каждый дискретный момент времени можно вычислить функцию принадлежности:

$$s_j(k) = \begin{cases} 1, & \text{если } Z_{j-1} \leq x(k) \leq Z_j, \\ 1 - \frac{x(k) - Z_j}{\Delta_Z}, & \text{если } Z_j \leq x(k) \leq Z_j + \Delta_Z, \\ 1 - \frac{Z_{j-1} - x(k)}{\Delta_Z}, & \text{если } Z_{j-1} - \Delta_Z \leq x(k) \leq Z_{j-1}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где  $\Delta_z < \min_{j=2:N_z-1} (Z_j - Z_{j-1})$  представляет собой буферную зону между интервалами, которая вводится специально, чтобы сгладить переходы между режимами. Функция принадлежности, определяемая на основании алгоритма (5), имеет трапецидальное распределение (рисунок).

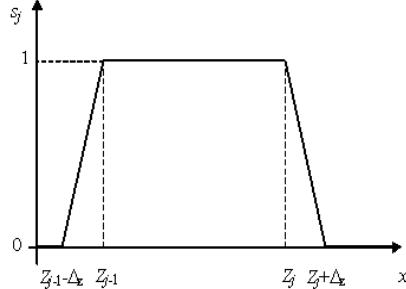


Рисунок. Графики распределения функции принадлежности  $s_j(x(k))$  для одномерного случая

Нормировка степени принадлежности проводится на основании соотношения

$$\bar{s}_j(k) = \frac{s_j(k)}{\sum_{i=1}^{N_z} s_i(k)}.$$

Адаптация в системе осуществляется посредством автоматического корректирования значений функции принадлежности на основании величины ошибки между выходом аппроксимирующей модели и текущим значением регулируемой переменной:

$$\begin{cases} \tilde{s}_j(k) = \bar{s}_j(k) J_j^0(k), \\ J_j^0(k) = e^{-\alpha \sqrt{M^{-1} \sum_{i=0}^M (y^*(k-i) - \hat{\theta}_j^T \phi_j(k-i))^2}}, \end{cases}$$

где параметр  $\alpha > 0$  и ширина скользящего окна  $M$  выбираются разработчиком, а оценки  $\hat{\theta}_j^T$  находятся из алгоритма идентификации (4). В этом случае выход результирующей модели определяется как взвешенное среднее выходов локальных моделей:

$$y(k) = \sum_{j=1}^{N_z} \tilde{s}_j(k) \hat{\theta}_j^T \phi_j(k). \quad (6)$$

### Синтез алгоритма управления

Рассмотрим систему комбинированного управления, включающую прямую и обратную связи.

Для синтеза алгоритма управления по прямой связи за основу были взяты методы управления, использующиеся при решении обратных задач динамики [12]. Преобразуем (6) к следующему виду:

$$y(k+1) = \sum_{i=0}^n \mathbf{W}_{j,i}^y y(k-i) + \sum_{l=-1}^p \mathbf{W}_{j,l+1}^1 \mathbf{f}_1(k-l) + \sum_{l=-1}^p [\mathbf{W}_{j,l+1}^u + \mathbf{W}_{j,l+1}^0 \mathbf{F}_0(k-l)] u(k-l), \quad (7)$$

где  $\mathbf{W}_{j,i}^y, \mathbf{W}_{j,l+1}^1, \mathbf{W}_{j,l+1}^0$  – значения векторов неизвестных параметров, зависящие от времени, а  $y(k)$ ,  $u(k)$ ,  $\mathbf{f}_1(k)$  и  $\mathbf{F}_0(k)$  – выходы, управления и дополнительные входы системы соответственно в каждый дискретный момент времени  $k$ . Векторы  $\mathbf{f}_1(k)$  и  $\mathbf{F}_0(k)$  формируются на основании компонент исходного вектора входов модели (1)  $\mathbf{d}_2(k)$  и  $[\tilde{d}_2(k) \dots \tilde{d}_l(k)]$  соответственно на основании (2).

Инвертируя (7) относительно сигнала управления, получаем выражение

$$\begin{aligned} u(k+l) = & [\mathbf{W}_{j,0}^u + \mathbf{W}_{j,0}^0 \mathbf{F}_0(k+1)]^{-1} \{ y^*(k+1) + \sum_{i=0}^z \mathbf{A}_i (y(k-i) - y^r(k-i)) - \\ & - \sum_{i=0}^n \mathbf{W}_{j,i}^y y(k-i) - \sum_{l=-1}^p \mathbf{W}_{j,l+1}^1 \mathbf{f}_1(k-l) - \sum_{l=0}^p [\mathbf{W}_{j,l+1}^u + \mathbf{W}_{j,l+1}^0 \mathbf{F}_0(k-l)] u(k-l) \}, \end{aligned}$$

где  $y^*$  обозначает желаемый выход системы, а матрица коэффициентов  $\mathbf{A}_i$  выбирается таким образом, чтобы гарантировать устойчивость модели ошибки  $e(k) = \sum_{i=0}^z \mathbf{A}_i e(k-i)$ .

Для синтеза управления по обратной связи был использован нелинейный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор:

$$u_{fb}(k) = k_1 e(k) + k_2 \sum_{i=0}^k e(i) + k_3 \sum_{i=1}^k (e(i) - e(i-1)) + k_4 \text{sign}(e(k)) + k_5 e^3(k), \quad (8)$$

где коэффициенты регулятора  $k_1 \dots k_5$  настраиваются, исходя из требований устойчивости замкнутой системы. Данный алгоритм содержит две нелинейных функции от ошибки. Кубический член в уравнении (8) позволяет обеспечить наиболее быструю реакцию по ошибке по сравнению с пропорциональной составляющей, и в то же время нечетная степень позволяет учесть знак ошибки. В свою очередь, введение функции знака позволяет гарантировать робастность динамики ошибки регулирования по отношению к малым шумам в канале управления.

### **Заключение**

В работе рассматривается оригинальный подход к синтезу гибридных аппроксимирующих моделей для нелинейных систем. Предполагается использование локальных нелинейных авторегрессионных моделей для отдельных динамических режимов системы и организация переключения между ними на основе «смешивания». Адаптация в системе осуществляется за счет коррекции весовых функций принадлежности к отдельным режимам в процессе функционирования.

Предлагается схема комбинированного управления. Синтез управления по прямой связи проводится решением обратной задачи динамики. В свою очередь, в обратной связи используется нелинейный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор. Вывод моделей и синтез регуляторов проводится в дискретном времени, что соответствует на практике динамике современных систем с цифровыми электронными компонентами.

В качестве направлений дальнейшей работы можно обозначить исследование методов автоматического выделения динамических режимов в системе и разработку более эффективных схем переключения, позволяющих обеспечить одновременно робастность системы и высокие показатели качества регулирования.

### **Литература**

1. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб: Наука, 2000. – 549 с.
2. Арановский С.В., Бобцов А.А., Никифоров В.О. Синтез наблюдателя для нелинейного объекта в условиях гармонического возмущения, приложенного к выходной переменной // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3 (67). – С. 32–38.
3. Heemels W.P.M.H., De Schutter B., Bemporad A. Equivalence of hybrid dynamical models // Automatica. – 2001. – № 37. – P. 1085–1091.
4. Bemporad A. Efficient Conversion of Mixed Logical Dynamical Systems Into an Equivalent Piecewise Affine Form // IEEE Transaction on Automatic Control. – 2004. – V. 49. – № 5. – P. 832–838.
5. Takagi T. and M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. – 1985. – V. 15. – № 1. – P. 116–132.
6. Liberzon D. Switching in Systems and Control. – Boston: Birkhauser, 2003. – 233 p.
7. Efimov D.V. Uniting Global And Local Controllers Under Acting Disturbances // Automatica. – 2006. – № 42. – P. 489–495.
8. Han Z. and K.S. Narendra. Multiple Adaptive Models for Control // Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control. – 2010. – P. 60–65.
9. Kuipers M. and P. Ioannou. Multiple model adaptive control with mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2010. – V. 55. – № 8. – P. 1822–1836.
10. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М: Наука, 1991. – 432 с.
11. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 684 с.
12. Крутко П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций: Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.

**Колюбин Сергей Алексеевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, s.kolyubin@gmail.com

**Ефимов Денис Валентинович**

– Государственный институт исследований по информатике и автоматике, Лилль, Франция, доктор технических наук, исследователь, efde@mail.ru

**Никифоров Владимир Олегович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, проректор, nikiforov@mail.ifmo.ru

**Бобцов Алексей Алексеевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ifmo.ru

УДК 681.51.015

**АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЫХОДУ С КОМПЕНСАЦИЕЙ  
СИНУСОИДАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА  
С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ И СТРУКТУРНЫМИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ<sup>2</sup>**  
**А.А. Бобцов, С.А. Колюбин, А.А. Пыркин**

Рассматривается задача стабилизации по выходу линейного объекта, подверженного влиянию внешнего неизвестного синусоидального возмущения. Решение задачи получено для класса линейных систем, функционирующих в условиях параметрической и структурной неопределенности.

**Ключевые слова:** управление по выходу, компенсация возмущений, параметрическая и структурная неопределенность.

### Введение

Компенсация синусоидальных возмущающих воздействий является актуальной и популярной задачей современной теории управления (например, [1–15]). Большинство исследований, связанных с разработкой методов компенсации гармонических возмущений, изучают случай, когда амплитуды, фазы и частоты являются неизвестными постоянными параметрами (например, [1–14]). В частности, работы [3, 4] являются одними из первых работ отечественных ученых, где была поставлена и решена задача адаптивной компенсации неизвестных гармонических возмущений. В настоящее время при различных допущениях относительно модели объекта рассматриваются различные случаи задач управления, а именно: линейность или нелинейность динамики, параметрическая определенность или ее отсутствие, доступность измерений всех переменных состояния или только их части и пр. Несмотря на то, что в фундаментальной монографии [2], посвященной методам компенсации возмущений, большинство подходов было изложено, кратко рассмотрим некоторые новые результаты.

В [5] предлагается алгоритм управления линейным устойчивым объектом с известными параметрами и единичной относительной степенью, подверженным влиянию смещенного гармонического возмущения. В отличие от [5], в [8] рассмотрен алгоритм компенсации возмущающего воздействия для случая неминимально фазового линейного объекта с известными параметрами, но любой относительной степени. Работы [9, 10, 14] посвящены парированию синусоидального возмущения в условиях полной параметрической неопределенности объекта управления. Выстроен адаптивный регулятор, базирующийся только на измерениях выходной переменной. В [9, 10] рассмотрен линейный объект, а в [14] – нелинейный. Однако в [9, 10, 14] допускается, что относительная степень известна и равна единице. В [12, 13] данная задача распространена на линейные объекты с известными параметрами, но с запаздыванием в канале управления.

В настоящей работе предлагается новый алгоритм управления по выходу параметрически неопределенным линейным объектом, подверженным влиянию гармонического возмущения  $\delta(t) = \mu \sin(\omega t + \varphi)$  с неизвестными амплитудой и фазой. Данный подход основан на методе операторного синтеза компенсации возмущения, который был опубликован в [15]. По мнению авторов, несмотря на то, что частота  $\omega$  известна, решаемая в этой работе задача развивает подходы, опубликованные в [1–15], поскольку допускается, что относительная степень объекта, как и его параметры, может быть неизвестна.

### Постановка задачи

Рассмотрим линейный объект управления вида

$$a(p)y(t) = b(p)u(t) + c(p)\delta(t), \quad (1)$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования; параметры полиномов

$$a(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + a_{n-2}p^{n-2} + \dots + a_0, \quad b(p) = b_m p^m + b_{m-1}p^{m-1} + b_{m-2}p^{m-2} + \dots + b_0 \quad \text{и}$$

$c(p) = c_l p^l + c_{l-1}p^{l-1} + c_{l-2}p^{l-2} + \dots + c_0$  – неизвестные числа, а  $\delta(t) = \mu \sin(\omega t + \varphi)$  – возмущающее воздействие с неизвестными амплитудой  $\mu$  и фазой  $\varphi$ .

Цель управления – найти такой сигнал  $u = u(y)$ , чтобы было выполнено целевое условие

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0. \quad (2)$$

Данную задачу будем решать при следующих допущениях.

*Допущение 1.* Полином  $b(p)$  гурвицев, и коэффициент  $b_0 > 0$ .

*Допущение 2.* Известно максимальное значение относительной степени  $r^*$ , но не размерности полиномов  $a(p)$  и  $b(p)$ , и сама относительная степень  $r = n - m$ .

<sup>2</sup> Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 16.740.11.0553).

*Допущение 3.* Известна частота  $\omega$  возмущения  $\delta(t) = \mu \sin(\omega t + \varphi)$ .

### Предварительный результат

Следуя [15], представим уравнение (1) в виде

$$Y(s) = \frac{b(s)}{a(s)}U(s) + \frac{c(s)}{a(s)}\Psi(s) + \frac{D(s)}{a(s)}, \quad (3)$$

где  $s$  – комплексная переменная Лапласа;  $Y(s) = L\{y(t)\}$ ,  $U(s) = L\{u(t)\}$  и  $\Psi(s) = L\{\delta(t)\} = \frac{\mu_1 s + \mu_2}{s^2 + \omega^2}$  –

изображения по Лапласу соответствующих сигналов,  $\mu_1 = \mu \sin \varphi$  и  $\mu_2 = \mu \cos \varphi$ ; полином  $D(s)$  обозначает сумму всех членов, содержащих начальные условия.

Временно предположим, что измеряются все необходимые производные выходного сигнала  $y(t)$ , а коэффициенты полиномов  $a(p)$  и  $b(p)$  известны. Предполагая, что относительная степень  $r$  известна, выберем закон управления  $u(t)$  следующим образом:

$$u(t) = -k \frac{\alpha(p)(p+1)^2}{p^2 + \omega^2} y(t), \quad (4)$$

где гурвицев полином  $\alpha(p)$  степени  $r^*-1$  и постоянный коэффициент  $k > 0$  выбираются из соображений строгой вещественной положительности передаточной функции (например, [16, 17]):

$$H(s) = \frac{b(s)\alpha(s)(s+1)^2}{a(s)(s^2 + \omega^2) + kb(s)\alpha(s)(s+1)^2}.$$

**Замечание 1.** В [16, 17] было показано, что для любого гурвицева полинома  $\alpha(p)$  существует в общем случае достаточно большой постоянный коэффициент  $k > 0$  такой, что передаточная функция  $H(s)$  удовлетворяет условиям строгой вещественной положительности. Для известных коэффициентов полиномов  $a(p)$  и  $b(p)$  поиск коэффициента  $k > 0$  является несложной задачей.

Тогда, подставляя изображение по Лапласу для (4) в уравнение (3), получаем

$$Y(s) = -k \frac{b(s)\alpha(s)(s+1)^2}{a(s)(s^2 + \omega^2)} Y(s) + \frac{c(s)}{a(s)} \frac{\mu_1 s + \mu_2}{(s^2 + \omega^2)} + \frac{D(s)}{a(s)}$$

и

$$Y(s) = (\mu_1 s + \mu_1) \frac{c(s)}{\gamma(s)} + \frac{D(s)(s^2 + \omega^2)}{\gamma(s)},$$

где полином  $\gamma(s) = a(s)(s^2 + \omega^2) + kb(s)\alpha(s)(s+1)^2$  – гурвицев в силу строгой вещественной положительности передаточной функции  $H(s)$ .

Осуществляя обратное преобразование Лапласа для  $Y(s)$ , имеем

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0.$$

### Основной результат

Однако производные выходного сигнала  $y(t)$  не измеряются, а коэффициенты полиномов  $a(p)$  и  $b(p)$  неизвестны. В этом случае воспользуемся результатами, опубликованными в [14, 15] и выберем закон управления следующим образом:

$$u(t) = -k \frac{\alpha(p)(p+1)^2(T_2 p + 1)^9}{(p^2 + \omega^2)(T_1 p + 1)^9} \xi_1(t), \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{r-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2 - \dots - k_{r-1} \xi_{r-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (6)$$

где число  $k > 0$  и полином  $\alpha(p)$  выбираются аналогично (4), число  $\sigma > k$ , а коэффициенты  $k_i$  рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (6) при нулевом входе  $y(t)$ ,  $\theta = r^* - r_0$ , параметр  $T_1^{-1}$  должен быть больше коэффициента  $k$  и много меньше  $\sigma$ , параметр  $T_2$  такой, что

$0 < T_2^{-1} \ll T_1^{-1}$ , число  $r_0$  соответствует известному минимальному значению относительной степени:  $0 < r_0 \leq r \leq r^*$ .

**Замечание 2.** Очевидно, что в условиях полной параметрической неопределенности выбор  $T_1^{-1}$ ,  $k$  и  $\sigma$  может вызывать некоторые сложности, поэтому рассмотрим более конструктивное правило расчета этих коэффициентов. Как показано в [17], можно настраивать коэффициент  $k$  по линейному закону до тех пор, пока переменная  $y(t)$  не попадет в некоторую малую область, заданную разработчиком системы. Параметры  $T_1^{-1}$  и  $\sigma$  можно рассчитывать следующим образом:  $T_1^{-1} = k^2$  и  $\sigma = \sigma_0(T_1^{-1})^{29}$ . Очевидно, что при таком расчете коэффициентов регулятора система может быть неустойчивой, но данная схема обеспечивает сходимость выходной переменной  $y(t)$  в некоторую малую область, заданную разработчиком системы.

Подставляя (5) в (1), получаем

$$y(t) = \frac{kb(p)\alpha(p)(p+1)^2(T_2p+1)^9}{a(p)(p^2+\omega^2)(T_1p+1)^9 + kb(p)\alpha(p)(p+1)^2(T_2p+1)^9} \varepsilon(t) + \\ + \frac{b(p)(p^2+\omega^2)(T_1p+1)^9}{a(p)(p^2+\omega^2)(T_1p+1)^9 + kb(p)\alpha(p)(p+1)^2(T_2p+1)^9} \delta(t), \quad (7)$$

где  $\varepsilon(t) = y(t) - \xi_1(t)$ .

Запишем (7) следующим образом:

$$y(t) = \frac{kb(p)\alpha(p)(p+1)^2(T_2p+1)^9}{a(p)(p^2+\omega^2)(T_1p+1)^9 + kb(p)\alpha(p)(p+1)^2(T_2p+1)^9} [\varepsilon(t) + w(t)], \quad (8)$$

где сигнал  $w(t) = \frac{(p^2+\omega^2)(T_1p+1)^9}{ka(p)(p+1)^2(T_2p+1)^9} \delta(t)$ .

Модель близкая к (8), рассматривалась в [18, 19], поэтому воспользуемся результатами [18, 19] и перейдем к форме вход–состояние–выход вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + k\mathbf{b}(\varepsilon + w), \quad (9)$$

$$y = \mathbf{c}^T \mathbf{x}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{x} \in R^n$  – вектор переменных состояния модели (9), (10);  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{c}$  – матрицы перехода от модели вход–выход к модели вход–состояние–выход, причем в силу известной леммы Якубовича–Калмана (например, [16]) можно указать симметрическую положительно определенную матрицу  $\mathbf{P}$ , удовлетворяющую двум следующим матричным уравнениям:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}_1, \quad \mathbf{P} \mathbf{b} = \mathbf{c},$$

где  $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_1^T$  – некоторая положительно определенная матрица.

Перепишем (6) в векторно-матричной форме:

$$\dot{\xi} = \sigma(\Gamma\xi + \mathbf{dy}), \quad (11)$$

$$\xi_1 = \mathbf{h}^T \xi,$$

где  $\xi \in R^{r-1}$  – вектор переменных состояния модели (11),  $\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_{r-1} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ k_1 \end{bmatrix}$ ,

$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$ , причем матрица  $\Gamma$  – гурвицева в силу расчета коэффициентов  $k_i$  модели (6).

Введем в рассмотрение вектор отклонений

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{h}y - \xi. \quad (12)$$

Дифференцируя уравнение (12), получаем:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{h}\dot{y} - \sigma(\Gamma(\mathbf{h}y - \xi) + \mathbf{dy}) = \mathbf{h}\dot{y} + \sigma\Gamma\boldsymbol{\eta} - \sigma(\mathbf{d} + \Gamma\mathbf{h})y = \mathbf{h}\dot{y} + \sigma\Gamma\boldsymbol{\eta},$$

$$\varepsilon = y - \xi_1 = \mathbf{h}^T \boldsymbol{\eta},$$

где  $\mathbf{d} = -\Gamma \mathbf{h}$ .

Таким образом, имеем систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + k\mathbf{b}(\varepsilon + w), \quad y = c^T \mathbf{x}, \quad (13)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{h}\dot{y} + \sigma\Gamma\boldsymbol{\eta}, \quad \varepsilon = \mathbf{h}^T \boldsymbol{\eta}. \quad (14)$$

В силу гурвицности  $\Gamma$  существует матрица  $\mathbf{N} = \mathbf{N}^T$ , удовлетворяющая уравнению Ляпунова

$$\Gamma^T \mathbf{N} + \mathbf{N}\Gamma = -\mathbf{Q}_2,$$

где  $\mathbf{Q}_2 = \mathbf{Q}_2^T$  – положительно определенная матрица.

В работах [18, 19] была построена функция Ляпунова вида

$$V = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{N} \boldsymbol{\eta} \quad (15)$$

и показано, что для системы (13), (14) существует число  $\sigma >> k$  такое, что

$$\dot{V} \leq -\lambda V + k^{-1}w^2, \quad (16)$$

где число  $\lambda > 0$ .

Следуя результатам раздела «Предварительный результат», легко показать, что  $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0$ . Поскольку доказательство аналогично приведенным в [18, 19], не будем повторять его здесь. Так как  $w(t)$  экспоненциально сходится к нулю, то из неравенства (16) следует, что функция (15) стремится к нулю, что означает выполнение целевого условия (2).

### Пример

Рассмотрим числовой пример моделирования предлагаемого алгоритма управления (5), (6) для линейного объекта вида (1) вида

$$[p^3 - 2p - 3]y(t) = [p + 2]u(t) + [-4p + 1]\delta(t), \quad y(0) = -2, \quad \dot{y}(0) = -2, \quad \ddot{y}(0) = 2.$$

Будем полагать, что относительная степень  $r^*$  не превосходит 3, но известно, что относительная степень не меньше 2. Выберем закон управления в соответствии с (5), (6), где  $\alpha(p) = p + 1$ ,  $T_2 = 1$ ,  $\theta = 1$ , коэффициент  $k$  настраивается по линейному закону до тех пор, пока переменная  $y(t)$  не попадет в малую область 0,1, параметры  $T_1^{-1}$  и  $\sigma$  рассчитываются в соответствии с замечанием 2, т.е.  $T_1^{-1} = k^2$  и  $\sigma = \sigma_0(T_1^{-1})^2$ , где  $\sigma_0 = 0,8$ . На рисунке представлены переходные процессы в замкнутой системе с возмущением  $\delta(t) = 6 \sin(3t - 2)$ . На рисунке (а) представлен результат моделирования для выходной переменной  $y(t)$ , а на рисунке (б) – для адаптивно настраивющихся параметров  $k$ ,  $T_1^{-1}$  и  $\sigma$ .

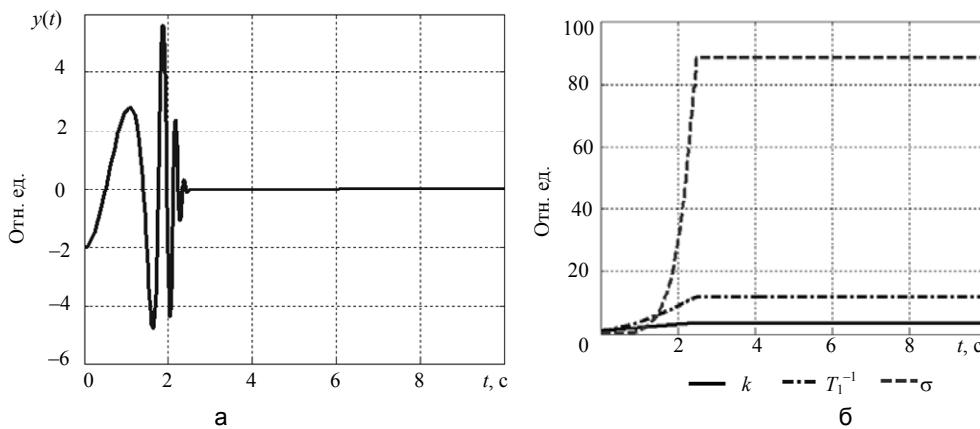


Рисунок. Графики переходных процессов в замкнутой системе: (а) – график функции  $y(t)$ ;

(б) – графики функций  $k$ ,  $T_1^{-1}$  и  $\sigma$

### Заключение

Для класса линейных стационарных параметрически и структурно неопределенных объектов вида (1) получаем алгоритм адаптивного управления (5), (6), полностью парирующий влияние синусоидального возмущающего воздействия  $\delta(t) = \mu \sin(\omega t + \varphi)$  с неизвестными амплитудой  $\mu$  и фазой  $\varphi$ . В качестве недостатка отметим, что в представленной работе задача была решена для случая известной частоты  $\omega$  возмущающего воздействия  $\delta(t) = \mu \sin(\omega t + \varphi)$ . Расширение полученного результата на случай неиз-

вестной частоты возможно посредством введения дополнительного канала ее идентификации. При этом подстановка получаемых оценок частоты в контур регулирования может происходить итеративно с использованием схемы с переключениями.

### Литература

1. Bodson M., Douglas S.C. Adaptive algorithms for the rejection of periodic disturbances with unknown frequencies // Automatica. – 1997. – V. 33. – P. 2213–2221.
2. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. – СПб: Наука, 2003. – 282 с.
3. Никифоров В.О. Адаптивная стабилизация линейного объекта, подверженного внешним детерминированным возмущениям // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1997. – № 2. – С. 103–106.
4. Nikiforov V.O. Adaptive non-linear tracking with complete compensation of unknown disturbances // European Journal of Control. – 1998. – V. 4. – № 2. – P. 132–139.
5. Marino R., Santosuosso G.L., Tomei P. Robust adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency. – Automatica. – 2003. – V. 39. – P. 1755–1761.
6. Marino R. and P. Tomei. Output Regulation for Linear Minimum Phase Systems with Unknown Order Exosystem // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2007. – V. 52. – P. 2000–2005.
7. Арановский С.В., Бобцов А.А., Никифоров В.О. Синтез наблюдателя для нелинейного объекта в условиях гармонического возмущения, приложенного к выходной переменной // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3 (67). – С. 32–38.
8. Бобцов А.А., Кремлев А.С. Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для линейного не минимально фазового объекта // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 10. – С. 14–17.
9. Бобцов А.А. Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 8. – С. 25–32.
10. Бобцов А.А. Адаптивное управление по выходу с компенсацией гармонического смещенного возмущения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 1. – С. 45–48.
11. Бобцов А.А., Пыркин А.А. Компенсация неизвестного синусоидального возмущения для линейного объекта любой относительной степени // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 3. – С. 114–122.
12. Бобцов А.А., Колюбин С.А., Пыркин А.А. Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 11. – С. 115–122.
13. Anton Pyrkin, Andrey Smyshlyaev, Nikolaos Bekiaris-Liberis, Miroslav Krstic. Rejection of Sinusoidal Disturbance of Unknown Frequency for Linear System with Input Delay // American Control Conference. – Baltimore, 2010. – P. 5688–5693.
14. Бобцов А.А., Кремлев А.С., Пыркин А.А. Компенсация гармонического возмущения для параметрически и функционально неопределенного нелинейного объекта // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 1. – С. 121–129.
15. Лукьяннова Г.В., Никифоров В.О. Алгоритм компенсации внешних детерминированных возмущений: операторный метод синтеза // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – 2003. – Вып. 10. – С. 5–9.
16. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб: Наука, 2000. – 549 с.
17. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 1. – С. 118–129.
18. Бобцов А.А., Шаветов С.В. Управление по выходу линейным параметрически неопределенным объектом в условиях возмущающих воздействий и неучтеннной динамики // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 32–38.
19. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Управление по выходу линейными системами с неучтеннной паразитной динамикой // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 6. – С. 115–122.

**Бобцов Алексей Алексеевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ifmo.ru

**Колюбин Сергей Алексеевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, s.kolyubin@gmail.com

**Пыркин Антон Алексеевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.pyrkin@gmail.com

УДК 681.5.11

**ОДНОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ОСИ СКАНИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ТЕЛЕСКОПА  
С ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ  
РЕГУЛЯТОРОМ СКОРОСТИ**

В.А. Толмачев, Д.А. Субботин

Сформулированы проблемы повышения точности воспроизведения диаграммы сканирования электроприводом на основе бесконтактного магнитоэлектрического преобразователя с ограниченным углом поворота. Предложена векторно-матричная математическая модель и методика синтеза одноконтурной системы управления с пропорционально-дифференциальным регулятором скорости. Проведено математическое моделирование процессов сканирования при заданных характеристиках магнитоэлектрического преобразователя и параметрах диаграммы сканирования, предложены перспективные структурные решения для системы управления.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический преобразователь, система стабилизации скорости, методика синтеза, математическая модель, режимы сканирования, инфракрасный телескоп.

### Введение

Основу системы наведения современного телескопа составляют опорно-поворотное устройство (ОПУ) и силовые следящие электроприводы. Например, система наведения инфракрасного телескопа строится на основе трехосного ОПУ с азимутальной, угломестной и сканирующей осями. На каждой из осей расположен электроагрегат, содержащий электрический двигатель и датчики угла поворота и скорости двигателя с жестко связанными валами. Синтезу систем управления прецизионными безредукторными следящими электроприводами азимутальной и угломестных осей на основе вентильных двигателей посвящены работы [1–3] и др. Специфическими являются требования к электроприводам осей сканирования. Во многих случаях они должны обеспечивать движение оси в пределах малых углов в соответствии с временной диаграммой, представленной диаграммой 1 на рис. 1.

Полный цикл сканирования  $T_{\text{ск}}$  содержит 2 участка рабочего хода ( $t_1-t_2$  и  $t_3-t_4$ ) с длительностью  $t_p$  и 2 участка нерабочего хода ( $t_2-t_3$  и  $t_4-t_5$ ) с длительностью  $t_{\text{hp}}$ . На участках рабочего хода угол поворота оси должен меняться линейно в пределах от  $-a_{\text{тр}}$  до  $+a_{\text{тр}}$  с допустимой погрешностью поддержания скорости на рабочем участке  $\Delta\%$ . Закон изменения угла на участках нерабочего хода не лимитируется. Длительность нерабочего хода измеряется между окончанием одного рабочего хода и началом следующего. Параметры диаграммы и требования к точности ее воспроизведения зависят от заданного режима сканирования (в широком или узком угловом поле). Здесь будем ориентироваться на параметры диаграммы, представленные в табл. 1.

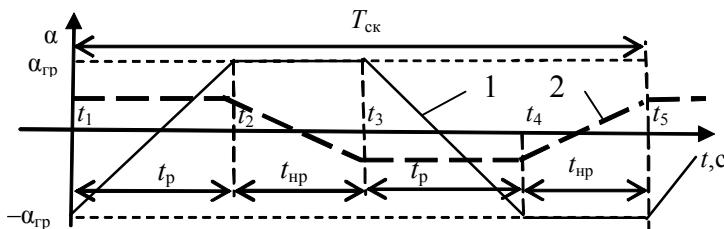


Рис. 1. Диаграммы сканирования электропривода:

1 – временная диаграмма сканирования для систем управления, замкнутых по углу поворота вала;  
2 – временная диаграмма сканирования для систем управления, замкнутых по скорости вала

Режим сканирования	$a_{\text{тр}}, '$	$T_{\text{ск}}, \text{с}$	$t_p, \text{с}$	$t_{\text{hp}}, \text{с}$	$\Delta\%$
Широкое угл. поле	30	2,4	1	0,2	5
Узкое угл. поле	5	0,5	0,17	0,08	5

Таблица 1. Параметры диаграммы сканирования

Время выхода на одну из границ рабочего диапазона углов из произвольной точки первоначального положения не должно превышать 0,2 с.

Ввиду достаточно малого диапазона изменения угла поворота оси сканирования для реализации электропривода нет необходимости использовать традиционные электродвигатели с неограниченным углом поворота. Перспективно применение для этих целей бесконтактных магнитоэлектрических преобразователей (МЭП) входного электрического сигнала (напряжения) в пропорциональное угловое перемещение его ротора [4]. В работе [5] проведен анализ статических и динамических характеристик МЭП с ограниченным углом поворота для приводов сканирования и малыми индуктивностями обмоток управления. На основе анализа обоснована целесообразность построения системы управления электропривода с внутренним контуром динамической коррекции для демпфирования слабо затухающих угловых коле-

баний вала с обратной связью по скорости вала. В работе [6] предложена векторно-матричная математическая модель и методика синтеза системы управления электропривода оси сканирования с внутренним контуром динамической коррекции и внешним контуром регулирования угла. Проведенное математическое моделирование процессов сканирования при заданных характеристиках МЭП, параметрах диаграммы сканирования, незначительных индуктивностях обмотки управления МЭП и малых статических моментах нагрузки на оси подтвердило правомерность предложенной методики синтеза и возможность реализации требуемого движения исполнительной оси в режиме слежения за трапецидальным задающим воздействием в виде диаграммы 1 на рис. 1. Испытание приводов сканирования на реальных ОПУ показало на необходимость учета при синтезе как значительных величин индуктивности обмоток управления МЭП, так и моментов нагрузки типа «сухое трение» в опорах оси. При подходах, описанных в работах [5, 6], быстродействие системы управления становится соизмеримым с длительностью рабочих участков диаграммы сканирования, а увеличение моментов нагрузки на оси приводит к существенному ухудшению линейности. В этих условиях требуемое движение оси невозможно обеспечить ни в одном из режимов сканирования. Устранение влияния указанных факторов возможно в структурах, замкнутых по скорости вала электромеханического преобразователя, при отработке входных воздействий в виде диаграмм, представленных диаграммой 2 на рис. 1. Здесь обсуждается один из возможных вариантов структурного построения замкнутых по скорости систем управления: одноконтурная система с пропорционально-дифференциальным (ПД) регулятором и задающим воздействием  $U_3$ , соответствующим диаграмме 2 на рис. 1.

### Структурная схема

Структурная схема исследуемой системы представлена на рис. 2, где штриховыми линиями выделены элементы и связи, образующие структурную схему собственно МЭП, основанную в работе [5], а Р – ПД-регулятор, осуществляющий компенсацию электрической постоянной времени МЭП  $T_s = L/R$ , где  $R$  и  $L$  – соответственно активное сопротивление и индуктивность обмотки управления. Необходимость такой компенсации возникает при значительных величинах индуктивности.

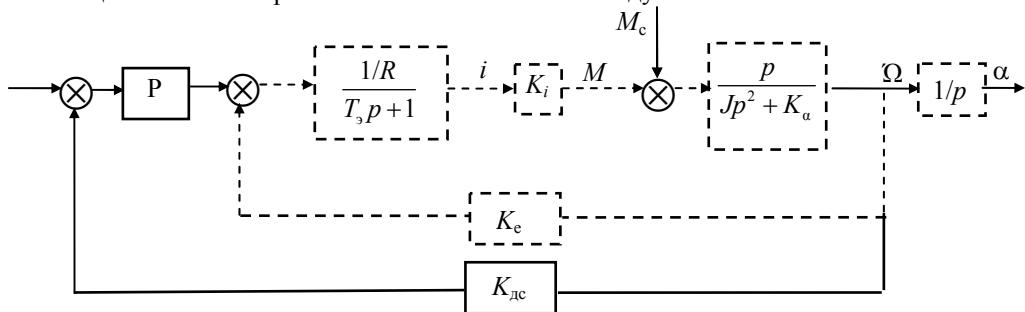


Рис. 2. Структурная схема системы управления

В приведенной схеме:  $u$  и  $i$  – соответственно напряжение на обмотке управления МЭП и ток в обмотке;  $\alpha$  и  $\Omega$  – соответственно угол поворота оси и ее угловая скорость;  $K_e$  – крутизна противо-Э.д.с.;  $J$  – суммарный момент инерции по оси сканирования;  $M_c = M_{c0} \cdot sign \Omega$  – момент типа «сухое трение» в опорах оси;  $K_a = dM/d\alpha$  – жесткость механической характеристики или жесткость «магнитной пружины»;  $K_i = dM/di$  – жесткость моментной (тяговой) характеристики или чувствительность по току;  $f$  – коэффициент внутреннего демпфирования. Далее при расчетах и моделировании будем ориентироваться на следующие параметры МЭП с нагрузкой:  $K_a = 4500 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ ;  $K_i = 120 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$ ;  $K_e = 1,5 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{рад}$ ;  $L = 0,6 \text{ Гн}$ ;  $R = 10,5 \text{ Ом}$ ;  $J = 250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $f = 0$ ;  $T_s = L/R = 0,057 \text{ с}$ ;  $K_{dc} = 20 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{рад}$ . Возможный диапазон изменения момента  $M_{c0}$  – 5–25 Н·м. Предельно допустимое значение напряжения на обмотке управления  $U_{\text{доп}} = 48 \text{ В}$ .

### Векторно-матричная математическая модель и методика синтеза одноконтурной системы управления с ПД-регулятором скорости

Рассмотрим динамические свойства одноконтурной системы регулирования скорости. Передаточная функция ПД-регулятора имеет вид

$$W_{\text{пп}}(p) = \frac{K_{\text{пп}}(T_d p + 1)}{T_v p + 1},$$

где  $K_{\text{пп}}$  – коэффициент передачи;  $T_d$  – постоянная времени дифференцирования и  $T_v$  – постоянная времени дополнительного инерционного звена. На рис. 3 представлена детализированная структурная схема (ДСС) регулятора, где  $\varepsilon = U_3 - K_{dc} \cdot \Omega$  – ошибка регулирования, а  $U_3$  – напряжение задания, соответствующее диаграмме 2 на рис. 1.

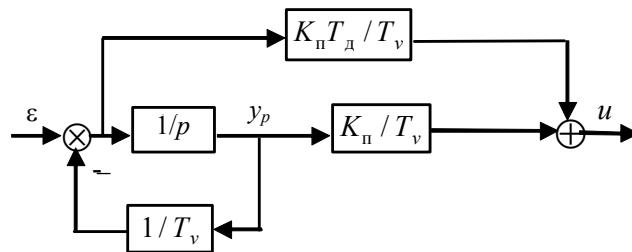


Рис. 3. Детализированная структурная схема ПД-регулятора

Используя ДСС, опишем ПД-регулятор следующими уравнениями:

$$\dot{y}_p = U_3 - K_{dc} \cdot \Omega - (1/T_v) y_p, \quad (1)$$

$$u = -\frac{K_n T_d K_{dc}}{T_v} \Omega - \frac{K_n (T_d - T_v)}{T_v^2} y_p + \frac{K_n T_d}{T_v} U_3, \quad (2)$$

где  $y_p$  – выходной сигнал интегратора ДСС;  $u$  – напряжение на обмотке управления МЭП.

Дополнив систему уравнений, описывающих поведение собственно МЭП, приведенную в работе [5], уравнениями регулятора (1) и (2), представим описание рассматриваемой структуры в векторно-матричной форме:

$$\frac{dY}{dt} = AY + BU, \quad (3)$$

где

$$Y^T = [i \quad \Omega \quad \alpha \quad y_p], \quad U^T = [U_3 \quad M_c],$$

$$A = \begin{bmatrix} R & -\frac{K_e T_v + K_{dc} T_d K_n}{L T_v} & 0 & -\frac{(T_d - T_v) K_n}{L T_v^2} \\ \frac{K_i}{J} & -\frac{f}{J} & -\frac{K_a}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -K_{dc} & 0 & -\frac{1}{T_v} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{K_n \cdot T_d}{L \cdot T_v} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{T_v} \end{bmatrix}.$$

Осуществляя компенсацию электрической постоянной времени обмотки управления выбором  $T_d = T_3$  и  $T_v \ll T_d$ , без большой погрешности передаточные функции контура по задающему  $U_3$  и возмущающему  $M_c$  воздействиям можно представить в виде выражений

$$\frac{\Omega(p)}{U_3(p)} = \frac{p K_\Omega^*}{(\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{K_\Omega^*}{\omega_0^2} p + 1) K_{dc} \omega_0^2},$$

$$\frac{\Omega(p)}{M_c(p)} = \frac{p}{(\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{K_\Omega^*}{\omega_0^2} p + 1) K_a},$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K_a}{J}}$  – резонансная частота МЭП;

$$K_\Omega^* = \frac{K_i K_n K_{dc}}{JR}. \quad (4)$$

Эти передаточные функции при  $K_{dc} \gg K_e$  и выборе коэффициента  $K_\Omega^*$  из условия  $K_\Omega^* \geq 2\omega_0$  принимают вид

$$\frac{\Omega(p)}{U_3(p)} = \frac{K_\Omega^* p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) K_{dc} \omega_0^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\Omega(p)}{M_c(p)} = \frac{p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) K_a}. \quad (6)$$

Постоянные времена определяются по формулам

$$T_1 = \frac{1}{\frac{K_\Omega^*}{2} - \sqrt{\left(\frac{K_\Omega^*}{2}\right)^2 - \omega_0^2}}, \quad T_2 = \frac{1}{\frac{K_\Omega^*}{2} + \sqrt{\left(\frac{K_\Omega^*}{2}\right)^2 - \omega_0^2}}. \quad (7)$$

Анализ передаточных функций (5) и (6) показывает, что при постоянных напряжениях задания и моменте нагрузки независимо от их величины установившееся значение скорости равно нулю. Это обстоятельство и определяет специфику синтеза системы управления скоростью МЭП – обеспечение заданной точности поддержания скорости на рабочем участке диаграммы сканирования в условиях принципиально стремящейся к нулю скорости.

### Математическое моделирование

Реакция контура на скачкообразное входное воздействие определяется выражением

$$\Omega(t) = \Omega_3 \cdot \frac{K_\Omega^*}{\omega_0^2} \cdot \left[ \frac{1}{T_1 - T_2} \exp(-t/T_1) - \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \exp(-t/T_2) \right]$$

или

$$\Omega(t) = \Omega_3 \cdot \gamma \cdot [\exp(-t/T_1) - \exp(-t/T_2)], \quad (8)$$

где  $\Omega_3 = U_3/K_{dc}$  – заданное значение скорости;  $\gamma = \frac{K_\Omega^*}{\omega_0^2(T_1 - T_2)}$ .

Следует отметить, что при достаточно больших значения  $K_n$ ,  $\gamma$  близко к 1.

Реакция координат привода с параметрами МЭП, приведенными выше, и  $K_n=200$  на скачкообразное входное воздействие  $\Omega_3=1$  град/с (0,018 1/с) представлена на рис. 4. Здесь 1 – заданное значение скорости  $\Omega_3$ ; 2, 3, 4 – кривые соответственно скорости  $\Omega$ , угла поворота  $\alpha$ , тока в обмотке управления  $i$ , полученные на математической модели (3) в среде Mathcad; 5 – кривая скорости, рассчитанная по выражению (8). Как видно, кривые 2 и 5 практически совпадают, что говорит о корректности предложенного далее подхода к синтезу регулятора.

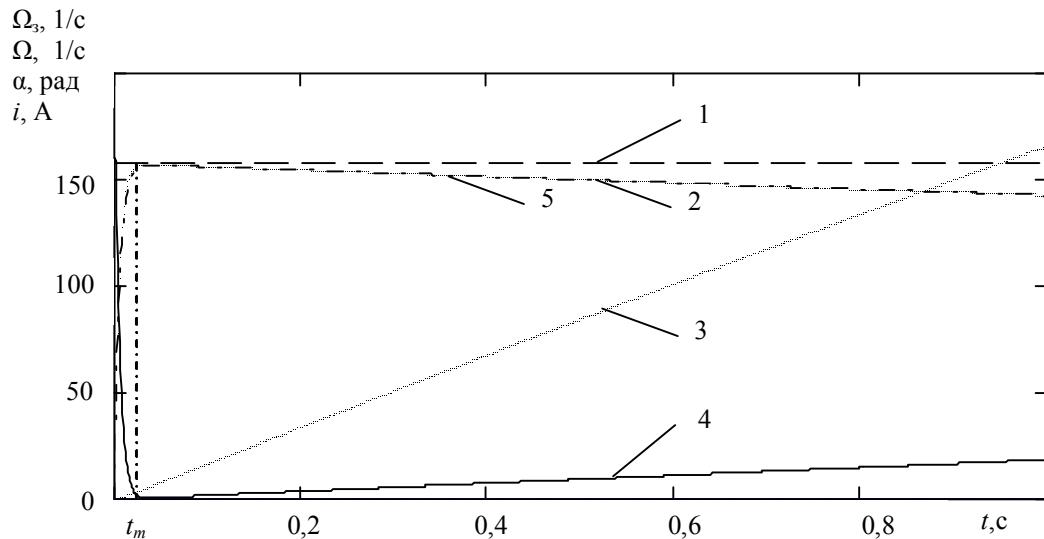


Рис. 4. Диаграмма реакции координат на скачкообразное задающее воздействие:  
1 – заданное значение скорости  $\Omega_3$ ; 2 – кривая скорости  $\Omega$ , полученная на математической модели (3);  
3 – угол поворота  $\alpha$ ; 4 – ток в обмотке управления  $i$ ; 5 – кривая скорости, рассчитанная по выражению (8)

Находя время достижения максимума  $t_m$  кривой (8) из условия  $\frac{d\Omega}{dt}(t_m) = 0$ , получим

$$t_m = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right). \quad (9)$$

Максимальное значение скорости в переходном процессе  $\Omega_m$  определяется по формуле

$$\Omega_m = \Omega_3 \cdot \gamma \cdot [\exp(-t_m/T_1) - \exp(-t_m/T_2)]. \quad (10)$$

При  $T_1 \gg T_2$  и  $T_1 \gg t_p$  на участке спада кривой 2 без большой погрешности процесс падения скорости можно считать линейным с ускорением  $-\Omega_3 \cdot \gamma / T_1$ . Тогда к концу рабочего участка скорость упадет на  $\Omega_3 \cdot \gamma \cdot t_p / T_1$ , а относительная погрешность поддержания заданного значения скорости составит  $\Delta = t_p / T_1$ . За-

даваясь допустимой погрешностью  $\Delta$ , определяем требуемое значение постоянной времени  $T_1$  и из выражения (4) находим требуемое значение коэффициента  $K_{\Omega}^*$  по формуле

$$K_{\Omega}^* = (\omega_0^2 + \Delta^2)t_p / \Delta. \quad (11)$$

Используя соотношение (4), легко найти значение коэффициента передачи  $K_{\pi}$ :

$$K_{\pi} = \frac{K_{\Omega}^* JR}{K_i K_{dc}}. \quad (12)$$

В табл. 2 приведены значения коэффициента передачи ПД-регулятора, рассчитанные по формуле (12), и параметры кривой скорости, рассчитанные по формулам (7), (9), (10) из условия обеспечения заданной погрешности  $\Delta$  при  $\Omega_3=1$  град/с (0,018 1/c), на рабочем участке при сканировании в режиме широкого углового поля ( $t_p=1$ ) и параметрах МЭП, приведенных выше. В последнем столбце таблицы приведены значения амплитуд всплесков напряжения  $U_m$  на обмотке управления МЭП, возникающих в моменты смены участков трапециoidalной диаграммы сканирования, полученные при математическом моделировании режима сканирования в широком угловом поле при  $M_{c0}=0$ . Это видно из диаграмм, представленных на рис. 5, а, соответствующих системе, синтезированной из условия обеспечения погрешности  $\Delta=5\%$ . Здесь 1 – заданное значение скорости  $\Omega_3$ ; 2, 3, 4 – кривые соответственно скорости  $\Omega$ , угла поворота  $\alpha$ , тока в обмотке управления  $i$ , полученные на математической модели (3) в среде Mathcad; 5 – диаграмма напряжения на обмотке управления  $u$ , сформированная по уравнению (2).

$\Delta\%$	$T_1, \text{с}$	$K_{\pi}$	$T_2, \text{с}$	$t_m, \text{с}$	$\gamma$	$\Omega_m, 1/\text{с}$	$U_m, \text{В}$
20	5,06	100	0,011	0,067	1,004	0,018	12
10	10	200	0,0056	0,042	1,001	0,018	24
5	20	390	0,0025	0,025	1	0,018	44
2	50.	984	0,0011	0,012	1	0,018	88

Таблица 2. Результаты расчета и моделирования режима сканирования в широком угловом поле

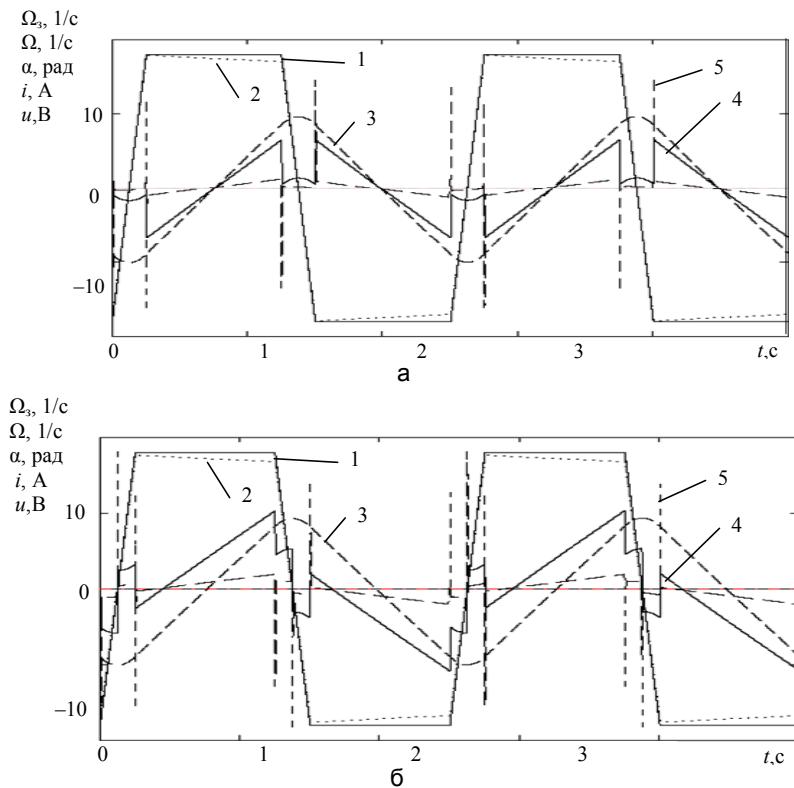


Рис. 5. Диаграмма моделирования режима сканирования в широком угловом поле при  $M_{c0}=0$  (а); при  $M_{c0}=25$  Нм (б): 1 – заданное значение скорости в масштабе 1000:1; 2 – скорость в масштабе 1000:1 (рад/с); 3 – угол поворота вала МЭП в масштабе 1000:1; 4 – ток в обмотке управления в масштабе 20:1; 5 – напряжение на обмотке управления в масштабе 1:3

Как явно следует из табл. 2, снижение ошибки на рабочем участке связано с повышением коэффициента передачи регулятора  $K_{\pi}$ . Однако повышение  $K_{\pi}$  приводит к росту амплитуды  $U_m$  всплесков напряжения  $u$  на выходе ПД-регулятора на границе смены рабочих участков диаграммы сканирования. Дело в том, что такая система является статической по задающему воздействию, и, следовательно, ей свой-

ственна ошибка, пропорциональная скорости изменения сигнала задания на нерабочем участке диаграммы сканирования. Поскольку скорость задания при смене участков меняется практически скачком, скачком изменяется и ошибка на входе ПД-регулятора. Этим обусловлены и всплески напряжения на обмотке управления.

Результаты моделирования, представленные на рис. 5, б, иллюстрируют процессы сканирования в широком угловом поле при наличии момента сухого трения в опорах оси с величиной  $M_{c0}=25$  Нм для системы, синтезированной из условия обеспечения погрешности  $\Delta=5\%$ . Влияние такого момента нагрузки проявляется как в увеличении на 2% относительно расчетной погрешности поддержания скорости на рабочем участке диаграммы сканирования, так и в появлении дополнительных всплесков напряжения на обмотке управления МЭП в моменты перехода скорости через 0. Эти всплески, по амплитуде достигающие значения 68 В, объясняются высокой скоростью изменения тока в обмотке управления и, следовательно, всплеском напряжения на индуктивности обмотки управления при смене знака реактивного момента  $M_c$ .

При сканировании в узком угловом поле ( $t_p=0,17$ ) и при расчете  $K_n$  по формулам (11) и (12) из условия обеспечения  $\Delta=2\%$  имеем  $K_n=167$ ;  $T_1=8,5$  с;  $T_2=0,0065$  с. При этом амплитуда всплеска напряжения на обмотке управления  $U_m=48$  В. Таким образом при заданном предельно допустимом напряжении на обмотке управления в системе с ПД-регулятором скорости 48 В при сканировании в широком угловом поле может быть реализована погрешность не менее 5%, а при сканировании в узком поле – не менее 2%.

Одним из путей повышения точности при обеспечении предельно допустимого напряжения на обмотке управления МЭП является формирование траектории движения на нерабочем участке так, чтобы подход к рабочему участку и выход с него осуществлялся с нулевым ускорением. Более радикальный путь – использование двухконтурной структуры, обеспечивающей повышение порядка астатизма как по задающему, так и по возмущающему воздействию в виде момента нагрузки типа «сухое трение».

### Заключение

В ходе работы была предложена векторно-матричная модель и методика синтеза одноконтурной системы регулирования скорости электропривода оси сканирования инфракрасного телескопа с компенсацией электрической постоянной времени с помощью пропорционально-дифференциального регулятора. Полученные расчетные соотношения позволяют аналитически получить требуемые значения коэффициента пропорциональности пропорционально-дифференциального регулятора при заданном значении погрешности поддержания скорости на рабочем участке диаграммы сканирования. В ходе моделирования режимов сканирования были установлены минимально реализуемые ошибки, при которых значение амплитуды всплеска напряжения на обмотке управления магнитоэлектрического преобразователя не превышает предельно допустимого значения 48 В: при сканировании в широком угловом поле может быть реализована погрешность не менее 5%, а при сканировании в узком поле – не менее 2%. Намечены пути снижения ошибки на рабочих участках диаграммы сканирования и амплитуды всплесков напряжения на обмотке управления в моменты смены рабочих и нерабочих участков.

### Литература

1. Борисов П.А., Томасов В.С. Методы анализа и синтеза энергоподсистем электротехнических комплексов с высокими энергетическими показателями // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 1 (59). – С. 5–13.
2. Толмачев В.А., Никитина М.В., Сергеева М.Е. Синтез системы управления электропривода азимутальной оси алтайского телескопа ТИ.3-12 // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 39–43.
3. Толмачев В.А., Антипова И.В., Фомин С.Г. Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 44. – С. 142–147.
4. Решетников Е.М., Саблин Ю.А. Электромеханические преобразователи гидравлических и газовых приводов. – М.: Машиностроение, 1982. – 144 с.
5. Толмачев В.А., Демидова Г.Л. Математические модели и динамические характеристики электромеханических преобразователей с ограниченным углом поворота // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 18–23.
6. Толмачев В.А., Субботин Д.А. Синтез системы управления электропривода сканирующей оси инфракрасного телескопа // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 53–57.

**Толмачев Валерий Александрович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tolmachev@ets.ifmo.ru

**Субботин Дмитрий Андреевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Subb-Dm@yandex.ru

УДК 621.391.037.372

МЕТОД ОЦЕНКИ УРОВНЯ КЛИППИРОВАНИЯ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА

С.В. Алейник, Ю.Н. Матвеев, А.Н. Раев

Рассмотрены различные способы оценки уровня клиппирования речевого сигнала. Предлагается и исследуется новый способ оценки уровня клиппирования, обладающий лучшими характеристиками по сравнению с известными.

**Ключевые слова:** клиппирование, речевой сигнал.

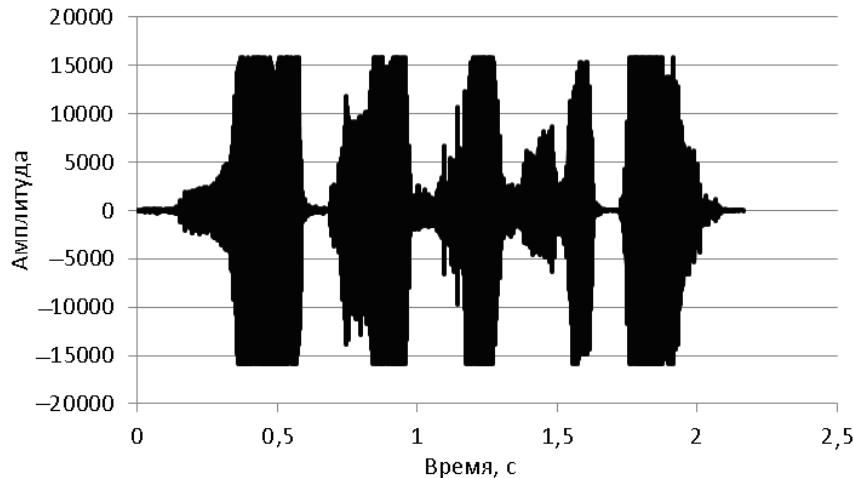
Введение

Клиппирование – один из видов искажения формы сигнала, которое происходит при перегрузке усилителя и при превышении выходным напряжением усилителя его динамического диапазона. На осциллограмме клиппирование обычно выглядит как обрезание сигнала по амплитуде. При этом различают одностороннее (обрезание «только сверху» или «только снизу») и двустороннее клиппирование. В цифровом сигнале клиппирование проявляется тем, что отсчеты сигнала группируются около его максимального и минимального значений («мягкое» клиппирование), либо просто равны соответствующим максимальным и минимальным значениям («жесткое» клиппирование). Математически процесс двустороннего жесткого клиппирования дискретного сигнала  $x(k)$  можно записать следующим образом [1]:

$$x_{cl}(k) = \begin{cases} x(k), & \text{if } |x(k)| < A, \\ Ax(k) / |x(k)|, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

где  $k$  – временной индекс;  $x_{cl}(k)$  – клиппированный сигнал;  $| |$  – операция взятия модуля;  $A$  – порог клиппирования.

Типичный вид клиппированного речевого сигнала представлен на рис. 1.



Клиппирование приводит к повышению уровня высокочастотных составляющих сигнала, к появлению гармоник высших порядков, что приводит к ухудшению качества звука, и, соответственно, к ухудшению результатов дальнейшей обработки, например, качества распознавания речи или голоса. Таким образом, задача оценки уровня клиппирования акустического сигнала (с целью, например, дальнейшей отбраковки сильно искаженных участков) представляется достаточно актуальной.

Если известен порог клиппирования  $A$  и мощность сигнала  $P_{sig}$ , то можно вычислить так называемое «отношение клиппирования» (clipping ratio, CR), служащее характеристикой того, насколько сильно клиппирован сигнал [1, 2]:

$$CR_{lin} = A / \sqrt{P_{sig}}, \quad (1)$$

$$CR_{db} = 10 \lg \left( A^2 / P_{sig} \right). \quad (2)$$

В реальной жизни, однако, чаще всего порог клиппирования неизвестен, а в формулах (1) или (2) вместо теоретических приходится использовать экспериментальные оценки величин  $A$  и  $P_{sig}$ , что приводит к высокой дисперсии рассчитанной  $CR$ .

Часто работы посвящены оценке клиппирования узкого круга известных (например, OFDM [1, 2]) сигналов, и соответственно при оценке требуемых характеристик используются присущие данным сигналам специфические свойства. Некоторые алгоритмы используют знание исходного (неклиппированного) сигнала [3] и, следовательно, ориентированы скорее на оценку качества устройства обработки (усилителя и пр.), а не самого сигнала.

Целью предлагаемого авторами исследования является разработка метода оценки уровня клиппирования речевого сигнала в случае, когда исходный неискаженный сигнал неизвестен, а параметры анализируемого сигнала (частота дискретизации, мощность, способ кодирования и т.п.) варьируются в широких пределах.

#### **Существующие методы оценки уровня клиппирования неизвестного сигнала**

Подход, когда исходный сигнал неизвестен, исследовался в работах [4, 5]. В работе [4] для оценки уровня клиппирования предлагается использовать «взвешенное дифференцирование». Действительно, если на клиппированном участке соседние отсчеты сигнала  $x(k)$  и  $x(k-1)$  равны или близки по амплитуде, то величина  $d(k) = x(k) - x(k-1)$  будет равна или близка к нулю. Соответственно, усредненное абсолютное значение  $D = \langle |d(k)| \rangle$  может служить индикатором уровня клиппирования – чем сильнее клиппирован сигнал, тем ближе к нулю величина  $D$ . Данный метод хорошо работает на медленно меняющихся неосциллирующих сигналах, т.е. тех, в которых присутствуют относительно длинные участки, для которых значение  $x(k)$  равно или близко к значению  $x(k-1)$ . Именно такой вариант и рассмотрен в работе [4]. К сожалению, вышеуказанное условие не выполняется для речевого сигнала. Как звонкие, так и глухие звуки в речевом сигнале содержат быстро меняющиеся компоненты, поэтому даже на участках сильного клиппирования соседние отсчеты могут сильно отличаться друг от друга. Таким образом, величина  $D$  уже не близка к нулю даже на сильно клиппированном сигнале, и, следовательно, точность оценки уровня клиппирования описанным методом невысока.

В работе [5] для оценки уровня клиппирования используется, на наш взгляд, более подходящий, гистограммный подход, т.е. строится и анализируется гистограмма обрабатываемого сигнала. Известно, что плотность распределения амплитуд неклиппированного речевого сигнала может быть достаточно хорошо аппроксимирована симметричными распределениями, такими как гамма-распределение или распределение Лапласа [6]. Общий вид данных распределений – одномодовые, с плавно спадающими хвостами. Совсем другая картина наблюдается в случае клиппированного сигнала (рис. 2).

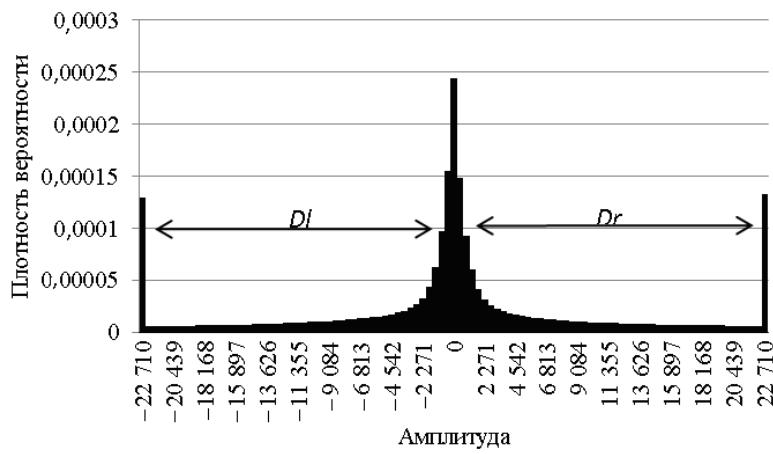


Рис. 2. Гистограмма значений амплитуды клиппированного речевого сигнала

Если центральная часть гистограммы действительно напоминает распределение Лапласа (или симметричное гамма-распределение), то, в отличие от неклиппированного сигнала, в данном случае имеются резкие «всплески» на хвостах, вызванные концентрацией отсчетов у максимального и минимального значений динамического диапазона клиппированного сигнала.

В работе [5] предлагаются два способа гистограммной оценки уровня клиппирования. Первый базируется на расчете степени отклонения  $d(a)$  рассчитанной нормализованной гистограммы  $h_{calc}(a)$  от некоей заранее известной «базовой» плотности распределения  $h_{base}(a)$ :

$$d(a) = h_{calc}(a) - h_{base}(a),$$

где  $a$  – абсцисса гистограмм (амплитуда сигнала). Для расчета окончательного уровня клиппирования используется либо мгновенное значение  $d(a)$ , либо усредненное по выбираемым участкам гистограммы

(исключается центральная часть), но во всех случаях необходимо знание базовой плотности и расчет отклонения. Второй способ основан на подсчете количества локальных максимумов на хвостах рассчитанной гистограммы  $h_{calc}(a)$ . Оба способа имеют существенные недостатки. Во-первых, получаемая оценка уровня клиппирования имеет низкую точность на ограниченном наборе данных. Так, например, при по-кадровой обработке речевого сигнала с частотой дискретизации 8 кГц, длиной кадра 0,5 с и количеством отсчетов гистограммы 100 количество отсчетов сигнала для построения гистограммы равно 4000. Такой статистики недостаточно для достоверной оценки реальной функции плотности распределения амплитуды сигнала, поэтому подсчет количества максимумов часто дает неверные результаты, а рассчитываемая степень отклонения  $d(a)$  имеет завышенное значение. Во-вторых, в случае кодированного (по А- или  $\mu$ -закону) речевого сигнала его гистограмма по определению имеет гребенчатый характер, что делает оценку уровня клиппирования подобного сигнала обоими способами совершенно неверной.

### Предлагаемый метод оценки уровня клиппирования речевого сигнала

В предлагаемом подходе также применяется гистограммный метод, но, в отличие от работы [5], для повышения надежности оценки не используется ни базовая гистограмма, ни амплитудные значения расчетной гистограммы.

Предлагаемый метод основан на следующих соображениях:

- если речевой сигнал не клиппирован, то хвосты гистограммы плавно повышаются от правой и левой границ гистограммы к ее mode. Естественные флуктуации значений гистограммы при этом незначительные, а расстояния (по оси «Амплитуда») между соседними локальными максимумами невелики;
- если речевой сигнал клиппирован, то на хвостах гистограммы наблюдаются выраженные максимумы, и расстояния (по оси «Амплитуда») от этих максимумов до соседних максимумов, превышающих их по величине (расстояния  $Dl$  и  $Dr$  на рис. 2), значительны.

Следовательно, величина  $\max(Dl, Dr)$ , нормированная на общий размах гистограммы, может служить оценкой уровня (коэффициента) клиппирования сигнала.

Приведем алгоритм расчета предлагаемого коэффициента.

1. Рассчитываем гистограмму амплитуд речевого сигнала.
2. Определяем левый ( $Min\_Index$ ) и правый ( $Max\_Index$ ) индексы ненулевых отсчетов гистограммы.
3. Принимаем:
  - левый индекс  $i=Min\_Index$ ;
  - правый индекс  $j=Max\_Index$ ;
  - максимальная дистанция  $Dist\_Max = 0$ .
4. Цикл: синхронно увеличивая  $i$  и уменьшая  $j$ , находим локальные максимумы в гистограмме и вычисляем расстояния  $Dl$  и  $Dr$  (рис. 2).
5. Находим максимум:  $Dist\_Max = \max(Dist\_Max, Dl, Dr)$ .
6. Если  $i < j$ , то возвращаемся к п. 4, если нет, то выходим из цикла и рассчитываем коэффициент клиппирования:  
$$R = 2Dist\_Max / (Max\_Index - Min\_Index)$$
.

Следует сразу заметить, что в случае сильно клиппированного сигнала локальные максимумы на хвостах гистограммы оказываются по величине больше центрального максимума. Тогда  $Dl = Dr = 0,5(Max\_Index - Min\_Index)$ , и, следовательно,  $R = 1$ .

Выделим свойства предложенного коэффициента клиппирования  $R$ :

1.  $0 \leq R \leq 1$ ;
2. инвариантен к частоте дискретизации сигнала;
3. инвариантен к амплитуде и амплитудному сдвигу сигнала (зависимость устраняется при нормировке в процессе построения гистограммы);
4. слабо чувствителен к точности оценки гистограммы;
5. слабо чувствителен к кодированию речевого сигнала по А- и  $\mu$ -законам;
6. в случае сильно нестационарного сигнала вида «почти весь кадр – нулевой сигнал и один короткий резкий всплеск на малом количестве отсчетов» возможно получение завышенной оценки уровня клиппирования;
7. простые сигналы, например, гармонический или прямоугольный, имеют  $R = 1$ .

### Экспериментальные исследования предлагаемого коэффициента

Результаты экспериментов по определению плотности распределения коэффициента  $R$  для различных уровней клиппирования речевого сигнала приведены на рис. 3.

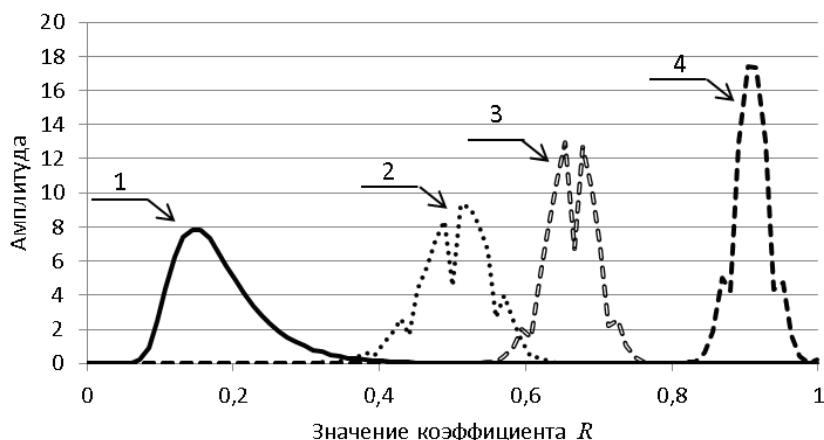


Рис. 3. Плотность распределения коэффициента клиппирования  $R$ : (1) – неклиппированный речевой сигнал; (2), (3) и (4) – клиппированный сигнал на уровне 10%, 30% и 60% от максимума соответственно

На рис. 3 кривая 1 – неклиппированный речевой сигнал; кривые 2, 3 и 4 – клиппированный сигнал на уровне 10%, 30% и 60% от максимума соответственно. Для оценки гистограммы использовались кадры сигнала длительностью в 4000 отсчетов с количеством отсчетов в гистограмме 200. Из рис. 3 видно, что коэффициент клиппирования  $R$  достаточно точно отражает уровень клиппирования сигнала.

Совмещенные осциллограммы речевого сигнала с участками с различным уровнем клиппирования и коэффициента  $R$  приведены на рис. 4 (шкала коэффициента – справа). Длина кадра в данном эксперименте соответствовала 1 с для частоты дискретизации 11025 Гц. Очевидно, что коэффициент  $R$  позволяет достаточно точно осуществлять «мгновенную» оценку уровня клиппирования речевого сигнала на коротких интервалах.

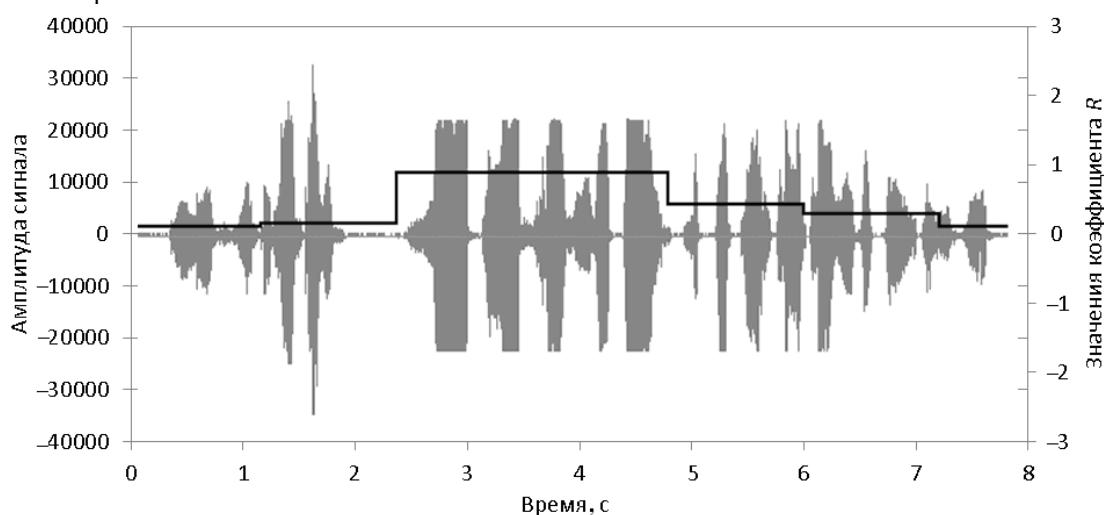


Рис. 4. Осциллограммы речевого сигнала (серый) и соответствующего коэффициента  $R$  (чёрный); шкала значений коэффициента – справа

### Заключение

Теоретические исследования и проведенные эксперименты показали большую точность предложенного метода оценки уровня клиппирования речевого сигнала по сравнению с известными. Предложенный метод тестиировался на различных сигналах, с различной частотой дискретизации, без использования и с использованием кодирования речевого сигнала по А- и  $\mu$ -законам, и продемонстрировал хорошую точность при длительностях кадров анализа 4000 отсчетов и более, при числе отсчетов в гистограмме от 200 до 500. Данный метод может использоваться для оценки качества речевого сигнала в реальном масштабе времени с целью, например, отбраковки фрагментов сигнала низкого качества.

Предложенный алгоритм не требует больших затрат памяти и вычислительных ресурсов и может быть реализован в системах реального времени на базе сверхбольших интегральных схем, программируемых логических интегральных схем и т.п. [7].

Повышение робастности метода при изменении параметров вычисления алгоритма является предметом дальнейших исследований.

### **Литература**

1. Chen H., Haimovich A.M. Iterative estimation and cancellation of clipping noise for OFDM signals // IEEE Commun. Lett. – 2003. – V. 7. – № 7. – P. 305–307.
2. Zhidkov S.V. Detection of clipped code-division multiplexed signals // Electronics Letters. – 2005. – V. 41. – № 25. – P. 1383–1384.
3. Kim J. Method and apparatus for evaluating audio distortion. – US Patent 005402495, Int.Cl. H04B 15/00, 1995.
4. Riemer T.E., Weiss M.S., Losh M.W. Discrete Clipping Detection by Use of a Signal Matched Exponentially Weighted Differentiator // Proceedings of the IEEE Southeastcon'90. – USA: New Orleans, Louisiana, 1990. – P. 245–248.
5. Otani T., Tanaka M., Ota Y., Ito S. Clipping detection device and method. – US Patent 20100030555 A1, Int.Cl. G10L 21/02, 2010.
6. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка речевых сигналов: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Прохорова, М.В. Назарова. – М: Радио и связь, 1981. – 496 с.
7. Чураев С.О., Адамова А.Д., Палташев Т.Т. Реализация алгоритма шумоподавления в речевом тракте систем мобильной связи на базе СБИС // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (77). – С. 72–76.

**Алейник Сергей Владимирович** – ООО «ЦРТ-Инновации», научный сотрудник, aleinik@speechpro.com  
**Матвеев Юрий Николаевич** – ООО «ЦРТ-Инновации», доктор технических наук, главный научный сотрудник, НИУ ИТМО, профессор, matveev@speechpro.com  
**Раев Андрей Николаевич** – ООО «ЦРТ», директор научно-исследовательского департамента, raev@speechpro.com

**УДК 004.93+57.087.1**

## **ПРОБЛЕМЫ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ СЕГМЕНТАЦИИ ДИКТОРОВ НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИОННОГО БАЙЕСОВСКОГО АНАЛИЗА**

**О.Ю. Кудашев, Т.С. Пеховский**

Приведено описание модели, используемой для решения задачи сегментации дикторов. На основе сделанных предположений приведены итерационные формулы аппроксимации функции апостериорного распределения параметров модели диктора и предложен оригинальный способ инициализации значений параметров модели. Приведена схема системы сегментации дикторов, реализованной на основе разработанного подхода. Применение разработанной системы дало относительную редукцию ошибки до 26% как на англоязычных, так и русскоязычных речевых базах.

**Ключевые слова:** байесовский анализ, вариационный метод, сегментация дикторов.

### **Введение**

Задача сегментации дикторов состоит в выделении речевых сегментов фонограммы и кластеризации (объединении) выделенных сегментов по принадлежности к одному диктору. Сегментация дикторов является неотъемлемой частью задач, связанных с обработкой речи. К таким задачам можно отнести, например, автоматическую идентификацию голоса говорящего (диктора), индексацию аудиоданных.

В последнее время методы байесовского факторного анализа показали высокую эффективность как в задачах голосовой идентификации [1, 2], так и в задачах сегментации дикторов [3, 4]. Работа [5] является ярким примером алгоритма сегментации дикторов, основанного на вариационном байесовском анализе. Однако, как и в любом итерационном алгоритме, возникает вопрос о начальной инициализации значений.

Целью данной работы является разработка и применение алгоритма инициализации начальных значений параметров модели, основанной на вариационном байесовском анализе. В отличие от работы [6], исследуется система сегментации дикторов для широкого спектра приложений, в частности, на различных русскоязычных и англоязычных речевых базах.

### **Применение вариационного байесовского анализа к задаче сегментации дикторов**

Пусть  $X$  – данные;  $\theta$  – совместный набор параметров модели и скрытых переменных. Задачей байесовского анализа является поиск максимально точного приближения  $Q(\theta)$  для функции апостериорного распределения параметров модели  $P(\theta|X)$ :

$$P(\theta|X) = \frac{P(X|\theta)P(\theta)}{P(X)},$$

где  $P(X) = \int P(X|\theta)P(\theta)d\theta$ .

Доказано, что решением данной задачи является функция  $Q(\theta)$ , обеспечивающая максимум нижней границы  $L(Q)$ :

$$L(Q) = \int Q(\theta) \ln \frac{P(X, \theta)}{Q(\theta)} d\theta.$$

Наиболее распространенными численными методами решения задачи байесовского анализа являются вариационные байесовские методы [7].

В основе как методов сегментации дикторов, так и методов текстонезависимой голосовой идентификации лежит статистическое моделирование распределения акустических признаков. Наиболее эффективным типом генеративной модели диктора признана смесь гауссовых распределений (Gaussian Mixture Models, GMM), аппроксимирующая распределение акустических признаков. При этом модель каждого диктора получается из универсальной фоновой модели (Universal Background Model, UBM) путем адаптации только средних значений гаусса без изменений матриц ковариаций. Объединение полученных таким образом векторов средних значений называют супервектором средних диктора.

Введем следующие предположения:

- речевые сегменты на фонограмме выделены, при этом на каждом сегменте присутствует ровно один диктор;
- количество дикторов известно;
- супервектор средних диктора имеет следующее априорное распределение:

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{V}\mathbf{y},$$

где  $\boldsymbol{\mu}$  – супервектор средних UBM;  $\mathbf{V}$  – матрица «собственных голосов»;  $\mathbf{y}$  – случайный вектор с нормальным стандартным распределением.

Последнее предположение является основой факторного анализа и дает не только мощный инструмент для методов сегментации дикторов, но также значительно уменьшает вычислительную сложность алгоритмов.

Введем следующие обозначения:

- $M$  – число речевых сегментов на фонограмме;
- $S$  – число дикторов;
- $X = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_M)$  – данные, полученные на каждом из сегментов фонограммы;
- $I = (\mathbf{i}_1, \dots, \mathbf{i}_M)$  – набор индикаторов для каждого сегмента фонограммы ( $i_{ms}=1$ , если на сегменте  $m$  говорит диктор  $s$  и равен нулю в обратном случае);
- $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_M)$  – априорные вероятности присутствия диктора  $s$  на сегменте;
- $Y = (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_S)$  – вектора в пространстве собственных голосов, отвечающие моделям соответствующих дикторов;
- $P(\mathbf{i}_m) = \prod_{s=1}^S \pi_s^{i_{ms}}$  – априорное распределение  $\mathbf{i}_m$ ;
- $P(Y)$  имеет нормальное стандартное распределение.

В соответствии с вариационным байесовским анализом, сделаем следующее предположение о факторизации:

$$Q(Y, I) = Q(Y)Q(I),$$

$$Q(I) = \prod_{m=1}^M \prod_{s=1}^S q_{ms}^{i_{ms}},$$

$$Q(Y) = \prod_{s=1}^S N(\mathbf{y}_s | \mathbf{a}_s, \mathbf{\Lambda}_s^{-1}).$$

Тогда формулы для вариационного приближения искомых функций имеют следующий общий вид:

$$\ln Q(Y) = E_I [\ln P(X, Y, I\pi)] + \text{const}, \quad (1)$$

$$\ln Q(I) = E_Y [\ln P(X, Y, I\pi)] + \text{const}. \quad (2)$$

Подробный вывод формул представлен в работе [5].

Таким образом, применяя последовательно формулы (1), (2), можно получить приближенные значения  $q_{ms}$ , являющиеся апостериорной вероятностью присутствия диктора  $s$  на сегменте  $m$ .

### Система сегментации дикторов

Алгоритм вариационного байесовского анализа, вообще говоря, гарантирует сходимость только в окрестности локального максимума функции  $L(Q)$ . Следовательно, для эффективного применения алгоритма, описанного в предыдущем разделе, необходимо произвести удачную инициализацию начальных значений  $q_{ms}$ .

Авторами была рассмотрена задача сегментации дикторов при  $S=2$  (диалог). Инициализация начальных значений  $q_{m1}, q_{m2}$  осуществляется путем применения алгоритма  $K$ -средних для векторов  $\mathbf{y}_m$  каждого из сегментов фонограммы с дальнейшей кластеризацией. Подробное описание такой кластеризации приведено в работе [6].

Общая схема взаимодействия блоков разработанной системы сегментации дикторов представлена на рисунке. Такая система состоит из шести основных блоков.

1. блок выделения речевых сегментов (Voice Activity Detector, **VAD**);
2. блок выделения речевых акустических признаков (Feature Extractor, **FE**);
3. блок построения векторов  $\{\mathbf{y}_m\}_{m=1}^M$  для каждого сегмента фонограммы (**Y-mapping**);
4. блок кластеризации множества векторов  $\{\mathbf{y}_m\}_{m=1}^M$  на множества  $C_1, C_2$  при помощи алгоритма  $K$ -средних (**K-means**);
5. блок перегруппировки множеств  $C_1, C_2$  в соответствии с формулой (**EV**)

$$C_1^* = \{m : (\langle \mathbf{y} \rangle_1 - \langle \mathbf{y} \rangle_2) \cdot (\mathbf{y}_m - \langle \mathbf{y} \rangle_1) > 0\},$$

$$C_2^* = \{m : (\langle \mathbf{y} \rangle_2 - \langle \mathbf{y} \rangle_1) \cdot (\mathbf{y}_m - \langle \mathbf{y} \rangle_2) > 0\},$$

$$\text{где } \langle \mathbf{y} \rangle_1 = \frac{1}{|C_1|} \sum_{m \in C_1} \mathbf{y}_m; \quad \langle \mathbf{y} \rangle_2 = \frac{1}{|C_2|} \sum_{m \in C_2} \mathbf{y}_m;$$

6. блок перегруппировки множеств  $C_1, C_2$  на основе вариационного байесовского анализа (**VBA**).

Инициализация начальных значений  $q_{m1}, q_{m2}$  осуществляется следующим образом:

$$q_{ms} = \begin{cases} 0,999 & m \in C_s \\ rand() & m \notin C_s \end{cases}.$$

Окончательная группировка множеств  $C_1, C_2$  осуществляется после применения вариационного байесовского анализа в соответствии с формулой  $C_1^* = \{m : q_{m1} > q_{m2}\}, C_2^* = \{m : q_{m2} \geq q_{m1}\}$ .

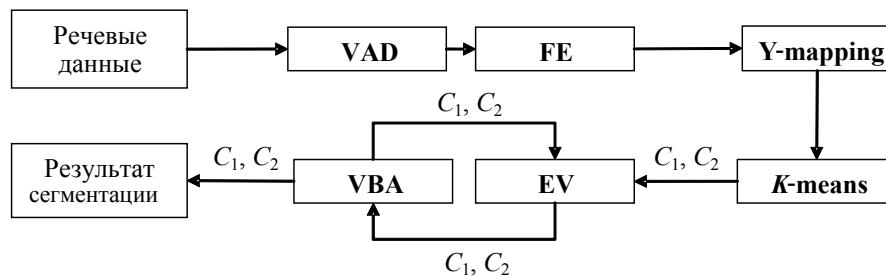


Рисунок. Схема взаимодействия блоков системы сегментации дикторов

Таким образом, происходит взаимодействие между дискриминативным (**EV**) и генеративным (**VBA**) блоками [6].

### Результаты экспериментов

Основной метрикой эффективности системы сегментации дикторов является показатель вероятности ошибки сегментации (Diarization Error Rate, DER):

$$DER = \frac{\text{длина речевых сегментов, неверно отнесенных к диктору}}{\text{длина всех речевых сегментов}} \cdot 100\%.$$

Помимо описанной системы, в экспериментах также была применена схема, отличающаяся отсутствием блоков **Y-mapping**, **K-means** и **EV**. При этом инициализация блока **VBA** происходило 6 раз путем рандомизации значений  $q_{m1}, q_{m2}$ . Из шести полученных множеств  $C_1, C_2$  выбирались те, которые обеспечивали наибольшее значение нижней границы  $L(Q)$ .

В качестве речевых акустических признаков использовались первые 13 MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) коэффициентов, без нормализации и вычитания среднего значения. Для обучения UBM и матрицы собственных голосов  $\mathbf{V}$  использовались следующие речевые базы: NIST 2002, NIST 2003, NIST 2004, NIST 2005, NIST 2006, NIST 2008, RuSTeN [8]. Суммарное количество дикторов указанных баз обучения составило 3620. Количество гауссовых распределений UBM бралось равным 512. Размерность матрицы собственных голосов для блоков **K-means** и **EV** составила 10, а размерность матрицы собственных голосов для блока **VBA** – 50.

В таблице представлены сравнительные результаты экспериментальных исследований реализованной системы сегментации дикторов (столбец DER), системы, основанной на рандомизации значений

$q_{m1}$ ,  $q_{m2}$  (столбец DER random), а также процент относительной редукции. В тестировании участвовали как англоязычные базы данных (NIST 2002, NIST 2008), так и русскоязычные базы компании ООО «Центр речевых технологий» (НАРКОКОНТРОЛЬ, МВД, СУБТИТРЫ). Базы НАРКОКОНТРОЛЬ и МВД представляют собой записи телефонных разговоров длительностью 1–3 мин. База СУБТИТРЫ состоит из коротких записей (20–50 с) новостных интервью, включающих разговор двух дикторов.

Наименование базы данных	Число файлов	Язык	Канал	Средняя продолжительность записей	DER, %	DER random, %	Редукция, %
NIST 2002	88	англ.	телефон	1 мин	5,15	7,03	26
NIST 2008	1172	англ.	телефон	5 мин	5,55	5,86	5,3
НАРКОКОНТРОЛЬ	17	русский	телефон	1 мин 45 с	4,8	4,97	3,4
МВД	83	русский	телефон	2 мин	5,77	5,95	3
СУБТИТРЫ	103	русский	радио	30 с	4,53	4,75	4,6

Таблица. DER систем сегментации дикторов

### Заключение

Как видно из таблицы, применение предварительной инициализации блоком **EV** обеспечило относительную редукцию DER на всех тестируемых базах. При этом необходимо отметить, что результаты справедливы как для англоязычных, так и для русскоязычных корпусов. На англоязычной базе с короткими произнесениями (NIST 2002) относительная редукция DER составила 26%. Разброс величины редукции обусловлен, главным образом, разнообразными условиями тестирования. Помимо усиления системы сегментации дикторов, использование дискриминативного блока **EV** имеет еще одно важное практическое значение. Разработанная авторами схема позволяет свести к минимуму число обращений к блоку **VBA** (в среднем 2–3 раза). Поскольку этот блок имеет наибольшую вычислительную сложность, происходит значительное уменьшение времени работы всей системы.

Разработанная система успешно внедрена и используется в системах автоматической голосовой идентификации, разработанных на кафедре «Речевые информационные системы», являющейся базовой кафедрой компании ООО «Центр речевых технологий». Также указанная система имела успешное применение в составе системы автоматической индексации записей новостных передач.

### Литература

1. Kenny P., Ouellet P., Dehak N., Gupta V., Dumouchel P. A study of inter-speaker variability in speaker verification // IEEE Trans. Audio, Speech and Lang. Process. – July 2008. – V. 16. – № 5. – P. 980–988.
2. Castaldo F., Colibro D., Dalmasso E., Laface P., Vair C. Compensation of Nuisance Factors for Speaker and Language Recognition // IEEE Trans. Audio, Speech, Lang. Process. – September 2007. – V. 15. – № 7. – P. 1969–1978.
3. Tranter S., Reynolds D. An overview of automatic speaker diarization systems // IEEE Trans. Audio, Speech, Lang. Process. – September 2006. – V. 14. – № 5. – P. 1557–1565.
4. Reynolds D., Kenny P., Castaldo F. A Study of New Approaches to Speaker Diarization // Proc. Interspeech – 2009. – P. 1047–1050.
5. Kenny P. Bayesian Analysis of Speaker Diarization with Eigenvoice Priors. – Technical report, Centre de recherche informatique de Montreal (CRIM). – Montreal, Canada. – May 2008. – 17 p.
6. Пеховский Т.С., Шулипа А.К. Гибрид генеративных и дискриминативных моделей для задачи диаризации в коротком телефонном диалоге // Proc. of the XIV International Conference «Speech and Computer» SpeCom'11. – Kazan, Russia, 2011. – P. 389–394.
7. Bishop M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York: Springer, 2006. – 738 p.
8. Linguistic Data Consortium [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ldc.upenn.edu/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 10.03.2012).

**Кудашев Олег Юрьевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [kudashev@speechpro.com](mailto:kudashev@speechpro.com)

**Пеховский Тимур Сахиевич**

– ООО «ЦРГ-инновации», кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, [tim@speechpro.com](mailto:tim@speechpro.com)

**УДК 004.912:303.7**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОВАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕКСТА**

**К.К. Боярский, Е.А. Каневский, С.К. Стafeев**

Описаны подходы к решению некоторых проблем, возникающих при компьютерном анализе русскоязычного текста. Затронуты вопросы, связанные со снятием лексической и морфологической неоднозначности, с выделением в тексте сложных объектов-словосочетаний и с использованием особенностей контекста для повышения точности разбора текста. Показано, что применение словарной информации может сыграть решающую роль при снятии как морфологической, так и частеречной и лексической омонимии.

**Ключевые слова:** анализ текста, лексема, морфология, омонимия, семантика, синтаксис, словарь.

### **Введение**

Задаче компьютерного анализа текста на естественном языке посвящено множество теоретических и практических работ. Эти задачи, а именно – поиск документов, рубрирование и аннотирование документов, диалог с компьютером, машинный перевод и построение баз знаний, – решали и решают различными методами. Однако их решение всегда начинается с морфологического анализа. Вопросам компьютерной морфологии посвящено множество работ, однако, как показал проведенный в 2010 г. форум «Оценка методов АОТ» [1], эта проблема до сих пор не решена окончательно.

Разработанный авторами морфолого-лексический анализатор TextAn [2] обеспечивал получение леммы и всех грамматических характеристик словоформы. В процессе участия в форуме 2010 г. авторами был проведен анализ коллекций текстов общим объемом более 950 тысяч словоформ. Из разобранных словоформ около 82,5% имели только одну лексему, остальным 17,5% соответствовали две и более лексем. В результате анализа неоднозначность по определению лексем уменьшилась в 11,5 раз и составила около 1,5%. В области снятия морфологической неоднозначности успехи несколько ниже. Если считать, что исходная морфологическая неоднозначность составляет около 50% [3], то TextAn снижает ее до 10,5% (конечно, возможные ошибки здесь не учитывались).

Как показало сравнение результатов работы TextAn с эталонным разбором («золотым стандартом»), основной причиной неполного снятия неоднозначности и даже появления ошибок являются ограниченные возможности системы по проверке согласования слов. При этом распространенное мнение о том, что слова в предложениях русского языка связываются в пределах ограниченного участка текста (от 3 до 7 слов), конечно, справедливы во многих случаях, но далеко не всегда. В этом случае для дальнейшего снижения неоднозначности было решено перейти к синтаксическому и частично семантическому анализу текста с максимально полным использованием имеющейся словарной информации. Такой анализ как раз и обеспечивает анализатор SemSin [4], который решает три основные задачи анализа:

1. получение грамматических характеристик словоформ;
2. построение дерева зависимостей;
3. снижение лексической неоднозначности.

### **Словари анализатора SemSin**

Если морфологический анализ еще можно проводить без использования словаря [5], то для синтаксического и семантического анализа словарь крайне необходим. В качестве исходных лексических материалов используются словарь и классификатор В.А. Тузова [6]. Словарь Тузова основан на морфологическом словаре А.А. Зализняка [7], при определении его семантики широко использовался словарь С.А. Кузнецова [8]. К настоящему времени словарь значительно пополнен, для чего с успехом использовалась специально разработанная диалоговая система Adviser [9]. Поскольку при анализе текстов практически всегда обнаруживаются новые слова, отсутствующие в словаре, то он постоянно пополняется. Для внесения в словарь новых слов также используется Adviser.

В процессе разработки на основе исходного словаря была создана морфологическая база данных, содержащая свыше 177 тыс. лексем, распределенных по 1660 семантическим классам. В ней каждой лексеме приписаны морфологические характеристики, а также номер своего класса и актанты или валентности (для подключения зависимых слов) в виде падежей или предлогов с соответствующими падежами – например, !подТв, !наПред и т.д. Часто перед таким аргументом указаны допустимые классы слов, могущих их замещать. Около 14% слов в базе имеют две и более лексем, которые в большинстве случаев относятся к разным классам (классический пример: слову *коса* соответствуют три лексемы – *девичья коса, береговая коса и острия коса*).

Дополнением к морфологической базе служит база окончаний, насчитывающая около 1040 записей. Каждая запись содержит полный набор окончаний для определенного типа словоизменения с учетом изменения корневых гласных и суффиксов. Хотя типовых вариантов словоизменения не так уж много, но некоторые слова изменяются редким или даже уникальным способом. Например, для схожих слов *отобрать* и *обобрать* невозможно использовать одинаковый тип словоизменения: *отобрать – отберу, обобрать – оберу*.

В анализаторе достаточно эффективно решается проблема словосочетаний. Для этого служит специальная база фразеологизмов, которая обеспечивает разбор трех типов словосочетаний: неизменяемых (*в отлучку от*, *и именно в ту пору*), с изменяемым первым словом (*гвоздь программы*) и полностью изменяемых (*белая ворона*). В настоящее время эта база содержит более 4100 фразеологизмов и играет важную роль в снятии неоднозначности, особенно для составных предлогов, союзов и наречий.

Четвертым элементом словарного обеспечения является отдельная база предлогов, хранящая около 2000 сочетаний классов существительных, с которыми взаимодействуют предлоги, и названия связей с хозяевами предложных групп.

#### Схема работы анализатора SemSin

В состав анализатора SemSin входят 4 блока (рис. 1): словарь, морфологический анализатор, производственные правила и лексический анализатор.

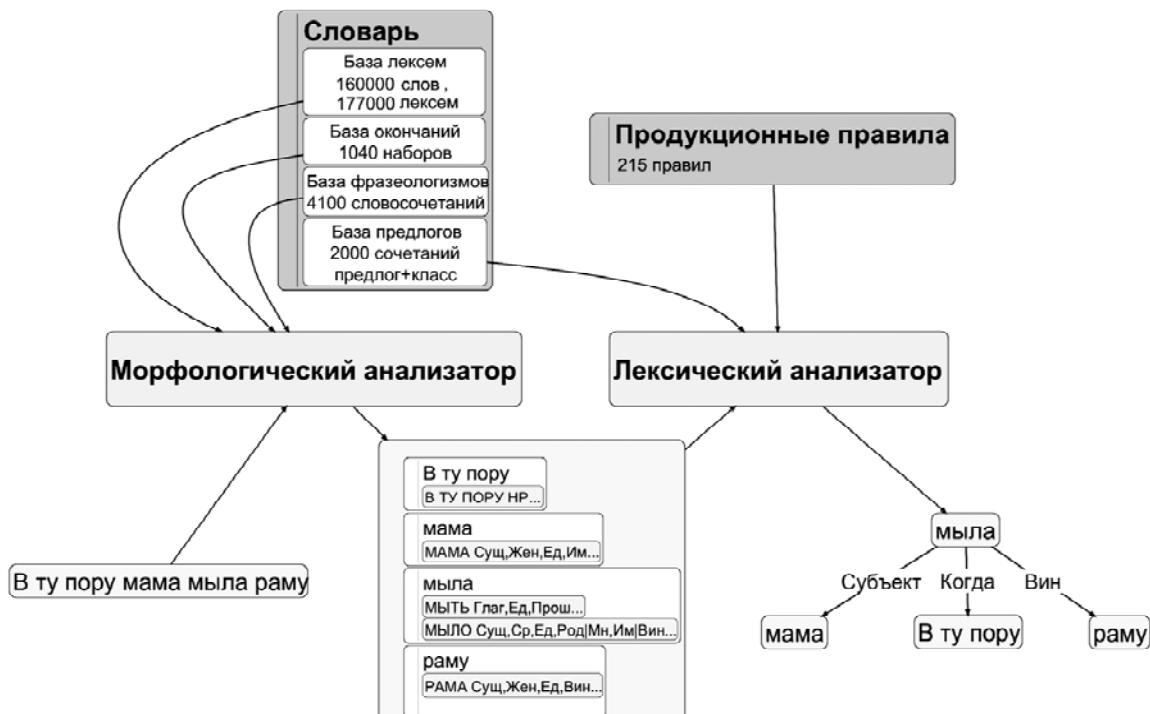


Рис. 1. Схема работы анализатора SemSin

На вход анализатора подается текст на русском языке, который считывается абзацами. Очередной абзац подвергается морфологическому анализу с выделением отдельных токенов (слов, словосочетаний, знаков препинания, чисел и т.д.). При этом каждому токену приписана не только морфологическая, но и синтаксическая (аргументы) и семантическая (класс по классификатору) информации.

Затем цепочка токенов обрабатывается с помощью системы производственных правил, целью которых является преобразование линейной последовательности токенов в дерево зависимостей. Специфика задачи породила ряд особенностей составления этих правил. В частности, было решено, что снимать морфологическую неоднозначность и строить синтаксическое дерево зависимостей надо одновременно, поскольку эти задачи слишком переплетены между собой.

Система правил не может быть представлена в виде простого набора конъюнкций условий, так как результат сильно зависит от порядка применения правил. Выбранная последовательность исполнения основных групп правил такова: разбиение абзаца на предложения, сборка названий (включая имена собственные), обработка числительных и числовых токенов, сборка групп существительное–прилагательное и предлог–существительное, выделение причастных и деепричастных оборотов и придаточных предложений, нахождение подлежащих, подключение предложных групп к их хозяевам, объединение разделенных частей сегментов. На каждом этапе производится частичное снятие неоднозначности.

Рассмотрим на небольшом примере взаимодействие различных блоков системы. Предположим, что на вход подано предложение *В ту пору мама мыла раму*. Прежде всего, морфологический анализатор определяет леммы и грамматические характеристики слов. При этом выясняется, что простое разделение текста по пробелам не годится, так как словосочетание *в ту пору* должно рассматриваться как единый токен – составное наречие. Обнаруживается также, что токен *мыла* неоднозначен, он может представлять глагол *мыть* или существительное *мыло*, у которого неоднозначно определяется число и падеж.

Последовательность токенов подается на вход лексического анализатора, который управляется набором продукции правил и использует информацию базы предлогов. В результате неопределенность полностью снимается, определяются типы связей между токенами и строится дерево зависимостей.

Выбранные принципы работы обеспечивают линейность зависимости времени анализа от общего количества слов текста. При этом скорость работы практически не зависит от длины предложения и составляет около 40 слов в секунду (процессор AMD Athlon64 3000+).

### Снятие неоднозначности

Как указывалось выше, результат работы морфологического анализатора отличается очень высокой степенью неоднозначности. Многозначность различных характеристик тесно связана с таким понятием, как омонимия. Для ее детального изучения лингвисты выделяют разные типы и подтипы омонимии, которые в данном контексте не вызывают интереса. По этой причине в дальнейшем будем пользоваться термином *неоднозначность*. Процесс снятия или уменьшения неоднозначности часто называют *дизамбигуацией* (word sense disambiguation) [10].

Будем различать три типа неоднозначности.

1. Частеречная неоднозначность возникает при совпадении словоформ разных лексем, принадлежащих различным частям речи. Примерами типичных вариантов являются сущ./личная форма глагола (*жала, еду, казни...*), сущ./дееприч. (*моря, неволя, пошив...*), сущ./прилаг. (*больной, дорогой...*), дееприч./прилаг. (*скучая, строгая...*) и т.д.
2. Морфологическая неоднозначность, возникающая при неоднозначном определении грамматических характеристик словоформы одной лексемы: *точки* (точка, ед. род./мн. им./мн. вин.), *проводите* (проводить, 2-е л. мн. ч./повел.).
3. Лексическая неоднозначность – одна лексема, употребляемая в различных значениях, причем в этих значениях она способна сочетаться с разными словами (*орел*: птица/гордый человек/город/обратная сторона монеты/созвездие/фамилия...).

Для каждого из этих типов используются свои методы обработки. Конечно, зачастую неоднозначность снимается при согласовании слов (сущ. – прил. по роду, числу и падежу, глагол – существительное по числу и т.д.). Такое согласование проводится с помощью правил. Однако в ряде случаев этого недостаточно. Рассмотрим два фрагмента предложений: *Это привело к притоку значительных финансовых средств и ... в области производства транспортных средств большой грузоподъемности*. В обоих примерах установлено, что слово *средств* стоит в родительном падеже множественного числа и возможности согласования исчерпаны. Однако в первом случае леммой является СРЕДСТВА (денежные), а во втором – СРЕДСТВО. Сделать правильный выбор оказывается возможным только с привлечением словарной информации. В описании аргументов прилагательного *финансовый* указаны семантические классы слов, с которыми возможно образование именной группы. Среди этих классов есть и такой: Физический\_объект/Неодуш./Деньги<sup>1</sup>, к которому принадлежит лексема *средства*. Во втором предложении оказывается возможным не только найти правильную лемму СРЕДСТВО, но и снять лексическую неоднозначность, установив, что в данном случае это лексема из класса техники (а не способ действия, вещества или прессы).

Возьмем теперь фрагмент ...*члены экипажей космических аппаратов*. Также как и выше, анализ аргументов прилагательного позволяет снять неоднозначность и установить, что лексема *аппарат* означает некий прибор, а не совокупность органов организма или сотрудников учреждения. Но к какому слову должна подключаться эта лексема на дереве зависимостей? Дело в том, что и лексема *член* и лексема *экипаж* способны подключать слова в родительном падеже. Однако в словаре имеется информация о том, что преимущественно лексема *член* подключает слова, обозначающие живые объекты. В результате получаем правильный разбор: *члены → экипажей → аппаратов → космических*.

### Предложные группы

Сложнее использовать словарную информацию при построении и подключении предложных групп. В качестве примера приведем несколько упрощенный результат разбора предложной группы в *море*:

в	ПР	\$711(!Вин!Пред)	...<Предлог>
море	MOP	м1 Ед. Пред. \$111031(\$124~!Род)	...<Болезнь>
		МОР м1о Ед. Пред. \$12413/03000	...<Фамилия>
	MORE с2	Ед. Им. Вин. Пред. \$12101(!Род)+\$122422(\$1227/\$123~!Род)	...<Изобилие+Ландшафт>

Здесь «м1», «м1о» и «с2» – грамматические классы существительных (обозначения близки к используемым в [7]), «\$» – признак номера класса, а «+» означает наличие двух (и более) лексем с одинаковыми морфологическими характеристиками.

---

<sup>1</sup> Здесь и далее названия семантических классов приводятся по [6].

Лексема *мор*, соответствующая имени собственному, легко отбрасывается по отсутствию прописной буквы, но остается еще четыре варианта морфологического разбора.

В аргументах предлога *в* указано, что он может подключаться к существительным в винительном и предложном падежах, так что все лексемы, соответствующие словоформе *more*, возможны. Однако подключение к хозяину предложной группы в предложении будет производиться разными связями в зависимости от семантического класса существительного. Информация об этом хранится в специальной базе предлогов. В результате формируются пять вариантов предложной группы (рис. 2).

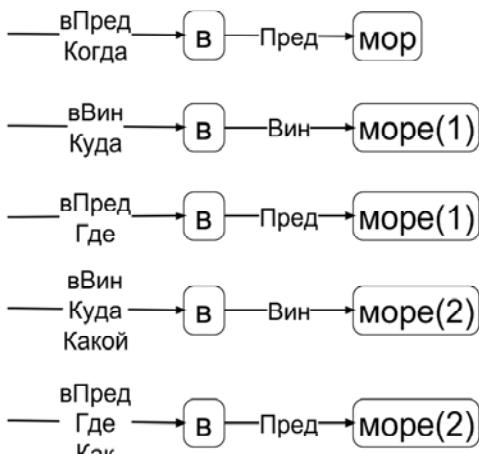


Рис. 2. Формирование предложных групп

Дальнейшее снятие неоднозначности происходит при подключении предложной группы к хозяину на основе анализа аргументов и их классов. Так, в предложении *Корабль находится в море* лексема *находиться* имеет следующие аргументы:

*!Им,\$1~!ПодТв,\$1~!вПред,!Тв,\$1~!Где,!При,!уИмея,\$15~!сТв,!наПред*<sup>2</sup>.

Как видно, с входными связями рассматриваемой предложной группы совпадают аргументы *вПред* и *Где*, которые способны подсоединять слова любых классов. Таким образом, остаются третий и пятый варианты предложной группы. Следовательно, в данной фразе остается слово *more* в предложном падеже. Если же предложение имеет вид *Корабль вышел в море*, то аргументами лексемы *выйти* будут (в упрощенном виде, без указания большинства классов):

*!Им,!Дат,!сТв,!Подат,!Откуда,\$1224~!Куда,!наВин,!Тв,!заВин,!Изо.*

Отсюда однозначно получается, что правилен четвертый вариант предложной группы, причем со связкой Куда. Следовательно, падеж слова *more* – винительный. Снимается также лексическая неоднозначность, остается лексема из класса ландшафтов.

### Заключение

Одним из ключевых моментов получения однозначных морфологических характеристик слов и построения дерева зависимостей при автоматическом разборе предложений русского языка является наличие обширной и разноплановой словарной информации. Необходимо, в частности, привлечение семантической информации хотя бы на уровне классов слов и их сочетаемости. Использование этих данных в системе SemSin позволило снизить уровень неоднозначности более чем в 2 раза (по частеречной неоднозначности с 1,5% до 0,7%, по морфологической неоднозначности с 10,5 до 3–4%).

### Литература

1. Ляшевская О.Н. и др. Оценка методов автоматического анализа текста: морфологические парсеры русского языка // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной Международной конференции «Диалог». – М.: Изд-во РГГУ, 2010. – Вып. 9 (16). – С. 318–326.
2. Каневский Е.А., Боярский К.К. Морфолого-лексический анализатор и классификация текста // Прикладная лингвистика в науке и образовании. Материалы V международной научно-практической конференции 25–26 марта 2010. – СПб: Лема, 2010. – С. 157–163.
3. Боярский К.К., Каневский Е.А. Разработка инструментария для полуавтоматической морфологической разметки текстов // Труды международной конференции «Корпусная лингвистика – 2008». – СПб: СПбГУ, 2008. – С. 83–88.

<sup>2</sup> Здесь \$15 обозначает класс действий, \$1224 – класс природных зон, \$1 – любой класс.

4. Боярский К.К., Каневский Е.А. Язык правил для построения синтаксического дерева // Интернет и современное общество: Материалы XIV Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество». – СПб: ООО «МультиПроджектСистемСервис», 2011. – С. 233–237.
5. Леонтьева Н.Н. Автоматическое понимание текстов: системы, модели, ресурсы. – М.: Академия, 2006. – 304 с.
6. Тузов В.А. Компьютерная семантика русского языка. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. – 400 с.
7. Зализняк А.А. Грамматический словарь русского языка. – М.: Русский язык, 1980. – 880 с.
8. Кузнецов С.А. Большой толковый словарь русского языка. – СПб: Норинт, 1998. – 1536 с.
9. Боярский К.К., Каневский Е.А. Проблемы пополнения семантического словаря // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 132–137.
10. Турдаков Д.Ю. Методы разрешения лексической неоднозначности // Программирование. – 2010. – № 6. – С. 3–27.

**Боярский Кирилл Кириллович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, Boyarin9@yandex.ru

**Каневский Евгений Александрович**

– Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, kanev@emi.nw.ru

**Стafeев Сергей Константинович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, stafeev@phd.ifmo.ru

**УДК 004.942**

## **ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ *MTBeam* ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ**

**Д.А. Кислин, М.А. Князев, В.Ф. Звягин, С.А. Козлов**

Разработан программный продукт, включающий в себя визуализатор и программу управления расчетами, способный решать задачи моделирования эволюции полей и спектров электромагнитных волновых пакетов, у которых как пространственный, так и временной спектры могут быть сверхширенными. Программный комплекс позволяет производить расчеты не только на локальном, но и на удаленном компьютере или суперкомпьютере, а также отображать результаты расчетов в виде диаграмм и графиков. Приведены примеры визуализации расчетов дифракции на щели однопериодного терагерцового импульса.

**Ключевые слова:** визуализатор, плагин, технология клиент-сервер, волны из малого числа колебаний, сверхширенный спектр излучения.

### **Введение**

В последние десятилетия благодаря широкому распространению персональных компьютеров, ноутбуков, планшетных электронных устройств, а также развитию технологий параллельных вычислений на суперкомпьютерах стала стремительно развиваться область научных и инженерных задач, связанных с моделированием различных физических и технологических процессов. Результаты таких расчетов чаще всего представляют собой одномерные или многомерные массивы данных, которые требуется визуализировать для того, чтобы сделать некоторое заключение о них. Для решения этой задачи существует немало способов. Задачи, не требующие ресурсоемких вычислений, можно решать с помощью так называемых математических пакетов, т.е. таких программных продуктов, как Mathcad, MATLAB, Octave, Maxima, используя их встроенные средства визуализации данных. Для более сложных задач, требующих вычислений на суперкомпьютерах, можно проводить визуализацию данных, считанных в математический пакет или программу-визуализатор из файла. Однако такой способ представления данных не всегда удобен, особенно если требуется отображать динамику данных в реальном времени.

Для преодоления указанных трудностей в процессе теоретического исследования динамики предельно коротких непараксиальных световых волн, т.е. излучения, спектр которого, как временной, так и пространственный, может быть сверхширен [1], был создан программный комплекс *MTBeam*. Одна из его составных частей, *MTVisual*, представляет собой кроссплатформенный визуализатор, предназначенный для удобного и быстрого представления результатов расчетов динамики оптических пучков. Основные задачи визуализатора как приложения – возможность работы на компьютере или электронном устройстве с практически любой операционной системой, отображение результатов расчетов, проводимых либо на том же самом компьютере, либо на удаленном суперкомпьютере, а также возможность задавать и редактировать настройки расчетов, включая расписание их проведения.

### Используемый инструментарий (программные средства)

При создании программного комплекса MTBeam были использованы следующие программные средства.

Инструментом для создания оконного приложения (визуализатора MTVVisual) был выбран язык программирования C++ с графической кроссплатформенной библиотекой Qt, что и обеспечило возможность создания исполняемых файлов приложения для различных платформ (операционных систем) [2, 3].

Для отрисовки графиков и диаграмм используется встроенный в Qt API (application programming interface). API – набор готовых классов, процедур, функций, структур и констант, предоставляемых приложением (библиотекой, сервисом) для использования во внешних программных продуктах. Двумерная диаграмма функции – множество точек, абсциссы которых являются допустимыми значениями аргумента  $x$ , ординаты – значениями аргумента  $y$ , а соответствующее им значение функции соотносится с некоторым цветом согласно выбранной цветовой схеме.

Для отрисовки трехмерных графиков используются возможности библиотеки OpenGL (Open Graphics Library). В основе этой библиотеки находится спецификация, определяющая независимый от языка программирования платформонезависимый программный интерфейс для написания приложений, использующих двухмерную и трехмерную компьютерную графику.

В качестве языка программирования для написания математических алгоритмов был взят Fortran. Его преимущество перед другими языками заключается в реализации удобной работы с массивами и наличии встроенных инструкций параллелизации кода [4].

Программный комплекс использует только программное обеспечение, распространяемое по свободным лицензиям.

### Визуализатор MTVVisual



Рис. 1. Дополнительные настройки двумерной диаграммы

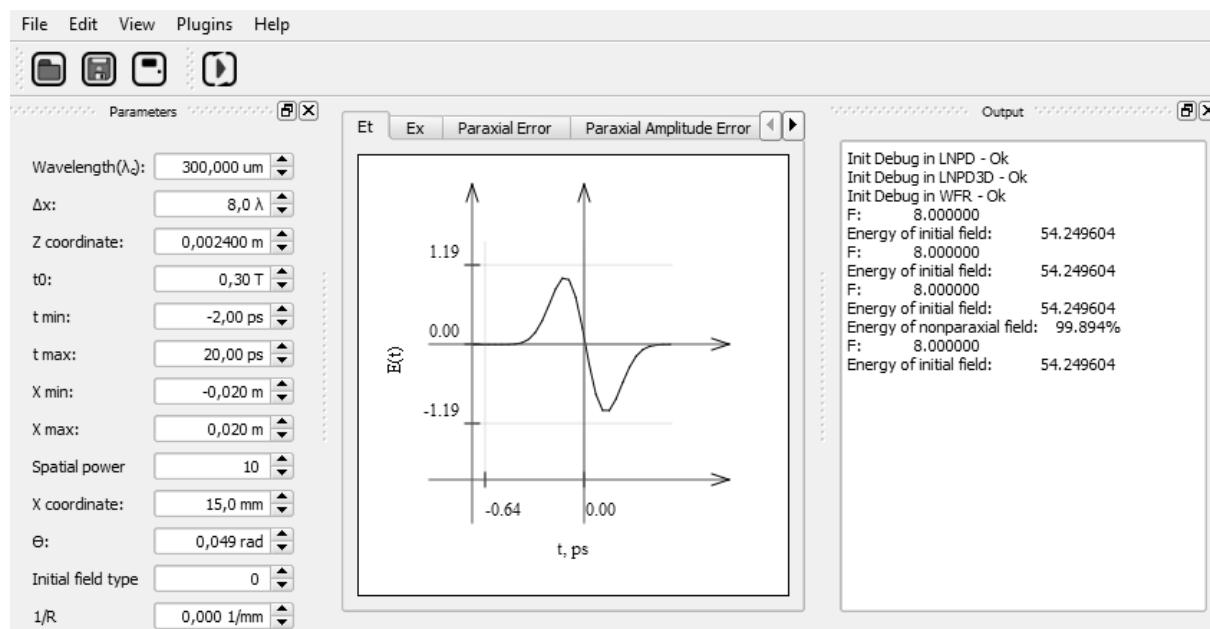


Рис. 2. Окно визуализатора: панель параметров, окно для отображения графиков и диаграмм и окно вывода отладочной информации

Одной из составных частей разработанного программного комплекса MTBeam является кросс-платформенный визуализатор MTVisual. Он является удобным инструментом для представления данных в виде одномерных и трехмерных графиков, двумерных диаграмм. Во всех режимах отображения имеется возможность настраивать масштаб изображения, цену деления осей, его цветовую схему, включать сглаживание изображения на основе общепринятых методов программной фильтрации, сплайновую интерполяцию отображаемой функции, аппроксимацию (рис. 1). Также присутствует возможность задавать настройки кэширования изображения.

Для удобства численной оценки отображаемой зависимости реализована возможность трассировки кривых и диаграмм – отображение значения под курсором на графиках.

Окно визуализатора разделено на три части (рис. 2) – панель ввода и редактирования параметров расчета, окно для отображения графиков и диаграмм и окно вывода отладочной информации. При использовании MTVisual для визуализации уже имеющихся массивов данных, загруженных из файлов, панель ввода и редактирования параметров не используется. MTVisual также позволяет запускать расчеты с заданными параметрами и отображать результаты по окончании расчета.

#### Расширение функционала программного комплекса за счет подключения плагинов

Программный комплекс MTBeam включает в себя встроенные плагины для решения определенных задач, связанных с моделированием различных режимов распространения оптических волновых пакетов в диэлектрических немагнитных средах. Эти плагины доступны для выбора в интерфейсе визуализатора. Плагин (plug-in) – независимо компилируемый программный модуль, динамически подключающийся к основной программе. Плагин LNPD (linear nonparaxial diffraction) используется для моделирования дифракционного распространения непараксиальных двумерных пучков в линейных однородных изотропных диэлектрических средах. Плагин WFR (wavefront reconstruction) предназначен для моделирования задач восстановления волнового фронта электрического поля световой волны по его известному распределению на некотором пройденном волной расстоянии. Плагин LNPD\_3D расширяет функционал плагина LNPD на случай трехмерных полей и спектров.

Данным набором плагинов функционал MTBeam не ограничивается, так как есть возможность подключения к нему внешних модулей, которые могут проводить расчеты других задач различного рода. Разные задачи можно запускать на выполнение в параллельном режиме при наличии многоядерного процессора.

MTBeam предоставляет API для разработчиков плагинов, который включает в себя необходимые связующие интерфейсы и набор часто используемых в оптике численных методов и алгоритмов, основными из которых являются быстрое преобразование Фурье, метод Симпсона численного интегрирования, интерполяция кубическим сплайнами, вычисление различных норм матриц.

#### Технология клиент-сервер

MTBeam реализует технологию клиент-сервер. Визуализатор является клиентской частью программного продукта, а серверная часть представляет собой программу для управления процессом запуска и расчета задач из плагинов (MTBeam Server). Взаимодействие между клиентской и серверной частью может осуществляться по двум схемам (рис. 3).

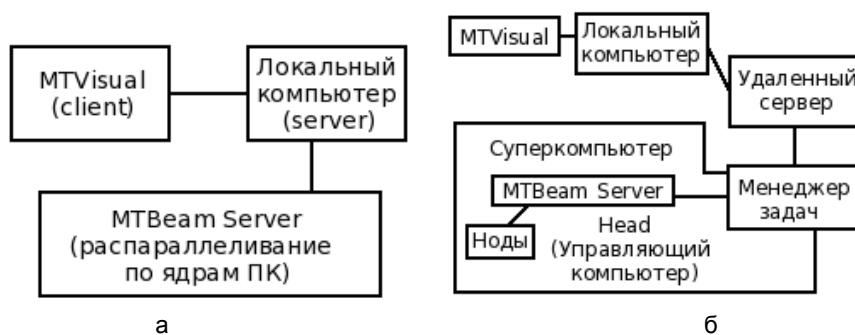


Рис. 3. Упрощенная схема работы программного продукта MTBeam – клиентская и серверная часть находятся на локальном компьютере (а); базовая схема работы программного продукта MTBeam – взаимодействие осуществляется по сети между локальным ПК и суперкомпьютером (б)

На рис. 3, а, изображена упрощенная схема работы программного комплекса MTBeam, согласно которой MTVisual и MTBeam Server работают на одном персональном компьютере (ПК) без использования сети. В этом случае возможности программы могут быть ограничены, поэтому базовым вариантом работы программного продукта является схема, представленная на рис. 3, б. Она предусматривает запущенную программу MTBeam Server на суперкомпьютере, которая взаимодействует с ресурсами операто-

ционной системы для получения информации о загруженности кластера и контролирует запуск и выполнение расчетов для подключившихся по сети (удаленно) клиентов. Суперкомпьютер обычно имеет большое число процессоров, а также большой объем оперативной и постоянной памяти, что является существенным для задач, требующих большого числа одновременно обрабатываемых данных.

### Системные требования

Программный продукт MTBeam доступен для следующих операционных систем: Microsoft Windows, GNU/Linux, Apple MacOS.

Рекомендуемые системные требования для запуска и работы визуализатора: 100 Мб свободного места на диске; 1024 Мб оперативной памяти (ОЗУ); процессор с частотой 2 ГГц. Рекомендуемые системные требования для запуска и работы MTBeam Server: 50 Мб свободного места на диске; 2048 Мб ОЗУ; процессор с частотой 2 ГГц.

### Примеры визуализированных результатов решений

На рис. 4, 5 представлены иллюстрации результатов моделирования дифракционной эволюции терагерцового пучка электромагнитного излучения из всего одного полного колебания поля на границе среды  $z = 0$  [5],

$$E(x, 0, t) = -E_0 \exp\left(-2^{19}\left(\frac{x}{\Delta x}\right)^{20}\right) \exp\left(-2\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right) \sin(\omega_c t),$$

в виде плоскостных изображений электрического поля  $E(x, z, t)$ , полученных в программном комплексе MTBeam. Параметры исходного пучка: центральная длина волны  $\lambda_c = 2\pi c/\omega_c = 300$  мкм; ширина пучка  $\Delta x = 3\lambda_c$ ; длительность  $\tau = 0,3$  пс.

На рис. 4, а, представлен пучок в зоне дифракции Френеля (расстояние  $z = 100$  мкм), смоделированный с использованием параксиального приближения, а на рис. 4, б – без применения параксиального приближения. Максимальная относительная ошибка, которая вычислялась как отношение норм матриц двумерного распределения электрических полей  $E(x, t)$ , составляет около 10%.

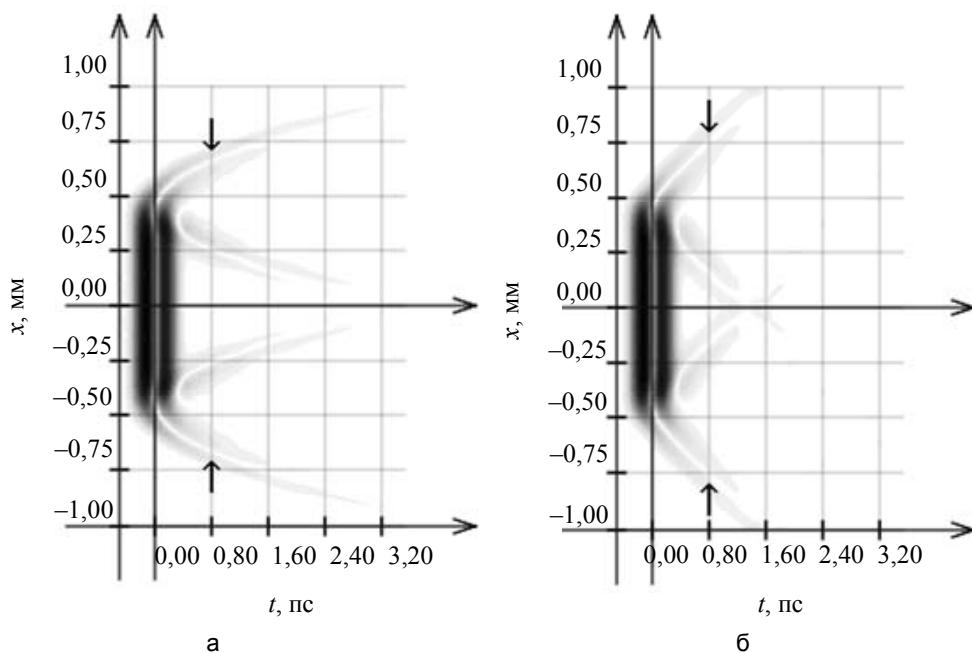


Рис. 4. Терагерцовый импульс, продифрагировавший на щели, на расстоянии в 100 мкм: с применением параксиального приближения (а); без использования параксиального приближения (б)

На рис. 5 представлены плоскостные изображения поля того же пучка на границе зон дифракции Френеля и Фраунгофера ( $z = 3$  мм). Как видно из рисунка, для волнового пакета с малым поперечным размером, сопоставимым с центральной длиной волны, использование параксиального приближения перестает быть корректным. Максимальная относительная ошибка между результатами, полученными с применением и без применения параксиального приближения, составляет примерно 30%. Заметно, что дифракционная расходимость у пучка в параксиальном приближении проявляется слабее.

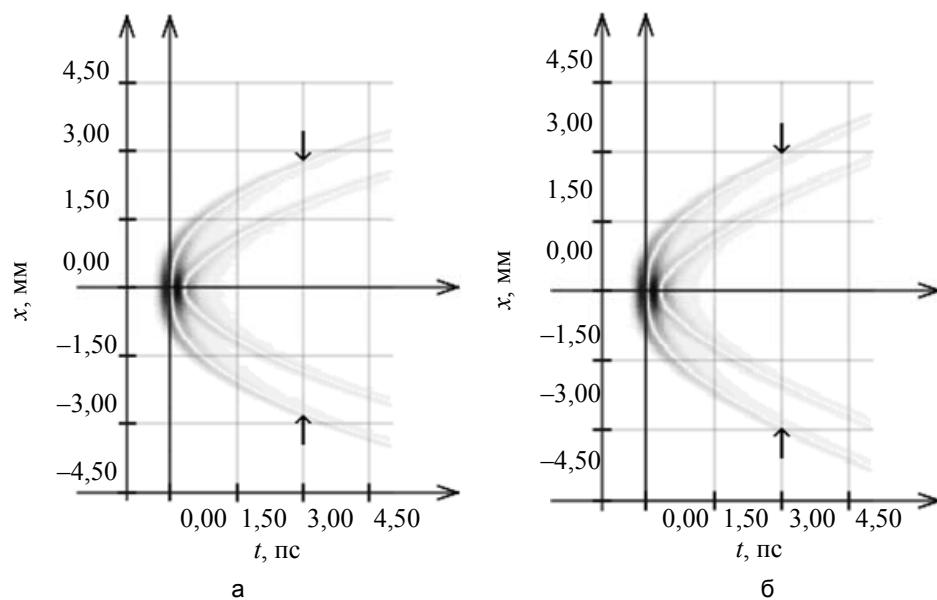


Рис. 5. Терагерцовый импульс, продифрагировавший на щели, на расстоянии в 3 мм: с применением параксиального приближения (а); без использования параксиального приближения (б)

На рис. 6 изображен график зависимости максимальной относительной ошибки параксиального приближения от пройденного пучком расстояния. Как видно из графика, с пройденным расстоянием она возрастает.

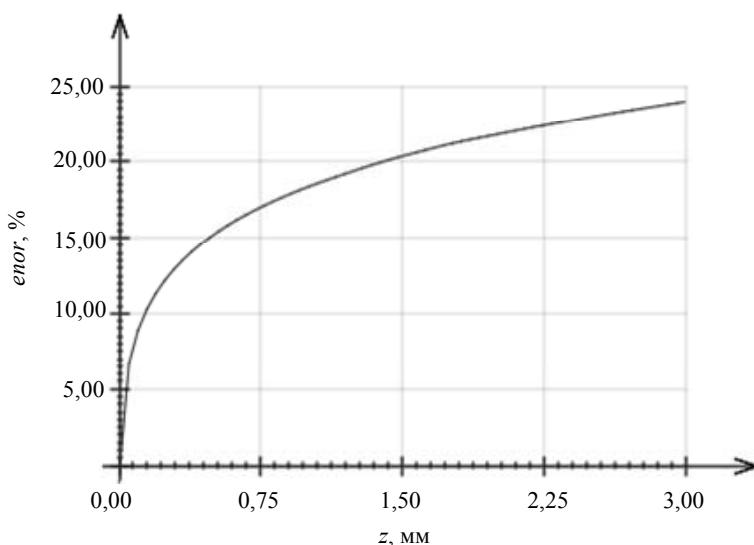


Рис. 6. График зависимости ошибки параксиального приближения от пройденного излучением расстояния

### Заключение

Авторами разработан программный продукт MTBeam, предназначенный для задач моделирования дифракционно-дисперсионной динамики полей и спектров электромагнитных волн, в том числе оптических пучков со сверхширенными временными и пространственными спектрами в диэлектрических средах. Программный продукт реализует технологию клиент-сервер и может проводить расчеты как на локальном, так и на удаленном компьютере или суперкомпьютере. Функционал включает в себя кросс-платформенное приложение-визуализатор и программу управления расчетами. Также имеется возможность подключения пользовательских плагинов для решения различных задач, не включенных в основной дистрибутив продукта.

Приведены примеры расчетов дифракции однопериодного терагерцевого импульса на щели и визуализации их результатов средствами MTBeam.

Работа поддержана грантами Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК № 16.513.11.3070 и ГК № 16.740.11.0459).

### Литература

1. Козлов С.А., Самарцев В.В. Оптика фемтосекундных лазеров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 218 с.
2. Шлее М. Qt 4.5 Профессиональное программирование на C++. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 896 с.
3. Бланшет Ж., Саммерфилд М. Qt 4: Программирование GUI на C++. – 2-е изд. – М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2008. – 736 с.
4. Немнюгин М.А., Стесик О.Л. Современный Фортран. Самоучитель. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.
5. Zhang X.-C., Xu. J. Introduction to THz wave photonics. – N.Y.: Springer Science+Business Media, 2009. – 249 р.

<b>Кислин Дмитрий Анатольевич</b>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, dexicekiller@gmail.com
<b>Князев Михаил Александрович</b>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, knyazev.michael@gmail.com
<b>Звягин Виктор Фомич</b>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, victor_zviagin@mail.ru
<b>Козлов Сергей Аркадьевич</b>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, декан, kozlov@mail.ifmo.ru

УДК 519.688+612.76

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПАМЯТИ

Б.А. Ляховецкий, А.С. Потапов

Рассмотрена модель запоминания последовательности движений (пространственных позиций), основанная на гетероассоциативной нейронной сети. Предложен критерий оценки правильности запомненного материала как числа итераций, необходимого для перехода в устойчивое состояние. Этот критерий хорошо согласуется с психофизиологическими данными и может использоваться для обучения нейросетевой модели без учителя. Предложена интерпретация разных типов ошибок с позиций нелинейной динамики.

**Ключевые слова:** гетероассоциативные нейронные сети, рабочая память, повторные ошибки.

### Введение

Основной функцией памяти является извлечение информации по содержанию, в чем технологии искусственного интеллекта до сих пор существенно проигрывают человеку. В этой связи актуальным представляется сопоставление характеристик компьютерных моделей и памяти человека. В настоящей работе это сопоставление выполняется на примере темпоральной рабочей памяти, которая используется для запоминания и последующего воспроизведения последовательности движений или пространственных положений.

Существуют три класса теорий, рассматривающих кодирование упорядоченной во времени информации [1]. Позиционные теории предполагают, что каждый элемент последовательности хранится в стеке рабочей памяти независимо от других элементов, а воспроизведение элементов в нужном порядке обеспечивается обходом стека предопределенным образом [2]. Популярные в настоящее время теории «соревновательного сцепления» (competitive queuing) являются развитием позиционных теорий. Они также предполагают, что элементы последовательности хранятся в рабочей памяти независимо друг от друга. Порядок воспроизведения элементов определяется «активностью» каждого элемента, определяющейся на протяжении запоминания всей последовательности. Выходные сигналы элементов последовательности конкурируют друг с другом, и только самый «активный» из них может «выиграть» в определенный момент времени. После того как элемент воспроизведен, осуществляется торможение его выходного сигнала, препятствующее его повторному воспроизведению [3]. Теории «последовательного связывания» (chaining) предполагают, что последующий элемент последовательности может быть воспроизведен лишь на основе информации о предыдущем элементе [1]. В настоящее время модели последовательного связывания реализуются на базе искусственных нейронных сетей (ИНС) типа ассоциативной памяти (автоассоциативные сети Хопфилда, гетероассоциативные сети Кооско) [4, 5]. Нейросетевые модели позволяют объяснить как электрофизиологические данные, так и когнитивные аспекты рабочей памяти [4].

В нейросетевых моделях элементы последовательности хранятся распределенно, определяя матрицу весов связей нейронов. При использовании простых алгоритмов расчета матрицы весов емкость

сетей достаточно мала, и они «самостоятельно», без вмешательства экспериментатора в работу сети, допускают ошибки при воспроизведении запомненного [6]. Это свойство сетей позволяет без дополнительных допущений объяснить малую емкость рабочей памяти, в отличие от моделей, основанных на теориях соревновательного сцепления, в которых необходимы дополнительные допущения для объяснения ошибок запоминания.

Одной из интересных проблем разработки моделей памяти является введение критерия оценки верности запомненного материала без обращения к запомненным объектам внешнего мира. Значение этого критерия характеризует качество запоминания и может позволить спланировать стратегию обучения модели. Проблема оценки верности запомненного материала – одна из важных проблем также в когнитивной психологии. Некоторым образом человеку удается понять, какой материал запомнен им правильно, а какой – ошибочно. При этом отличить правильный ответ от неверного можно и неосознанно [7]. Часто правильность ответа влияет на время, требуемое на воспроизведение запомненного, – средние времена правильных и неверных ответов испытуемого различны. При воспроизведении последовательности движений руки среднее время правильно воспроизведенных движений ниже среднего времени ошибочно воспроизведенных движений [8].

Нейросетевая модель [5], основанная на теории последовательного связывания, хорошо подходит для описания распределений ошибок при немедленном воспроизведении запомненных последовательностей движений руки, в частности, воспроизводит эффект новизны, наблюдаемый в психофизиологическом эксперименте. В настоящей работе предпринята попытка, оставаясь в рамках внутреннего представления данных, используемого в модели [5], предложить объективный критерий, позволяющий отличить верные ответы от неверных, не обращаясь повторно к входной последовательности стимулов.

### **Методика**

Предложенная нейросетевая модель используется для описания процессов запоминания и воспроизведения человеком последовательности движений руки по плоскости, поэтому целесообразно начать изложение методики с описания психофизического эксперимента.

С помощью сенсорного экрана регистрировались координаты положений указательного пальца руки (т.е. «рабочей точки» руки) испытуемых при немедленном воспроизведении запомненной последовательности. Для регистрации использовался емкостной сенсорный экран 3M Touch Systems 18.90", подключенный с помощью NovRAM кабеля через микроконтроллер к USB-порту персонального компьютера. Специальное программное обеспечение, разработанное авторами, позволяло регистрировать параметры касаний сенсорного экрана. Опыты проводились без обратной связи – до окончания эксперимента испытуемому не сообщалось о правильности или ошибочности его ответов. Локоть испытуемого не касался поверхности стола и не был фиксирован. В экспериментах принимали участие правши, определение доминирующей руки проводилось по специальному тесту [9].

Изучалось воспроизведение последовательностей движений в двух группах правшей (по 15 человек в каждой): в группе А испытуемые начинали работать правой рукой, а продолжали левой, в группе Б – наоборот. Анализировались ошибки испытуемых при многократном (3 раза) запоминании и воспроизведении последовательности движений правой или левой руки по 6 целям, расположенным на листе формата А4, разбитом на 6×4 квадратов.

Анализ данных проводили, исходя из гипотезы о двух способах кодирования информации в кратковременной моторной памяти, согласно которой при запоминании последовательности кодируется положение стимулов (позиционное кодирование конечных точек движений) и (или) изменение их положения (кодирование векторов перемещений руки) [5]. Для двух последовательных серий движений выделялись одинаковые повторные ошибки по положению (испытуемый дважды неправильно воспроизводил положение руки с расхождением не более чем на 2 см) и по направлению движения (испытуемый дважды неправильно воспроизводил направление движения руки с расхождением не более чем на 15°). Регистрировалось среднее время движений испытуемых при правильных и ошибочных ответах.

**Математическая модель.** Модель типа двунаправленной гетероассоциативной памяти содержит два слоя формальных нейронов, соединенных двунаправленными связями [5] (рисунок).

На входной слой модели подается вектор  $Z_i$ . Нейроны этого класса сетей работают с бинаризованными данными, поэтому элементы векторов  $Z$  переводятся в двоичную систему счисления [10]. Согласно вышеупомянутой гипотезе о двух возможных типах кодирования в моторной памяти, элементы векторов запоминаемой последовательности  $Z_i$  содержат информацию о рабочих точках руки  $S_i$ , которые можно определить в полярной или декартовой системах координат.

**Полярная система координат.** Элементами векторов являются направление  $\alpha$  и величина перемещения  $\rho$ . Направление  $\alpha$  хранится дискретно, с шагом 11,5°, максимальная величина перемещения составляет 6 квадратов (из одного угла листа в другой по диагонали), поэтому для хранения  $\alpha$  и  $\rho$  в бинаризованной форме требуется 5 и 3 элементов соответственно. Параметры  $\alpha$  и  $\rho$  хранятся в рамках двух подсетей, между которыми отсутствуют связи, что соответствует имеющимся в литературе сведениям о раз-

дельном запоминании человеком направления и амплитуды движения. Для расчета симметричной матрицы весов  $\mathbf{W}_\rho$ , используемой при запоминании последовательности величин перемещений, применялся алгоритм расчета, предложенный в [10]. Для расчета асимметричной матрицы весов  $\mathbf{W}_a$ , используемой при запоминании последовательности направлений перемещений, применялся алгоритм расчета, предложенный в [6]. Схема кодирования смещений рабочей точки в полярной системе координат может использоваться при векторном способе внутреннего представления информации, т.е. при кодировании траектории движения руки.

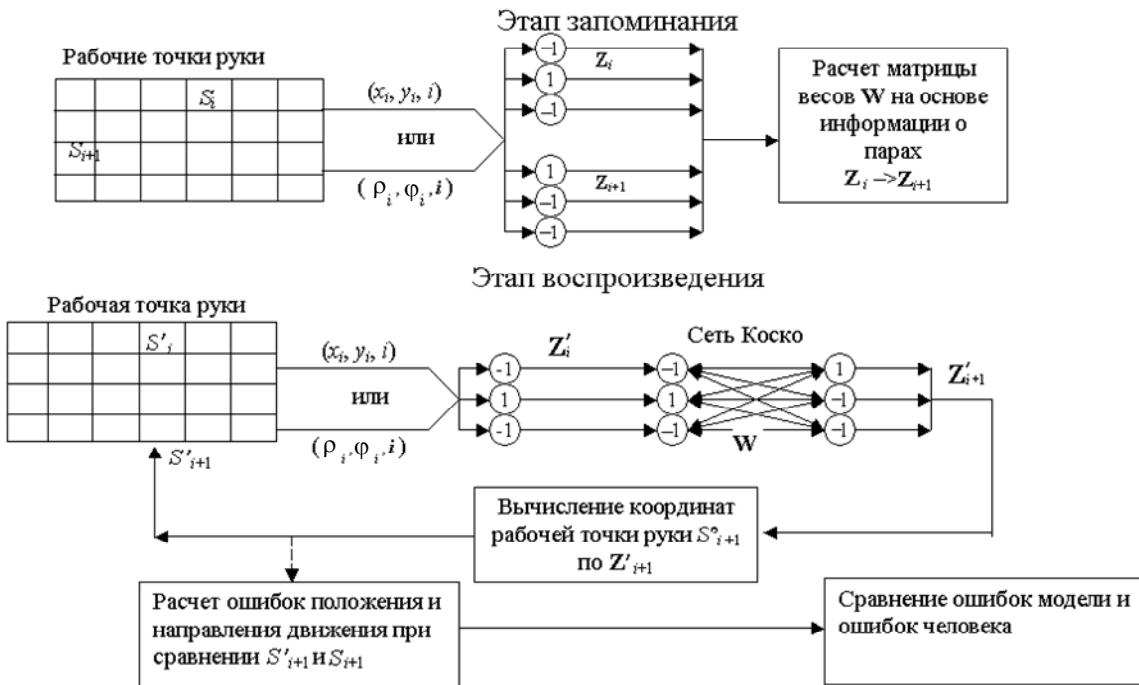


Рисунок. Схема модели

**Декартова система координат.** Модель предназначена для имитации запоминания целей, расположенных на листе, разбитом на  $6 \times 4$  квадрата, поэтому для хранения координат в бинаризованной форме требуется 3 и 2 элемента соответственно. Такая схема кодирования может использоваться при позиционном способе внутреннего представления информации, т.е. при кодировании положения руки.

Для обеих рассмотренных выше схем кодирования вектор  $\mathbf{Z}$  содержит номер цели, поэтому модель способна запоминать последовательности, содержащие повторяющиеся элементы.

Сеть характеризуется вычисляемой в явной форме матрицей весов  $\mathbf{W}$  и не нуждается в тренировке. Этап запоминания заключается в расчете матрицы  $\mathbf{W}$  по «цепочки» пар ( $\mathbf{Z}_{i-1}, \mathbf{Z}_i$ ) векторов запоминаемой последовательности:  $\mathbf{W} = \sum_i \mathbf{Z}_{i-1}^T \mathbf{Z}_i$ . Модель предназначена для имитации запоминания шести движений руки, поэтому  $i = 1-6$ .

На этапе воспроизведения элементы  $z_{ik}$  вектора  $\mathbf{Z}_i$  вычисляются через элементы  $z_{(i-1)m}$  вектора  $\mathbf{Z}_{i-1}$  и элементы  $w_{mk}$  матрицы  $\mathbf{W}$ :

$$z_{ik}^0 = \text{sgn}(\sum_m z_{(i-1)m} w_{mk}),$$

где  $k, m = 1 \dots K$ ,  $K$  – число нейронов одного слоя сети, которое зависит от выбранной схемы кодирования,

$$\text{sgn}(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a \geq 0, \\ -1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Далее активность распространяется на первый слой сети,  $z_{(i-1)k} = \text{sgn}(\sum_m z_{im}^0 w_{mk})$ , и затем вновь на второй слой,  $z_{ik}^1 = \text{sgn}(\sum_m z_{im}^1 w_{mk})$ . Двустороннее распространение активности продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто устойчивое состояние,  $z_{im}^t = z_{im}^{t+1}$ .

При каждой схеме кодирования с моделями проводили 10000 опытов с нейронной сетью. Регистрировалось количество итераций, за которые сеть достигнет устойчивого состояния для верно и ошибочно запомненных векторов.

### Результаты и их обсуждение

Зависимость числа итераций, за которое нейронная сеть достигнет устойчивого состояния, от числа ошибочно запомненных битов представлена в табл. 1. Из таблицы видно, что для обеих схем кодирования сеть достоверно быстрее приходит в устойчивое состояние при правильных ответах (0 ошибочных бит). Это означает, что, хотя информация о числе ошибочных битов не доступна сети, для оценки правильности ответа модель может использовать количество итераций, необходимых для перехода сети в устойчивое состояние.

Ошибочных битов	0	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Схема 1</b>	1,3	1,6	1,6	1,7	1,8	1,7	1,7	1,7	1,8
<b>Схема 2</b>	1,4	1,6	1,7	1,8	1,8	1,7	—	—	—

Таблица 1. Число итераций сети для различного числа ошибочно запомненных битов

Можно предположить, что, так как разница в среднем числе итераций в зависимости от правильности ответа невелика (0,3 итерации для Схемы 1; 0,2 итерации для Схемы 2), то, основываясь на таком критерии, модель будет иногда принимать ошибочный ответ за верный. Это означает, что введенный в рассмотрение критерий правильности ответа будет «слабым». Однако такое свойство модели не будет недостатком – и человек, как показано в приведенном психофизическом опыте, не всегда способен отличить свои правильные ответы от ошибочных.

При запоминании движений руки испытуемые достаточно часто допускают повторные ошибки, т.е. при двукратном воспроизведении запомненной серии движений дважды повторяют свою ошибку одинаковым образом (дважды подряд касаются окрестности одной и той же неверной точки, дважды подряд выбирают одно и то же неверное направление). Среднее время правильных и ошибочных ответов испытуемых представлено в табл. 2. Среднее время движений, связанных с повторными ошибками, значительно (по критерию знаков) меньше среднего времени движений, связанных с иными ошибками, и не отличается от среднего времени правильно запомненных движений. Причем эта закономерность проявляется уже для первого ошибочного движения.

Группа	Рука	Положение			Направление		
		Правильные ответы	Ошибки		Правильные ответы	Ошибки	
			Повторные	Иные		Повторные	Иные
<b>A</b>	Правая	1649	1447	2139	1667	1624	2004
	Левая	1602	1671	2038	1789	1809	2029
<b>Б</b>	Левая	1583	1493	1939	1592	1723	1707
	Правая	1592	1412	1966	1518	1549	1828

Таблица 2. Среднее время движений при правильных и ошибочных ответах испытуемых, мс

По-видимому, испытуемые уверены в правильности таких ошибочных движений и не пытаются корректировать их при повторном заучивании последовательности движений руки, т.е. не могут отличить такие неверные ответы от правильных – число повторных ошибок не уменьшается от первой серии заучивания к третьей.

Нейросетевые модели могут допускать как случайные, так и повторные ошибки. Эти ошибки хорошо объяснимы с позиций нелинейной динамики ИНС: поведение подобных рекуррентных ИНС можно описать через траектории в фазовом пространстве, задаваемом активностями нейронов сети. Сходимость ассоциативной памяти к некоторому устойчивому состоянию означает наличие точечного аттрактора в фазовом пространстве. Задача запоминания некоторых образов такой сетью сводится к выбору таких весов связей, которые бы в качестве аттракторов определяли запомненные образы.

В нашем исследовании затрачиваемое время при совершении повторных ошибок, совершаемых человеком, близко ко времени, затрачиваемом при правильных ответах. Такое соотношение времен воспроизводится нейросетевой моделью, для которой повторные ошибки обусловлены «ложными» точечными аттракторами, не соответствующими запоминаемым образам и возникающими как побочный эффект при обучении.

При совершении случайных ошибок человек затрачивает больше времени на принятие решения. Эта особенность также воспроизводится нейросетевой моделью: при возникновении в фазовом пространстве ИНС неточечных аттракторов сеть (при попадании в такой аттрактор) будет колебаться между разными ответами, выбор между которыми (при превышении максимального числа итераций) даст случайную ошибку.

### Заключение

Критерий оценки правильности запомненного материала нейросетевой моделью как числа итераций, необходимого для перехода искусственных нейронных сетей в устойчивое состояние, предложенный в данной работе, хорошо согласуется с психофизиологическими данными и может использоваться для обучения нейросетевой модели без учителя.

Установлено наличие сходства между процессами воспроизведения запомненных образов человеком и искусственными нейронными сетями не только в случае случайных, но и в случае повторных ошибок. В дальнейшем планируется расширить интерпретацию указанных особенностей функционирования памяти с позиции нелинейной динамики не только для установления сходства при совершении ошибок, но и для воспроизведения полезных свойств памяти человека в компьютерных системах. К таким свойствам относится обобщение образов и их извлечение по отдельным фрагментам. В случае робототехнических систем подобные свойства могут быть полезны при реализации адаптивных программ управления движением, формируемых на основе примеров, а также для реализации топографической памяти.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### Литература

1. Henson R. Serial order in short-term memory // The Psychologist. – 2001. – V. 14. – P. 71–74.
2. Conrad R. Order error in immediate recall of sequences // J. of Verbal Learning and Verbal Behavior. – 1965. – V. 6. – P. 49–54.
3. Grossberg S. Behavioral contrast in short-term memory: serial binary memory models or parallel continuous memory models? // J. of Mathematical Psychology. – 1978. – V. 17. – P. 199–219.
4. Durstewitz D., Seamans J.K., Sejnowski T. Neurocomputational models of working memory // Nature Neuroscience Supplement. – 2000. – V. 3. – P. 1184–1191.
5. Ляховецкий В.А., Боброва Е.В. Воспроизведение запомненной последовательности движений правой и левой руки: позиционное и векторное кодирование // Журнал высшей нервной деятельности. – 2009. – № 1. – С. 45–54.
6. Xu Z.-B., Leung Y., He X.-W. Asymmetric bidirectional associative memories // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 1994. – V. 24. – P. 1559–1564.
7. Аллахвердов В.М. Методологическое путешествие по океану бессознательного к таинственному острову сознания. – СПб: Речь, 2003. – 368 с.
8. Rabbit P. An elementary preliminary taxonomy for some errors in laboratory choice RT-tasks // Acta Psychologica. – 1970. – V. 33. – P. 56–76.
9. Oldfield R.C. The assessment and analysis of handedness: the Edinburg inventory // Neuropsychologia. – 1971. – V. 9. – P. 97–113.
10. Kosko B. Bidirectional associative memories // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 1988. – V. 18. – P. 49–60.

**Ляховецкий Всеволод Александрович**

– Институт Физиологии им. И.П. Павлова РАН, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, v\_la2002@mail.ru

**Потапов Алексей Сергеевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, pas.aicv@gmail.com

**УДК 004.932.2**

## МЕТОД СЖАТИЯ ТРЕХМЕРНЫХ БИОМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ФОРМЕ ОКТОДЕРЕВА И.Н. Жданов, А.С. Потапов, О.В. Щербаков

Рассмотрен метод сжатия без потерь трехмерных биомедицинских изображений на основе их представления в форме октодерева. Предложена модификация метода, реализующая сжатие с потерями с использованием предварительной фильтрации и подавления шума. Показано, что предлагаемый метод превосходит по эффективности методы сжатия двумерных изображений как с потерями, так и без потерь (JPEG и PNG), примененные к трехмерным изображениям послойно.

**Ключевые слова:** сжатие изображений, биомедицина, октодерево.

### Введение

Использование трехмерных данных становится все более распространенным в самых разнообразных информационно-телекоммуникационных системах. В частности, большое значение такие данные приобретают для биомедицинских систем, в которых объемные изображения биологических тканей не-

сут важную информацию для проведения диагностики заболеваний. При этом сложность задач хранения информации и ее передачи по каналам связи в случае трехмерных изображений оказывается существенно выше, и одной из основных проблем становится эффективное представление трехмерных данных. При решении этой проблемы, однако, в качестве основы используются преимущественно традиционные представления изображений. Например, в работе [1] рассматривается алгоритм сжатия трехмерных изображений, основная идея которого состоит в преобразовании трехмерных изображений в двумерные и в последующей их компрессии с использованием известных алгоритмов – JPEG и PNG. Представления, разработанные для двумерных изображений, могут быть неоптимальными в случае трехмерных изображений, поэтому они дополняются некоторыми элементами, повышающими их эффективность.

В частности, в работе [2] предложен двухэтапный метод компрессии изображений, основанный на сжатии разных областей изображения с разными параметрами качества. На первом этапе осуществляется выделение «областей интереса» на изображении. На втором этапе осуществляется компрессия изображения с помощью JPEG, при этом для «областей интереса» и остальных областей используются разные параметры качества.

Повышение эффективности сжатия может достигаться путем замены дискретного косинусного преобразования вейвлет-преобразованием. Однако при этом в случае многослойных изображений центральными становятся вопросы быстродействия. В частности, в [3] предложен гибридный алгоритм, основанный на применении дифференциальной импульсно-кодовой модуляции, целочисленных вейвлет-преобразований и вейвлет-преобразований с вложенными нуль-деревьями. Для решения проблем быстродействия подобные кодеки приходится реализовывать на спецпроцессорах.

Альтернативным (но тоже уже достаточно традиционным) является фрактальный подход к сжатию. Так, в работе [4] предложен метод компрессии изображений в спутниковых системах связи, основанный на концепциях мультимасштабного анализа сигналов. Однако исследования авторов [5] показывают, что фрактальные представления являются недостаточно эффективными в случае некоторых классов биомедицинских изображений. Таким образом, в задачах компрессии трехмерных изображений используется весьма ограниченный набор представлений информации, заимствованный из области сжатия двумерных изображений. В этой связи разработка и исследование эффективных представлений трехмерных изображений является весьма актуальной задачей.

Эффективность трехмерных представлений изображений важна при решении не только задач компрессии изображений, но также и задач их реконструкции и визуализации в масштабе реального времени. Для этих целей распространенным является представление в форме октодерева [6, 7]. Эффективность такого класса представлений была по отдельности показана как для описания биомедицинских изображений [8], так и для задач сжатия трехмерных данных [9].

В настоящей работе представлены результаты исследования возможностей компрессии трехмерных биомедицинских изображений с использованием представления в форме октодерева, пригодного для последующей визуализации в масштабе реального времени. Поскольку представление в форме октодерева очень удобно для визуализации, то вполне естественно рассмотреть вопрос хранения информации в такой форме для минимизации вычислительной сложности последующих операций. Показано, что использование представлений в форме октодерева достаточно эффективно для хранения сжатых трехмерных биомедицинских изображений.

### Представление трехмерных изображений в форме октодерева

Октодерево является структурой, описывающей последовательное разбиение объема изображения (который обычно ограничен прямоугольным параллелепипедом) на элементы уменьшающегося объема. Формирование октодерева удобнее всего описать в рекурсивной форме. В корневом узле октодерева находится весь объем изображения. Далее каждый узел может иметь восемь потомков, если соответствующий элемент объема, или блок (прямоугольный параллелепипед), разделен на подблоки (которые, как правило, берутся равными по размеру и форме). Например, на рис. 1 показано небольшое октодерево, состоящее из четырех уровней, включая корневой узел, и соответствующий результат разделения исходного объема на блоки.

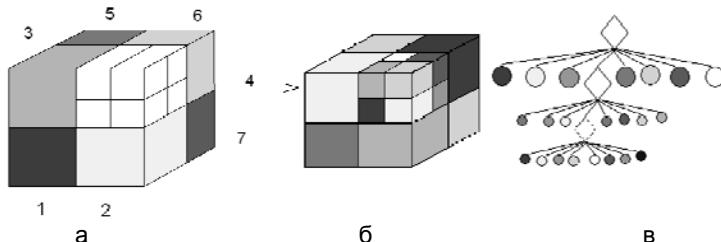


Рис. 1. Пример октодерева: верхний уровень дерева (а); дальнейшее разделение 4-го блока на подблоки (б); структура результирующего октодерева (в)

Для использования представления в форме октодерева в целях сжатия можно предложить следующий алгоритм рекурсивного разбиения.

1. Сформировать октодерево, состоящее из одного корневого узла, соответствующего всему объему изображения. Пометить данный узел как активный.
2. Для каждого активного узла проверить равенство яркостей всех пикселей в соответствующем блоке (объеме изображения). Если равенство выполняется, сделать узел неактивным (пометить его как лист), в противном случае породить восемь узлов-потомков, которые пометить как активные, разделив текущий блок на подблоки.
3. Выполнять шаг 2, пока остаются активные узлы на дереве.

В процессе рекурсивного разбиения в файл может отдельно записываться структура октодерева, которая описывается последовательностью битов, указывающих, был ли разбит некоторый блок изображения на подблоки. При фиксированном порядке обхода октодерева никакую дополнительную информацию сохранять не нужно.

Отдельно требуется сохранять яркости пикселей в блоках, соответствующих листьям октодерева. Аналогично, здесь достаточно указывать для каждого листа одно значение яркости и ничего более: при детерминированном порядке обхода октодерева и его известной структуре можно однозначно восстановить яркости всех пикселей.

Файл со структурой октодерева может быть дополнительно сжат, поскольку верхние уровни октодерева, которые, как правило, имеют потомков, будут приводить к записи битов со значением 1 в начале файла, тогда как листья октодерева, не имеющие потомков, будут преимущественно приводить к появлению в конце файла битов со значениями 0. Вместе с тем к файлу, содержащему значения яркости, может быть применено энтропийное кодирование, учитывающее неравномерность гистограммы распределения яркостей. В настоящей работе структура октодерева и яркости в его листьях записывались в два отдельных файла и сжимались с использованием архиваторов общего назначения.

Описанный алгоритм обеспечивает сжатие без потерь, что нередко является необходимым для биомедицинских изображений. Однако полезно также модифицировать алгоритм для осуществления сжатия с потерями. Для этого вполне естественно ослабить условие на то, чтобы внутри блоков яркости всех пикселей были абсолютно одинаковы. Из-за этого условия можно ожидать, что для зашумленных изображений размеры блоков в октодереве будут получаться слишком маленькими (и, соответственно, небольшим окажется коэффициент сжатия).

Достаточно естественно принимать решение о разделении блока на подблоки на основе критерия дисперсии яркостей. При этом вместо использования одного строгого порога на величину дисперсии можно применить адаптивный выбор порога по критерию минимальной длины описания по аналогии с тем, как это было сделано авторами в случае построения квадродерева при фрактальном сжатии двумерных изображений [10].

В случае трехмерных изображений, однако, вычисление значения дисперсии яркостей для каждого блока оказывается неприемлемым из-за существенного снижения быстродействия, поскольку при этом число обращений к каждому пикселию оказывается пропорциональным числу уровней в октодереве. В то же время при использовании требования равенства всех яркостей внутри блоков оказывается необходимым в среднем проверять лишь несколько пикселей в каждом блоке, что для больших блоков, находящихся на верхних уровнях октодерева, приводит к существенному сокращению числа операций.

Поскольку причиной, по которой допустимо использование сжатия с потерями, является отсутствие необходимости сохранять шум, можно в явном виде использовать предобработку изображения путем фильтрации с подавлением шума. Такая фильтрация должна привести к тому, что вариативность значений яркостей близких точек уменьшится, что облегчит формирование блоков большего размера на октодереве и повысит степень сжатия. Дополнительным преимуществом такого подхода является то, что он не будет (в отличие от традиционных подходов сжатия с потерями) приводить к появлению артефактов сжатия, обусловленных спецификой, например, блочного представления изображений. Поскольку те изображения, для которых разрабатываются данные методы, характеризуются высоким уровнем шума, явное подавление шума как косвенный способ повышения степени сжатия является вполне приемлемым. Здесь нами были рассмотрены простейшие фильтры – медианный и гауссов.

### Экспериментальная проверка

Для проведения экспериментальной проверки были использованы трехмерные изображения биотканей, полученные с помощью метода оптической когерентной томографии. На рис. 2 показаны несколько слоев (В-сканов) одного изображения (инвертированного по яркости), а на рис. 3 показаны примеры слоев других изображений. Представленные на рисунках изображения имеют размеры 1214×416×500 пикселей (рис. 2), 640×1000×511 пикселей (рис. 3, а), 971×416×400 пикселей (рис. 3, б), 1280×500×92 пикселей (рис. 3, в).

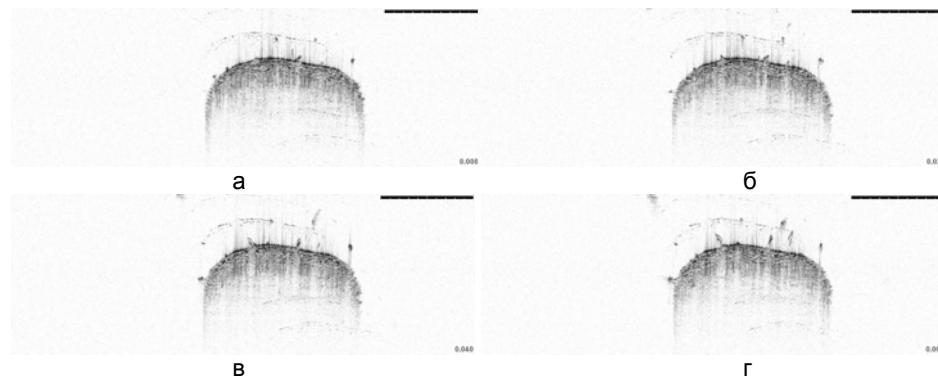


Рис. 2. Последовательные слои одного из трехмерных изображений (а–г)

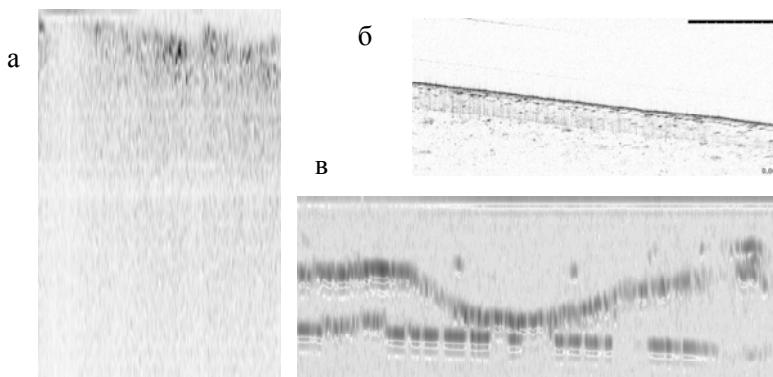


Рис. 3. Примеры одного слоя изображений разных объектов (а–в)

В табл. 1 представлены результаты сжатия без потерь представленных изображений с использованием октодерева. Для сравнения приведены размеры архивов, содержащих файлы с В-сканами в PNG-формате (данный формат также обеспечивает сжатие без потерь), и объемы несжатых изображений.

Номер изображения	Объем (октодерево), МБ	Объем (PNG), МБ	Объем (несжатый), МБ
1	109	156	240,8
2	174	206	312
3	75	105	154
4	9,2	11,7	56,2

Таблица 1. Результаты сжатия трехмерных изображений без потерь

Как видно, рассмотренный метод компрессии на основе октодерева оказывается эффективным в смысле коэффициента сжатия. Выигрыш по сравнению с форматом PNG составляет 18%–43%.

Рассмотрим теперь вопрос сжатия с потерями. Для оценки потерь использовалась информационная мера, которая оценивалась как количество битов, необходимых для кодирования различий между восстановленным после сжатия и исходным изображениями. Для этого считалась попиксельная разность между этими изображениями, строилась гистограмма отклонений, по которой вычислялась энтропия. Эта энтропия, умноженная на число пикселей в изображении, и является информационной оценкой потерь при сжатии.

В табл. 2 приведены объемы файлов, полученные при сжатии с помощью октодерева при различных масках медианного фильтра, а также величины потерь. Результаты сжатия при использовании гауссова фильтра оказались хуже, что связано, видимо, с тем, что при такой фильтрации получаются промежуточные значения яркостей, тогда как при медианной фильтрации происходит замена яркостей некоторых пикселей на яркости соседних пикселей. Последнее позволяет формировать блоки октодерева большего размера. В табл. 3 приведены аналогичные результаты для сжатия методом JPEG. Как видно, уменьшение объема сжатого файла сопровождается возрастанием информационных потерь. При этом при равных объемах сжатых файлов потери при компрессии методом октодерева оказываются более чем на 17% меньше, чем при сжатии JPEG. Для изображения, представленного на рис. 3, в, выигрыш превышает 2 раза, а для изображения на рис. 3, б, выигрыш составляет 7% (при этом при равных информационных потерях коэффициент сжатия методом октодерева в 1,36 раза выше, чем методом JPEG). Однако для изображения на рис. 3, а, при равных размерах сжатых файлов информационные потери более чем в 2 раза оказываются меньшими для JPEG, что может быть связано с особой структурой этого изображения. Таким образом, метод на осно-

ве октодерева оказывается в среднем лучше, чем метод JPEG, хотя в случае большой избыточности изображения в частотной области сжатие JPEG может оказаться эффективнее.

Размер маски	3	5	7	9	11	13	15
Объем, МБ	59,9	40,7	34,9	32,4	30,8	29,5	28,3
Потери, МБ	95,4	100,1	101,7	102,6	103,2	103,6	104,1

Таблица 2. Результаты сжатия изображений с потерями на основе октодерева с использованием медианного фильтра

Качество	80	60	40	20
Объем, МБ	45,5	25,0	15,8	6,67
Потери, МБ	116,9	129,9	136,2	149,5

Таблица 3. Результаты сжатия JPEG с разными значениями параметра качества

### **Заключение**

В работе предложен быстрый алгоритм построения октодерева для сжатия трехмерных биомедицинских изображений без потерь. Предложена модификация алгоритма путем добавления предварительной фильтрации и подавления шума для осуществления сжатия с потерями.

Показано, что представление трехмерных изображений в форме октодерева, традиционно применяемое для повышения эффективности их визуализации, оказывается пригодным и для сжатия изображений, что позволяет использовать этот тип представлений для решения обеих задач одновременно. Сжатие с помощью октодерева на рассмотренных трехмерных биомедицинских изображениях эффективнее в среднем на 18% и более по сравнению с методом PNG (при компрессии без потерь) и методом JPEG (при сжатии с потерями), применяемых к каждому слою объемного изображения независимо.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### **Литература**

1. Karpinsky N., Zhang S. Composite phase-shifting algorithm for three-dimensional shape compression // Opt. Eng. – 2010. – V. 49. – P. 063604.
2. Shao X., Gao K., Lv L., Ni G. A new efficient method for color image compression based on visual attention mechanism // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7850. – P. 78501G.
3. Fan J., Zhou J., Chen X., Shen W. Hyperspectral image data compression based on DSP // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7850. – P. 78500H.
4. Bagmanov V., Kharitonov S., Meshkov I., Sultanov A. Multiscale image compression for satellite telecommunication systems // Proc. of SPIE. – 2008. – V. 7026. – P. 70260E.
5. Гуров И.П., Окунев В.В., Потапов А.С. Исследование эффективности фрактальных методов компрессии биомедицинских изображений с помощью принципа минимальной длины описания // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 12. – С. 17–21.
6. Soares L., Menier C., Raffin B., Roch J.-L. Parallel Adaptive Octree Carving for Real-time 3D Modeling // IEEE Virtual Reality Conference, VR'07. – 10–14 March 2007. – P. 273–274.
7. Szeliski R. Rapid Octree Construction from Image Sequences // CVGIP: Image Understanding. – 1993. – V. 58. – № 1. – P. 23–32.
8. Kochunov P.V., Lancaster J.L., Fox P.T. Accurate High-Speed Spatial Normalization Using an Octree Method // NeuroImage. – 1999. – V. 10. – P. 724–737.
9. Siddiqui R.A., Celasun I., Bayazit U. Octree Based Compression of Volumetric and Surface 3D Point Cloud Data // Proc. 13th Int'l Conf. on Virtual Systems and Multimedia, VSMM 2007. – Brisbane, Australia. – 23–26 Sept. 2007. – P. 278–282.
10. Окунев В.В., Потапов А.С. Оптимизация разбиения изображения в форме квадродерева по критерию минимальной длины описания во фрактальном сжатии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 34–38.

- Жданов Иннокентий Николаевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, avenger15@yandex.ru
- Потапов Алексей Сергеевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, pas.aicv@gmail.com
- Щербаков Олег Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ScherbakovOlegDK@yandex.ru

# 6

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 53.082.74

### ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СТАЛЕЙ В КРИОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

И.Ю. Иванов, А.А. Васильев, М.Е. Взнуздаев, С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, С.А. Котов,  
П.А. Кравцов, А.В. Надточий, В.А. Трофимов

Криогенный индукционный магнитометр разработан и изготовлен в Петербургском институте ядерной физики. Прибор позволяет измерять магнитную восприимчивость материалов в широком диапазоне температур (10–300 K). Описаны технические особенности установки. Приведены результаты измерений динамической магнитной восприимчивости для нескольких марок высоколегированной нержавеющей стали. По результатам исследования дана рекомендация по применению одной из рассмотренных марок как конструкционного материала в ядерно-физическем эксперименте MuSun.

**Ключевые слова:** динамическая магнитная восприимчивость, криогенника, магнитометр.

#### Введение

В целом ряде экспериментов, в частности, на ускорителях, предъявляются высокие требования к однородности магнитного поля, которое искается конструкционными материалами или остаточной намагниченностью металла. Это, в свою очередь, приводит к ошибкам эксперимента и увеличению его продолжительности. Все это обуславливает высокие требования, предъявляемые к магнитным свойствам конструкционных материалов.

Одним из ценных свойств сталей аустенитного класса является их низкая магнитная восприимчивость. По этому показателю они существенно отличаются от прочих типов высоколегированных коррозионностойких сталей, таких как мартенситные и ферритные. Магнитная восприимчивость стали весьма чувствительна к содержанию легирующих элементов и однородности кристаллической структуры образца. Разброс процентного содержания легирующих элементов в составе промышленных марок сталей может достигать 2 ат.%. Для большинства прикладных задач этот разброс, как и возникающая в результате этого повышенная магнитная восприимчивость, не имеют существенного значения. Однако в ряде тонких физических экспериментов влияние магнитных полей и их однородность являются критическими. К числу таких экспериментов относится ядерно-физический эксперимент MuSun [1]. Центральным детектором этого эксперимента является криогенная ионизациянная время-проекционная камера, работающая при температуре около 30 K. Условия работы и конструкция детектора этой камеры детально описаны в работе [2].

В состав камеры входят детали, изготовленные из аустенитной стали. Это обусловило необходимость выбора материала, наиболее подходящего по магнитным свойствам, прежде всего по величине динамической магнитной восприимчивости (ДМВ) и ее температурной зависимости. Для этого перед авторами была поставлена задача создать магнитометр, позволяющий производить измерения ДМВ и определять температурную зависимость этой величины в широком температурном диапазоне, вплоть до предельно низких температур. Для выполнения исследований в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ) предложена схема, спроектирована конструкция магнитометра, разработана методика измерений в условиях низкой температуры, соответствующей требованиям эксперимента MuSun. Ниже показаны основные идеи, положенные в основу разработки магнитометра, и результаты его апробации на ряде конструкционных материалов.

#### Методика эксперимента

Для измерения динамической магнитной восприимчивости применен хорошо себя зарекомендовавший индукционный метод [3, 4]. Схема установки, обеспечивающей одну из возможных реализаций метода, приведена на рис. 1.

Измерительный соленоид II, представляющий из себя катушку (10000 витков) с площадью попечерного сечения 155 mm<sup>2</sup>, помещен вместе с образцом в переменное магнитное поле задающего соленоида I напряженностью  $H = H_0 \cdot \sin \omega t$  ( $\omega$  – частота). Соленоиды I, II и III образуют так называемый дифференциальный измерительный трансформатор взаимоиндукции. Сигнал, подаваемый на задающий соленоид, формируется системой, состоящей из генератора низкочастотных сигналов и стабилизатора тока. Введение образца в измерительный соленоид II приводит к изменению магнитного потока, проходящего через его витки, что вызывает изменение электродвижущей силы (ЭДС) на нем. Ее величина регистрируется измерительной системой, состоящей из прецизионного потенциометра, усилителя и осциллографа. В схеме использован «опорный» соленоид III, работающий в противофазе с измерительным, для

устранения влияния изменяющихся от температуры параметров измерительного соленоида II. Параметры соленоида III подбирают таким образом, чтобы при отсутствии образца сигнал с двух соединенных соленоидов II и III был минимальным. Величины ЭДС, наводимых в двух соленоидах, будут иметь вид (соответственно для соленоида с образцом и без него):

$$E_1 = -n \cdot S \cdot q_m \cdot \mu_0 \cdot \left( \frac{dB}{dt} \right), \quad (1)$$

$$E_2 = -n \cdot S \cdot q_m \cdot \left( \frac{dH}{dt} \right), \quad (2)$$

где  $n$  – число витков обмотки измерительного соленоида;  $S$  – площадь поперечного сечения соленоида;  $q_m$  – геометрический фактор, связанный с формой соленоидов;  $B$  – магнитная индукция,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

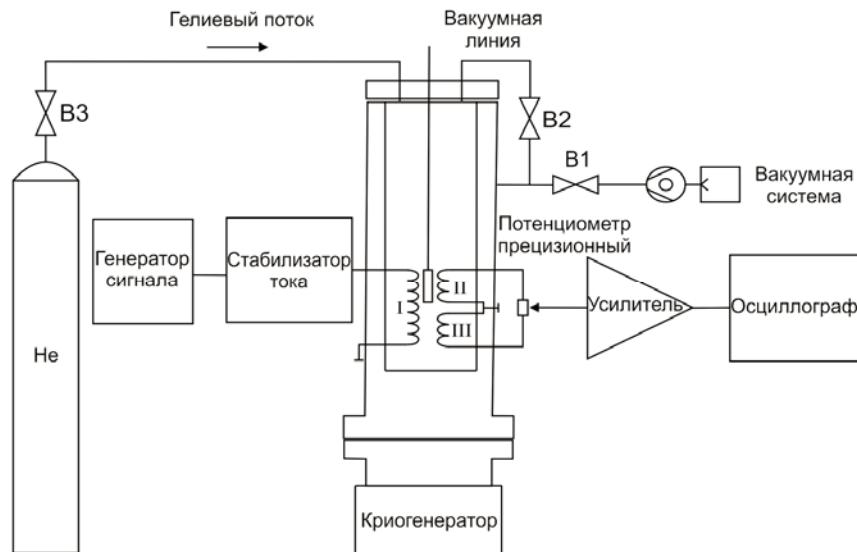


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Вычитая (2) из (1) и учитывая, что  $B = \mu_0 \cdot (H + M)$ , где  $M$  – намагниченность образца, получим

$$\Delta E = E_2 - E_1 = -n \cdot S \cdot q_m \cdot \left( \frac{dM}{dt} \right). \quad (3)$$

Таким образом, выходной сигнал дифференциального трансформатора взаимоиндукции пропорционален  $dM/dt$ . Производную намагниченности можно переписать в виде  $dM/dt = \chi \left( \frac{dH}{dt} \right)$ , тогда выходной сигнал  $\Delta E$  будет пропорционален магнитной восприимчивости исследуемого образца  $\chi$ .

В общем случае намагниченность  $M$  образца зависит от величины намагничивающего поля нелинейно. В пределе малого поля ее можно разложить в степенной ряд по  $H$ :

$$M = \sum_{i=0}^{\infty} \chi_i \cdot H^{2i+1}. \quad (4)$$

Таким образом, при оптимально подобранных параметрах соленоидов II и III, учитывая (4), выражение (3) можно переписать в виде  $\Delta E = -n \cdot S \cdot q_m \cdot \chi_0 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot \cos \omega t$ , оставив только линейный по напряженности магнитного поля член ряда. Это допустимо только в приближении малых полей.

Изменяя температуру, при которой находятся соленоиды и образец, можно получить температурную зависимость магнитной восприимчивости. В нашем случае наиболее информативной для дальнейшего использования сталей в эксперименте является область низких ( $\sim 30$  К) температур, достигаемая за счет применения криогенератора. Тепловая связь между криогенератором, соленоидами и образцом поддерживается за счет высокой теплопроводности газообразного гелия, который выступает в этом случае в качестве хладагента. Для предотвращения нагрева образца паразитным тепловым потоком, который поступает по измерительным проводам и держателю соленоидов, теплоотвод от них осуществляется на первую ступень криогенератора.

Для снижения притока в рабочий объем криостата тепла извне применена вакуумная изоляция. Высокий вакуум ( $\sim 10^{-4}$  Па) создается откачной системой, состоящей из форвакуумного и турбомолекулярного насосов. Производительность откачной системы превышает 400 л/с.

Конструкция спроектированного магнитометра приведена на рис. 2. В установке реализован «шахтный» принцип вертикальной загрузки основных рабочих элементов без потери вакуума в системе, что позволяет производить смену образца за 10–15 мин. При разработке конструкции применено не-

сколько оригинальных технических решений, таких как гибкая вибрационная развязка 6 криогенератора с рабочим объемом, биметаллическая (медь + нержавеющая сталь) конструкция шахты 7 криостата 7 и др.

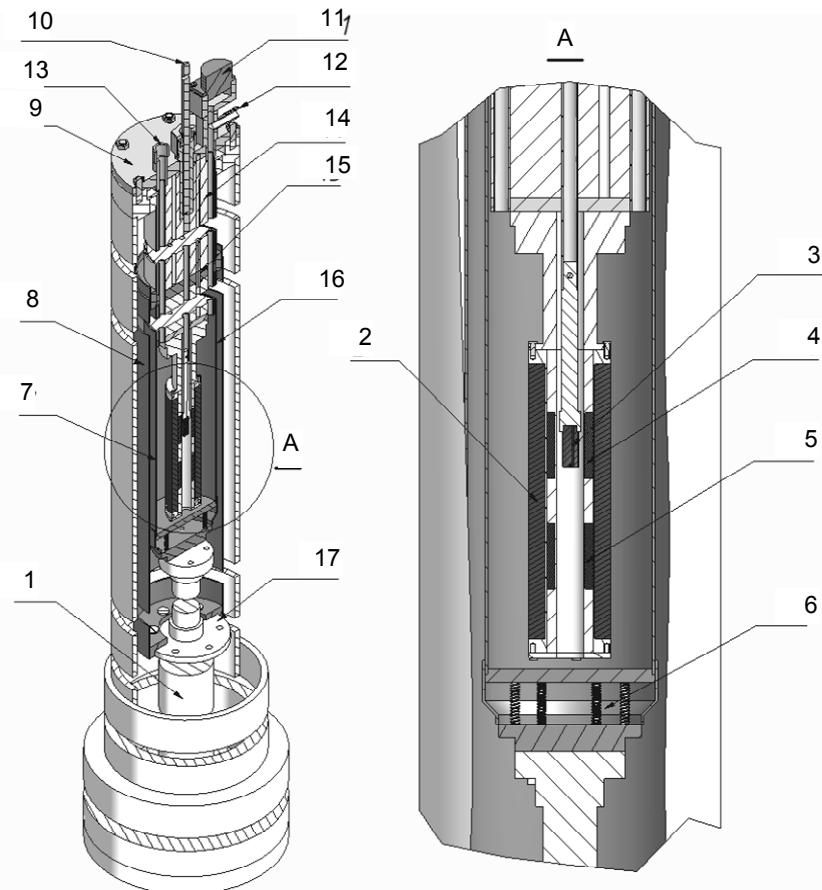


Рис. 2. Схема конструкции магнитометра: 1 – криогенератор; 2 – задающий соленоид; 3 – исследуемый образец; 4 – измерительный соленоид; 5 – опорный соленоид; 6 – вибрационная развязка; 7 – биметаллическая шахта криостата; 8 – вакуумная изоляция; 9 – верхний фланец криостата; 10 – держатель трансформатора взаимоиндукции; 11 – разъем для сигнальных проводов; 12, 13 – штуцеры для подвода и откачки хладагента; 14 – тепловая изоляция; 15 – тепловой перехват; 16 – экран для перехвата теплового излучения; 17 – первая ступень криогенератора

### Результаты измерений

Перед началом измерений образцов стали производился калибровочный эксперимент с пустым соленоидом с целью определения магнитного фона. Полученная в эксперименте температурная зависимость ЭДС измерительного соленоида была аппроксимирована полиномом 5-й степени. Измерения проводились с образцами сталей различных марок. На рис. 3 приведены данные по измерению фона и температурной зависимости магнитной восприимчивости для стали марки X2CrNiMo17-13-3 (DIN 1,4429). Динамическая магнитная восприимчивость соленоида без образца имеет сложную зависимость, которая определяется целым рядом температурно-зависимых факторов, таких как геометрические параметры, удельное сопротивление материалов (токи Фуко) и др. Для получения окончательного результата значение сигнала фона, вычисленное для данной температурной точки по аппроксимационному многочлену, вычиталось из измеренного для образца значения ЭДС.

На рис. 4 показаны результаты измерений для трех образцов: аустенитной нержавеющей стали западногерманского производства марок X2CrNiMo17-12-2 (DIN 1,4404) и X2CrNiMo17-13-3 (DIN 1,4429) и образца отечественной стали 12Х18Н10Т.

Сплошная вертикальная линия, параллельная оси ординат, соответствует рабочей температуре эксперимента MuSun (30 К). Хорошо заметно, что магнитная восприимчивость для сталей X2CrNiMo17-12-2 и X2CrNiMo17-13-3 при этой температуре существенно меньше, чем для стали 12Х18Н10Т. Этот факт позволяет рекомендовать применение данных марок сталей в качестве конструкционных для работы в криогенных условиях, как эксперимент MuSun, в случаях, где требуются материалы с низкой магнитной восприимчивостью.

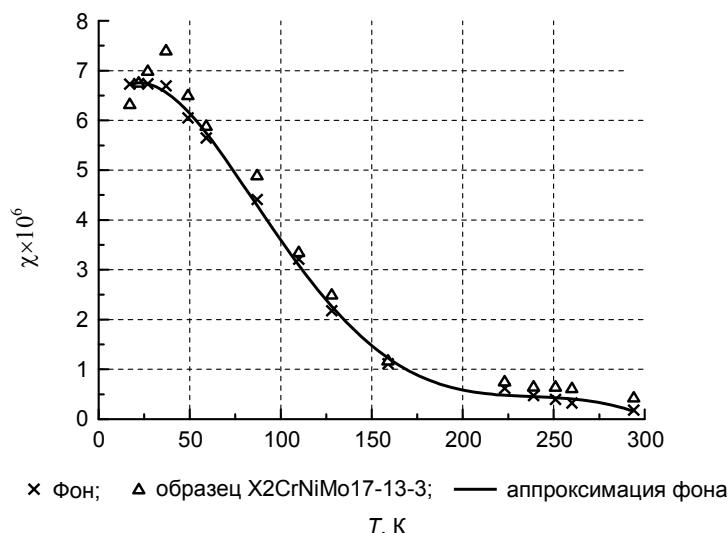


Рис. 3. Температурные зависимости динамической восприимчивости фона соленоида и образца с маркой стали X2CrNiMo17-13-3 в переменном магнитном поле  $H=8,7$  Э частотой 137 Гц

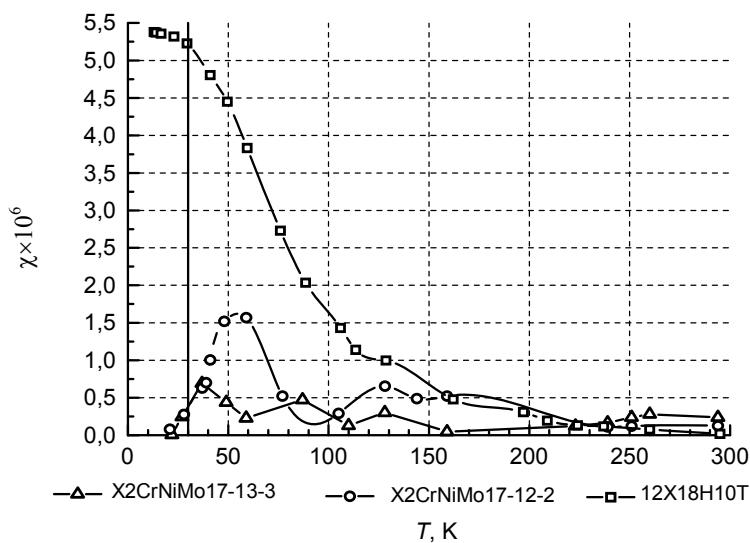


Рис. 4. Температурные зависимости динамической магнитной восприимчивости образцов в переменном магнитном поле  $H=8,7$  Э частотой 137 Гц, сплошная вертикальная линия соответствует рабочей температуре эксперимента MuSun (30 К)

### Заключение

В Петербургском институте ядерной физики разработана и изготовлена установка для измерения магнитной восприимчивости конструкционных материалов в условиях предельно низких температур. Установка позволяет осуществлять предварительные измерения перед установкой образцов в ускоритель. Это дало возможность получить существенную экономию дорогостоящего времени работы ускорителя, представляя предварительные сведения о тестируемых образцах. Результаты апробации установки показали, что она является высокочувствительным прибором для анализа качества конструкционных сталей, работающих в магнитных полях при низких температурах. По результатам измерений даны рекомендации по применению определенных марок сталей в эксперименте MuSun. Разработанная установка и предложенная методика заслуживают дальнейшего внимания. Результаты работы могут быть применены как для решения узкоспециализированной задачи выбора оптимальной по магнитным свойствам стали, так и для решения иных исследовательских задач, таких, как изучение фазовых переходов второго рода, сопряженных с изменением магнитной восприимчивости [5].

### Литература

1. Эксперимент MuSun (официальный сайт) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.npl.illinois.edu/exp/musun/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 30.03.2012).

2. Иванов И.Ю., Васильев А.А., Взнузаев М.Е., Воропаев Н.И., Каммель П., Кравцов П.А., Надточий А.В., Петров Г.Е., Петижан К., Трофимов В.А. Криогенная времяз-проекционная ионизационная камера для исследования процесса захвата мюона дейтроном в эксперименте MuSun // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 7. – С. 55–61.
3. Костышин А.М., Сыч И.И., Такзей Г.А. Установка для исследования магнитных свойств материалов при низких температурах // Физические методы исследования металлов. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 31–36.
4. Brodbeck C.M., Bukrey R.R., Hoeksum J.T. Integrated circuit AC mutual inductance bridge for magnetic susceptibility measurements // Rev. Sci. Instrum. – 1978. – № 49. – Р. 1279–1281.
5. Такзей Г.А. Магнитные превращения с образованием спинового стекла в разупорядоченных сплавах 3d-переходных металлов: Дис. ... док. физ.-мат. наук. – Киев, 1987.

**Иванов Илья Юрьевич**

– Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», аспирант, ivannov\_ilya@mail.ru

**Васильев Александр Анатольевич**

– Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, зав. кафедрой, vassilie@pnpi.spb.ru

**Взнузаев Марат Евгеньевич**

– Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», ст. научный сотрудник, marat@pnpi.spb.ru

**Воробьев Сергей Иванович**

– Лаборатория мезонной физики конденсированных сред ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», зав. кафедрой, vsiloa@pnpi.spb.ru

**Геталов Александр Леонидович**

– Лаборатория мезонной физики конденсированных сред ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, getalov@pnpi.spb.ru

**Котов Сергей Арестович**

– Лаборатория мезонной физики конденсированных сред, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», научный сотрудник, kotoff@pnpi.spb.ru

**Кравцов Петр Андреевич**

– Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, pkravt@gmail.com

**Надточий Александр Васильевич**

– ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, avnad@pnpi.spb.ru

**Трофимов Виктор Алексеевич**

– Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, vtrof@gmail.com

**УДК 539.171.017**

## **ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМОВ ДЕЙТЕРИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА POLFUSION**

**С.Н. Терехин, А.А. Васильев, М.С. Микиртычьянц, П.А. Кравцов, М.Е. Взнузаев**

Лабораторией криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики совместно с Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики создается источник поляризованных атомов водорода и дейтерия для международного эксперимента по исследованию ядерной реакции синтеза поляризованных дейтронов (Polarized dd-fusion experiment). Этот эксперимент проводится в России. Для этого в Петербургском институте ядерной физики создается специализированный экспериментальный комплекс. Описаны базовые принципы конструкции одного из модулей установки – источника поляризованных атомов дейтерия. Подробно рассмотрена конструкция радиочастотного диссоциатора и вопросы контроля параметров пучка.

**Ключевые слова:** поляризация, сечение реакции, ядерный синтез, диссоциация.

### **Введение**

Целью эксперимента по изучению поляризованного дейтериевого синтеза (международное название проекта – PolFusion, Polarized dd-fusion experiment) является систематическое исследование ядерных реакций  $d+d$  и  $d+^3He$  с поляризованными исходными частицами в диапазоне энергий 10–100 кэВ. Эксперимент осуществляется международной коллаборацией в составе нескольких научно-исследовательских и образовательных институтов, в числе которых ведущие позиции занимают Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ) (базовая организация) и Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. В качестве основного иностранного участника выступает Институт ядерной физики Исследовательского центра г. Юлих, Германия (FZ-Jülich, IKP) [1].

Одной из задач эксперимента является измерение ассиметрии в дифференциальном сечении для

различных каналов указанных реакций, а также исследование изменения полного сечения реакции dd-синтеза при поляризации исходных частиц по сравнению с неполяризованным сечением. Планируется экспериментальное определение спин-корреляционных коэффициентов  $C_{zz}$  и  $C_{zz,zz}$ , в частности, для определения фактора подавления квинтетного состояния для обоих каналов реакции dd-синтеза. Данная величина имеет противоречивые теоретические предсказания и играет важную роль для создания термоядерного реактора с малым выходом нейтронов. В качестве дополнительной задачи эксперимента рассматривается измерение астрофизического S-фактора для поляризованного дейтерия.

Для осуществления эксперимента необходима установка, объединяющая различные по назначению элементы, каждый из которых заслуживает отдельного рассмотрения. Предметом настоящей работы являются вопросы конструирования одной из двух наиболее важных частей установки PolFusion – источника поляризованных атомов дейтерия ABS (Atomic Beam Source).

#### Требования к интенсивности источника поляризованных атомов дейтерия

Использование источников поляризованных атомов в настоящее время является основным методом получения поляризованных атомов дейтерия. Такие источники используются в ускорительной технике в составе инжекторов, а также для создания внутренних мишеней для накопительных колец ускорителей. Создание источников поляризованных атомов возможно только в рамках масштабных ускорительных экспериментов ввиду высокой стоимости необходимого оборудования. Интенсивность лучших мировых образцов таких источников не превышает  $5 \cdot 10^{16}$  атом/с [2, 3].

Для эксперимента PolFusion предполагается применение источника, построенного на базе установки Кельнского университета, использованной в проекте SAPIS [4]. В исходном варианте источник производил пучок нейтральных атомов дейтерия с тензорной и векторной поляризацией, энергией атомов порядка 0,1 эВ и интенсивностью около  $10^{15}$  атом/с. Для эксперимента PolFusion приведенной интенсивности недостаточно; необходима модернизация установки с увеличением интенсивности до мирового уровня.

#### Конструкция источника поляризованных атомов

Источник поляризованных атомов – устройство (рис. 1), состоящее из ряда подсистем. Первая из них – радиочастотный диссоциатор 1, в котором исходный молекулярный дейтерий подвергается диссоциации на атомы. На выходе из сопла диссоциатора формируется газовая струя, состоящая преимущественно (до 90%) из нейтральных атомов. Далее параметры струи корректируются механическими диафрагмами – скиммером и коллиматором 2. Проходя через систему блоков сверхтонких переходов и спин-сепарирующих магнитов 3–6, пучок приобретает заданную условиями эксперимента поляризацию, сохраняя при этом фокусировку. В результате на выходе из источника получается практически цилиндрический пучок атомов дейтерия 7 со скоростью около 1000 м/с (тепловая энергия) и упорядоченным спиновым состоянием, который может быть использован в качестве струйной мишени в эксперименте PolFusion.

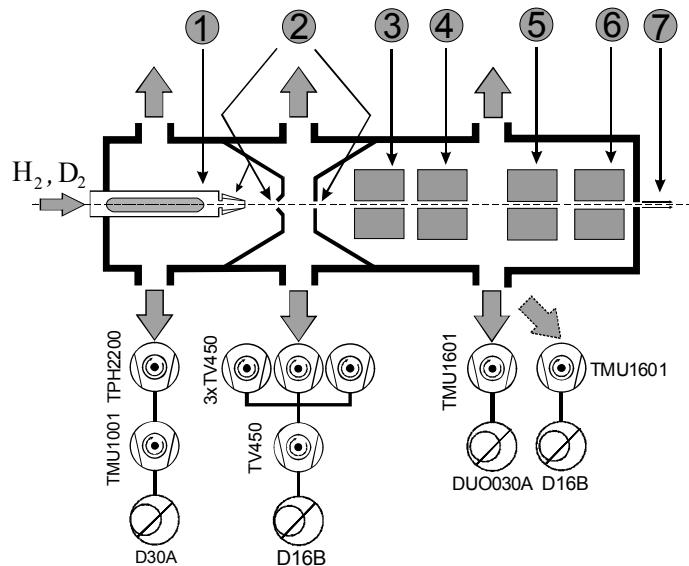


Рис. 1. Структура источника и системы откачки

Одной из технических особенностей источника поляризованных атомов является система дифференциальной вакуумной откачки. В эксперименте PolFusion источник состоит из трех частично изолированных друг от друга камер, в каждой из которых поддерживаются индивидуальные вакуумные условия.

Для обеспечения такой схемы была создана вакуумная система, состоящая из четырех форвакуумных и восьми турбомолекулярных насосов суммарной производительностью около 6000 л/с.

### Радиочастотный диссоциатор

Диссоциатор с соплом (рис. 2) создает исходную атомарную струю и является ключевым элементом источника. Ниже приводится его принцип действия и конструктивная реализация для эксперимента PolFusion.

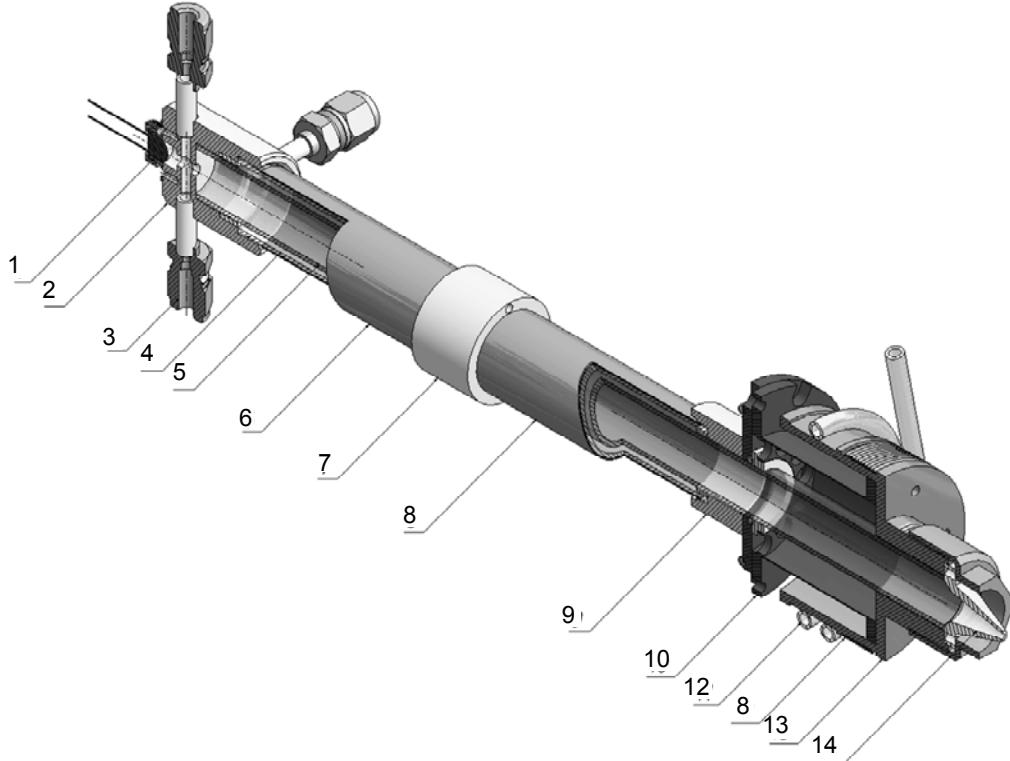


Рис. 2. Схема диссоциатора: 1 – фотодиод; 2 – коллектор; 3 – штуцер; 4 – внешняя трубка; 5 – внутренняя (разрядная) трубка; 6 – заземленная обкладка; 7 – центрирующая муфта; 8 – обкладка под потенциалом; 9 – запорная муфта; 10 – составной фланец; 11 – трубки охладителя; 12 – нагреватель; 13 – муфта стабилизатора температуры сопла; 14 – сопло

Основа устройства – коаксиально расположенные стеклянные трубы 4 и 5, скрепленные с одной стороны коллектором из нержавеющей стали 2, а с другой – пластиковой запорной муфтой 9. Перечисленные элементы соединены между собой герметичным kleевым швом таким образом, что между трубками образуется пространство для циркуляции охлаждающей жидкости.

Коллектор имеет четыре однотипных штуцера 3 с условным проходом 4 мм. Два из них предназначены для обеспечения циркуляции охлаждающей жидкости, третий и четвертый – для подвода дейтерия и измерения его давления. Внешний торец коллектора имеет стеклянное окно, на котором размещен фотодиод 1. Назначение фотодиода – контроль за параметрами разряда внутри диссоциатора по интенсивности свечения плазмы.

Пластиковая центрирующая муфта 7, являющаяся изолирующим разделителем между заземленной обкладкой 6 и обкладкой под потенциалом 8, и составной фланец 10 предназначены для размещения и фиксации диссоциатора относительно элементов источника.

Алюминиевое сопло 14 закреплено на массивной медной муфте 13, температура которой стабилизируется. Трубки охладителя 11 и никромовая нить нагревателя 12 смонтированы на муфте 13, образуя с ней общий узел стабилизатора температуры сопла.

Принцип автоматической стабилизации температуры, заложенный в работе устройства, заключается в установлении баланса между холодильной мощностью, мощностью электрического нагревателя и теплоподводом от нескольких источников: внешний теплоподвод через тепловые мосты, нагрев самого диссоциатора в процессе его работы, теплопередача через поток газа из диссоциатора. Холодильная мощность определяется расходом испаряющегося в трубках хладагента – жидкого азота; в стационарном режиме работы она практически постоянна. Величина паразитного теплоподвода зависит от многих факторов, она может меняться относительно быстро в процессе работы системы. Мощность электрического нагревателя регулируется с помощью регулируемого источника тока, ее величина заложена в алгоритм

автоматической стабилизации температуры сопла с обратной связью по его температуре. Температура сопла непрерывно контролируется установленным на нем резистивным датчиком РТ-100.

Охлаждение сопла необходимо для уменьшения скорости атомов в пучке и обеспечения условий для намерзания тонкого слоя льда на поверхности сопла, который существенно уменьшает рекомбинацию атомов (превращение атомарного дейтерия в молекулярный) на поверхности.

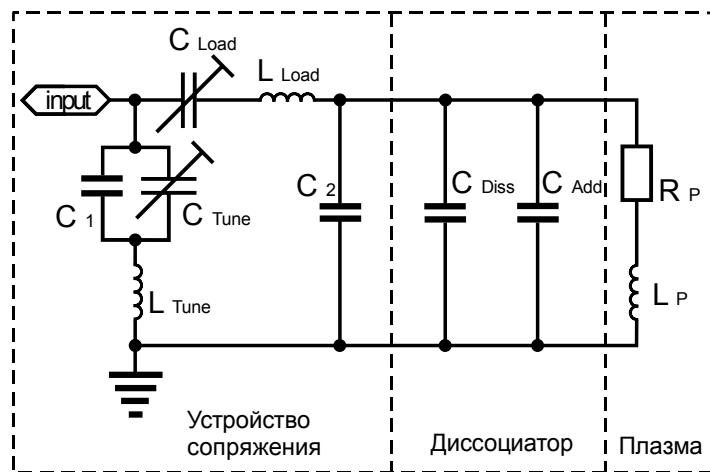


Рис. 3. Радиочастотная система диссоциатора (включая эквивалентную схему плазмы)

Исходный газ инжектируется во внутреннее пространство диссоциатора под давлением порядка 100–200 Па. Такое давление является оптимальным для существования газового разряда. Для получения и поддержания плазменного разряда (рис. 3) используют колебательный контур, питаемый радиочастотным генератором (input). Мощность электромагнитного поля передается на плазму посредством емкостной связи. Автоматическая подстройка параметров контура с минимизацией отраженной мощности осуществляется специальным устройством сопряжения, с помощью переменных конденсаторов  $C_{Load}$  и  $C_{Tune}$ . Остальные элементы служат для настройки динамического диапазона.

Газовый разряд порождает большое количество свободных электронов. В приложенном электромагнитном поле эти электроны приобретают некоторую энергию и при столкновении с молекулами газа вызывают их ионизацию либо диссоциацию. При средней энергии свободных электронов ~5 эВ интенсивность процесса диссоциации существенно выше интенсивности ионизационных процессов. По этой причине при выборе режима газового разряда руководствуются этим значением.

Степень диссоциации зависит не только от режима газового разряда, но и от скорости протекания обратного процесса рекомбинации. Преобладающим процессом является поверхностная рекомбинация [1]. Она зависит, прежде всего, от материала разрядной трубки и от температуры на ее поверхности. Эффективность использования электрической мощности для диссоциации молекул не превышает 5%. В этом случае ключевым элементом системы является водяное охлаждение, которое отводит от диссоциатора неиспользованную электрическую мощность (около 300 Вт).

#### Контроль параметров пучка

Для достижения оптимальных условий работы источника необходимо измерение параметров выходящей из него струи, таких как распределение плотности газовой струи и распределение степени диссоциации пучка в поперечном сечении. Для измерения этих характеристик предложено устройство двухкоординатного сканирования. Устройство позволяет перемещать в плоскости, перпендикулярной оси пучка, один из двух чувствительных элементов — головку квадрупольного масс-спектрометра или компрессионную трубку.

Принцип работы квадрупольного масс-спектрометра подробно описан в [2]. Прибор действует по принципу разделения ионов по отношению их заряда к массе в высокочастотном электростатическом поле, формируемом между четырьмя симметрично расположенными электродами с переменной полярностью. Это позволяет с высокой эффективностью измерять относительную интенсивность молекулярной и атомарной формы дейтерия, получая в результате степень диссоциации вещества, попавшего в чувствительный объем (головку) квадрупольного масс-спектрометра. Перемещая головку в плоскости, перпендикулярной оси пучка, можно построить распределение степени диссоциации дейтерия в поперечном сечении.

Для построения распределения плотности пучка в поперечном сечении используется компрессионная трубка. Схема работы этого устройства приведена на рис. 4. При рассмотрении схемы надо при-

нять во внимание, что объемная концентрация атомов в пучке невелика и соответственно течение газа находится в свободно-молекулярном режиме.

Частицы, образующие атомарный пучок дейтерия, попадают в компрессионную трубку и проходят внутрь измерительного объема. При этом атомы не встречают существенного сопротивления, так как их траектории практически параллельны стенкам компрессионной трубки. Напротив, частицы, покидающие измерительный объем через компрессионную трубку, имеют хаотично направленные траектории и встречают уже значительное сопротивление. Разница сопротивлений прямому и обратному потоку газа в компрессионной трубке служит причиной роста давления внутри измерительного объема, которое измеряется с помощью высокочувствительного датчика (вакуумной ионизационной лампы с горячим катодом). Изменение давления тем существеннее, чем интенсивнее пучок и чем больше степень перекрытия его поперечного сечения входным отверстием компрессионной трубы.

Если диаметр компрессионной трубы относительно невелик по сравнению с поперечным сечением атомарной струи, то, перемещаясь ось компрессионной трубы относительно оси пучка в двух координатах, можно получить диаграмму распределения интенсивности пучка в поперечном сечении.

Измерения с помощью компрессионной трубы допускают абсолютную калибровку. Если из независимого источника через вентиль тонкой регулировки подавать известный поток дейтерия, то можно построить зависимость давления в компрессионном объеме от величины потока. После сравнения давления можно назвать абсолютное количество атомов пучка, попадающих в секунду на вход компрессионной трубы. Компрессионный объем должен гарантировать полную рекомбинацию атомов в молекулы при измерении потока атомарного пучка, так как калибровка осуществляется с использованием молекулярного дейтерия.

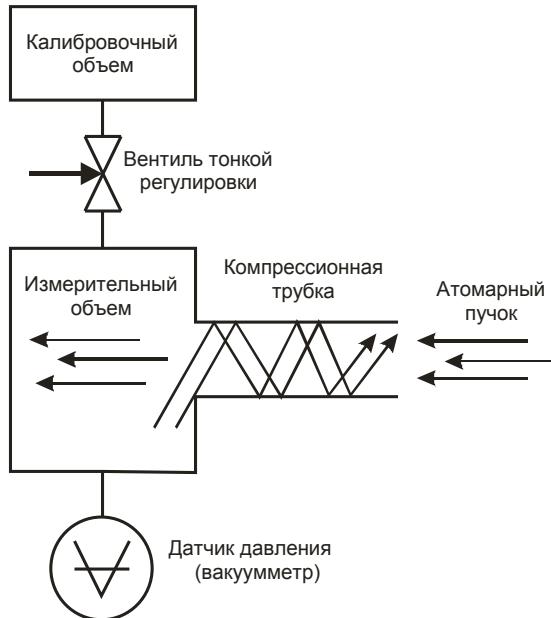


Рис. 4. Схема работы компрессионной трубы

### Заключение

В масштабной экспериментальной установке для измерения дифференциального сечения ядерной реакции синтеза поляризованных дейтронов присутствует большое количество разнородных подсистем – вакуумных, газовых, криогенных, электронных и др. Только при оптимизации всего комплекса устройств можно добиться высокой интенсивности пучка дейтронов. Эта интенсивность определяет время набора статистики для получения данных. Наибольшее влияние поляризационных параметров на сечение реакции предполагается при низких энергиях, где кулоновский барьер делает реакции синтеза очень редкими (одна реакция в несколько минут). И именно эта область энергий (около 10 кэВ) чрезвычайно интересна для теоретической физики и астрофизики.

Подробно описанное в работе устройство – диссоциатор, оригинальная разработка коллектива авторов. В диссоциаторе приходится совмещать противоречивые требования. Например, плазменный разряд можно осуществить при невысоком давлении (100–200 Па). Но низкое давление не позволяет сформировать хорошую газовую струю. Следовательно, экспериментально приходится определять как условия для осуществления плазменного разряда, так и газодинамические характеристики формирования струи. Таким образом, кроме самого диссоциатора, появляется комплекс измерительных средств (квадрупольный масс-спектрометр и компрессионная трубка с системой перемещения) для осуществления оптимизации параметров всей установки.

Разработка и тестирование источника поляризованных атомов, а также испытания отдельных элементов производятся в настоящее время в лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики.

### Литература

1. Терехин С.Н. и др., Приборная база эксперимента по исследованию сечения реакции dd-ядерного синтеза с поляризованными компонентами в проекте PolFusion // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – № 7. – С. 62–67.
2. Микиртычьянц М.С. Разработка и исследование источника атомарного водорода идейтерия с ядерной поляризацией для экспериментов на внутренних пучках ускорителей: Дис. ... к. ф.-м. н.: 01.04.01. – Гатчина: ПИЯФ, 2002. – 118 с.
3. Emmerich R. and H. Paetz gen. Double-Polarized Fusion Experiment // Schieck, NIM. – A586. – 2008. – P. 387.
4. Kravtsov P. et al. Double-Polarized Fusion // Conf. proceedings (XIVth International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry). – St. Petersburg, 2011. – P. 116–119.

**Терехин Сергей Николаевич**

- Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», научный сотрудник, lab19@yandex.ru, serzh@gtn.ru

**Васильев Александр Анатольевич**

- Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, зав. лабораторией, vassilie@pnpi.spb.ru

**Микиртычьянц Максим Сергеевич**

- Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», научный сотрудник, maxmik@gmail.com

**Кравцов Петр Андреевич**

- Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, pkravt@gmail.com

**Взнуздаев Марат Евгеньевич**

- Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат химических наук, ст. научный сотрудник, magat@pnpi.spb.ru

**УДК 539.25:(678.742.23+678.675)**

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СМЕСЕЙ

**А.В. Подшивалов, В.В. Зуев, С.В. Бронников**

Методом электронной микроскопии исследована морфология смеси полиэтилена низкой плотности и полиамида-6 в соотношении 75%/25% с добавками эмульгатора и совместителя. Гистограммы размера частиц фазы, полученные при статистической обработке микрофотографий смеси, описаны с использованием модели агрегации, построенной в рамках термодинамики необратимых процессов. Установлено, что при смешении компонентов смеси происходит диспергирование частиц в фазе и их последующая коагуляция. Обнаружено влияние количества введенных в смесь совместителя и эмульгатора на средний размер частиц и механические свойства смеси.

**Ключевые слова:** морфология, смесь полимеров, совместитель, эмульгатор, термодинамика необратимых процессов.

### Введение

В настоящее время актуальным направлением получения новых полимерных материалов технического назначения является создание полимерных многокомпонентных смесей, обладающих требуемыми эксплуатационными свойствами и низкой стоимостью. Целью настоящей работы является изучение морфологии смеси коммерческих полимеров – полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и полиамида-6 (ПА-6) в соотношении 75%/25%. Для улучшения совместимости полимеров в смесь вводили добавки: эмульгатор – органически модифицированную глину (20A) и совместитель – блок-сополимера стирола, этиленбутена и стирола с привитым малеиновым ангидридом (SEBS-g-MA).

### Экспериментальная часть

В качестве метода исследования была использована электронная микроскопия с последующим статистическим анализом электронно-микроскопических фотографий реплик сколов смесей и аналити-

ческим описанием гистограмм размера частиц минорной фазы с использованием принципов необратимой термодинамики. Электронные микрофотографии смеси полимеров были подвергнуты сегментированию в графическом редакторе. Далее сегментированные микрофотографии анализировались статистически с использованием программного обеспечения Image Tool 3.0, в результате чего были получены гистограммы размера частиц фазы ПА-6. Для аналитического описания полученных гистограмм был использован алгоритм, построенный на модели агрегации [1].

В основе модели агрегации лежат принципы необратимой термодинамики, используемые для описания эволюции микроструктуры, которая в каждый момент времени рассматривается как последовательность ограниченных квазиравновесных состояний. В рамках модели статистическое распределение размера частиц  $h(s)$  фазы ПА-6 имеет вид [1]:

$$h(s) = \sum_i^{i=N} a_i s_i^2 \exp\left(-\frac{s_i \Delta u_{0i}}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $a_i$  – нормировочный параметр;  $s_i$  – площадь частиц в  $i$ -ом ансамбле;  $\Delta u_{0i}$  – энергия агрегации  $i$ -го ансамбля;  $T$  – абсолютная температура;  $N$  – количество статистических ансамблей;  $i$  – номер статистического ансамбля.

Аналитическое описание гистограмм позволяет определить средний размер частиц  $\langle s_i \rangle$  как нормированное математическое ожидание  $M s_i$ :

$$\langle s_i \rangle = M s_i = \frac{\int_0^\infty s_i h(s_i) ds}{\int_0^\infty h(s_i) ds} = \frac{3kT}{\Delta u_{0i}}. \quad (2)$$

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены микрофотографии протравленных муравьиной кислотой реплик скола смесей ПЭНП/ПА-6, ПЭНП/ПА-6 с добавками 20А в количестве 5% и 10%, а также статистические распределения площади частиц минорной фазы (ПА-6), описанные с использованием модели обратимой агрегации [1]. На рис. 1, а–в, темные области представляют собой фазу ПА-6, а светлая область – фазу ПЭНП.

Для описания статистических распределений, приведенных на рис. 1, д, е, использовали мономодальное распределение (уравнение (1),  $N=1$ ), а для описания статистического распределения, приведенного на рис. 1, г, – бимодальное распределение (уравнение (1),  $N=2$ ). На рис. 1, г, тонкие линии показывают индивидуальные (модовые) распределения, а толстая линия показывает суммарное распределение.

Из работ [2–4] известно, что в процессе смешения несовместимых полимеров обычно протекают два процесса – диспергирование частиц минорной фазы и их последующая коалесценция. Таким образом, становится ясным физический смысл частиц фазы ПА-6, образующих два статистических ансамбля: это диспергированные и коалесцированные частицы.

На рис. 2 представлена зависимость средней площади диспергированных и коалесцированных частиц фазы ПА-6, вычисленной с использованием уравнения (2), от количества добавленного эмульгатора 20А. Как видно из рис. 2, при добавке к смеси полимеров эмульгатора средний размер диспергированных частиц фазы ПА-6 уменьшается, а коалесцированные частицы исчезают полностью. Из работ [5, 6] известно, что уменьшение среднего размера частиц и отсутствие их коалесценции повышает прочность и модуль Юнга смеси полимеров при испытаниях на растяжение.

Аналогичным образом анализировали микрофотографии смеси ПЭНП/ПА-6 с добавками не только эмульгатора 20А, но и совместителя SEBS-g-МА (рис. 3). Видно, что использование уравнения (1) оказалось успешным при  $N=1$ . С использованием формулы (2) была определена средняя площадь частиц фазы ПА-6, зависимость которой от содержания добавок приведена на рис. 4.

Как следует из рис. 4, добавка совместителя SEBS-g-МА резко снижает средний размер как диспергированных, так и коалесцированных частиц фазы ПА-6, в то время как совместная добавка SEBS-g-МА и 20А немного увеличивает его. Таким образом, совместное использование совместителя и эмульгатора при смешении ПЭНП с ПА-6 не предотвращает коалесценцию частиц фазы ПА-6. Согласно работам [5, 6], смеси ПЭНП/ПА-6 при наличии совместителя и эмульгатора обладают хорошими ударопрочными свойствами.

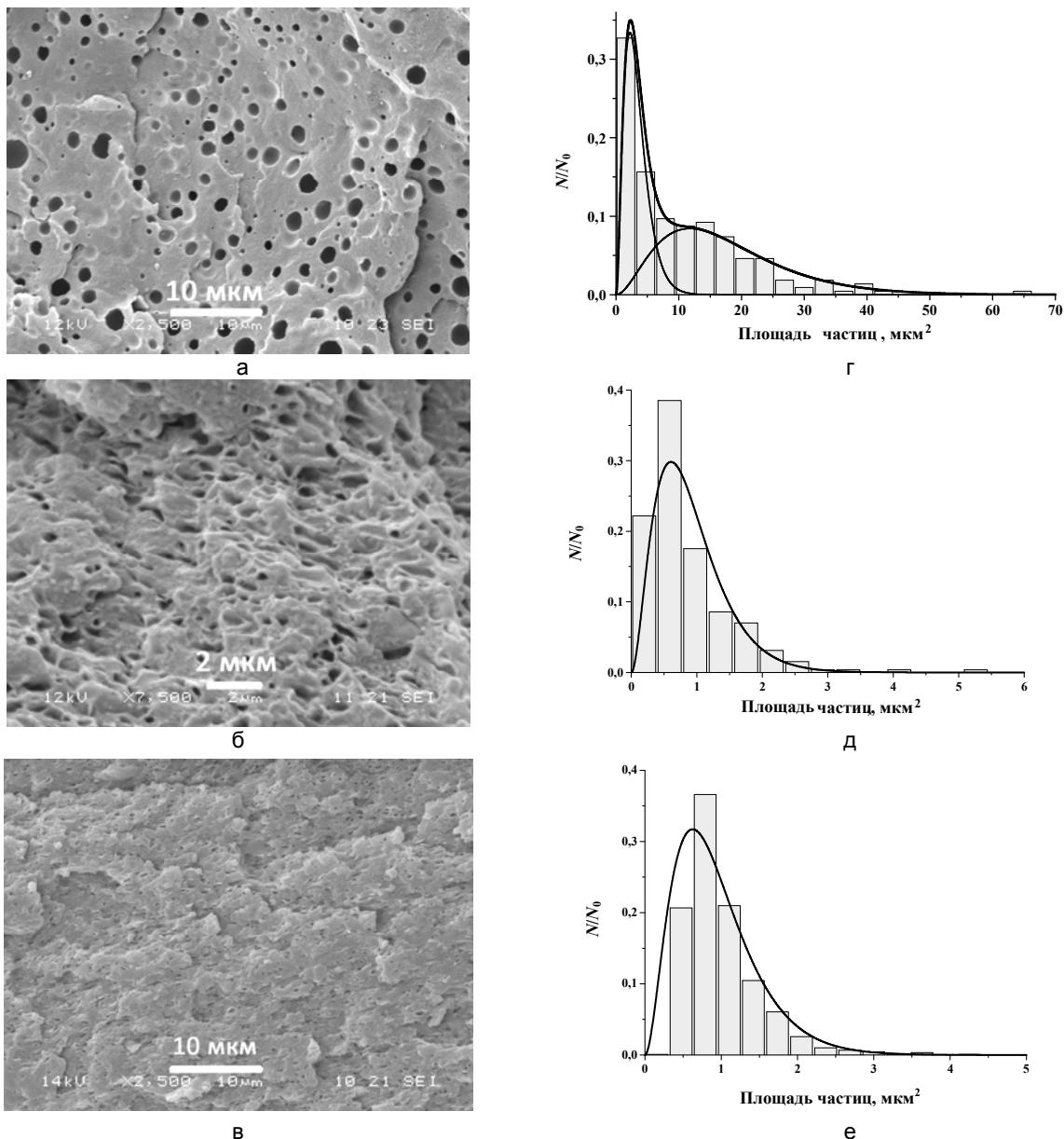


Рис. 1. Микрофотографии реплик сколов смесей ПЭНП/ПА-6 (75%/25%) (а); ПЭНП/ПА-6/20А (75%/25%/5%) (б) и ПЭНП/ПА-6/20А (75%/25%/10%) (в), а также соответствующие им статистические распределения размера частиц ПА-6 (г–е), аналитически описанные с использованием уравнения (1)

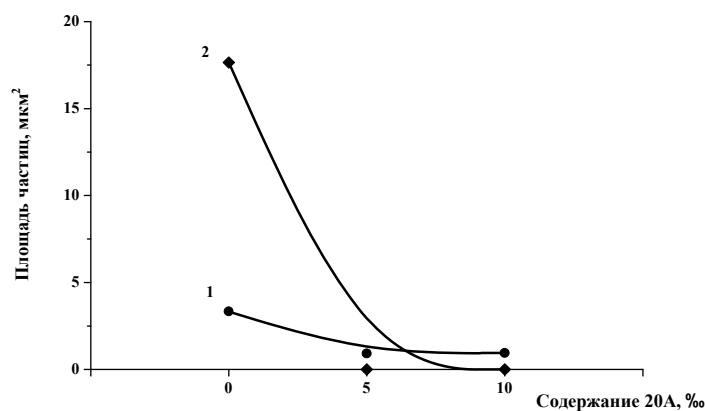
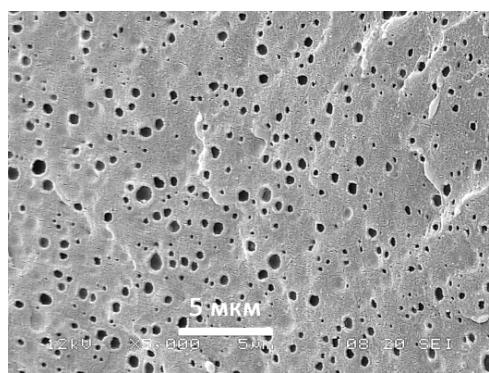
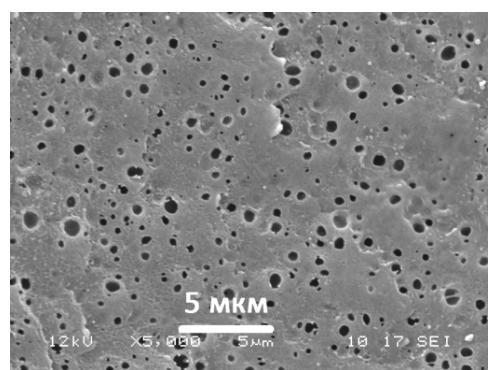


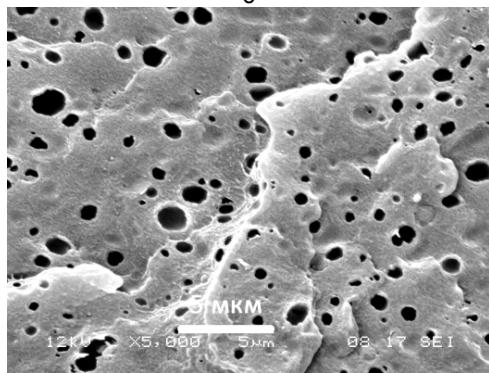
Рис. 2. Средняя площадь диспергированных (1) и коалесцированных (2) частиц фазы ПА-6 в зависимости от содержания эмульгатора 20А в смеси состава ПЭНП/ПА-6/20А



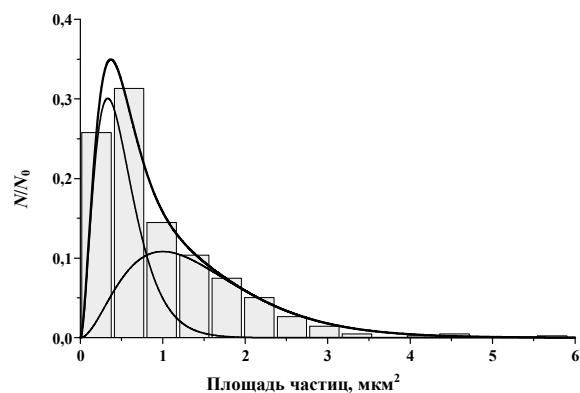
а



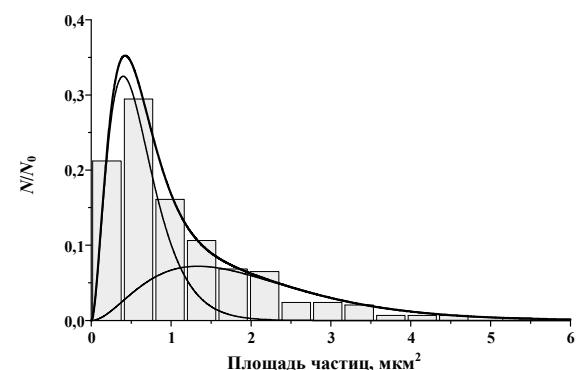
б



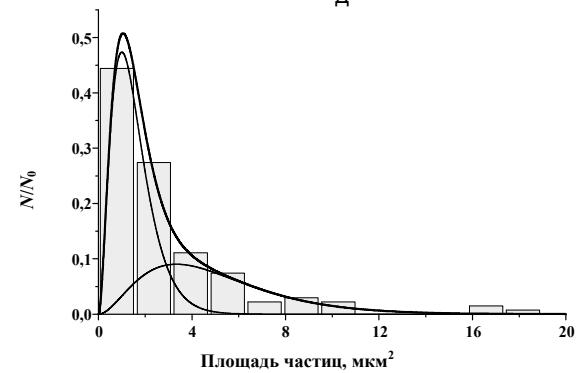
в



Г



Д



Е

Рис. 3. Микрофотографии реплик смесей ПЭНП/ПА-6/SEBS-g-МА (75%/25%/2%) (а),  
ПЭНП/ПА-6/SEBS-g-МА/20A (75%/25%/2%/0,22%) (б) и ПЭНП/ПА-6/SEBS-g-МА/20A (75%/25%/2%/1,33%)  
(в), а также соответствующие им статистические распределения размера частиц минорной фазы (ПА-6),  
аналитически описанные с использованием уравнения (1) при  $N=2$

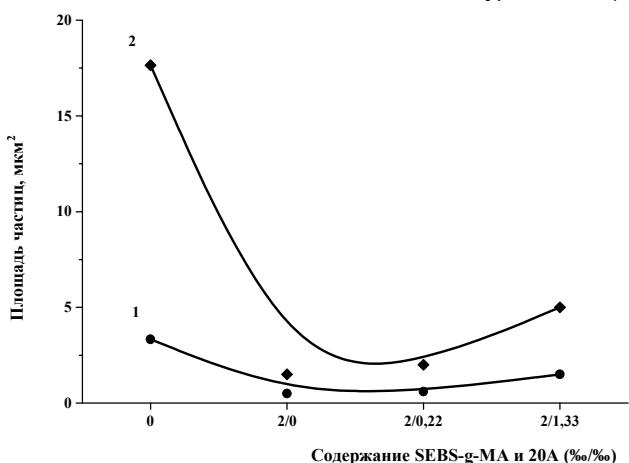


Рис. 4. Средняя площадь диспергированных (1) и коалесцированных (2) частиц фазы ПА-6 в зависимости  
от содержания совместителя SEBS-g-МА и эмульгатора 20A в смеси состава ПЭНП/ПА-6/SEBS-g-МА/20A

### Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что морфологию смеси ПЭНП/ПА-6 с добавками эмульгатора и совместителя можно описать с использованием принципов термодинамики необратимых процессов. Показано, что в процессе смешения полимеров частицы ПА-6 диспергируются, а затем коалесцируют в фазе ПЭНП. Установлено, что введение эмульгатора в количестве не менее 5% улучшает диспергирование частиц ПА-6 и подавляет процесс их коалесценции, что способствует улучшению механических свойств смеси на растяжение. В то же время совместное использование эмульгатора и совместителя также улучшает диспергирование частиц ПА-6, но не препятствует их коалесценции, что способствует улучшению ударных механических свойств смеси.

### Литература

1. Kilian H.-G., Bronnikov S., Sukhanova T. Transformations of the micro-domain structure of polyamide films during thermally induced chemical conversion: characterization via thermodynamics of irreversible processes // J. Phys. Chem. B. – 2003. – V. 107. – № 49. – P. 13575–13582.
2. Fortelny I., Zivny A., Juza J. Coarsening of the phase structure in immiscible polymer blends: Coalescence or Ostwald ripening? // J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. – 1999. – V. 37. – P. 181–187.
3. Fellahi S., Favis B.D., Fisa B. Morphological stability in injection-moulded LDPE/PA-6 blends // Polymer. – 1996. – V. 37. – № 13. – P. 2615–2626.
4. Fillipone G., Netti P.A., Acierno D. Microstructural evolutions of LDPE/PA-6 blends by rheological and rheo-optical analyses: Influence of flow and compatibilizer on break-up and coalescence processes // Polymer. – 2007. – V. 48. – № 1. – P. 564–573.
5. Filippi S., Dintcheva N.T., Scaffaro R., La Mantia F.P., Polacco G., Magagnini P. Effects of organoclay on morphology and properties of nanocomposites based on LDPE/PA-6 blends without and with SEBS-g-MA compatibilizer // Polym. Eng. Sci. – 2009. – V. 49. – № 6. – P. 1187–1197.
6. Chow W.S., Ishak Z.A., Ishiaku U.S., Karger-Kocsis J., Apostolov A.A. The effect of organoclay on the mechanical properties and morphology of injection-molded polyamide 6/polypropylene nanocomposites // J. Appl. Polym. Sci. – 2004. – V. 91. – P. 175–189.

<b>Подшивалов Александр Валерьевич</b>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, podshivalov2005@mail.ru
<b>Зуев Вячеслав Викторович</b>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, zuev@hq.macro.ru
<b>Бронников Сергей Васильевич</b>	– Институт высокомолекулярных соединений РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, sergei_bronnikov@yahoo.com

УДК 536.2, 629.5

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ДВУХСТЕПЕННОГО ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА

Д.С. Громов

Описаны результаты исследования теплового режима двухступенчатого поплавкового гироскопа. Проведен расчет стационарного и нестационарного тепловых режимов прибора, представлена его тепловая модель, приведены рекомендации по оптимизации конструкции для уменьшения влияния температурных возмущений на точность показаний прибора. Предложено направление дальнейшей деятельности по развитию настоящего исследования.

**Ключевые слова:** поплавковый гироскоп, тепловая модель, тепловой режим, CAD-система.

**Введение**

В современных гироскопических системах навигационного класса точности по-прежнему остается актуальным использование поплавковых гироскопов, следовательно, актуален вопрос увеличения их точности и стабильности показаний [1]. Существует несколько факторов, влияющих на это. Один из них – тепловой режим, а именно стабильность поддержания необходимого уровня температур с точностью не менее 0,1 К и минимизация температурных градиентов в определенных частях прибора, например, по поверхности его поплавковой камеры [2].

Главная особенность исследуемого в настоящей работе двухступенчатого поплавкового гироскопа (ДПГ), с точки зрения теплового режима, состоит в том, что для поддержания требуемого уровня температур по поверхности его поплавковой камеры используется собственная система терmostабилизации. Из других особенностей стоит отметить нелинейный режим включения и прогрева прибора при изменяющейся температуре окружающей среды, использование в конструкции специальных материалов с недостаточно изученными теплофизическими свойствами, заполнение внутренних полостей гироскопа газообразным гелием и демпфирующей жидкостью, малые размеры некоторых элементов и зазоров между ними. Это ведет к дополнительным сложностям, так как все вышеперечисленное необходимо учесть при выполнении расчета.

Обзор современной литературы показал, что ранее расчеты тепловых режимов подобных приборов и устройств проводились в основном аналитическими методами (они позволяют, как правило, исследовать систему лишь из нескольких тел) или методом тепловых балансов [2]. Кроме того, рассматривались лишь отдельные части конструкций, в то время как расчеты приборов в целом, позволяющие полноценно исследовать тепловой режим, не проводились. Такие расчеты в настоящее время принято выполнять с помощью современного программного обеспечения, основанного на методе конечных элементов (МКЭ) [3]. В настоящей работе использован программный пакет (САЕ-система) для тепловых и гидро- и газодинамических расчетов CFDesign, среди преимуществ которого стоит отметить возможность расчета различных теплофизических процессов, наглядную визуализацию результатов вычислений по различным поверхностям и в любых точках исследуемой конструкции, удобство и относительную (по сравнению с другими САЕ-системами) простоту в использовании [4].

Целями настоящей работы являются:

- исследование теплового режима ДПГ как в стационарном состоянии, так и при его включении и прогреве;
- определение возможностей оптимизации конструкции с целью уменьшения влияния температурных возмущений на точность показаний ДПГ;
- разработка предложений по дальнейшему развитию работы в данном направлении для определения методов повышения стабильности работы прибора в целом.

**Постановка задачи**

Геометрическая трехмерная модель ДПГ, выполненная с помощью системы автоматизированного проектирования – САЕ-системы Pro/Engineer, предоставлена разработчиками прибора. Модель, упрощенная для проведения расчета, представлена на рис. 1. Материалы каждой входящей в конструкцию детали обозначены непосредственно в модели. Вид сред, заполняющих внутренние объемы гироскопа, режим работы при его включении и прогреве, температура окружающей среды, информация по способу установки и существующие к настоящему времени результаты экспериментов также являются исходными данными для расчета.

Основными тепловыделяющими элементами в настоящей конструкции (рис. 1) являются нагреватель системы терморегулирования 1, выполненный в виде намотки на внешней поверхности поплавковой камеры прибора, гиromотор 2, расположенный внутри поплавковой камеры, платы электроники 3 и дат-

чики угла 4. Изменения мощностей тепловыделений нагревателя, гиромотора и плат электроники при включении и прогреве представлены на рис. 2, мощность тепловыделений датчиков угла во времени не изменяется и составляет 0,1 Вт. В конструкции присутствует датчик температуры, выполненный по аналогии с нагревателем системы термостабилизации 1 (рис. 1) в виде намотки на внешней поверхности поплавковой камеры. Температура окружающей среды изменяется от начального состояния 20°C до 45°C в течение 2 ч и далее остается постоянной. За начальную температуру всех элементов ДПГ на момент его включения принято значение 20°C.

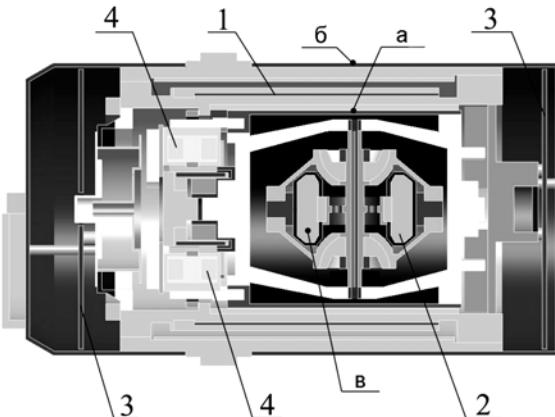


Рис. 1. Упрощенная геометрическая модель ДПГ: источники тепловыделений (1 – нагреватель системы термостабилизации; 2 – гиромотор; 3 – платы электроники; 4 – датчики угла) и точки для вывода графиков (a–b)

В результате расчетов требуется получить распределения температур по наиболее значимым поверхностям и сечениям гироскопа в установившемся тепловом режиме, а также графики изменения температуры во времени в некоторых точках (точки а–в на рис. 1) при его включении (переходный процесс, нестационарный тепловой режим).

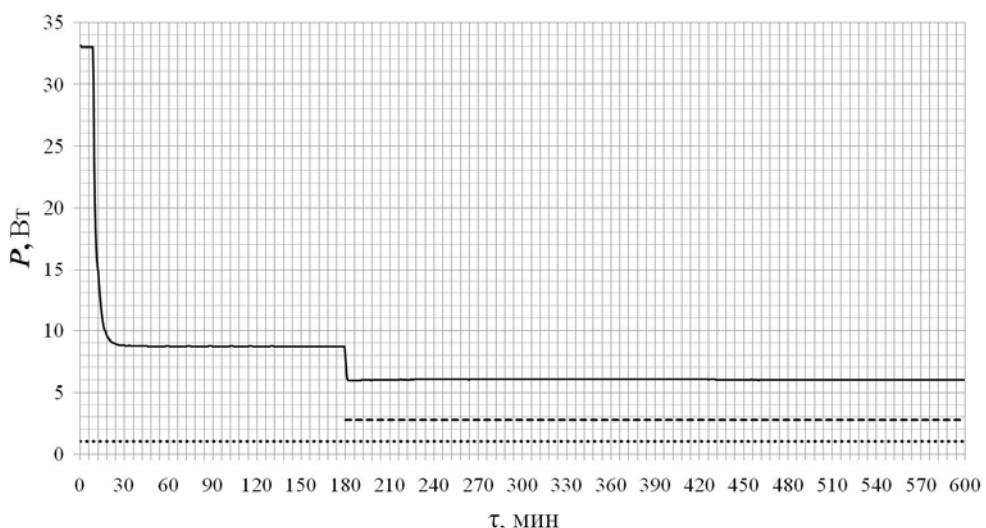


Рис. 2. Мощность тепловыделений системы термостабилизации ( $P_{\text{стс}}$ ), гиромотора ( $P_{\text{гм}}$ ) и платы электроники ( $P_{\text{пэ}}$ ) во времени ( $t$ ): —  $P_{\text{стс}}$ , - - -  $P_{\text{гм}}$ , .....  $P_{\text{пэ}}$

#### Тепловая модель

ДПГ представляет собой систему тел, которые взаимодействуют между собой в тепловом отношении за счет процессов теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Геометрическая модель, созданная с помощью CAD-системы Pro/Engineer, была подготовлена для передачи в среду CFDdesign. Согласно известным методикам, из нее удалены элементы крепежа, отверстия, фаски и прочие элементы, усложняющие генерацию сетки для конечно-элементного анализа и не оказывающие серьезного влияния на тепловой режим. Ввиду сравнительно узкого диапазона изменения температур элементов прибора значения теплофизических свойств (теплопроводность и теплоемкость) принимаются независимыми от

температуры. Источники тепловыделений (рис. 1) считаются объемными, значения мощностей тепловыделений приведены ранее.

Теплообмен кондукцией и конвекцией во внутреннем объеме гироскопа рассчитывался непосредственно в программе, конвективно-лучистый теплообмен во внешнюю среду задан граничным условием на соответствующих поверхностях. Коэффициент теплоотдачи в окружающую среду рассчитан с помощью критериальных уравнений и известных законов теплообмена, кондуктивный отток тепла в местах крепления определен с помощью закона баланса мощности [5]. На момент начала нестационарного расчета температура всех элементов ДПГ принималась равной 20°C, температура окружающей среды с помощью внешнего теплового воздействия в течение 60 мин возрастает с 20°C до 45°C и далее остается постоянной. Экспериментальные значения температуры в стационарном тепловом режиме, снятые с единственного температурного датчика, использованы для верификации созданной тепловой модели с целью получения как можно более точных результатов расчета.

Кроме того, при формировании тепловой модели были сделаны следующие допущения и приближения: нагревательный элемент системы термостабилизации представлен в виде тонкостенного цилиндра с объемным тепловыделением; расчет проведен для ориентации прибора, при которой его продольная ось и ось вращения гиромотора находятся в плоскости горизонта; тепловое расширение жидкости и вращение гиромотора не учитываются; теплообмен излучением внутри гироскопа не учитывается ввиду его незначительного вклада, что было определено в результате предварительных оценок.

Расчеты в среде CFDesign производятся посредством МКЭ. После подготовки геометрической модели, задания свойств материалов элементов, тепловых нагрузок, граничных и начальных условий, создания сетки конечных элементов и проведения тепловых расчетов программа позволяет проанализировать температурные поля по любым поверхностям и в различных сечениях, а также графики зависимости температуры от времени в любых точках конструкции [4].

### Результаты моделирования

Все результаты проведения расчетов, оформленные в виде графической информации, слишком объемны для размещения их в рамках настоящей работы. На рис. 3, 4 представлены наиболее значимые из них. Сравнение результатов расчета с существующими на настоящий момент экспериментальными данными показано в таблице.

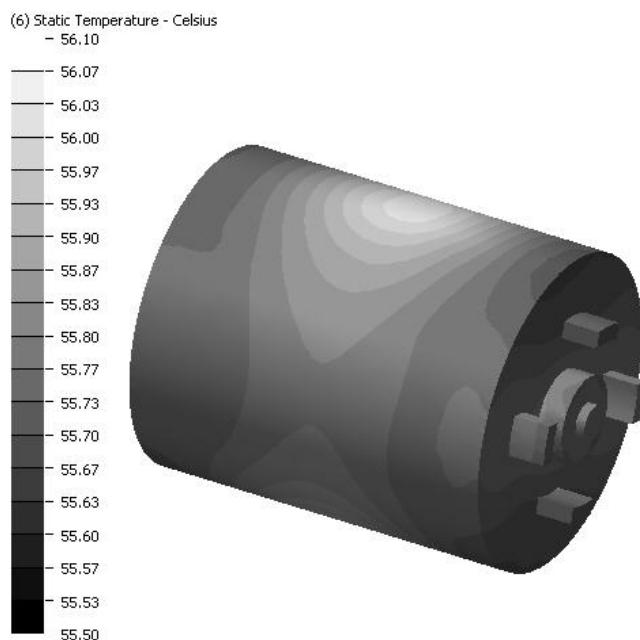


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности поплавковой камеры ДПГ

На основании анализа результатов расчетов были сделаны следующие выводы:

- при включении и прогреве температурная стабильность прибора (стационарный тепловой режим) наступает через 6 ч (рис. 4);
- разница температур между гиромотором (график «в» на рис. 4) и внешней поверхностью поплавковой камеры (график «а» на рис. 4) весьма существенна и составляет 11 K;

- перепад температур по внешней поверхности поплавковой камеры составляет 0,4 К (рис. 3); после включения гиромотора мощность, выделяемая им, компенсируется системой термостабилизации, но происходит перераспределение температур в поплавковой камере;
- обнаружено существенное влияние на тепловой режим гироскопа платы электроники, расположенной справа;
- расчетное значение температуры нагревательного элемента системы термостабилизации отличается от экспериментального не более чем на 1%; это указывает на то, что созданная тепловая модель с должным уровнем точности верифицирована и соответствует исследуемому прибору;
- в силу того, что единственное экспериментально определенное значение температуры использовалось в качестве исходной информации для верификации созданной тепловой модели, независимо оценить погрешность определения температур на данном этапе исследований не представляется возможным;
- сравнение полученных в результате расчетов и экспериментов значений времени выхода ДПГ на стационарный тепловой режим (при первоначальном прогреве прибора до включения гиромотора) показывает, что относительная погрешность определения настоящего параметра не превышает 15%.

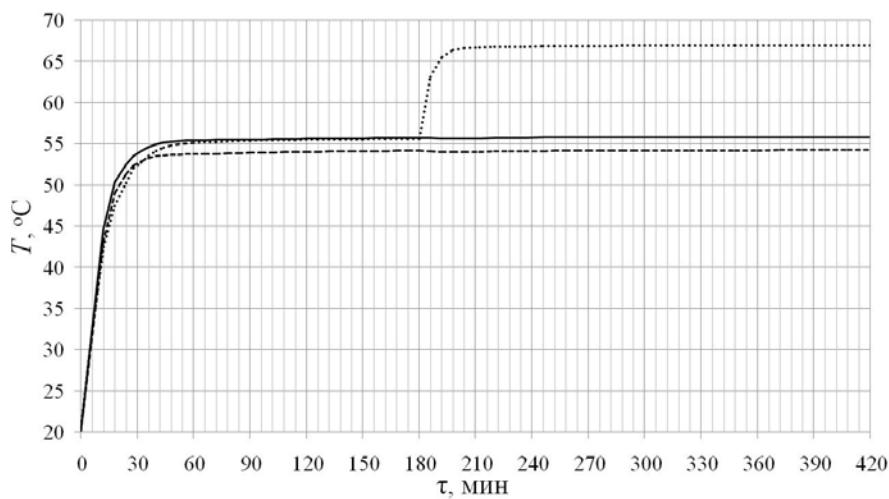


Рис. 4. Выход на стационарный тепловой режим в различных точках ДПГ: — а, - - - б, ····· в  
(расположение точек для построения графиков показано на рис. 1)

Параметр	Расчет	Эксперимент	Отклонение
Температура в месте расположения датчика $T$ , °C	55,9	55,4	менее 1%
Время выхода прибора на стационарный тепловой режим при прогреве $\tau$ , мин	47	41	15%

Таблица. Сравнение рассчитанных и экспериментальных значений

Установлено, что в системе термостабилизации расположение датчика температуры и исполнительного элемента (нагревателя) в одной обмотке, как это выполнено в настоящей конструкции, не является оптимальным. Для достоверной оценки температурного состояния прибора при проведении испытаний было предложено рассмотреть возможность размещения датчика температуры, одного или нескольких, внутри поплавковой камеры. Кроме того, было определено, что использование материалов с высокой теплопроводностью (более 100 Вт/(м·К)) при изготовлении элементов, расположенных в поплавковой камере, позволит обеспечить в ней неравномерность температурного поля не более 5 К и при этом снизить максимальные значения температур.

#### Заключение

В результате проведения работы исследован тепловой режим двухступенчатого поплавкового гироскопа, сделаны выводы и рекомендации по его усовершенствованию, проведено сопоставление полученных значений с экспериментальными данными. Анализ погрешности проведенных расчетов позволяет рекомендовать разработанную тепловую модель и методику для проведения инженерных расчетов и определения температуры с относительной погрешностью, не превышающей 20%. Эта оценка сделана автором на основании предыдущих подобных расчетов, изучения документации к использованному программному обеспечению, исследования литературы и работ других специалистов в данной области. Модель может найти применение при выборе параметров элементов конструкции, а также при разработке

рекомендаций по усовершенствованию теплового режима гироскопа и улучшению его технических характеристик.

Результаты проведенных расчетов могут быть использованы как начальные и граничные условия для исследования влияния температуры на дисбаланс поплавковой камеры прибора (сопряженная задача теплофизики и механики). Она является гораздо более сложной, но ее решение представляется возможным при переходе к более универсальному программному обеспечению (например, Ansys), что позволит расширить набор параметров (температурный коэффициент линейного расширения материалов, механические напряжения и деформации), влияющих на точность показания двухстепенного поплавкового гироскопа.

Описанные результаты и планы формируют цепочку исследований и расчетов, успешное выполнение которых способно привести к улучшению точностных характеристик и стабильности функционирования двухстепенного поплавкового гироскопа.

### **Литература**

1. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1 (72). – С. 3–16.
2. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2005. – 404 с.
3. Богоявленский Д.А., Кармановский Н.С. Исследование тепловых режимов различных радиоэлектронных конструктивов с помощью системы COSMOSWorks // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 44. – С. 234–238.
4. CFDesign Customer Portal [Электронный ресурс] / владелец прав: компания Autodesk Co. – Режим доступа: <http://www.cfdesign.com/support/customerportal>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 17.01.2012).
5. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.

*Громов Дмитрий Сергеевич* – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер-конструктор, dmitrygromov17@gmail.com

УДК 519.635.4

УЛУЧШЕНИЕ СХОДИМОСТИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ  
С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РЕШЕНИЯ

А.Ю. Грищенцев, А.Г. Коробейников

Рассмотрена актуальность применения метода конечных разностей для решения дифференциальных уравнений с граничными условиями. Предложен способ вычисления промежуточного решения для повышения эффективности метода конечных разностей. Приведены результаты программной реализации указанного способа. Рассмотрен принцип алгоритмической реализации способа в двумерном пространстве.

**Ключевые слова:** метод конечных разностей, дифференциальные уравнения.

**Введение**

Многие процессы окружающего нас мира описываются различными дифференциальными уравнениями [1], значительную часть которых практически невозможно решить аналитически. По этой причине актуальным вопросом является разработка новых и повышение производительности имеющихся численных методов решения дифференциальных уравнений. Метод конечных разностей (МКР) широко распространен и применяется для решения дифференциальных уравнений путем их замены конечными разностями [2, 3]. Метод достаточно просто реализуется программно для решения дифференциальных уравнений в произвольном  $n$ -мерном пространстве.

Основным недостатком МКР является относительно невысокая скорость сходимости при значительном числе элементов, подлежащих итерационным операциям (расчетам). Уменьшение числа этих элементов за счет увеличения дискретности не всегда может пойти на пользу решению задачи, так как при таком подходе во многих случаях происходит снижение скорости сходимости к точному решению. Можно сделать выбор в пользу более быстрого метода конечных элементов (МКЭ), который имеет ряд преимуществ. Например, он позволяет увеличить степени дискретизации там, где необходимо повысить точность решения, а также практически исключить эффект ступенчатости границ. При этом МКЭ в большинстве случаев обеспечивает существенно более высокую скорость решения задачи по сравнению с МКР. Сложность применения МКЭ обусловлена необходимостью разбиения пространства на конечные элементы. На сегодняшний день существует ряд алгоритмов, позволяющих эффективно производить триангуляцию в  $n$ -мерных пространствах. Многие из этих алгоритмов имеются в свободном доступе в виде библиотек открытого кода. Таким образом, в некоторых случаях есть смысл отказаться от применения МКР в пользу МКЭ.

Несмотря на все преимущества МКЭ, есть ряд особенностей, ограничивающих повсеместное практическое применение МКЭ вместо МКР. Большинство алгоритмов и программ предназначено для триангуляции в двумерном пространстве. Для трехмерного пространства доступные готовые инструменты триангуляции существенно скучнее. Для пространства размерностью более трех, например, в задачах математической физики, где часто встречается четырехмерное пространство (пространственно временной континуум), таких инструментов в открытом доступе вообще не обнаружено. Разработка собственных библиотек алгоритмов для построения диаграммы Вороного в  $n$ -мерном пространстве является достаточно трудоемким процессом и не всегда оправдана с точки зрения затрат ресурсов.

**Сущность предлагаемого способа**

Целью работы является разработка способа сокращения времени вычислений МКР за счет повышения скорости сходимости итерационного процесса при сохранении алгоритмической простоты реализации метода для произвольного  $n$ -мерного пространства.

Известен способ сокращения времени вычислений МКР для мягких дифференциальных уравнений [3] в некоторой области  $W$  с граничными (краевыми для физических областей и начальными для времени) условиями  $G$ , сущность которого состоит в укрупнении шага  $h$  сетки  $U$  в области  $W+G$ . При этом происходит потеря точности решения вплоть до того, что оно становится непригодным. Например, в основной задаче электростатики могут быть рассмотрены электрические заряды, описанные единственной точкой. При укрупнении сетки такие граничные условия могут быть потеряны, что принципиально меняет сущность промежуточного решения.

По этой причине обычным является решение, содержащее несколько последовательно применяемых сеток. Первоначально применяется самая крупная сетка  $U_1$ , позволяющая получить приближение решения. Затем решение уточняют, последовательно применяя сетки с меньшим шагом  $U_k$ ,  $k > 1$ . Общее число различных сеток обычно составляет 2–3. Шаг сетки  $h$  может быть различным в разных направле-

ниях и областях сетки  $U$ . Таким образом, ускорение процедуры сходимости к решению задачи с заданной точностью  $p$  происходит за счет более быстрого формирования некоторого промежуточного решения в области  $W$ .

В соответствии с теоремой о сходимости [4] разностного решения  $y(x)$  с шагом сетки  $h$  к точному решению  $u(x)$  для уравнения

$$Au(x) = f(x), \quad (1)$$

где  $A$  – дифференциальный оператор;  $x \in W+G$  ( $W$  – область решения;  $G$  – граничные условия);  $f(x)$  – заданная функция, из условия  $\|y(x)-u(x)\| \rightarrow 0$ , при  $h \rightarrow 0$  и заданном порядке точности  $p$  для  $\|y(x)-u(x)\| \rightarrow O(h^p)$  следует, что указанный метод уменьшения шага сетки  $h$  является прямым следствием этой теоремы.

При этом каждое уточнение решения является итерационным, имеющим вычислительную сложность

$$O\left(k \prod_{i=1}^n N_i\right), \quad (2)$$

где  $n$  – размерность рассматриваемой задачи;  $N_i$  – число узлов сетки в каждом направлении;  $k$  – число итераций, обеспечивающее заданную точность на данном этапе. В многомерных задачах величина (2) может быть очень велика даже при разреженной сетке.

Предлагаемый способ нахождения предварительного решения базируется не на последовательных итерационных приближениях, а на аппроксимации промежуточного решения в области  $W$  по имеющимся данным о граничных условиях  $G$  с учетом правой части (1). При этом вычислительная сложность может быть оценена как

$$O\left(n \prod_{i=1}^n N_i\right),$$

где, как правило,  $n \ll k$ , причем  $n$  и  $k$  имеют тот же смысл, что и в (2).

Указанную задачу нахождения промежуточного решения в области  $W$  можно решить путем аппроксимации значений  $f(x)$  правой части уравнения (1), образующих последовательно вдоль линий однородную сетку разбиения  $U$  с граничными условиями  $G$ . Аппроксимацию  $f(x)$  можно производить различными функциями в зависимости от физической сущности задачи, например, многочленом вида

$$a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_p z^p, \quad (3)$$

где  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$  – коэффициенты многочлена;  $z$  – переменная, вдоль которой происходит интегрирование.

В общем случае, если линии сетки не параллельны координатным осям, образующим пространство  $W$ ,  $z$  может не совпадать с набором переменных исходной задачи. В этом случае необходимо учитывать поворот системы координат, в которых рассмотрен аргумент  $z$ , относительно исходной системы координат. В случае  $n$ -мерной ( $n > 1$ ) задачи аппроксимирование необходимо производить последовательно для всех линий, образующих сетку в каждом направлении, с последующей оценкой средних значений для каждого узла сетки. Среднее значение узла сетки вычисляется как среднее значение аппроксимации в точках линий сетки, принадлежащих данному узлу. В определенном смысле можно говорить, что для нахождения некоторого промежуточного решения задача МКР разбивается на множество одномерных задач МКЭ, число которых равно числу линий сетки МКР.

Возможно совместное применение способа укрупнения сетки и предлагаемого способа, ведь даже для укрупненной сетки процесс ускорения сходимости остается актуальным. Применение предложенного способа должно производиться с учетом физической сущности процессов и условий каждой конкретной задачи. При укрупнении сетки используются не все граничные условия, а только их часть; можно также использовать некоторые усредненные граничные условия. В этом случае фактически для получения новых граничных условий будет применен предложенный способ, но в локальной области.

Промежуточное решение, полученное предлагаемым способом, в некоторых случаях (в зависимости от особенностей граничных условий), может быть «не очень» гладким. На практике возможно применение некоторых дополнительных действий, повышающих гладкость. Например, при аппроксимации возможен учет (с некоторыми весовыми коэффициентами) значений в соседних узлах, не вошедших в качестве значения или аргумента в функцию аппроксимации, применяемую к данной линии сетки.

### Апробация способа

Способ тестировался на различных задачах электротехники, описываемых уравнением Лапласа и Пуассона в пространствах с числом измерений  $n = 2$  и  $n = 3$ :

- решение основной задачи электростатики (в том числе с зарядами, описываемыми единственным граничным элементом);
- расчет поля конденсатора сложной формы;
- расчет магнитного поля в зазоре электрической машины.

Дополнительно способ тестирулся на некоторых других видах задач, описываемых уравнениями в частных производных.

Во всех случаях полученное промежуточное решение позволяло существенно сократить число итераций МКР для получения решения с заданной точностью. Особый выигрыш в сокращении числа итераций наблюдается при гладких граничных условиях, вплоть до того, что при некоторой достаточной гладкости может быть получено решение только с применением указанного способа без итерационного процесса МКР.

Для разбиения области  $W$  была выбрана прямоугольная сетка, образованная линиями, параллельными координатным осям, с равным во всех направлениях шагом  $h$ . В качестве многочлена (3) было использовано уравнение прямой  $a_0 + a_1x$ , коэффициенты которой рассчитывались по двум элементам граничных условий из  $G$ . Полученные результаты (рис. 1) показывают существенное ускорение сходимости итерационного процесса МКР.

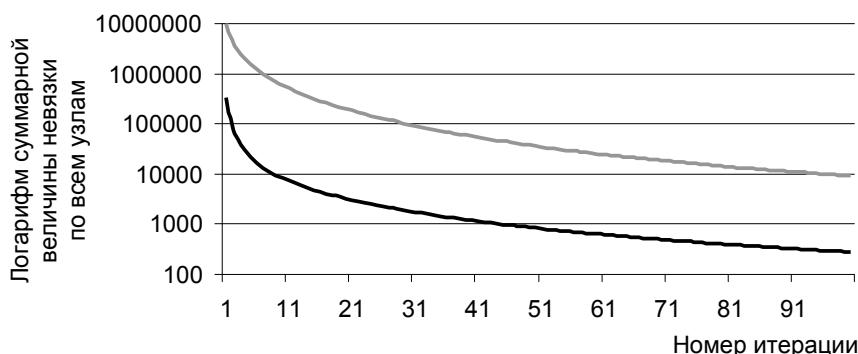


Рис. 1. Значения логарифмов суммарных невязок по всем узлам сетки в зависимости от номера итерации в двумерном пространстве: — без поиска предварительного решения; — с поиском предварительного решения

Применение рассмотренного способа в некоторых двумерных задачах позволило уменьшить число итераций в 10–100 раз, что говорит о существенном повышении эффективности МКР.

Устойчивость МКР для мягких уравнений, в частности, для уравнения Лапласа, показана в [2–4].

В результате нахождения некоторого промежуточного решения  $y'(x)$  улучшается сходимость МКР. Ускорение итерационного процесса зависит от значения величины  $\|y'(x) - u(x)\|$  в области решения  $W$ . Чем меньше  $\|y'(x) - u(x)\|$ , тем меньше итераций требуется для уточнения решения (снижения невязки до некоторой заданной величины). Промежуточное решение  $y'(x)$  будет зависеть от способа аппроксимации (выбора функции аппроксимации, ее размерности). На практике дополнительный эффект дает учет соседних значений, принадлежащих линиям сетки, соседним по отношению к той, для которой производится итерация.

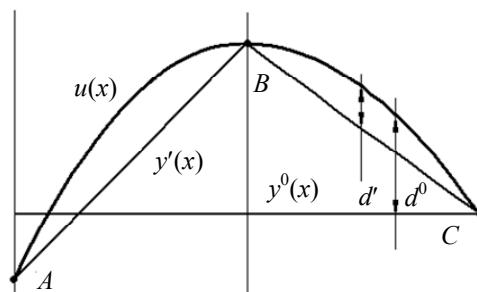


Рис. 2. Расчет промежуточного решения

На рис. 2 показаны точки  $A$ ,  $B$ ,  $C \in G$  – элементы граничных условий;  $u(x)$  – точное решение;  $y'(x)$  – промежуточное решение и начальные значения  $y^0(x)$ . Области между элементами множества  $G$  принадлежат области  $W$ , в которой необходимо отыскать решение. Начальные значения  $y^0(x)$  задаются

произвольно, обычно  $y^0(x) = \text{const}$ , как в случае, представленном на рис. 2. Величина  $\|y'(x) - u(x)\| = d'$  представляет разность между точным и промежуточным решениями, а  $\|y^0(x) - u(x)\| = d^0$  – между точным решением и начальным значением.

Строгое математическое доказательство возможности аппроксимации функции  $u(x)$  функцией  $y'(x)$  и, в частности, алгебраическим полиномом (3) приведено в [5].

### **Реализация в двумерном пространстве**

Рассмотрим вариант реализации способа на примере двумерной задачи с граничными условиями, описанной уравнением Лапласа, в случае применения равномерной сетки с шагом  $h$ , образованной линиями, параллельными осям координат пространства. Поиск промежуточного решения производится последовательно: сначала в направлении оси  $X$ , а затем в направлении оси  $Y$ , или наоборот. Совершим проход по первой строке, если встречаем элемент, являющийся элементом граничного условия, запоминаем его значение и двигаемся далее, пока не встретим следующий элемент, являющийся элементом граничного условия. Зная значение двух граничных элементов в пределах одного вектора, применяем аппроксимацию для вычисления значений элементов, расположенных между ними. Таким образом аппроксимируем все значения в пределах одного столбца. Последовательно проходим все столбцы в направлении  $X$ , а затем совершаем такой же проход по всем строкам в направлении  $Y$ . При проходе по строкам в направлении  $Y$  учитываем ранее полученные значения (при проходе по  $X$ ) и вычисляем фактическое значение как среднее между проходом в направлении  $X$  и  $Y$ .

Добавление проходов по диагоналям позволит получить промежуточное решение, более близкое к точному.

### **Заключение**

Предложен способ вычисления промежуточного решения в  $n$ -мерных задачах с граничными условиями, способствующий ускорению процесса сходимости метода конечных разностей. При практической реализации предложенного способа в двумерном пространстве число итераций для достижения заданной невязки снижено в 10–100 раз за счет поиска промежуточного решения. Таким образом, указанный способ можно применять для существенного повышения эффективности метода конечных разностей.

### **Литература**

1. Грищенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Разработка модели решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 109–113.
2. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. – СПб: Лань, 2010. – 400 с.
3. Бахвалов Н.С., Воеводин В.В. Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования: в 2 томах. – Т. 1. Вычислительная математика. – М.: Наука, 2005. – 343 с.
4. Формалёв В.Ф., Ревезников Д.Л. Численные методы. – М.: Физматлит, 2004. – 400 с.
5. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учебное пособие для вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 432 с.

**Грищенцев Алексей Юрьевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tigerpost@ya.ru

**Коробейников Анатолий Григорьевич**

– Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук (СПбФ ИЗМИРАН), доктор технических наук, профессор, зам. директора, Korobeynikov\_A\_G@mail.ru

**9****МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

УДК 004.056.53

**ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЙЕСОВСКОЙ СЕТИ  
В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ**

С.А. Арутамов, В.Ю. Дайнеко

Сформулированы проблемы, встречающиеся при функционировании известных систем обнаружения вторжений. Дано описание структуры разработанной модели системы обнаружения вторжений. Приведены описания используемой динамической байесовской сети, алгоритмов обучения и тестовой доменной сети. Определены ошибки первого и второго рода работы при эксплуатации системы обнаружения вторжений. Представлены сравнительные результаты тестирования при использовании разработанной системы и системы Snort.

**Ключевые слова:** система обнаружения вторжений, динамическая байесовская сеть, байесовский вывод.

**Введение**

Возросшая роль компьютерных сетей в жизни не только отдельно взятого человека, но и всего общества и даже государства заставляет серьезно относиться к проблеме защиты компьютерных сетей. Для построения комплексной системы защиты наравне с остальными традиционно используемыми инструментами защиты все чаще применяют системы обнаружения вторжения (СОВ).

Существует два распространенных метода обнаружения вторжений, используемые в СОВ: основанные на сигнатурах и аномалиях. Сигнатурный метод позволяет точно обнаруживать вторжения, но не способен выявлять новые типы вторжений. Метод, основанный на аномалиях, позволяет выявить новые вторжения, но имеет низкую надежность, выраженную в высокой частоте ложных обнаружений. Для решения проблемы ложных срабатываний в СОВ авторами предлагается использовать алгоритмы байесовского вывода (БВ) для принятия решения о вторжениях. БВ является статистически корректным инструментом для прогнозирования, фильтрации и оценивания текущей модели, которая описывает наблюдаемые данные. Оценка выбранной модели позволяет ответить на вопрос о корректности описания наблюдаемых событий, произошедших в прошлом или настоящем. При этом БВ применяется в виде модели динамической байесовской сети (ДБС). ДБС предназначена для моделирования последовательности характеристик сетевого трафика. Отдельно авторы рассматривают проблему увеличения временного отрезка автономной работы СОВ без участия человека для обслуживания. Система обнаружения вторжения после ввода в эксплуатацию способна в течение некоторого промежутка времени функционировать эффективно. Однако с течением времени система может начать деградировать, что приводит к росту частоты ложных срабатываний и пропуску вторжений. Чтобы этого не происходило, требуется участие человека в обслуживании и настройки системы с течением времени.

Ранее уже производились попытки решить проблему ложных срабатываний в СОВ. Так, в [1] предложено использовать шаги БВ в переходной модели между выводами, чтобы оценить, содержит ли конкретный всплеск сетевого трафика атаку. В работе [2] была предложена модель, которая имитирует интеллектуального злоумышленника, используя байесовские методы, чтобы создать план целенаправленного действия. Это исследование также предлагает схему классификации событий на основе байесовских сетей (БС). Отмечается преимущество использования БС, выраженное в простоте включения дополненной информации в уже существующую модель.

В [3] считают, что байесовская система обеспечивает прочную основу для упрощения математики и решения тех проблем, которые СОВ не в состоянии решить. В работе [4] предлагается адаптивная СОВ с использованием БС, обученных на смеси реального и синтетического трафика с помощью K2 алгоритма, и использующая алгоритм *junction tree* для БВ. В [5] предлагается использовать скрытые марковские модели для обнаружения аномалий в системных вызовах к ядру операционной системы, что позволяет локализовать аномалию с точностью до системного вызова.

Цель настоящей работы заключается в разработке структуры модели системы обнаружения вторжений для повышения надежности выявления вторжения с использованием модели ДБС и повышения времени автономной работы системы.

**Структура модели разработанной системы обнаружения вторжений**

Предлагаемая авторами структура модели системы обнаружения вторжений представлена на рис. 1 и состоит из пяти модулей.

1. Модуль байесовского вывода производит решение о наличии вторжения на основании собранной с сенсоров информации о свойствах сетевых сессий с защищаемой сетью и выбранной обученной моделью ДБС. Под сеансом понимается промежуток времени между запросом на соединение и запросом на

- разрыв соединения, в течение которого между двумя IP-адресатами посылаются потоки данных по определенному протоколу.
2. Модуль обучения отвечает за процесс обучения ДБС. Выбор критерия обучения производится модулем конфигурации СОВ.
  3. Модуль конфигурации СОВ управляет работой СОВ и отвечает за выбор алгоритма обучения и алгоритма вывода.
  4. Модуль базы моделей ДБС содержит обученные модели ДБС, применяемые в модуле вывода;
  5. Модуль сбора и обработки информации представляет собой группу сенсоров, расположенных в контролируемых узлах сети. Сенсоры захватывают сетевые пакеты на контролируемом узле и формируют последовательности свойства сессий для модуля байесовского вывода. Сетевым сенсором является программа, использующая сетевую библиотеку WinPcap [6], которая позволяет захватывать и собираять информацию о сетевом трафике. Собранная информация о сессии обрабатывается в виде свойств сетевых сессий и передается на вход модуля байесовского вывода.



Рис. 1. Структура предлагаемой модели СОВ

С обучения ДБС начинается период инициализации работы СОВ. Используя один из алгоритмов обучения и обучающих данных, модуль обучения формирует обученную модель ДБС. Обучающие данные определяют ту априорную информацию, которая закладывается в модель ДБС. После обучения, обученная модель добавляется в базу моделей СОВ. В базе данных моделей каждая модель ранжируется по убыванию в зависимости от критерия оценки при обучении. Далее СОВ переходит в режим эксплуатации. Модуль байесовского вывода на основании лучшей модели ДБС, с точки зрения наблюдаемых свойств сетевых сеансов и выбранного алгоритма вывода, производит оценку БВ для определения аномалий в последовательностях. На этапе генерации модулем рабочей конфигурации СОВ может происходить оценка корректности описания наблюдаемых свойств сессий для текущей модели ДБС. При расхождении предсказания и наблюдения производится выбор следующей модели ДБС из базы моделей. Если перебор моделей ДБС не дал желаемых результатов, то модуль конфигурации СОВ производит обучение новой модели ДБС с помощью изменения алгоритма обучения. В случае обнаружения вторжений задача модуля конфигурации СОВ заключается в занесении обнаруженной последовательности в обучающие данные и обучении новой модели ДБС для получения лучшей модели описания вторжений. Кроме того, модуль конфигурации может взять на себя функцию по блокированию источников вторжений, например, путем добавления источника в черный список или выработки дополнительных правил для межсетевого экрана.

#### Применение динамических байесовских сетей

ДБС является обобщенной моделью в модели пространства состояний [7] для описания последовательностей, порожденных моделируемой динамической системой. ДБС состоит из двух байесовских сетей – исходной БС, определяющей структуру сети в каждом временном срезе, и транзитной БС, определяющей переходы между двумя ближайшими временными срезами. Структура БС остается неизменной во всех временных срезах. Срезом называют текущее состояние ДБС в дискретный момент времени без транзитивных связей.

ДБС может быть представлена в виде графической модели направленного ациклического графа, каждой из вершин которого соответствует случайная наблюдаемая или скрытая переменная, а дуги задают условную вероятность переходов между вершинами. Вершина в сети может иметь родителя только в своем временном срезе или в непосредственно предшествовавшем временном срезе, другими словами, ДБС определяется как марковский процесс первого порядка. В отличие от статических БС, ДБС имеют механизм для использования временного аспекта данных временных рядов и позволяют моделировать циклические явления, что дает возможность описывать сложные последовательности. Однако необходимость обучения исходной и транзитивной БС увеличивает вычислительную сложность. ДБС в виде гра-

фической модели приведена на рис. 2, где показана построенная авторами транзитная БС между двумя срезами. ДБС состоит из 9 вершин, которые, в свою очередь, представлены восьмью свойствами сетевых сеансов и одной переменной типа вторжения: protocol\_type, service, src\_bytes, count, srv\_count, same\_srv\_rate, diff\_srv\_rate, dst\_host\_same\_src\_port\_rate и type.

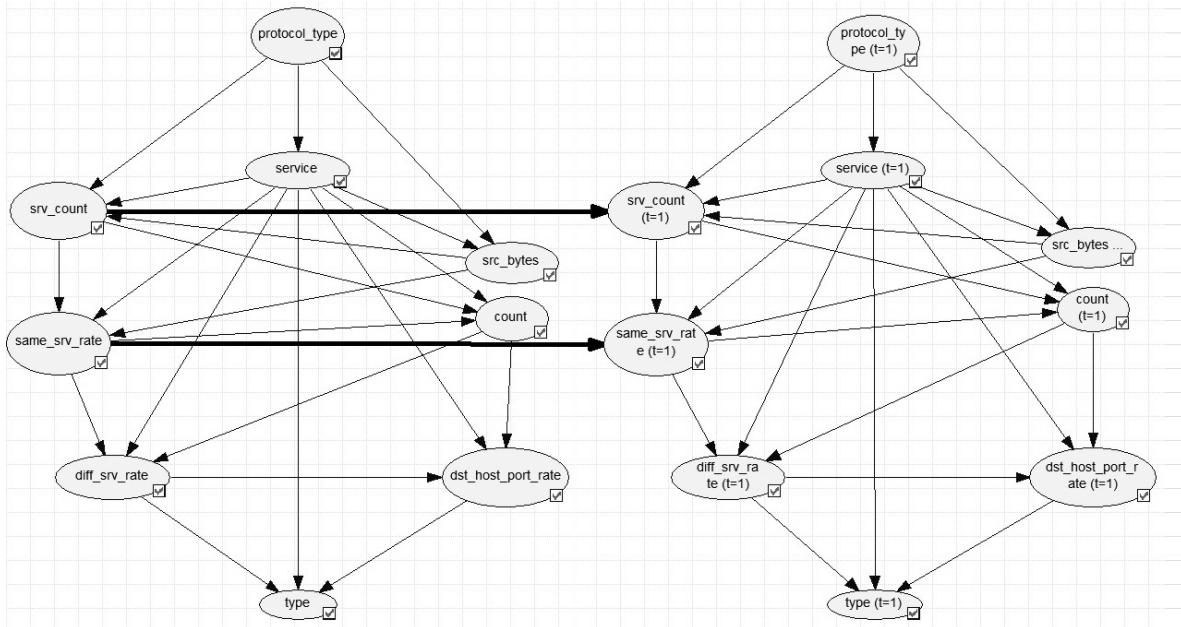


Рис. 2. Графическая модель транзитной ДБС

В модуле байесовского вывода СОВ используются алгоритмы БВ. Задачи, которые решаются с помощью БВ, представлены в табл. 1. Уравнение БВ для дискретного случая имеет вид

$$P(x_i | Y) = \frac{P(x_i) \cdot P(Y | x_i)}{P(Y)}, \quad x_i \in X,$$

где  $x_i$  –  $i$ -е скрытое состояние из всех возможных;  $X$  – пространство скрытых состояний;  $Y$  – данные наблюдений;  $P(x_i | Y)$  – апостериорная вероятность скрытого состояния;  $P(Y | x_i)$  – правдоподобие данных наблюдения;  $P(x_i)$  – априорная вероятность скрытого состояния;  $P(Y)$  – априорная вероятность наблюдаемых данных. В разработанной СОВ для решения задач предсказания, задачи Витерби, сглаживания на шаг применяются алгоритмы, сведенные в табл. 1.

Задача	Алгоритмы
Предсказание	$P(x(t+dt)   y(1:t))$ Алгоритм экстраполяции распределения вероятностей для будущих состояний ДБС
Фильтрация	$P(x(t)   y(1:t))$ Алгоритм оценки текущего состояния модели
Сглаживание	$P(x(1:t)   y(1:t))$ Алгоритм оценки всех наблюдаемых состояний в прошлом с учетом всех доказательств до текущего времени
Сглаживание на шаг	$P(x(t-dt)   y(1:t))$ Алгоритм оценки состояния для некоторого прошлого момента с учетом всех доказательств до текущего времени
Витерби	$\max_{x(1:t)} P(x(1:t)   y(1:t))$ Алгоритм для вычисления наиболее возможных последовательностей скрытых состояний с учетом полученных данных

Таблица 1. Алгоритмы вывода ( $t$  – время)

#### Алгоритм обучения

Для модуля обучения ДБС была выбрана комбинация применяемых алгоритмов обучения. Задача обучения ДБС заключается в поиске такой структуры из всего набора, которая обладала бы лучшей оценкой корректного описания данных обучения. В нашей работе используются:

- алгоритм поиска структуры сети *hill-climbing*, реализованный в Probabilistic Network Library [8];
- критерий минимальной длины описания;

- критерий взаимной информации.

Эти критерии основаны на теории информации и реализованы в библиотеках GlobalMIT [9] и BnFinder [10] соответственно.

### Апробация системы

Для тестирования работы СОВ была построена тестовая доменная сеть (рис. 3). Тестовая доменная сеть состоит из контроллера домена (Windows 2003 R2) и пяти клиентских машин (Windows XP SP3), межсетевого экрана и двух маршрутизаторов. Сетевые сенсоры СОВ установлены на каждую клиентскую машину тестовой сети и контроллер домена. На контроллере домена развернута служба Active Directory, хранящая критическую информацию, и запущены следующие серверы: DNS-сервер доменных имен, сервер службы принтеров, базы данных (Microsoft SQL).

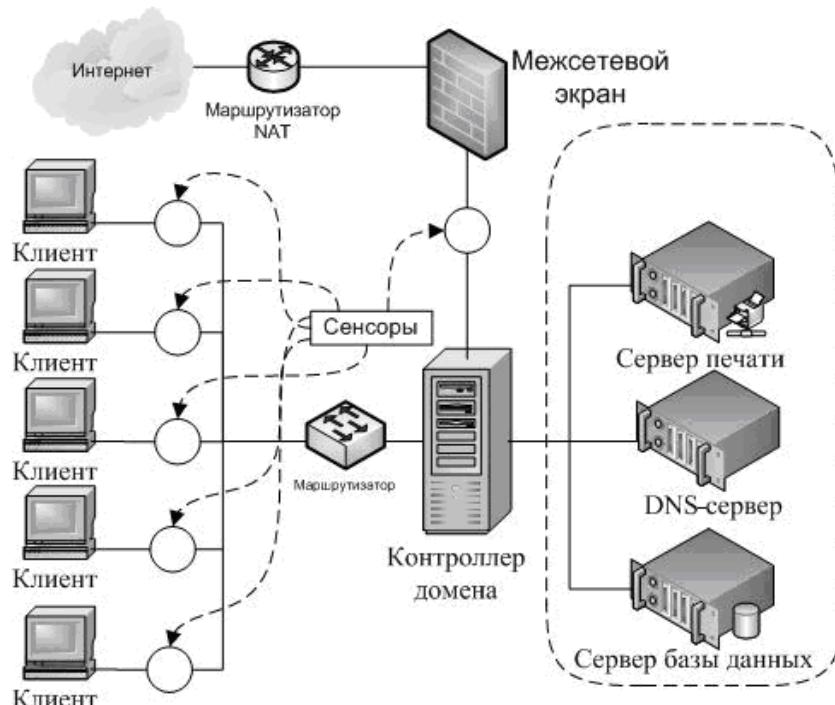


Рис. 3. Схема тестовой доменной сети

Атаки на доменную сеть, как правило, проводят в три этапа:

1. первоначальное сканирование сети;
2. проведение атак на найденные уязвимости для получения доступа к узлам сети;
3. поднятие своих прав до уровня администратора домена.

Авторами были реализованы два вида сканирований – сканирования сети для определения наличия сервера доменных имен (порт 53) и ARP-пинг. ARP-пинг – широковещательный запрос MAC-адреса компьютера с IP-адресом по протоколу ARP. Применились следующие атаки на домен: использование уязвимости MS10-061 – повышение своих прав через службу печати; делегирование захваченных токенов, принадлежащих администратору; MS08-067 – выполнение произвольного кода из-за ошибки в проверке входных данных; ARP-spoofing – атака «человек посередине» с использованием протокола ARP. Атаки MS10-015, использующая доступ к 16-битным приложениям из 32-битной системы, и SMB relay, эксплуатирующая протокол NetBIOS, неизвестны для тестируемых СОВ.

Для создания обучающих данных авторами были проведены описанные выше сканирования сети и атаки на защищаемую доменную сеть. Вторжения выполнялись в ручном режиме. К собранным данным с сенсоров добавлялась информация о типе производимого вторжения.

После обучения и включения СОВ в режиме эксплуатации, с компрометирующего ресурса запускался диспетчер атак, в задачу которого входило проведение атак. Диспетчер атак запускал в случайной последовательности сканирования и атаки, направленные на тестовую доменную сеть. Атаки воспроизводились через каждые 5–10 минут в случайном порядке в течение 24 часов. Информация о времени запуска и о типе атаки сохранялась в файле истории.

Для сравнения эффективности работы разработанной СОВ в качестве аналога была выбрана система Snort [11]. Snort – свободная и открытая СОВ, производящая анализ трафика и использующая пра-

вила для обнаружений вторжений. Snort и предложенная СОВ в процессе своей работы сохраняли историю работы, выводя время обнаружения вторжения и его тип. По окончании тестирования файлы историй атак и историй обнаружения вторжений были проанализированы. Для определения эффективности работы СОВ использовались следующие оценки [12]:

- False Positive (FP) – вероятность обнаружения вторжения в случае, если его не было, определяемая как отношение количества ложных обнаруженных вторжений к общему числу сессий, содержащих вторжения. Такую ситуацию будем рассматривать как ошибку первого рода.
- False Negative (FN) – вероятность необнаружения вторжения в случае, если оно имело место, определяемая как отношение необнаруженных вторжений к общему числу сессий, содержащих вторжения. Такую ситуацию будем рассматривать как ошибку второго рода.

Всего было проведено 355 атак в течение 9846 нормальных сессий. В табл. 2 представлены результаты сравнения работы систем. Система Snort не смогла обнаружить новые типы вторжения, так как правила для нее задаются извне и не формируются в процессе работы. Разработанная СОВ показала высокую вероятность обнаружения вторжения и меньшую, чем Snort, вероятность ложных срабатываний.

Кроме того, обнаружение 20 новых вторжений во время эксперимента произошло без вмешательства специалиста, что подтверждает тезис об увеличении времени эффективной автономной работы.

	Обнаруженные вторжения	Пропущено вторжений (ошибка II рода)	Сессии, признанные нормальными	Ложные срабатывания (ошибка I рода)	Новые обнаруженные вторжения
Snort	281 (79,15%)	74 (20,85%)	9256 (94%)	590 (6%)	0
Разработанная СОВ	326 (91,84%)	29 (8,16%)	9561 (97,1%)	285 (2,9%)	20

Таблица 2. Сравнение результатов работы разработанной СОВ и Snort

### Заключение

Авторами отмечены недостатки известных из литературы систем обнаружения вторжений – высокая вероятность ложных срабатываний и частое вмешательство человека в работу системы. Благодаря способности самонастройки алгоритмов своей работы разработанная система обнаружения вторжения способна увеличить время автономной работы без вмешательства специалиста. Это свойство сохраняется и для случаев, когда текущая модель динамической байесовской сети перестает корректно описывать наблюдаемые свойства сеансов. Проведенные эксперименты показали большую эффективность предложенной системы в сравнении с системой Snort для исследованных типов атак с точки зрения способности обнаруживать новые вторжения и уменьшения ошибок первого и второго рода.

### Литература

1. Axelsson S. The base-rate fallacy and the difficulty of intrusion detection // ACM Transaction of Information System Security. – 2000. – V. 3. – P. 186–205.
2. Kruegel C., Mutz D., Robertson W., Valeur F. Bayesian event classification for intrusion detection // Proceedings of the 19th Annual Computer Security Applications Conference. – 2003. – P. 14–23.
3. Johansen K., Lee S. Network Security: Bayesian Network Intrusion Detection (BINDS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cs.jhu.edu/~fabian/courses/CS600.424/course\\_papers/samples/Bayesian.pdf](http://www.cs.jhu.edu/~fabian/courses/CS600.424/course_papers/samples/Bayesian.pdf), свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.10.2011).
4. Cemerlic A., Yang L., Kizza J.M. Network Intrusion Detection Based on Bayesian Networks // In Proceedings of SEKE. – 2008. – P. 791–794.
5. Аникеев М.В. Метод обнаружения аномалий на основе скрытых марковских моделей с поиском оптимального числа состояний // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Информационная безопасность». – Таганрог: ТРТУ, 2005. – С. 58–60.
6. The WinPcap Team. WinPcap Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.winpcap.org/docs/docs\\_412/html/main.html](http://www.winpcap.org/docs/docs_412/html/main.html), свободный. Яз. англ. (дата обращения 10.10.2011).
7. Murphy K.P. Dynamic bayesian networks: representation, inference and learning. The dissertation. – University of California Berkeley, 2002 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Thesis/thesis.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.11.2011).
8. Intel Corporation. Probabilistic Network Library – User guide and reference manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sourceforge.net/projects/openpnl>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 15.12.2011).

9. Vinh N.X., Chetty M., Coppel R., Wangikar P.P. GlobalMIT: Learning Globally Optimal Dynamic Bayesian Network with the Mutual Information Test (MIT) Criterion // Oxford Journals: Bioinformatics. – 2011. – V. 27. – P. 2765–2766.
10. Wilczynski B., Dojer N. BNfinder: Exact and efficient method for learning Bayesian networks Supplementary Methods Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bioputer.mimuw.edu.pl/software/bnf/supp.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.01.2012).
11. Sourcefire. Inc. Snort Users Manual 2.9.2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.snort.org/assets/166/snort\\_manual.pdf](http://www.snort.org/assets/166/snort_manual.pdf), свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.01.2012).
12. Mattord H., Whitman M. Principles of Information Security // Course Technology. – 2008. – P. 290–301.

- Арутюнов Сергей Аркадьевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, sergey.arutunov@gmail.com
- Дайнеко Вячеслав Юрьевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, daynekovy@yandex.ru

**УДК 004.931**

## **СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ**

**Е. Е. Бессонова, И. А. Зикратов, Ю. Л. Колесников, В. Ю. Роксов**

Рассматриваются механизмы идентификации пользователей в сети Интернет. Предложен способ формирования признакового пространства для идентификации пользователя, обоснован метод идентификации по вторичным характеристикам рабочей среды. Для проверки полученных результатов проведен вычислительный эксперимент.

**Ключевые слова:** идентификация, информативность, признак, кортеж, пользователь.

### **Введение**

Одной из важных задач в теории защиты информации является задача идентификации пользователя в сети Интернет. Актуальность данной задачи обусловлена целесообразностью идентификации субъектов сети при построении системы защиты информации, в частности, для выявления нарушителей.

Целью данной работы является определение рационального признакового пространства и способа идентификации, позволяющего повысить достоверность отождествления пользователей с имеющимися записями в базе данных информационного ресурса.

Для современных информационных систем применяются способы идентификации, основанные на хранении IP-адресов компьютеров посетителей и записи на компьютер пользователя данных Cookie. К недостаткам первого способа относится широкая распространенность динамических IP-адресов, выделяемых из пула провайдера в момент подключения пользователя, а также возможность использования в сети прокси-серверов, анонимайзеров и механизма NAT (Network Address Translation), что снижает степень достоверности идентификации пользователя [1]. Недостатком второго способа является привязка Cookie к конкретному браузеру, что снижает достоверность идентификации при использовании нескольких браузеров. Другим недостатком использования данной технологии является возможность подмены и уничтожения данных Cookie, а также отключения самого механизма пользователем.

Таким образом, оба способа не позволяют в ряде случаев достичь требуемой степени достоверности идентификации [2]. В то же время существуют способы получения данных, характеризующих рабочую среду пользователя. Под рабочей средой пользователя понимаются данные об операционной системе пользователя, шрифтах, параметрах экрана, плагинах, посещенных ссылках и т.п. Известны попытки использования перечисленных данных в качестве признаков идентификации [3]. Однако использование такой технологии влечет за собой увеличение объема трафика, что приводит к возрастанию времени загрузки сайта.

Таким образом, задача состоит в разработке способа, позволяющего осуществить рациональный выбор признаков, необходимых для повышения степени достоверности идентификации пользователя в сети Интернет.

### **Обоснование рационального признакового пространства**

Сформулированная задача решена в два этапа:

1. сбор и обработка данных с целью обоснования рационального признакового пространства;
2. обоснование метода идентификации пользователя в выбранном пространстве признаков.

В рамках первого этапа при помощи тестового сайта был произведен сбор данных о рабочей среде пользователя. Для этого при каждом посещении пользователя сайта собирались следующие данные:

время посещения; настоящий (контрольный) идентификатор пользователя (пользователь вводил логин и пароль); IP-адрес пользователя; строка-идентификатор User Agent; набор плагинов браузера, предоставляемый при помощи технологии Javascript, а также предоставляемая при помощи технологии Javascript информация о браузере и операционной системе, о языке операционной системы и разрешении экрана; список установленных шрифтов, собранный при помощи технологий ActiveX и Flash [3].

Все собранные признаки можно разделить на программные и аппаратные. К аппаратным можно отнести MAC-адрес, получаемый при помощи технологии Java, к программным – все остальные.

Совокупность перечисленных признаков (идентификаторов), кроме контрольных идентификаторов, вводимых пользователем, получила название кортежа. Именованный кортеж признаков, относящийся к конкретному пользователю, в данной работе называется профилем пользователя.

Очевидно, что тот или иной признак в различной мере способствует процессу отождествления кортежа с тем или иным профилем. Для выявления наиболее значимых для идентификации признаков введено понятие информативности признака. Под информативностью в работе понимается степень влияния признака в кортеже идентифицируемого объекта на результат отождествления с имеющимися профилями пользователей.

Для вычисления меры информативности каждого признака в работе использован метод регрессионного анализа. В качестве зависимой переменной было выбрано расстояние между кортежами признаков, в качестве набора независимых – набор бинарных расстояний между значениями признаков в отдельности. Полученные в результате регрессии коэффициенты при признаковых расстояниях были приняты за коэффициенты информативности для этих признаков [4].

Технология	Признак	Информативность
ETag(кэш браузера)	Идентификатор	0,88765812
Supercookie	Идентификатор	0,758318026
Cookie	Идентификатор	0,692106732
Java	MAC	0,507266254
IP	IP	0,50545622
Flash	Шрифты	0,36639634
Javascript	Плагины	0,320531032
ActiveX	Шрифты	0,310195763
CSS	Параметры экрана	0,230771305
TCP-протокол	Операционная система	0,185970125
Браузерные особенности	Браузер	0,118123798
Java	Шрифты	0,117587794
Javascript	Браузер	0,081847248
Javascript	Параметры экрана	0,069818299
Javascript	Часовой пояс	0,06374125
Javascript	Язык	0,035509264
User Agent	Браузер	0,029075342
User Agent	Операционная система	0,028753274
Java	Операционная система	0,0214338177
User Agent	Язык, кодировка	0,009661464
CSS + History + JS	Посещенные ссылки	0,006501557
Javascript	Операционная система	0,000394953

Таблица. Значения информативности признаков кортежа

Используемое в качестве критерия идентификации пользователей регрессионное уравнение для псевдорасстояния между двумя кортежами признаков имеет вид

$$Score(U_1, U_2) = \sum D_i \cdot a_i,$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – кортежи признаков;  $D_i$  – бинарное расстояние между  $i$ -ми признаками из кортежей;  $a_i$  – коэффициент информативности  $i$ -го признака;  $Score$  – профиль с минимальным значением, принимающийся за соответствующий эталон профиль. При этом установлен эмпирический порог  $Score_{max} = 3,47$ , при превышении которого эталон считается не подходящим ни к одному профилю. В этом случае создается новый профиль. Под бинарным расстоянием между кортежами признаков, а также

между значениями одного и того же признака понимается величина, принимаемая за 0 при совпадении кортежей и за 1 – при несовпадении. Полученные в результате регрессионного анализа значения информативности приведены в таблице.

Вывод о достоверности расчетов сделан на основе величины фактического F-критерия Фишера, а также величин P-значений. Величина фактического F-критерия Фишера оказалась близка к нулю, из чего сделан вывод о статистической значимости полученных в результате регрессионного анализа коэффициентов. Полученные величины P-значений также малы, из чего следует, что вероятность сделать ложный вывод на основе регрессионного уравнения близка к нулю.

### **Обоснование метода идентификации пользователя в пространстве признаков**

На втором этапе рассматривались методы идентификации пользователя по его кортежу путем сравнения его с накопленной базой.

Для решения задачи рассматривалось несколько методов:

- байесовский классификатор для вычисления вероятности идентичности профиля с эталоном;
- метод расчета корреляции между кортежами признаков;
- метод расстояния Левенштейна;
- метод прямого сравнения с эталоном.

Сравнение методов осуществлялось по двум параметрам: скорость и надежность. Надежность оценивалась как процент верно идентифицированных пользователей при увеличении процента измененных данных. За скорость принималось время работы алгоритма в секундах. Сравнительный результат работы методов представлен на рис. 1, 2.

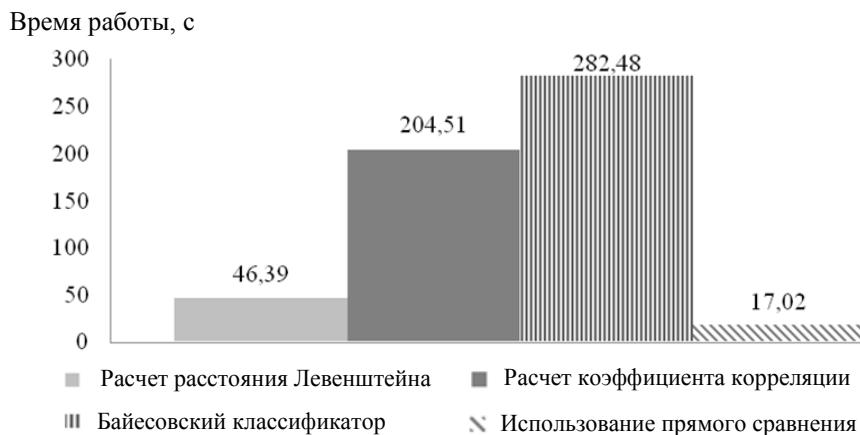


Рис. 1. Сравнение скорости алгоритмов идентификации:

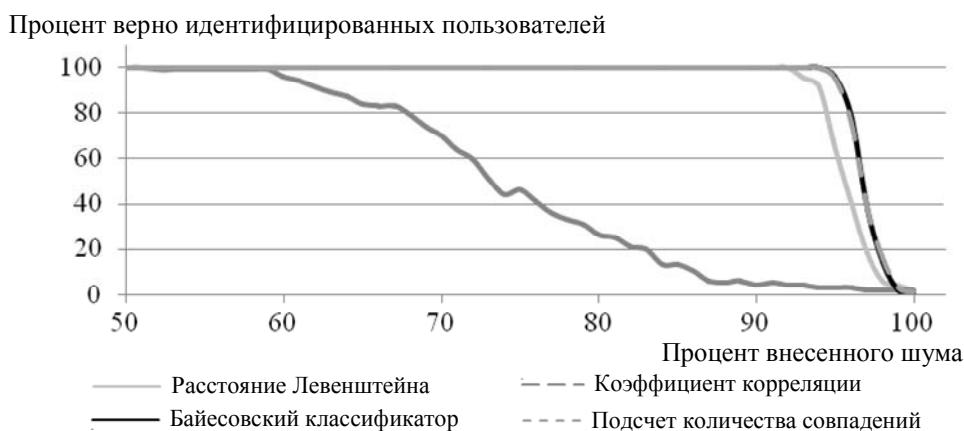


Рис. 2. Сравнение надежности алгоритмов идентификации. Искажения 50–100%

Как видно из графиков, метод прямого сравнения с эталоном показал результаты, по надежности сравнимые с байесовским классификатором, имея при этом самую высокую скорость работы из представленных методов. Кроме этого, он подходит для расчета бинарных расстояний между признаками. Именно он и был использован при идентификации пользователей.

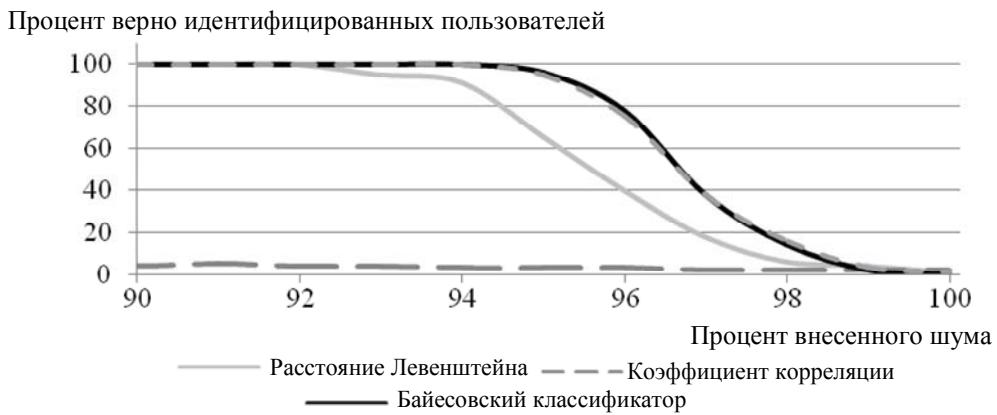


Рис. 3. Сравнение надежности алгоритмов идентификации. Искажения 90–100%

#### Проведение эксперимента

Для проверки полученных показателей информативности был проведен вычислительный эксперимент с целью оценки степени достоверности идентификации по кортежу признаков. В качестве входных данных были использованы учетные записи, выбранные в случайном порядке (эталоны); статистика учетных записей пользователей, заходящих на тестовый сайт не менее двух раз; признаки, упорядоченные по возрастанию информативности.

Цель эксперимента – определить зависимость степени достоверности идентификации от количества признаков, включенных в профиль пользователя. Для эксперимента был взят полный кортеж признаков, описанный в таблице. При помощи этого кортежа проводилось сравнение эталонов с пользовательскими профилями, полученными в результате сбора статистики. После этого суммарная информативность уменьшалась за счет удаления из кортежа признаков с рассчитанной наибольшей информативностью, затем с наименьшей информативностью. Результаты эксперимента отображены на графиках (рис. 4).

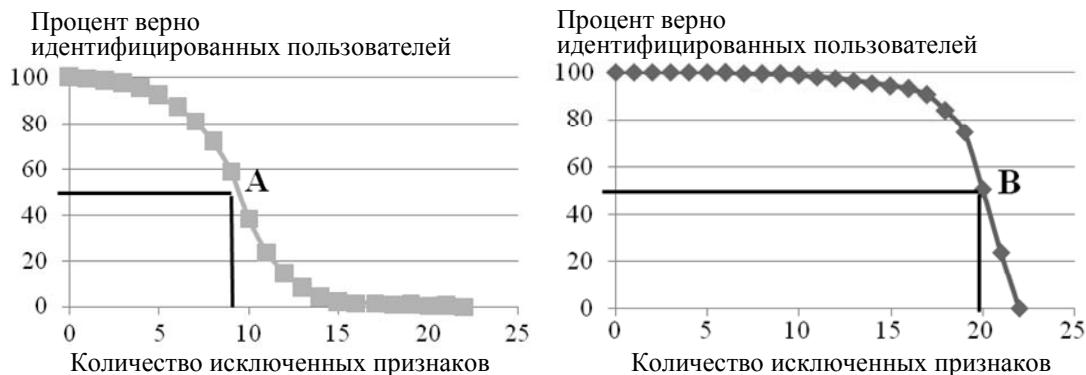


Рис. 4. Графики зависимостей достоверности идентификации от количества исключенных из кортежа признаков: сначала с высокой информативностью (а); сначала с низкой информативностью (б). Точки А и Б – точки, в которых происходит падение точности идентификации до уровня 50%

По горизонтальной оси располагается количество признаков, включенных в профиль пользователя, по вертикальной оси – процент правильно идентифицированных пользователей.

Оба графика монотонно убывают, что объясняется тем, что с уменьшением информативности уменьшается и процент распознанных эталонов. Прямой линией зафиксирован уровень, при котором происходит снижение точности идентификации в 2 раза. В точке А (рис. 4, а), находящейся на пересечении прямой и графика, видно, что зафиксированный уровень точности идентификации сохраняется при удалении до 9–10 самых информативных признаков, что подтверждает гипотезу об информативности признаков.

Из результата эксперимента следует, что наиболее информативными следует считать признаки, полученные с помощью технологий ETag (информативность равна 0,888), Supercookie (информативность равна 0,758). Признаки с меньшей информативностью – Cookie (информативность равна 0,692), MAC-адрес (информативность равна 0,507) и IP-адрес (информативность равна 0,505) также обладают высокой степенью информативности, однако их подмена является менее затратной для злоумышленника. Как видно из графика, одновременное удаление из кортежа вышеперечисленных признаков резко снижает степень достоверности идентификации.

На втором графике (рис. 4, б) также зафиксирован уровень, при котором происходит снижение точности идентификации в 2 раза. Точка В, находящаяся на пересечении прямой и графика, расположена дальше от начала координат, что обуславливается удалением из кортежа максимально информативных признаков в последнюю очередь.

Результаты расчета подтверждают, что степень достоверности идентификации зависит от набора признаков в кортеже. Был использован доверительный уровень степени идентификации в 95%. При отбрасывании, в первую очередь, наименее информативных признаков пересечение уровня в 95% происходит при переходе границы в 8 признаков. Отсюда следует, что рациональным признаком пространством для идентификации является наличие в кортеже восьми наиболее информативных идентификаторов: ETag, Supercookie, Cookie, MAC, IP, шрифты через Flash, плагины, шрифты через ActiveX. По сравнению с Cookie данный кортеж обеспечивает в 6,3 раза большую информативность (4,35 против 0,69).

Большая часть указанных в работе признаков применима для идентификации пользователей на мобильных устройствах. Очевидно, что при использовании мобильных устройств, планшетов, виртуальных машин и т.п., возможно изменение признакового пространства, однако сам подход остается прежним. Также предложенный механизм позволяет не противоречить системам идентификации на основе OpenID и социальных профилей.

Таким образом, задача повышения степени достоверности идентификации по сравнению с используемыми в настоящее время механизмами решена.

### **Заключение**

Для нейтральной среды (т.е. для пользователей, не стремящихся фальсифицировать идентификацию) будет целесообразно использовать только наиболее информативные признаки, не требующие подтверждения пользователя и дополнительных запросов к серверу.

Результаты исследований могут быть использованы для автоматизированной оптимизации систем обнаружения вторжений при выставлении адаптивного порога проверки для обнаружения объекта, который был ассоциирован с нарушителем.

Если среда использования является агрессивной или затруднено получение наиболее информативных признаков, то представляется возможным использование всего кортежа, либо набора информативных признаков. Целью дальнейшей работы авторов является исследование по определению показателей качества идентификации по вторичным признакам при использовании нарушителем наиболее распространенных способов маскировки – подмены и (или) удаления признаков.

### **Литература**

1. Understanding IP Addressing: Everything You Ever Wanted To Know [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://web.archive.org/web/20100821112028/http://www.3com.com/other/pdfs/infra/corpinfo/en\\_US/501302.pdf](http://web.archive.org/web/20100821112028/http://www.3com.com/other/pdfs/infra/corpinfo/en_US/501302.pdf), свободный. Яз. англ. (дата обращения 15.10.2011).
2. McKinkley K.: Cleaning Up After Cookies. iSec Partners White Paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.isecpartners.com/storage/white-papers/iSEC\\_Cleaning\\_Up\\_After\\_Cookies.pdf](http://www.isecpartners.com/storage/white-papers/iSEC_Cleaning_Up_After_Cookies.pdf), свободный. Яз. англ. (дата обращения 15.10.2011).
3. Кантор И. Способы идентификации в интернете [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://javascript.ru/unsorted/id>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 15.10.2011).
4. Таха Х.А. Введение в исследование операций. – 2-е изд. Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2005. – 912 с.

**Бессонова Екатерина Евгеньевна**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, bessonova@cit.ifmo.ru

**Зикратов Игорь Алексеевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, zikratov@cit.ifmo.ru

**Колесников Юрий Леонидович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, проректор, kolesnikov@mail.ifmo.ru

**Росков Владислав Юрьевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, vos@vos.uз

УДК 004.738.5,004.942

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ  
СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ  
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И.О. Датьев, А.В. Маслобоев

Для повышения эффективности информационного обеспечения прогнозирования развития региональных информационно-коммуникационных систем предложен метод комплексного исследования динамики развития этих систем с учетом параметров социально-экономической среды. Разработаны информационные технологии и средства автоматизированного построения системно-динамических моделей региональных информационно-коммуникационных систем.

**Ключевые слова:** информационные технологии, моделирование, системная динамика, региональные информационно-коммуникационные системы, прогнозирование.

**Введение**

В эпоху бурно развивающейся компьютеризации и интернетизации всех сфер жизни современного общества возрастают требования к качеству прогнозирования и обоснования решений в области развития региональных информационно-коммуникационных систем (РИКС). Под информационно-коммуникационной системой (ИКС) понимается система взаимодействия поставщиков информационно-коммуникационных услуг, пользователей, информационных ресурсов. К особенностям РИКС относится зависимость от социальной и экономической структуры пользовательской среды региона.

Моделирование нагрузки на различные элементы ИКС служит основным средством при разработке рекомендаций по техническим мероприятиям, направленным на улучшение функционирования этой системы. Знания об изменениях нагрузки, генерируемой пользователями, необходимы для эффективного развития информационно-коммуникационных услуг. В этом контексте особенно важным является получение перспективных оценок, способствующих формированию наилучших стратегий развития компаний, предоставляющих информационно-коммуникационные услуги. Кроме того, в современных условиях такие оценки необходимы и для эффективного решения задач прогнозирования и выработки стратегий информационно-коммуникационного развития регионов в целом, анализа существующего состояния информационно-коммуникационных услуг, разработки и внедрения новых услуг и информационно-коммуникационных технологий.

Меры, направленные на развитие ИКС, могут быть как оперативными (быстрая модификация для решения существующих проблем), так и стратегическими (некоторые превентивные меры для сведения к минимуму затрат на модификацию системы в будущем). При принятии решений по выбору и обоснованию технических мероприятий, носящих стратегический характер, необходимо прогнозировать поведение различных показателей, влияющих на принятие решений и зависящих от этих решений.

В случае, когда накоплено достаточное количество статистических данных за некоторый промежуток времени, для прогнозирования могут использоваться методы математической статистики. Главной проблемой при этом является необходимость оперирования большими объемами статистических данных за длительный период времени (рекомендуемый в методиках экономического анализа период – не менее 10 лет). Зачастую в регионах таких объемов статистических данных не существует.

Однако даже наличие необходимого объема статистических данных не является решением проблемы прогнозирования нагрузки на компоненты ИКС. Это связано с периодическим обновлением технологий передачи и обработки данных, существенно влияющих на производительность систем и на статистические характеристики информационно-коммуникационного трафика. Таким образом, с внедрением новых технологий накопленные статистические данные становятся неактуальными для прогнозирования нагрузки на ИКС. Как правило, длительность периодов до очередной смены технологий передачи данных в ИКС не превышает 5–7 лет. Исходя из этого, представляется целесообразным использовать другие виды моделирования с целью среднесрочного (5–7 лет) прогнозирования развития РИКС.

Нагрузка на ИКС зависит от показателей пользовательской среды. Основным показателем пользовательской среды в системах моделирования на сегодняшний день является количество пользователей. Однако каждый пользователь генерирует некоторую нагрузку на систему в зависимости от различных факторов. Одним из этих факторов является социально-экономическое положение пользователя: различия в уровне дохода, целях использования системы, информационных ресурсах порождают различный сетевой трафик. В связи с этим для решения задач прогнозирования нагрузки необходимо также прогнозировать число пользователей систем различных социально-экономических групп, т.е. прогнозировать значения параметров социально-экономической среды региона в целом. Проблемы проектирования информационно-

вычислительных систем с учетом влияния социально-экономических параметров рассматриваются в работах П.И. Братухина, Д.Г. Жимерина, В.И. Максименко, В.Н. Квасницкого, В.Г. Лисицына, В.А. Балыбердина. Базисом представленных в работе результатов исследований также являются работы отечественных и зарубежных авторов: В.М. Вишневского, В.А. Лексина, К.В. Воронцова, F.D. Smith, F.H. Campos, B. Mah, J. Cao, W.S. Cleveland, S. Floyd, V. Paxson, K. Lan, J. Heidemann, P. Barford и M. Crovella.

В настоящее время одним из эффективных методов изучения сложных динамических систем, успешно развивающимся во многих странах, является предложенный в 1960-х г.г. Джем Форрестером специализированный метод имитационного моделирования – метод системной динамики. Системная динамика не требует построения математической модели исследуемого объекта в традиционной форме, а дает исследователю инструментарий для моделирования в виде реализованных на компьютере аналитических описаний системных элементов и связей между ними.

Таким образом, в условиях ограниченной доступности достоверных статистических данных о РИКС, необходимости учета разнородных факторов, а также высоких требований к оперативности получения результатов наиболее приемлемым способом прогнозирования параметров нагрузки на подобные системы представляется построение системно-динамической модели РИКС, основанной на легко доступных (в смысле времени получения и стоимости) данных.

Теоретическая значимость представленных в настоящей работе результатов исследований заключается в том, что для повышения эффективности информационного обеспечения прогнозирования развития РИКС разработан метод комплексного исследования динамики развития РИКС с учетом параметров социально-экономической среды [1]. Метод обеспечивает среднесрочное (5–7 лет) прогнозирование нагрузки на компоненты РИКС. Отличительными особенностями разработанного метода являются учет информационных потребностей пользователей различных групп, возможность учета динамики параметров социально-экономической среды и технических параметров ИКС, автоматизированное формирование проблемно-ориентированных имитационных моделей.

С точки зрения практической значимости предложенный метод является основой для создания инструментальных сред имитационного моделирования, обеспечивающих эффективное применение современных средств математического моделирования и вычислительного эксперимента для решения прикладных проблем прогнозирования и планирования развития РИКС [2]. Учет в процессе моделирования влияния социально-экономических факторов обеспечивает повышение эффективности решения задач планирования развития РИКС за счет возможности реализации перспективных программно-технических решений, в наибольшей мере адекватных ожидаемому состоянию социально-экономической среды, в которой функционирует РИКС.

#### **Обзор существующих методов и средств построения моделей трафика ИКС**

На сегодняшний день основное внимание исследователей сосредоточено на моделировании параметров преобладающего типа трафика – веб-трафика. Наибольшее развитие получили два направления моделирования параметров трафика, определяемые перспективной целью моделирования, т.е. областью использования моделей. Это модели веб-трафика, используемые для веб-майнинга, и модели, ориентированные на использование в симуляторах ИКС для генерирования синтетического сетевого трафика. В первом случае основной акцент делается на моделирование поведения пользователя, а параметры трафика, лежащие в основе моделей – это типовые цепочки навигации, абсолютные и относительные временные характеристики использования веб-сайтов и отдельных страниц. По сути дела, в данном случае моделируется не столько трафик как таковой, сколько поведение пользователя ИКС, а разрабатываемые модели ориентированы, в первую очередь, на использование владельцами веб-сайтов.

Второе направление, в противовес первому, во главу угла ставит именно трафик и определяющие его характеристики. Область применения таких моделей – тестирование компонентов ИКС на специальных испытательных стендах, имитирующих работу реальной системы, а также эксперименты с реальными компьютерными системами в различных режимах работы, моделируемых с помощью имитации источников трафика. Моделей такого типа в настоящее время существует множество, среди них можно выделить следующие основные группы.

- Модели систем массового обслуживания. Трафик представляется как случайный (стохастический) – марковский или самоподобный – процесс поступления в систему массового обслуживания заявок на обслуживание. В моделях такого типа внимание ограничивается уровнем сетевых пакетов и не учитываются поведенческие модели источников трафика.
- Модели уровня TCP-соединения, в отличие от предыдущих, базируются на имитации источников сетевых пакетов и позволяют учитывать активный характер протокола – реакцию на перегрузки в системе и управление потоком. От моделей уровня приложения они отличаются набором параметров трафика, составляющих модель. В данном случае это статистические характеристики TCP-сессий. Преимущество по сравнению с моделями уровня прикладных протоколов – возможность моделирования трафика, представляющего собой смесь данных от нескольких прикладных протоколов.

- Модели уровня приложения имеют целью моделирование трафика прикладных протоколов, прежде всего – HTTP. Моделируемые параметры – размеры HTTP-запросов и откликов, временные задержки, связанные с ментальной деятельностью пользователя или с обработкой запроса сервером.

Как правило, шаг дискретизации по времени моделей этих трех типов варьируется от миллисекунд до секунд. Однако для получения усредненных показателей нагрузки на систему моделировать трафик с точностью до миллисекунд не требуется. Известными работами в области проектирования информационно-вычислительных систем и, в частности, расчета нагрузки на системы являются работы П.И. Братухина, В.И.Максименко, М.Л. Селезнева. В данных работах описывается вычислительная модель расчета суммарного объема нагрузки за промежуток времени от суток до года. Основным постулатом является предположение о том, что количественные характеристики информационных процессов, ассоциированных с некоторой социально-экономической системой, зависят от внутренней структуры и значений параметров этой системы. При этом величина оценки объемов информационных процессов в региональной социально-экономической системе в целом определяется как сумма аналогичных оценок ее компонентов. Каждая из последних, в свою очередь, зависит от типа компонента и его объемной характеристики: для каждого типа компонента определяется коэффициент его удельной информацио-емкости и искомая оценка объема информационных процессов вычисляется как произведение коэффициента информацио-емкости на значение объемной характеристики данного конкретного элемента системы.

В качестве компонентов расчетной модели можно использовать территориальные (районы, области) и функциональные (отрасли экономики) элементы социально-экономической системы различного уровня детализации. При делении по функциональному признаку на самом общем уровне это могут быть отрасли экономики. В этом случае методика, разумеется, применима лишь для систем большого масштаба и способна дать лишь весьма общие оценки, однако для крупных элементов, как правило, проще оценить их удельную информацио-емкость.

Для расчета информационных потребностей элементов социально-экономической системы используется два метода – распределительный и прямой.

- Распределительный метод может быть использован, когда известно значение информационной потребности пользователей для крупного региона и требуется распределить это значение между его подрегионами.
- Прямой метод расчета позволяет обойтись без оценки суммарной информационной потребности – вместо этого в качестве базового показателя, на основе которого рассчитываются информационные потребности функциональных и территориальных элементов социально-экономической системы, используется усредненная базовая информационная потребность одного пользователя. Информационная потребность региона вычисляется как сумма информационных потребностей пользователей, ассоциированных с различными отраслями экономики, а информационная потребность региона более высокого уровня (области) – как сумма соответствующих потребностей его подрегионов (районов и городов).

В ходе исследований при расчете характеристик нагрузки использованы процедуры, подобные прямому методу расчета информационной потребности, по причине отсутствия сведений о суммарной информационной потребности.

В существующих системах моделирования нагрузки ИКС не учитываются предпочтения пользователями различных информационных ресурсов, зависящие от социально-экономического аспекта (при надлежность пользователя к некоторой возрастной, социальной, экономической группе), влияющие на генерируемый пользователем трафик.

Кроме того, в рассмотренных работах не учитывается динамика социально-экономических показателей пользовательской среды, однако в некоторой среднесрочной перспективе пользовательская среда может претерпеть изменения (перераспределения в экономических отраслях, социальных группах, миграционные процессы), что влияет на объемы трафика, генерируемого популяциями пользователей.

### **Технология автоматизированной постановки задач прогнозирования характеристик РИКС с учетом влияния социально-экономических параметров**

В рамках исследований – технология автоматизированной постановки задач прогнозирования характеристик РИКС с учетом влияния социально-экономических параметров на основе разработанного декларативного представления компонентов этих систем. Предложены алгоритмы (составляющие технологию) формирования целостного описания частных задач и примеры постановок задач прогнозирования характеристик РИКС в терминах декларативного представления, алгоритмы оценки текущего состояния компонентов РИКС.

Декларативное представление компонентов РИКС имеет следующий вид:

$$RICS = \{U, DS, SG, UT, PN, R, RC, C, Attr\},$$

где  $U$  – множество пользователей;  $DS$  – множество демографических секторов пользователей;  $SG$  – множество социально-экономических групп пользователей;  $UT$  – множество пользовательских типов;  $PN$  –

множество поставщиков информационных услуг;  $R$  – множество информационных ресурсов;  $RC$  – множество классов информационных ресурсов;  $C$  – множество отношений, среди которых  $T$  – отношение «трафик»:  $T \subseteq U \times PN \times RC = \{(u_i, pn_j, rc_k) \mid u_i \in U, pn_j \in PN, rc_k \in RC\}$ , обозначив  $t_{i,j,k} = (u_i, pn_j, rc_k)$ , получаем  $T = \{t_{i,j,k}\}$ ;  $Attr$  – множество атрибутов. На более низком уровне представления происходит атрибутирование элементов этих множеств некоторыми группами характеристик и объединение элементов множеств по определенным признакам этих групп. Множество атрибутов:  $Attr = \{UAt, PNAAt, RAt, CAt, mtime, Scn\}$ , где  $UAt$  – атрибуты пользователей:  $UAt = \{DSAt, SGAt, UTAt\}$ , где  $DSAt$  – множество атрибутов демографических секторов,  $SGAt$  – множество атрибутов социально-экономических групп,  $UTAt$  – множество атрибутов пользовательских типов;  $PNAAt$  – атрибуты поставщиков информационных услуг; атрибуты информационных ресурсов  $RAt = \{RCAt\}$ , где  $RCAt$  – атрибуты классов информационных ресурсов (каждый ресурс может быть представлен как класс, количество объектов которого равно 1);  $CAt$  – атрибуты отношений;  $mtime$  – временной промежуток моделирования:  $mtime = (mtbeg, mtend, mper)$ , где  $mtbeg$  – начальное модельное время,  $mtend$  – конечное модельное время,  $mper$  – интервал вычисления характеристик трафика;  $Scn = \{scn_z\}, z = [1; N_{Scn}]$  – множество сценариев (сценарных изменений параметров компонентов РИКС),  $N_{Scn}$  – количество сценариев,  $scn_z = \{\langle objn, parn, Mod \rangle_i\}, i = [1; N_i]$  – сценарное изменение параметра,  $N_i$  – количество изменений,  $objn$  – имя объекта,  $parn$  – имя параметра, принадлежащего объекту, содержащееся во множестве атрибутов;  $Mod$  – множество модификаторов.

Декларативное представление включает средства для задания сценариев изменения структуры и параметров ИКС с помощью множества сценарных изменений. Каждое сценарное изменение представляет собой кортеж, содержащий идентификатор объекта модели, параметры которого будут изменяться, идентификатор модифицируемого параметра, момент модельного времени, в который активизируется функция модификации, а также собственно функция-модификатор, задающая правила изменения данного параметра. Предложенный механизм задания сценариев позволяет учесть при моделировании явления, которые влияют на функционирование ИКС, но не могут быть априорно заданы при определении начальных параметров для моделирования.

Рассматривать и моделировать каждого пользователя в отдельности – трудоемкий, ресурсозатратный процесс. В связи с этим в работе выделяются пользовательские типы, определяющие характеристики пользователей относительно используемых ими классов ресурсов. Кроме того, существует возможность выделять целевые группы пользователей – группы, которые представляют интерес (для заказчика) с точки зрения потребления трафика, т.е. производить разбиение множества пользователей, например, на демографические сектора, социально-экономические группы и т.д. Пусть  $GD$  – целевое разбиение пользователей (разбиение множества  $U$ ),  $GD = \{gd_\alpha\}$ , где  $\alpha = [1; N_{GD}]$ ,  $N_{GD}$  – количество блоков разбиения,  $gd_\alpha = \{u_i^\alpha\}$ ,  $gd_\alpha \neq \emptyset$ ,  $gd_\alpha \cap gd_\beta = \emptyset$ ,  $\beta = [1; N_{GD}]$ ,  $\alpha \neq \beta$ , множество  $U$ , на котором произведено целевое разбиение для удобства представления, обозначим  $U^{GD}$ , тогда  $U^{GD} = \bigcup_{\alpha=1}^{N_{GD}} gd_\alpha$ .

При использовании целевого разбиения пользователей отношение «трафик» выглядит следующим образом:  $T^{GD} = \{t^{gd}_{a,j,k}\}$ , где  $t^{gd}_{a,j,k} = (gd_a, pn_j, rc_k)$ , где  $gd_a$  – блок разбиения множества  $U$ ;  $pn_j$  – провайдер  $j$ , т.е. рассматривается отношение между блоком целевого разбиения пользователей, провайдером и классом ресурса. При этом с точки зрения потребления трафика целевые группы представляются как совокупность пользователей различных типов, поэтому необходимо задать соотношения, определяющие состав данных групп относительно пользовательских типов. В результате отдельный пользователь не выделяется, но подразумевается, учитывается.

Таким образом, созданное декларативное представление определяет компоненты РИКС, связи между компонентами и атрибуты. Постановка задачи осуществляется с помощью разработанных алгоритмов. В процессе постановки осуществляется контроль целостности – задание всех необходимых атрибутов, проверка количественных балансов. Алгоритмы постановки задач и оценки текущего состояния компонентов РИКС реализованы в программном модуле-конфигураторе, основным результатом работы которого является файл спецификации задачи, содержащий целостное описание задачи.

### **Шаблоны системно-динамических моделей компонентов РИКС**

Разработка системно-динамических (СД) шаблонов осуществлялась поэтапно: извлечение параметров декларативного представления РИКС, связанных с объектом разработки, построение диаграмм причинно-следственных связей, построение СД-модели, инициализация, тестирование полученного фрагмента СД-модели.

Шаблон «Демографический сектор» позволяет создавать модели для получения прогнозного количества населения различных возрастных категорий. Основные характеристики шаблона – доли пользователей демографического сектора среди каждой социально-экономической группы или типа пользователей, смертность, количество людей, количество родившихся, нижняя и верхняя возрастные границы, количество иммигрирующих, количество эмигрирующих.

Модели социально-экономических групп пользователей, построенные на базе соответствующего системно-динамического шаблона, позволяют прогнозировать количество населения, принадлежащего

каждой из этих групп. Разбиение населения на группы может производиться на основе различных социально-экономических аспектов, таких как занятость в экономической отрасли, принадлежность организации, принадлежность социальной группе. Перечень основных параметров шаблона социально-экономических групп пользователей: доли пользователей социально-экономической группы среди каждого типа пользователей или демографического сектора; численность; уровень доходов пользователей социально-экономической группы; уровень привлекательности (популярности) социально-экономической группы; емкость группы (максимальная численность).

Модели поставщиков информационных услуг, построенные на основе разработанного СД-шаблона, позволяют прогнозировать количество пользователей различных типов, демографических секторов, социально-экономических групп для каждого поставщика информационных услуг.

Основные характеристики шаблона системно-динамических моделей поставщиков информационных услуг – доли абонентов определенного тарифного плана различных социально-экономических групп, демографических секторов, типов пользователей; количество пользователей тарифного плана; средняя цена для абонента переданной единицы информации; скорость передачи данных; бесперебойность работы провайдера; абонентская плата за определенный промежуток времени.

Разработанные системно-динамические шаблоны социально-экономических групп и поставщиков информационных услуг предоставляют возможность строить модели, позволяющие прогнозировать количество пользователей ИКС с учетом динамики показателей социально-экономической среды региона и технико-экономических характеристик предоставляемых информационных услуг.

Разработанный шаблон моделей типов пользователей представляет собой набор характеристик, описывающих поведенческие особенности пользователя. К поведенческим характеристикам пользователя относятся количество сеансов обращения к информационным ресурсам, количество запрошенных в течение сеанса страниц, процентное соотношение количества запрошенных информационных страниц различных классов ресурсов. Кроме того, в шаблоне модели типа пользователя присутствуют атрибуты, определяющие технические и экономические требования к предоставляемым информационно-коммуникационным услугам.

Класс информационного ресурса представляет собой агрегированную характеристику, являющуюся сочетанием количества и объема объектов ресурса с поставленным ей в соответствие названием, отражающим тематику и предназначение ресурса. С точки зрения моделирования трафика необходимо выделять такие классы ресурсов, которые порождают различный трафик. По отношению к контенту данных ресурсов, можно сказать, что они должны обладать некоторыми структурными (дизайнерскими) особенностями, например, соотношением текста и графики на страницах. Подобные особенности с технической точки зрения выражаются в определенном количестве размещенных на страницах ресурсов объектов специфического размера. Основные характеристики шаблона классов информационных ресурсов – размер страницы ресурса, размер «тел» страниц, количество объектов на странице, размер объектов ресурса.

Модели типа пользователя и класса ресурса позволяют учитывать не только общее количество пользователей информационных систем, но и специфику информационных ресурсов, необходимых для решения задач типичных представителей различных социально-экономических групп пользователей.

Разработанные шаблоны используются при создании системно-динамических моделей для решения задач прогнозирования характеристик РИКС.

### Технология синтеза системно-динамических моделей РИКС

Разработана технология синтеза СД-моделей, основанная на шаблонах типовых компонентов РИКС и целостном формализованном описании задач прогнозирования характеристик ИКС. Кроме того, создана инструментальная среда постановки задач и реализации имитационного моделирования на базе предложенного в работе метода комплексного исследования динамики развития РИКС.

При формировании имитационных моделей ИКС выделяются два основных этапа:

1. постановка задачи;
2. формирование имитационной модели необходимой структуры и ее параметризация.

Первый этап заключается в задании структуры моделируемой системы, т.е. состава типовых компонентов РИКС – участников моделирования, задании цели моделирования, задании исходных значений параметров, сценариев развития событий. По сути, постановка задачи – процесс параметризации фрагмента декларативного представления, который производится с помощью разработанной технологии автоматизированной постановки задач.

Формирование структуры имитационной модели выполняется на основе целостного описания задачи с помощью разработанных алгоритмов и сводится к созданию и размещению подмоделей, внутри которых в дальнейшем размещаются шаблоны, заданию необходимых информационных связей между ними, созданию интерфейсных переменных (отвечающих за обмен информацией между подмоделями), инициализации модели. Для автоматизации второго этапа формирования имитационных моделей реализован программный модуль генерирования СД-моделей на основе файла спецификации задачи.

Предложенный метод комплексного исследования развития РИКС положен в основу разработанной инструментальной среды системно-динамического моделирования РИКС. Основные компоненты инструментальной среды – модуль конфигурирования, файл спецификации, генератор СД-модели, шаблоны, исполняемая имитационная модель, функциональное ядро системы имитационного моделирования Anylogic. В рамках применения инструментальной среды была создана СД-модель РИКС Кольского НЦ РАН. Информация об объемах трафика, ассоциированного с основными подразделениями Кольского НЦ и соответствующими провайдерами, полученная в результате моделирования (временной диапазон, для которого было проведено моделирование – 2006–2012 г.г.) согласуется с накопленными в коммуникационном центре Кольского НЦ РАН данными за период 2006–2009 г.г. Другим примером практического применения инструментальной среды является построение СД-модели ИКС одного из интернет-провайдеров г. Апатиты. Результаты прогнозирования объемов трафика, ассоциированных с различными группами пользователей, соответствуют накопленным данным за период 2006–2009 г.г. Результаты моделирования использованы при формировании стратегии развития этих ИКС.

### **Заключение**

В ходе исследований сформулирована и решена научно-техническая задача повышения эффективности информационного обеспечения прогнозирования развития РИКС. Разработан метод комплексного исследования динамики развития РИКС на базе имитационного моделирования с учетом широкого спектра факторов:

1. динамика развития социально-экономической среды для прогнозирования численности групп пользователей;
2. динамика экономических и технических характеристик, предоставляемых провайдерами информационных услуг;
3. контент информационных ресурсов, влияющий на трафик, генерируемый при использовании этих ресурсов;
4. различная интенсивность влияния разных типов пользователей на формирование трафика ИКС.

В работе были получены следующие основные результаты.

- Разработана технология автоматизированной постановки задач прогнозирования характеристик РИКС с учетом социально-экономических параметров. Технология основана на использовании предложенного декларативного представления компонентов РИКС в виде теоретико-множественных отношений. Алгоритмы, реализующие технологию, обеспечивают интерактивное формирование формализованного описания задач и анализ его целостности.
- Создана технология синтеза системно-динамических моделей РИКС. Технология обеспечивает снижение трудоемкости формирования проблемно-ориентированных имитационных моделей за счет повторного использования типовых модельных компонентов и автоматизации процесса синтеза модели на основе декларативных описаний задач предметной области.
- Разработаны модельные шаблоны компонентов ИКС, представляющие собой непараметризованные фрагменты системно-динамических моделей, определяющие структуру внутренних причинно-следственных взаимосвязей социально-экономических и технических компонентов. Шаблоны служат основой синтезируемых проблемно-ориентированных имитационных моделей РИКС.
- Разработана инструментальная среда постановки задач и реализации имитационного моделирования, обеспечивающая комплексное исследование динамики развития РИКС с учетом социально-экономических параметров.

На базе полученных результатов построены имитационные модели РИКС с целью оценки и анализа перспективных стратегий их развития.

Полученные результаты смогут найти применение при реализации «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г.» [3] и «Стратегии развития информационного общества до 2015 г.» на территории Мурманской области, а также могут быть использованы при выработке единых принципов и стратегий развития ИКС на уровне регионов и населенных пунктов в целом, администрации городов и населенных пунктов.

### **Литература**

1. Датьев И.О., Путилов В.А., Шишаев М.Г. Метод прогнозирования показателей функционирования региональных информационно-коммуникационных систем // Программные продукты и системы. – 2009. – № 3 (87). – С. 16–19. Датьев И.О., Маслобоев А.В. Имитационное моделирование развития региональных информационно-коммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – Т. 8. – № 2. – С. 51–56.
2. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Информационно-аналитическая поддержка управления безопасностью развития Арктических регионов России: задачи, методы, технологии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 143–145.

**Датьев Игорь Олегович**

– Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, аспирант, datyev@iimm.kolasc.net.ru

**Маслобоев Андрей Владимирович**

– Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, кандидат технических наук, доцент, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

**УДК 339.3:351.82**

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТЕЙКХОЛДЕРОВ В ХОДЕ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ ТОРГОВОЙ ПОЛИТИКИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

**Р.А. Луговской, Д.В. Соловьев, В.Ю. Сысоев**

Выявлены стороны, заинтересованные в формировании и реализации эффективной торговой политики. Проведен анализ современного взаимоотношения стейкхолдеров и предложены направления их взаимодействия.

**Ключевые слова:** торговля, предпринимательство, государственное регулирование.

### **Введение**

Функционирование торговли в определенной степени зависит от эффективности взаимодействия стейкхолдеров, интересы которых нуждаются в согласовании. В связи с этим формирование и реализация торговой политики не должны ограничиваться интересами ритейла. Стратегические ориентиры в сфере торговли и пути их достижения должны учитывать работу всех субъектов внешнего взаимодействия отрасли. В работе авторы пытаются их охарактеризовать, определить их роли и комплекс действий, которые целесообразно осуществлять в процессе формирования стратегии сферы торговли.

Стейкхолдеры (Stakeholders) – все стороны, заинтересованные в финансовых и иных результатах деятельности компании: акционеры, кредиторы, держатели облигаций, сотрудники компании, клиенты, руководство, общество в целом и правительство [1].

Стратегия развития торговли обусловливается функционированием совокупности коммерческих организаций, выполняющих различные функции цепи товародвижения – предприятий-производителей товаров (промышленных и сельскохозяйственных), транспортных организаций, оптовых базах, складов и пр. Кроме того, в современных условиях деятельность предприятий торговли невозможна без организаций, способных оказать поддержку торговому бизнесу в рамках аутсорсинга – учебных заведений, рекрутинговых, консалтинговых фирм, рекламных агентств и т.д. Опыт их взаимодействия в рыночных условиях, особенно в условиях кризиса, показал, что на данный момент рыночные инструменты не обеспечивают реализацию интересов общества в целом и отдельных участников потребительского рынка. Необходим постоянный диалог представителей бизнеса и других держателей интересов в сфере торговли с органами власти по вопросам выработки стратегических инициатив.

Предлагается выделить и рассмотреть более подробно следующие группы стейкхолдеров, которые должны активно взаимодействовать между собой для успешного развития торговли:

- органы государственной власти;
- предприниматели;
- общественные организации;
- общественность – потребители, а также другие участники (инвесторы, кредиторы и т.п.).

### **Взаимодействие заинтересованных сторон в формировании эффективной политики развития сферы торговли Санкт-Петербурга**

**Органы государственной власти.** Координирующую роль в разработке стратегии развития торговли играют органы государственной власти. Их задача заключается в том, чтобы обобщить позиции заинтересованных групп и отразить их в разрабатываемых нормативных актах.

Конечно же, федеральные органы государственной власти должны взаимодействовать с региональными и муниципальными органами власти. Рассмотрим схему взаимодействия стейкхолдеров и ее особенности в условиях крупного мегаполиса на примере Санкт-Петербурга.

В соответствии с Конституцией Российской Федерации и Уставом Санкт-Петербурга [2], систему органов государственной власти Санкт-Петербурга образуют:

- постоянно действующий высший и единственный законодательный (представительный) орган государственной власти Санкт-Петербурга – Законодательное Собрание Санкт-Петербурга;
- Правительство Санкт-Петербурга – высший исполнительный орган государственной власти Санкт-Петербурга, возглавляемый высшим должностным лицом Санкт-Петербурга – Губернатором Санкт-Петербурга, и возглавляемые Правительством Санкт-Петербурга иные исполнительные органы государственной власти Санкт-Петербурга, составляющие систему исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга – Администрацию Санкт-Петербурга;

- судебные органы государственной власти – Уставный суд Санкт-Петербурга, мировые судьи;
- отдельно выделены органы местного самоуправления.

В Законодательном Собрании Санкт-Петербурга образована Постоянная комиссия по промышленности, экономике и собственности (ПКПЭС) [3]. Важнейшими направлениями ее деятельности, непосредственно затрагивающими интересы торговли, являются:

- поддержка городской промышленности, агропромышленного комплекса, антимонопольная деятельность и вопросы банкротства;
- рассмотрение региональных проблем экономической реформы в сфере предпринимательства, включая налоговую, инвестиционную деятельность;
- рассмотрение вопросов по торговле, транспортному комплексу, собственности, таможенной политике, среднему и малому бизнесу;
- защита субъектов отечественного рынка.

Стратегии, планы и программы должны разрабатываться Комитетом экономического развития промышленной политики и торговли (КЭРППиТ) и выноситься на утверждение Правительства Санкт-Петербурга<sup>1</sup>. Законодательное Собрание создает законодательные условия для разработки таких документов. Взаимодействие в процессе выработки стратегических решений, на наш взгляд, целесообразно осуществлять на основе создаваемых рабочих групп. В состав такой группы должны входить представители законодательных и исполнительных органов государственной власти, ответственных за данное направление, представители крупных и малых организаций сферы торговли и взаимосвязанных с ней сфер деятельности, общественных организаций, учебных и научно-исследовательских институтов.

Согласование интересов стейкхолдеров может осуществляться через профильные комиссии, созданные для предварительного рассмотрения и подготовки вопросов, относящихся к компетенции ПКПЭС, и экспертный совет – совещательный и консультативный орган, призванный решать вопросы развития различных областей рынка в Санкт-Петербурге и подготовки предложений по совершенствованию нормативно-правовой базы. Одновременно могут создаваться профильные экспертные советы и рабочие группы для целенаправленного рассмотрения узкоспециализированных вопросов. Членами экспертного совета, как правило, являются специалисты в определенной области или заинтересованные лица – предприниматели, которые утверждаются на очередном заседании ПКПЭС. Роль экспертных советов при государственных структурах достаточно значима, так как люди, которые туда входят, – специалисты и (или) теоретики (ученые) высокого уровня, и их предложения основываются как на практическом опыте, так и на теоретических знаниях, что помогает в выработке оптимальных решений.

В 2004 г. был создан Общественный совет по развитию малого предпринимательства при Губернаторе Санкт-Петербурга, что явилось важным шагом в диалоге бизнеса и власти. В него входят представители различных общественных организаций, поддерживающих и отстаивающих интересы предпринимателей. В 2005 г. были созданы структурные подразделения Общественного совета при Главах администраций районов для координации действий в области предпринимательства.

Состояние и перспективы развития торговли в значительной степени определяются результативностью работы Правительства Санкт-Петербурга. В состав Правительства Санкт-Петербурга входят вице-губернаторы, которые назначаются Губернатором по согласованию с Законодательным Собранием Санкт-Петербурга [4].

Один из вице-губернаторов Санкт-Петербурга отвечает за решение вопросов экономического развития, налоговой, финансовой, промышленной и научно-технической политики, развития потребительского рынка, бюджетными вопросами, а также обеспечивает взаимодействие Правительства Санкт-Петербурга с органами и организациями, осуществляющими деятельность в данной сфере. Помимо этого, в связи с участием властей в различными рейдерства создана межведомственная комиссия при Правительстве Санкт-Петербурга по вопросам экономической безопасности, возглавляемая этим же вице-губернатором, с контролирующими полномочиями.

Правительство Санкт-Петербурга формирует исполнительные органы власти. На развитие предпринимательства в торговле непосредственно влияет деятельность следующих комитетов:

- экономического развития, промышленной политики и торговли (КЭРППиТ);
- по управлению городским имуществом (КУГИ);
- финансов.

КЭРППиТ образован для разработки и реализации государственной социально-экономической политики в Санкт-Петербурге, определения методов государственного регулирования экономики, организаций и межотраслевой координации деятельности исполнительных органов государственной власти

---

<sup>1</sup> Прим. авт. Стратегия торговли Санкт-Петербурга на долгосрочную перспективу, на наш взгляд, должна утверждаться Законодательным Собранием Санкт-Петербурга.

Санкт-Петербурга по вопросам функционирования государственного сектора экономики Санкт-Петербурга, внутренней торговли, сферы услуг и тарифной политики.

Для эффективной реализации стратегического процесса федеральные органы государственной власти Российской Федерации должны внести изменения в Федеральный закон о торговле и стратегию развития торговли Российской Федерации. Необходимо особое внимание уделить продаже продовольственных товаров и сельскохозяйственной продукции, в структуре которых преобладает импорт. Значительная доля импорта по некоторым группам товаров обусловлена не только ассортиментной политикой ритейла, но и неразвитостью рынка этих товаров, отсутствием достаточного предложения. Это относится, прежде всего, к мясной, рыбной и плодоовощной продукции. Преобладание импорта среди продуктов питания наносит ущерб продовольственной безопасности России.

Правительство Санкт-Петербурга на основе принятых законов Санкт-Петербурга о торговле и ярмарках, а также всесторонних консультаций с заинтересованным предпринимательским сообществом и представителями общественности должно подготовить проект стратегии развития торговли в Санкт-Петербурге. Мы убеждены, что только после этого нормативно-правового акта можно разрабатывать программы и формировать планы развития торговой деятельности в крупном мегаполисе.

Важным является также выявление полного перечня существующих проблем в сфере торговли и создание механизмов, позволяющих их решить.

Взаимоувязанная, совместная с заинтересованными сторонами и поэтапная реализация комплекса мер по различным направлениям, осуществляемая органами государственной власти при всесторонней поддержке населения, позволит, на наш взгляд, обеспечить эффективную работу экономической системы российского государства.

**Предприниматели и банковские институты.** Предпринимательство в сфере торговли в рамках выбранной рыночной ниши должно способствовать эффективному функционированию бизнеса с учетом интересов стейкхолдеров, а также требований современных стандартов корпоративной социальной ответственности региона. Для этого необходимы:

- интеграция новых взаимовыгодных видов деятельности предприятий-производителей и торговли, не входящей в крупные торговые сети;
- развитие сети независимых продавцов;
- использование дистанционных форм торговли;
- разработка системы стимулирования и мотивации;
- объединение в общественные организации и другие союзы;
- разработка и наличие собственных антикризисных программ.

Мероприятия, перечисленные в рамках каждого блока, детализируются и координируются с учетом возможности взаимной поддержки и непротиворечивости. При таком подходе к формированию региональной стратегии развития торговли обеспечивается комплексность решения стержневых задач в сфере торговли на основе ресурсного синергизма. Реализация мер по обеспечению работы предприятий торговли сможет создать условия для привлечения профессионалов, которые способны эффективно развивать предприятия и сферу торговли в целом, а также формировать адекватные стратегии, программы и планы фирм. Открытость коммерческих предприятий позволит создать положительный имидж фирмы на внутреннем и внешнем рынках, облегчит получение кредитов на развитие на выгодных условиях, снизит внутренние конфликты сотрудников и возможные судебные издержки в связи с разногласиями и обманом, который присущ современной торговле.

Банковский сектор, инвесторы и кредиторы также должны участвовать в выработке механизмов регулирования торговой деятельности региона, так как именно от них зависят кредиты и инвестиции, необходимые как для первоначального развития бизнеса, так и для его успешного развития. Наличие стратегии развития торговли в регионах будет являться определенным сигналом для указанных стейкхолдеров в разработке совместных программ с предпринимателями в приоритетном направлении для региональных органов власти, что будет положительным образом сказываться в развитии региона.

Стоит отметить, что обсуждение каких-либо нормативно-правовых актов в области предпринимательства и торговли без участия предпринимателей или с участием определенной стороны, например, крупного сетевого ритейла, может привести к негативным последствиям и лоббированию интересов отдельного круга лиц.

**Общественные организации.** В Санкт-Петербурге действует множество организаций, которые созданы для поддержки предпринимательства, доведения до органов власти своих предложений по регулированию административных барьеров развитию бизнеса. Среди них можно выделить Санкт-Петербургскую Торгово-промышленную палату, ОПОРУ РОССИИ, Ассоциацию малого бизнеса в сфере потребительского рынка, Санкт-Петербургский Союз предпринимателей, Санкт-Петербургское отделение «Деловой России», Купеческий клуб Санкт-Петербурга, Северо-Западный центр поддержки малого и среднего бизнеса, НП «Содружество», профсоюзы и др. Некоторые из перечисленных организаций отстаивают интересы потребительского рынка. Есть организации, в которых имеются профильные подраз-

деления по сферам деятельности. Наличие такого количества организаций говорит о широком спектре интересов, участников рыночного взаимодействия, часто вступающих в противоречие друг с другом и нуждающихся в согласовании.

Как правило, такие организации аккумулируют вопросы и доводят до органов власти информацию не только по частным вопросам, но и о серьезных региональных проблемах, требующих немедленного решения. В связи с этим и органам власти, и предпринимателям необходимо совершенствовать взаимосвязь с такими организациями для выработки единого мнения по различным вопросам, в том числе в сфере потребительского рынка. Необходимо также доводить до предпринимателей информацию о принятых решениях. Указанные организации не должны заниматься простым лоббированием интересов предпринимателей, они должны разрабатывать и содействовать внедрению новых механизмов развития предпринимательства и рынка.

Несмотря на наличие Общественного совета по развитию малого предпринимательства при Губернаторе Санкт-Петербурга, позволяющего исполнительным органам власти принимать скоординированные решения с учетом мнений малых предпринимателей, в состав которого преимущественно входят представители многих общественных организаций, не все вопросы удается согласовать, что вызывает недовольство малых предпринимателей.

Необходимо совместно с общественными организациями, курирующими вопросы развития торговых предприятий, постараться максимально учесть их мнения или аргументировано обосновать целесообразность реализации противоположных позиций.

Низкий уровень социальной ответственности бизнеса, отсутствие в торговле сложившихся традиций борьбы рядового персонала за соблюдение работодателями прав наемных работников, сформировали ситуацию в данной сфере, которую можно назвать далекой от принципов социальной гармонии. Многочисленные нарушения действующего трудового законодательства, игнорирование интересов торгово-оперативного и вспомогательного персонала в угоду собственной выгоде – достаточно типичная картина для торгового бизнеса. При разработке стратегии и программы развития торговли важную роль должны играть структуры, способные представлять и выражать интересы работников торговли. К ним относятся миграционная служба, Комитет по социальной политике Санкт-Петербурга и профсоюзы в сфере торговли. Такие организации могут дать наиболее взвешенные предложения в области защиты прав трудящихся, они должны выполнять как минимум совещательные функции, а их предложения – носить официальный рекомендательный характер, к которому органы власти должны прислушиваться.

Розничная торговля является одним из субъектов потребительского рынка, услуги которой предназначены для удовлетворения потребностей населения, конечным звеном товародвижения. В этом случае результаты деятельности розничной торговли непосредственно зависят от способности бизнеса удовлетворять потребности населения. В процессе разработки стратегии выразителями интересов потребителей являются различные общественные организации. На территории Санкт-Петербурга существует несколько общественных организаций по защите прав потребителей, например, ОМО (Общественная межрегиональная организация) «Наши права потребителей», Санкт-Петербургское общество защиты прав потребителей, общество защиты прав потребителей «Диалог» и др. Такие организации могут предъявлять претензии, подавать жалобы и иски по собственной инициативе в интересах неопределенного круга потребителей или по поручению одного потребителя, группы потребителей. Услуги таких организаций – платные, что существенно снижает их социальную функцию, особенно в отношении граждан с небольшим уровнем дохода. Представители организаций защиты прав потребителей способны указать на наиболее часто возникающие жалобы граждан, решение которых можно учесть в стратегии торговли (потребительского рынка) Санкт-Петербурга после утверждения основного проекта документа.

**Общественность – потребители.** Очень многое зависит и от самого общества. Последние тенденции показывают недоверие общества к власти. При каких-либо выявленных нарушениях в сфере торговли многие не верят, что смогут реально защитить свои права, что также порождает «грязную» коммерцию. Это также связано и с менталитетом россиян. Будучи гражданами Советского Союза, практически никто не мог и подумать о некачественном питании в магазинах, так как существовали «строгое» законодательство и партийная ответственность. Советские люди не привыкли постоянно жаловаться и отстаивать свои права, многие функции были возложены на государство, котороеправлялось со своими обязанностями. Например, в Законе РСФСР [5] в ст. 69 «Вредительство» предусматривалось «за действие или бездействие, направленное к подрыву промышленности, транспорта, сельского хозяйства, денежной системы, торговли или иных отраслей народного хозяйства, а равно деятельности государственных органов или общественных организаций с целью ослабления Советского государства, если это действие совершено путем использования государственных или общественных предприятий, учреждений, организаций, либо путем противодействия их нормальной работе – лишение свободы на срок от восьми до пятнадцати лет с конфискацией имущества».

К переходу от социализма к капитализму россияне оказались не готовы. Зарубежный опыт показывает, что при покупке некачественного товара в Европе потребитель самостоятельно обращается в со-

ответствующие органы (организации), что ведет к серьезным санкциям для продавца. Даже сам потребитель готов сразу же обратиться в соответствующие органы. Граждане России во многом еще пока надеются на государство, которое их сможет защитить, и очень медленно перестраиваются на новый ритм жизни. Для этого необходимо проводить общественные кампании, призванные сделать сферу торговли привлекательной для молодежи, разъяснять со школы суть предпринимательства, объяснять, как правильно вести свое дело и защищать свои права. Торговля должна быть направлена не просто на перепродажу товаров, а на оказание услуг по удовлетворению потребителей качественными товарами и ведению цивилизованного, честного и благородного бизнеса. Люди должны научиться защищать свои права, обращаясь в надзорные ведомства, которые, в свою очередь, обязаны незамедлительно реагировать. Общественное самосознание должно стимулировать предпринимателя предлагать качественные продукты по доступным ценам. Потребители должны отказываться от посещения (бойкотировать) соседних предпринимателей, реализующих низкокачественные товары. Потребители и их мнение о предлагаемых нововведениях должны быть существенным сигналом при принятии тех или иных норм.

Особое внимание стоит уделить научному сообществу, в частности, профильным высшим учебным заведениям (вузам), где уровень обучения несколько оторван от реальности. В данном направлении необходима последовательная работа по модернизации среднего профессионального и высшего образования, создание механизмов государственного регулирования, при которых крупный и малый бизнес в сфере торговли и услуг могли бы совместно разрабатывать программы обучения, что могло бы создать условия для подготовки высококвалифицированных специалистов, способных практически сразу решать различные задачи в сфере торговли. Тем не менее, даже сейчас, органам государственной власти необходимо привлекать преподавателей вузов и колледжей, готовящих специалистов в сфере торговли, для разработки соответствующих стратегий, программ и планов.

### **Заключение**

Сложившаяся практика показывает, что органы государственной власти Санкт-Петербурга не учитывают в достаточной степени мнения предпринимателей. Общественный совет при Губернаторе Санкт-Петербурга [6] старается объединять общественные организации, в большей степени лояльные к Правительству Санкт-Петербурга, что не позволяет учитывать в полной мере мнения предпринимателей или давать им аргументированные объяснения и приводит к социальной напряженности. Высшие учебные заведения также не всегда привлекаются в достаточной степени к разработке основных положений планов и программ в сфере торговли и предпринимательства.

Эффективное взаимодействие региональных органов власти в области стратегического планирования с профессиональными объединениями, общественными организациями, другими представителями субъектов рынка позволит разработчикам стратегии развития торговли в максимальной степени выразить весь спектр интересов предпринимателей и согласовать их с интересами населения города. Грамотное регулирование государством сферы торговли поможет устраниТЬ конфликтные зоны развития бизнеса, что позволит эффективно развивать экономику региона, обеспечить его население товарами и услугами, отвечающими мировым стандартам. Актуальным представляется также принятие антикризисных мер государственного регулирования сферы торговли, которые помогут нейтрализовать негативные последствия ведения коммерческой деятельности в условиях кризиса.

### **Литература**

1. Свободная энциклопедия «Википедия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BA%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%BA%D1%80>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 11.02.2010).
2. «Устав Санкт-Петербурга» от 28.02.1998.
3. Постановление Законодательного Собрания Санкт-Петербурга от 14.04.1999 №78 «О структуре Законодательного Собрания Санкт-Петербурга».
4. Закон Санкт-Петербурга от 06 июля 2009 года №335-66 «О Правительстве Санкт-Петербурга».
5. Закон РСФСР от 27.10.1960 «Об утверждении уголовного кодекса РСФСР (вместе с «уголовным кодексом РСФСР»).
6. Постановление Губернатора Санкт-Петербурга «Об Общественном совете по развитию малого предпринимательства при Губернаторе Санкт-Петербурга» от 11 октября 2007 года №51-пг.

- Луговской Роман Андреевич** – Санкт-Петербургский торгово-экономический институт, кандидат экономических наук, ассистент, rlugovskoy@yandex.ru
- Соловьев Денис Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, старший преподаватель, 9218964588@mail.ru
- Сысоев Виталий Юрьевич** – Законодательное Собрание Санкт-Петербурга, помощник депутата, 9136434@mail.ru

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.51.015

## КАСКАДНАЯ РЕДУКЦИЯ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ

С.В. Арановский, А.А. Бобцов, А.А. Пыркин

Рассматривается задача идентификации неполного набора неизвестных параметров линейной регрессионной модели. Предложена процедура редукции, позволяющая свести исходную модель к редуцированной, содержащей меньшее число неизвестных параметров. Проанализированы условия существования редуцированной модели, сводящиеся к линейной независимости входных сигналов.

**Ключевые слова:** линейная регрессионная модель, редукция, идентификация.

Как в теории идентификации, так и при решении задач адаптивного управления важнейшую роль играет линейная регрессионная модель, описываемая выражением [1]

$$y(t) = \theta_1 \omega_1(t) + \theta_2 \omega_2(t) + \dots + \theta_n \omega_n(t) = \sum_{k=1}^n \theta_k \omega_k(t), \quad (1)$$

где  $y(t)$  – измеряемый выходной сигнал;  $\omega_i(t)$  – измеряемые сигналы (регрессоры);  $\theta_i$  – неизвестные параметры;  $i = 1, \dots, n$ . Такая модель часто используется в явном виде при описании линейных статических процессов или линейных дискретных систем, может быть получена для непрерывных систем путем введения фильтра состояний, применяется для описания некоторых нелинейных систем с известными нелинейностями или же может входить как подсистема в более сложные модели [1]. Также в работах [2–4] приведен пример использования такой модели для идентификации параметров гармонического сигнала и компенсации соответствующих возмущений.

Как правило, ставятся задачи идентификации неизвестных параметров по набору измерений, оценивания параметров в реальном времени при использовании адаптивного управления или компенсации возмущений. Существует большое число подходов, решающих эти задачи, наиболее известным среди которых является метод наименьших квадратов и различные его модификации [1]. Для оценки в реальном времени могут использоваться итеративные формы метода наименьших квадратов или градиентные интегральные алгоритмы. К преимуществам последних относятся меньшая вычислительная сложность и возможность варьировать скорость сходимости оценок. Указанные подходы обладают общим недостатком – оценка всех параметров модели (1) происходит одновременно, что отрицательно оказывается на времени оценивания. В то же время, в ряде задач полная идентификация модели (1) не требуется. Например, при диагностике отказов оборудования нет необходимости оценивать все  $n$  неизвестных параметров, достаточно оценить только один контрольный параметр  $\theta_k$ . Для решения задачи идентификации одного параметра  $\theta_k$  предложена итеративная процедура каскадной редукции модели (1).

Рассмотрим для краткости и удобства изложения модель (1) при  $n = 3$  и опустим в выражениях аргумент  $t$ :

$$y = \theta_1 \omega_1 + \theta_2 \omega_2 + \theta_3 \omega_3. \quad (2)$$

Поставим задачу редуцировать систему (2) до одного неизвестного параметра  $\theta_3$ . Сначала умножим (2) на  $\omega_2$  и проинтегрируем по времени на интервале от  $t_0$  до  $t$ :

$$\int_{t_0}^t y \omega_2 dt = \theta_1 \int_{t_0}^t \omega_1 \omega_2 dt + \theta_2 \int_{t_0}^t \omega_2^2 dt + \theta_3 \int_{t_0}^t \omega_3 \omega_2 dt.$$

Введем обозначения  $\varphi_y = \int_{t_0}^t y \omega_2 dt$ ,  $\varphi_1 = \int_{t_0}^t \omega_1 \omega_2 dt$ ,  $\varphi_2 = \int_{t_0}^t \omega_2^2 dt$ ,  $\varphi_3 = \int_{t_0}^t \omega_3 \omega_2 dt$ . Тогда

$$\varphi_y \varphi_2^{-1} = \theta_1 \varphi_1 \varphi_2^{-1} + \theta_2 + \theta_3 \varphi_3 \varphi_2^{-1}.$$

Продифференцировав по времени, получим

$$\dot{\varphi}_y \varphi_2^{-1} - \varphi_y \varphi_2^{-2} \dot{\varphi}_2 = \theta_1 (\dot{\varphi}_1 \varphi_2^{-1} - \varphi_1 \varphi_2^{-2} \dot{\varphi}_2) + \theta_3 (\dot{\varphi}_3 \varphi_2^{-1} - \varphi_3 \varphi_2^{-2} \dot{\varphi}_2). \quad (3)$$

Модель (3) является редуцированной формой модели (2), из которой исключен параметр  $\theta_2$ . Отметим, что  $\varphi_2 > 0$  для  $\forall t \geq t_0$  при  $\omega_2(t_0) \neq 0$ , причем последнее достигается путем выбора  $t_0$ . Ситуация, при которой подходящего  $t_0$  не существует, т.е.  $\omega_2 \equiv 0$ , интереса не представляет, так как является вырожденной, и идентификация системы (2) невозможна (при этом система может быть редуцирована отбрасыванием нулевого члена). Модель (3) позволяет осуществить дальнейшую редукцию тогда и только тогда, когда выражение  $\dot{\varphi}_y \varphi_2^{-1} - \varphi_y \varphi_2^{-2} \dot{\varphi}_2$  не обращается тождественно в ноль, где под  $\varphi_y$  понимается лю-

бая функция из  $\varphi_y, \varphi_1, \varphi_3$ . Заметим, что это условие выполняется, если  $\varphi_\sim$  не может быть линейно выражена через  $\varphi_2$ , т.е. не существует такого  $k = \text{const}$ , что  $\varphi_\sim \equiv k\varphi_2$ . Несложно показать, что если это условие нарушается, то система (2) вырождается и не может быть однозначно идентифицирована (исключением является случай  $n = 1$ , который не представляет интереса с точки зрения поставленной задачи).

Продолжим редукцию модели (3). Чтобы исключить процедуру деления, умножим правую и левую части (3) на  $\varphi_2^2$ :

$$\dot{\varphi}_y \varphi_2 - \varphi_y \dot{\varphi}_2 = \theta_1 (\dot{\varphi}_1 \varphi_2 - \varphi_1 \dot{\varphi}_2) + \theta_3 (\dot{\varphi}_3 \varphi_2 - \varphi_3 \dot{\varphi}_2). \quad (4)$$

Введем новые переменные  $\gamma_y = \dot{\varphi}_y \varphi_2 - \varphi_y \dot{\varphi}_2$ ,  $\gamma_1 = \dot{\varphi}_1 \varphi_2 - \varphi_1 \dot{\varphi}_2$ ,  $\gamma_3 = \dot{\varphi}_3 \varphi_2 - \varphi_3 \dot{\varphi}_2$ , умножим модель (4) на  $\gamma_1$  и проинтегрируем по времени на интервале от  $t_0$  до  $t$ :

$$\int_{t_0}^t \gamma_y \gamma_1 dt = \theta_1 \int_{t_0}^t \gamma_1^2 dt + \theta_3 \int_{t_0}^t \gamma_3 \gamma_1 dt.$$

Тогда, введя по аналогии выражения  $\xi_y = \int_{t_0}^t \gamma_y \gamma_1 dt$ ,  $\xi_1 = \int_{t_0}^t \gamma_1^2 dt$ ,  $\xi_3 = \int_{t_0}^t \gamma_3 \gamma_1 dt$ , получим

$$\dot{\xi}_y \xi_1^{-1} = \theta_1 + \theta_3 \xi_3 \xi_1^{-1}.$$

Продифференцировав по времени, получаем

$$\dot{\xi}_y \xi_1^{-1} - \dot{\xi}_y \xi_1^{-2} \dot{\xi}_1 = \theta_3 \left( \dot{\xi}_3 \xi_1^{-1} - \xi_3 \xi_1^{-2} \dot{\xi}_1 \right). \quad (5)$$

Модель (5) является редуцированной формой модели (2), в которой остался только один неизвестный параметр  $\theta_3$ , а выходной сигнал и регрессор известны. Соответственно параметр  $\theta_3$  может быть идентифицирован любым из описанных выше способов. Как и ранее, в выражении (5) можно исключить процедуру деления, умножив его на  $\xi_1^2$ . Таким образом, итеративная процедура каскадной редукции позволяет выделить из исходной модели (1) только те неизвестные параметры, которые требуется идентифицировать. Во избежание достижения интегралами больших величин интегрирование может проводиться на не интервале от  $t_0$  до  $t$ , а на некотором интервале от  $t-T$  до  $t$ ,  $t \geq T$ , образующем временное окно. Это позволит также отслеживать вариации идентифицируемого параметра, но пока оставляет открытым вопрос выбора ширины окна  $T$ .

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 16.740.11.0553).

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
2. Арановский С.В., Бобцов А.А., Никифоров В.О. Синтез наблюдателя для нелинейного объекта в условиях гармонического возмущения, приложенного к выходной переменной // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3 (67). – С. 32–39.
3. Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. – 2010. – № 2. – Р. 129–139.
4. Бобцов А.А., Ефимов Д.В., Пыркин А.А., Золгадри А. Алгоритм адаптивного оценивания частоты смещенного синусоидального сигнала с аддитивной нерегулярной составляющей // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 2. – С. 16–21.

**Арановский Станислав Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, s.aranovskiy@gmail.com

**Бобцов Алексей Алексеевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ru

**Пыркин Антон Алексеевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.pyrkin@gmail.com

**УДК 004.93+57.087.1**

## ВЫБОР ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ ДИКТОРА А.В. Шолохов

Исследуется подход к выбору наиболее информативных признаков в задаче автоматического определения эмоционального состояния человека по записям устной речи. Для получения оптимального подмножества признаков по заданному критерию качества распознавания использовался генетический алгоритм.

**Ключевые слова:** распознавание эмоций, речевые признаки, генетические алгоритмы.

Важность проблемы автоматического распознавания эмоций объясняется тем, что их выражение в значительной степени улучшает взаимопонимание у людей при общении друг с другом. Знания эмоцио-

нальной окраски высказывания позволяют извлечь более полную информацию, содержащуюся в речевом сигнале. Одна из основных проблем в распознавании эмоций заключается в том, что неизвестно, какие именно речевые характеристики и их подмножества отвечают за проявление той или иной эмоции. В связи с этим важным этапом предобработки является процесс извлечения из большого объема тех данных, которые действительно содержат в себе необходимую информацию. Кроме того, наличие шумовых нерелевантных признаков может снизить устойчивость классификатора. Таким образом, из множества всех извлеченных признаков необходимо выбрать подмножество, обучившись на котором, классификатор покажет наилучшую оценку качества распознавания.

Так как количество возможных решений экспоненциально зависит от размерности пространства признаков, было решено использовать генетический алгоритм для поиска оптимального решения. Целевая функция представляла собой оценку вероятности правильного распознавания со слагаемым, штрафующим наборы из большого количества признаков.

Эксперименты проводились на Берлинской базе записей эмоциональной речи EMO-DB [1]. Для каждой аудиозаписи формировалась 400-мерные вектора признаков, которые и составили обучающую выборку. В качестве классификатора использовался метод опорных векторов (Support Vector Machine) [2]. В таблице представлены полученные в результате эксперимента оценки вероятности безошибочной классификации эмоций. В левой части ячеек (столбцы 1) показаны оценки для исходного набора признаков, а в правой (столбцы 2) – для отобранных генетическим алгоритмом, количество которых в 10 раз меньше. Значение в каждой ячейке соответствует отдельно обученному бинарному классификатору. Как видно, в некоторых случаях качество распознавания даже повысилось на сокращенных наборах признаков.

Эмоции	Скука		Отвращение		Страх		Радость		Грусть		Нейтральное	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Гнев	0,95	0,96	0,87	0,89	0,89	0,87	0,75	0,79	0,98	0,97	0,98	0,99
Скука	–	–	0,85	0,79	0,86	0,79	0,88	0,88	0,78	0,73	0,72	0,67
Отвращение	–	–	–	–	0,72	0,68	0,76	0,76	0,89	0,91	0,88	0,88
Страх	–	–	–	–	–	–	0,76	0,77	0,90	0,88	0,89	0,85
Радость	–	–	–	–	–	–	–	–	0,94	0,95	0,92	0,88
Грусть	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,83	0,84

Таблица. Оценка вероятности безошибочной классификации эмоций для исходного набора речевых признаков (столбцы с индексом 1) и набора признаков, отобранных генетическим алгоритмом (столбцы с индексом 2)

Эксперименты показали, что генетический алгоритм является эффективным средством для решения задачи выбора подмножества информативных признаков. В дальнейшем планируется исследовать адаптивные генетические алгоритмы, параметры которых могут подстраиваться в ходе работы, тем самым увеличивая скорость поиска решения и увеличивая вероятность выхода из локальных оптимумов.

1. Берлинская база эмоциональной речи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pascal.kgw.tu-berlin.de/emodb/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 09.02.2012).
2. Cortes C., Vapnik V. Support vector networks // Machine Learning. – 1995. – V. 20. – P. 1–25.

**Шолохов Алексей Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sholokhovalexeyp@gmail.com

**УДК 519.688**

### ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА РУССКОЙ РЕЧИ НА ОСНОВЕ СКРЫТЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ П.Г. Чистиков

Представлен подход к построению системы синтеза речи на основе скрытых марковских моделей применительно к русскому языку. Для повышения ее гибкости применяется алгоритм кластеризации состояний. Представлен подход моделирования сигнала возбуждения.

**Ключевые слова:** синтез речи, скрытые марковские модели, параметризация речи, кластеризация данных.

Архитектурно и логически систему синтеза можно разделить на две части – построение модели голоса и непосредственно синтез [1]. Первая часть включает в себя следующие этапы: вычисление акустических, лингвистических и просодических признаков для каждого аллофона из базы данных; обучение контекстно-зависимых HMM (скрытых марковских моделей); кластеризация состояний HMM на основе лингвистических и просодических признаков. Синтезирующая часть представляет собой следующую последовательность действий: транскрибирование входного текста и вычисление лингвистических и просодических характеристик для каждого аллофона; формирование последовательности HMM; генерация акустических параметров на основе полученной модели; вычисление функции возбуждения и ее фильтрация с целью получения итогового речевого сигнала.

Неотъемлемой составляющей для построения системы синтеза речи является выбор параметров, обеспечивающих генерацию естественного сигнала. Такие параметры могут включать, например, тип предыдущего/следующего аллофона, слога, слова, предложения и т.д. Определение набора таких параметров для определенного языка базируется на лингвистической и просодической информации. Помимо теоретического подхода, применяется также эмпирический анализ с целью выбора наиболее информативных из них. Так, для русского языка было выбрано 7 аллофонных, 13 слоговых, 8 словных и 3 синтагматических признака, таких как имя фонемы, предшествующей предыдущей, имя предыдущей фонемы, имя текущей фонемы, имя следующей фонемы, имя фонемы, следующей за следующей, позиция текущей фонемы от начала слога, позиция текущей фонемы от конца слога и т.д.

Моделируемые параметры идеологически делятся на две группы – спектральные и временные. В качестве спектральных используются частота основного тона и мел-частотные кепстральные коэффициенты. Расчет данных параметров выполняется по всей фонограмме из базы данных с окном анализа 25 мс и смещением 10 мс. Временные параметры представляют собой длительности соответствующих аллофонов.

Важным этапом для обеспечения качественного синтезированного сигнала является моделирование функции возбуждения. Наиболее качественную работу показывает алгоритм [2], основанный на моделировании формы этой функции при помощи двух фильтров (единичных импульсов – (1) и белого шума – (2)),

$$H_v(z) = \sum_{l=-M/2}^{M/2} h(l)z^{-l}, \quad (1)$$

$$H_u(z) = \frac{1}{1 - \sum_{l=1}^L g(l)z^{-l}}, \quad (2)$$

для вокальной и шумовой составляющих соответственно, коэффициенты которых  $h(l)$  и  $g(l)$  вычисляются на этапе обучения. Порядки фильтров  $M$  и  $L$  равны 512 и 256 соответственно. Примеры синтеза показывают, не вдаваясь в детали качества воспроизведения аллофонов, что ритмика фразы сохраняется. Данный факт демонстрирует важную характеристику основанного на НММ синтеза речи: возможность имитировать просодические характеристики корпуса, который был использован при построении модели голоса. Также стоит отметить, что для построения модели голоса достаточно небольшого количества материала, однако отсутствие некоторых элементов в базе данных существенно влияет на качество, что делает процесс подготовки звуковой базы данных также очень важным при разработке систем синтеза.

Автором предложен подход к построению системы синтеза русской речи на основе скрытых марковских моделей. Принцип основан на методе, в котором соответствующие параметры извлекаются из скрытых марковских моделей, векторы наблюдений которых содержат спектральные характеристики, значения основного тона и длительности речи. Экспериментальные результаты показывают, что русская речь может быть успешно параметризована и произвольное предложение может быть синтезировано из полученных моделей.

1. Maia R., Zen H., Tokuda K., Kitamura T., Resende F.G. Towards the development of a Brazilian Portuguese text-to-speech system based on HMM // Proceedings of the European Conference on Speech Communication and Technology (EUROSPEECH). – Geneva, Switzerland, 2003. – P. 2465–2468.
2. Maia Rannery, Toda Tomoki, Zen Heiga, Nankaku Yoshihiko, Tokuda Keiichi. An Excitation Model for HMM-Based Speech Synthesis Based on Residual Modeling // 6th ISCA Workshop on Speech Synthesis. – Bonn, Germany, 2007. – P. 1315–1318.

**Чистиков Павел Геннадьевич** – ООО «ЦРТ», научный сотрудник, аспирант, chistikov@speechpro.com

УДК 372.862,681.5

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ И ВВОДА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ В ЛОКАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ УСПЕВАЕМОСТИ Ю.В. Китаев

Рассматривается построение и функционирование процесса автоматизированного сбора и оценки выполнения домашних заданий с использованием интернет-технологий в дистанционном обучении.

**Ключевые слова:** дистанционное обучение, интернет-технологии.

Контрольная проверка знаний может производиться различными способами, в том числе в процессе выполнения домашних заданий. Для дисциплин с преобладанием точных наук нетрудно подготовить пакеты домашних заданий, в которых проверка ответов может быть автоматизирована, сокращая время, затрачиваемое преподавателем, и уменьшая риск неправильной оценки. Один из способов такой автоматизации, разработанный автором, представлен на рисунке. Обучающиеся (студенты) получают варианты домашних заданий с разовыми паролями. Ответы пересыпаются на электронный почтовый ящик, который преподаватель открывает для этих целей. Специальная программа на компьютере преподавателя

считывает ответы из почтового ящика, оценивает их и записывает результаты в электронный локальный журнал (ЭЛЖ) [1].

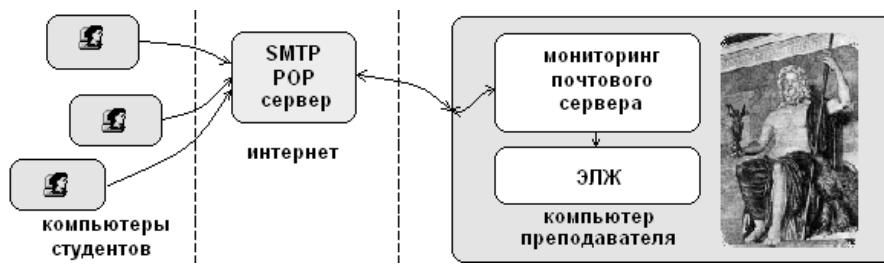


Рисунок. Схема автоматизированного сбора результатов домашних заданий в ЭЛЖ

Ответы оформляются по специальной форме, включающей следующие поля: фамилия и инициалы, номер группы, дата и время, пароль, номер варианта задания, ответ/ответы. Причем, запись делается не в самом письме, а в теме сообщения, что значительно ускоряет и упрощает обработку ответов. Затем письмо отправляется на электронный почтовый ящик преподавателя (SMTP-сервер).

Программа, установленная на компьютере преподавателя, осуществляет сбор ответов с почтового сервера и может работать, как постоянно в режиме сервиса (службы), так и по запросу преподавателя. Она содержит модули, которые осуществляют опрос POP-сервера электронной почты преподавателя, выделение компонентов темы сообщения, заполнение или обновление записей в ЭЛЖ. Программа написана в среде MS Excel с использованием VBA и дополнительных библиотечных модулей. Ниже приводится фрагмент, выделяющий «тему – Subject» из электронного письма и заполняющий массив строк с ответами, персональными данными и другой информацией.

```
Set POP3Msg = Session.GetMessage
.....
For Each POP3Email In POP3Msg.Senders
    TextSubj(i) = POP3Email.Subject
Next
```

После разбора текстовых строк на компоненты [2], вызывается модуль, обновляющий электронный локальный журнал преподавателя в соответствии с результатами проверки домашнего задания.

Предлагаемая структура и содержание программы для проверки домашних заданий позволяет существенно ускорить проверку ответов, автоматизировать заполнение ЭЛЖ и устраниет возможные ошибки.

1. Китаев Ю.В. Автоматизация ведения электронного журнала и интернет технологии // Сборник тезисов конференции «Оптика и образование». – СПб: СПБГУ ИТМО, 2010. – С. 48–49.
2. Попова С.В., Ходырев И.А. Извлечение ключевых словосочетаний // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 1 (77). – С. 67–71.

**Китаев Юрий Васильевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, доцент, KitaevUV@km.ru

УДК 617+616.8+615.1/4

### РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ВЫПОЛНЕНИЯ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

**Ю.А. Скупов, С.С. Киселев, А.Д. Аничков, Ю.З. Полонский, А.Н. Серегин**

Проанализированы известные в настоящее время системы для стереотаксической нейрохирургии. Приведен принцип расчета координат внутримозговых мишеней и метод наведения на них. Описан новый автоматизированный комплекс и принцип его работы.

**Ключевые слова:** стереотаксическая нейрохирургия.

Стереотаксическая хирургия является малоинвазивным методом хирургического вмешательства, когда доступ осуществляется к целевой точке внутри тела или толщи тканей какого-либо органа с использованием пространственной схемы по заранее рассчитанным координатам по трехмерной декартовой системе координат.

Стереотаксическое направление в нейрохирургии неуклонно развивается. Разработаны и успешно применяются стереотаксические операции на головном, спинном мозге и мозжечке. Объектами вмешательства являются самые разнообразные патологические процессы: паркинсонизм, торсионная дистония, гемибаллизм, болевой синдром, детский церебральный паралич, хореические и миоклонические гиперкинезы, аневризмы мозговых сосудов, опухоли мозга, внутримозговые кисты и абсцессы, эпилепсия [1].

Стереотаксические операции представляют собой основной методический прием функциональной нейрохирургии, имеющий своей целью восстановление или улучшение патологически измененных функций мозга без воздействия на причину, вызвавшую это нарушение.

Стереотаксический метод – сочетание приемов и расчетов, обеспечивающих точное введение инструмента (канюли, электрода и др.) в заранее определенную глубоко расположенную структуру мозга. Основным методическим приемом является сопоставление условной координатной системы мозга с трехмерной координатной системой стереотаксического прибора. Для этого необходим не только стереотаксический аппарат и атлас [2], но и рентгенографическое определение внутримозговых ориентиров, на основе которых устанавливается пространственная локализация глубинных церебральных структур.

Хирургическая мишень, т.е. подлежащая воздействию глубинная структура мозга, избирается в каждом случае индивидуально в зависимости от вида патологии. С помощью стереотаксических операций производят биопсию, а в некоторых случаях, при глубоко расположенных опухолях, осуществляют их криодеструкцию.

При выборе места для наложения трепанационного отверстия в кости черепа необходимо учитывать, что место введения канюли должно находиться на безопасном расстоянии от функционально важных зон коры и по пути к хирургической мишени канюля не должна повреждать другие важные глубинные структуры мозга.

В основном перед проведением снимков голову больного фиксируют в стереотаксическом аппарате, что обеспечивает получение идентичных рентгенограмм в ходе операции. Затем производят расчеты, обеспечивающие установление локализации подкорковой структуры, в которую будет введена канюля или электрод. Точные данные о положении искомой структуры по отношению к указанным выше ориентирам хирург получает из специального стереотаксического атласа мозга человека.

Полученные расчетные данные переносят на транспортиры стереотаксического аппарата, направляющую канюли устанавливают под необходимым углом. В него устанавливают канюлю и после вскрытия твердой оболочки и коагуляции мелких сосудов коры вводят ее в мозг.

Успех операции, в первую очередь, зависит от точности попадания в заданную структуру. При вмешательствах на подкорковых образованиях, расположенных вблизи внутренней капсулы, ядер гипоталамуса, ошибка в расчетах всего на 2–3 мм может вызвать самые серьезные осложнения. В последние годы в стереотаксической хирургии для повышения точности применяют ЭВМ. Перспективным для стереотаксической нейрохирургии является проведение операций с использованием компьютерной томографии. Она позволяет использовать изображения серийных срезов мозга для точного определения координат любой точки в глубоких образованиях мозга.

Современная нейрохирургия использует множество стереотаксических систем, таких как стереотаксис Leksell компании Elekta, Cosman-Roberts-Wells (CRW) компании Integra Radionics, Zamorano компании Stryker, Patil, Inomed (Германия) [3], стереотаксический манипулятор «Ореол» (Россия) [4], и это только небольшая часть. Существующие конструкции стереотаксических систем наведения не предполагают автоматизацию процесса и имеют в своем составе детали сложной геометрической формы, которые в своей совокупности не обладают достаточной жесткостью. При проведении операции на несколько мишеней много времени уходит на перестройку (наведение на новую цель) манипулятора, вследствие чего происходят большие кровопотери у пациента и снижение реакции у врача, что, в свою очередь, увеличивает риск и снижает шансы на успешный исход операции.

Целью настоящей работы является разработка варианта конструкции манипулятора для автоматизированного выполнения нейрохирургических операций под контролем врача-нейрохирурга. Данная система должна отрабатывать все необходимые координаты для проведения операции, т.е. принимать оптимальное положение в пространстве для проведения операции и иметь достаточный доступ к операционному полю, также иметь минимальные влияния температур рабочего диапазона (18–30°C) и жестко фиксироваться в любом положении. В разрабатываемой системе наведения мы отказываемся от хирургической фиксации манипулятора в костях черепа, что делает операцию менее травматичной для пациента.

Система манипулятора будет состоять из двух основных частей – нижней и верхней платформы. Нижняя платформа крепится к операционному столу и имеет возможность двухкоординатного перемещения, а верхняя платформа крепится к нижней платформе и имеет возможность пятикоординатного перемещения, что позволит получить доступ ко всем необходимым участкам мозга пациента во время операции. Платформа имеет форму, удобную для манипуляций инструментов в ходе операции. Пятикоординатное перемещение верхней платформы осуществляется с помощью трех линейных приводов и шарико-винтовых передач (ШВП) под управлением компьютера по определенному алгоритму [5]. На подвижной части верхней платформы закреплен хирургический инструмент, осветительные элементы и видеокамеры. Осветители и камеры располагаются вокруг инструмента. Изображение, получаемое с камер, передается на монитор компьютера, что позволяет контролировать процесс операции в реальном времени. Двухкоординатное перемещение нижней платформы обеспечивается моментными двигателями также по алгоритму под управлением компьютера. Оператором компьютера выступает врач-

нейрохирург, который принимает решения и управляет всеми перемещениями системы. Местоположение системы определяется автоматически в реальном времени, что позволяет повысить качество и точность операции. Но для начала операции необходимо сначала определить местоположение цели и пересчитать координаты цели в координаты системы манипулятора.

Определение местоположения целевой точки будет производиться во время компьютерной и магнитно-резонансной томографии с помощью рентгеновского и магнито-резонансного (МР) локализатора на основе зубной пластины. Применение такого локализатора не наносит травм пациенту и дает возможность проводить исследования для определения координат целевой точки заблаговременно до операции. А для проведения самой операции, как уже отмечалось, необходимо зафиксировать расстояния от основной плоскости платформы до реперных точек локализатора, который закреплен во рту пациента, с помощью лотка с оттиском зубов, который индивидуальный для каждого пациента. Измерения будут проводиться с помощью трех линейных энкодеров, расположенных на базовой плоскости манипулятора. Для калибровки энкодеров применяются поверочные плитки. С помощью абсолютных линейных энкодеров производят непосредственные цифровые измерения без вывода манипулятора в исходное положение. Измеряя три расстояния до каждой реперной точки локализатора, получаем точные координаты положения локализатора в системе координат платформы. После проведенных измерений необходимо произвести пересчет координат цели, полученных во время расчетного томографического исследования, в координаты системы с учетом измеренных значений. Таким образом, получаем координаты целевой точки относительно системы координат манипулятора, после этого можно проводить операцию. Необходимость в фантомном моделировании отпадает, так как все возможные траектории могут уже храниться в базах данных или могут быть отработаны виртуально [6]. Все это позволит сократить время операции, повысить ее точности и качество.

Во время работы над проектом были проведены исследования возможности разработки манипулятора стереотаксической системы наведения для проведения операций на головном мозге. Было проведено исследование технологических параметров и характеристик существующих аналогов манипуляторов стереотаксической системы наведения и выявлены недостатки конструктивных и практических параметров применяемых манипуляторов при наведении. Предложен алгоритм управления платформой при наведении в ходе нейрохирургических операций, который основан на выборе мишени и фиксировании манипулятора в нужном положении, с учетом отказа крепления на черепе пациента. При этом платформа имеет возможность принимать любое необходимое положение вокруг головы, при использовании в системе управления моментных двигателей, линейных приводов и ШВП. Предложено конструктивное исполнение манипулятора стереотаксической системы наведения.

1. Stereotaxis. Консультативный портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stereotaxis.ru/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 20.01.2012).
2. Аничков А.Д., Полонский Ю.З., Серегин А.Н., Киселев С.С., Смирнов А.А., Колмогоров М.А., Иванов И.А. Автоматизированный комплекс для стереотаксических операций // Сборник статей II международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине». – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – Т. 3. – С. 305–306.
3. Российская нейрохирургия / Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова. – СПб: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.neuro.neva.ru/ru/Articles\\_2009\\_2/parfenov.shtml#literature](http://www.neuro.neva.ru/ru/Articles_2009_2/parfenov.shtml#literature), свободный. Яз. рус. (дата обращения 20.01.2012).
4. Аничков А.Д., Полонский Ю.З., Низковолос В.Б. Стереотаксические системы. – СПб: Наука, 2006. – 142 с.
5. Альян Х.М., Слоущ А.В. Декомпозиция задачи силового анализа многоподвижного механизма параллельной структуры // Теория механизмов и машин. – М., 2005. – Т. 3. – № 1. – С. 35–39.
6. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.

**Скупов Юрий Алексеевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, starosta-61@yandex.ru

**Киселев Сергей Степанович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, kiselev@mail.ifsmo.ru

**Аничков Андрей Дмитриевич** – Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН, доктор медицинских наук, профессор, зам. директора, stereo@ihb.spb.ru

**Полонский Юрий Зуьевич** – Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, uzpol@qip.ru

**Серегин Александр Николаевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, perikl@yandex.ru

УДК 535.64

**КРИТЕРИИ ПРИМЕНИМОСТИ ЦВЕТОВЫХ ПРОСТРАНСТВ  
В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ЦВЕТОВОГО АНАЛИЗА МИНЕРАЛОВ**

А.Д. Вакуленко, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов

Рассмотрены критерии оценки применимости цветовых пространств для описания цвета минеральных объектов с точки зрения эффективности их анализа, идентификации, разделения оптико-электронными методами в автоматическом режиме. **Ключевые слова:** описание цвета, цветовая модель, оптико-электронный метод, минеральный объект, фотометрическая сепарация.

В настоящее время в горнодобывающей промышленности одним из наиболее динамично развивающихся и активно применяемых методов обогащения является фотометрическая (оптическая) сепарация, реализующая идентификацию и селекцию минеральных объектов на основании результатов анализа их цветовых характеристик в реальном времени. В оптических сортировщиках немецких фирм ALIUD GmbH (сепараторы Optosort), Mogensen GmbH (сепараторы MikroSort), CommoDas GmbH–UltraSort и др., широко представленных на мировом рынке радиометрического обогатительного оборудования, описание и последующее воспроизведение цвета реализуются с помощью одной из цветовых моделей – RGB, YUV, HLS [1] и некоторых других.

Несмотря на то, что для настройки под особенности конкретного типа минерального сырья и определения границ рабочих диапазонов разделения используются методы машинного обучения, указанные автоматизированные сортировочные комплексы эффективны, главным образом, для решения простых задач: в случае ярко выраженного цветового контраста объектов контроля, при разделении по нескольким цветовым оттенкам или же по однородности одного из цветов. Однако при необходимости различения в автоматическом режиме тонких цветовых оттенков, контроле минеральных структур со сложной поверхностью структурой (например, кристаллов алмаза или кусков золотосодержащей породы) потенциально перспективный метод часто пасует, не позволяя достигать должного качества сортировки.

Не последней причиной указанного обстоятельства нередко является неверный выбор цветовой модели, однако объективных критериев и методики выбора, заранее позволяющих устанавливать степень применимости того или иного цветового пространства для описания цвета сложных минеральных структур и установки точных цветовых порогов и допусков, до настоящего времени не выработано. Для определения оптимальной системы описания цвета предложены критерии применимости цветовых пространств: простота задания рабочих диапазонов, взаимонезависимость компонент цветового пространства, а также адекватность последнего восприятию минерального объекта зрительным аппаратом человека.

Первый критерий определяется сложностью математической функции задания границ рабочих диапазонов системы контроля в используемом цветовом пространстве. Чем она проще, тем эффективнее пространство с точки зрения описания объекта контроля и тем выше быстродействие алгоритма анализа. Наиболее приемлемые варианты описания указанной функции – линейная зависимость или задание границы одним значением (например, значение координаты  $R > 100$  в пространстве RGB).

Второй критерий характеризует возможность различения близких, «тонких» цветовых оттенков. Чем больше независимых компонент содержит цветовая модель, тем эффективнее она при анализе «сложных» минеральных объектов. Например, система цветовых координат RGB не имеет ни одной независимой компоненты; системы цветовых координат YUV и L\*a\*b\* имеют одну независимую компоненту (Y и L\*, соответственно); в системе цветовых координат HLS все компоненты независимы [2].

Третий критерий при оптической сортировке имеет немалое значение, поскольку эффективность процесса сепарации, в первую очередь, определяется визуально специалистами-минералогами. Указанный критерий особенно важен для выбора системы цветовых координат при анализе объектов, цветовые различия которых выражаются в тонких цветовых оттенках, отличающихся по некоторым параметрам одновременно: светлоте и насыщенности, цветности и насыщенности, цветности и светлоте или по всем перечисленным параметрам. Например, системы цветовых координат RGB, XYZ и CMY наименее адекватны представлениям визуального аппарата человека; системы цветовых координат YUV и L\*a\*b\* частично обладают свойством адекватности; системы цветовых координат HLS, HSI и HSV считаются наиболее адекватными представлениям визуального аппарата человека.

Совокупность указанных критериев, характеризующих существующие цветовые пространства, определяет степень их применимости в каждом конкретном случае и позволяет выбрать наиболее предпочтительную для решения поставленной задачи анализа, идентификации, разделения минеральных объектов.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральных целевых программ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» и «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

1. Цвет в промышленности / Под ред. Р. Мак-Дональда: Пер. с англ. – М.: Логос, 2002. – 596 с.
2. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке: Пер. с франц.– М.: Техносфера, 2008. – 328 с.

**Вакуленко Анатолий Дмитриевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, vgoron5266@yandex.ru

**Горбунова Елена Васильевна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, vredina\_ia@mail.ru

**Чертов Александр Николаевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a.n.chertov@mail.ru

**УДК 65.012.65**

### ПРОБЛЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ПОТОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК

**В.А. Фетисов, Д.Л. Головцов**

Рассматриваются причины возникновения ошибок в производственном планировании и политике управления запасами готовой продукции при поступлении заказа потребителя в цепях поставок.

**Ключевые слова:** управление цепями поставок.

Одним из проявлений ошибок управления в цепях поставок является так называемый «эффект хлыста»: если рассматривать движение товара по цепи поставок, можно заметить, что даже небольшое колебание спроса на ее конце приводит к большему колебанию на вышестоящем уровне. Первое серьезное и детальное исследование динамики процессов, происходящих при движении товаров от производства к потребителю, произвел Дж. Форрестер в 1958 году в своей книге «Индустриальная динамика». На основании анализа работ Дж. Форрестера и H.L. Lee можно сформулировать пять фундаментальных причин «эффекта хлыста» [1, 2].

1. **Корректировка прогнозируемого спроса.** Например, если в розничной продаже в какой-то момент времени возникает скачок спроса на товар, рetailер интерпретирует это как сигнал об увеличении спроса в будущем, корректирует свой прогноз и размещает у поставщика заказ, больший, чем планировалось до этого. Соответственно, менеджер поставщика скорректирует прогнозируемый спрос и сопряженный с ним страховой запас. Заказ, размещенный поставщиком у производителя, будет иметь намного больший размах колебаний, чем запрос потребителя.
2. **Формирование заказов.** В цепях поставок каждая компания размещает заказы в вышестоящем звене, используя некоторую политику мониторинга и управления запасами. Зачастую запросы клиентов акумулируются перед размещением заказа. Многие производители обрабатывают заказы в зависимости от схемы работы их MRP-системы (Material Requirement Planning). Как правило, заказы клиентов консолидируются вплоть до размера минимальной партии, таким образом, чем больше размер такого заказа и чем реже делается заказ, тем больше будет степень его отклонения. Кроме того, компании имеют серьезный стимул для полной загрузки транспортного средства при перевозке заказанных материалов от поставщика.
3. **Колебания цены.** Большое количество транзакций между производителями и дистрибуторами проходит по схеме форвардных закупок, когда продукты закупаются в большем количестве, чем требуется. Обычно такие закупки являются результатом колебаний цен на рынке. Производители также привлекают потребителей снижением цен или специальными акциями. В результате подобных действий потребители закупают товары в таком количестве, которое не отражает их потребность на данный момент. В случае, когда цена вернется к нормальной, потребитель приостанавливает закупки до момента исчерпания накопленных запасов. Как результат, покупательская модель не будет отражать структуру потребления, и колебания в размерах закупок будут намного больше, чем колебания нормы потребления – т.е. очевиден «эффект хлыста».
4. **«Раздутые» заказы в условиях дефицита товара у производителя.** Когда спрос на продукцию превышает возможности поставки, производители зачастую нормируют свою продукцию заказчикам. Заказчики, в свою очередь, увеличивают объем заказа по сравнению с реально необходимым объемом. Производители принимают это за реальный уровень спроса и увеличивают производство. Затем, когда спрос падает, заказы внезапно аннулируются, таким образом, что вызывает «эффект хлыста».
5. **Время выполнения заказа.** Время выполнения заказа является ключевым параметром при определении уровней текущего и страхового запасов, точки заказа, и его можно разделить на две составляющие: физическая задержка и информационная задержка. Усиление колебаний в системе напрямую зависит от увеличения времени задержки.

Определив наличие «эффекта хлыста» в системе и зная причины его возникновения, можно принять меры для уменьшения этого явления, воздействуя тем или иным методом на выявленные причины, тем самым снижая негативные последствия как для отдельных звеньев, так и для всей цепи поставок.

1. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия. Индустримальная динамика: Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.
2. Lee H.L., Padmanabhan V., Whang S. The bullwhip effect in supply chains // Sloan Management Review. – 1997. – V. 38. – P. 93–102.

**Фетисов Владимир Андреевич** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, fet1@aanet.ru

**Головцов Дмитрий Львович** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, зав. лабораторией, kaf16@list.ru

---

## **SUMMARY**

---

### **REVIEW ARTICLE RECONFIGURABLE AND NONLINEAR METAMATERIALS**

**Yu. Kivshar, A. Orlov**

We review the recent experimental results on reconfigurable and nonlinear microstructured metamaterials with negative refractive index. New types of reconfigurable metamaterials are suggested and described having either nonlinear magnetic or nonlinear electric response at microwave frequencies. By introducing a voltage variable capacitor as a nonlinear element within each resonator, the frequency shift of either magnetic or electric resonance is obtained at power changing of incident wave. A novel approach is discussed for efficient re-tuning of the transmission characteristics of metamaterials by the lattice period modulation. Some of the re-tuning mechanisms discussed here can be suitable for scaling toward optical wavelengths with useful applications realizable in a wide frequency range.

**Keywords:** metamaterials, nonlinearity, reconfigurability, composites, resonators.

*Yuri Kivshar* – Nonlinear Physics Centre, Australian National University, Professor, [ysk@internode.on.net](mailto:ysk@internode.on.net)

*Alexey Orlov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, [alexey.orlov@phoi.ifmo.ru](mailto:alexey.orlov@phoi.ifmo.ru)

### **OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES DEVELOPMENT TENDENCIES OF COMPACT THIRD GENERATION INFRARED SYSTEMS BASED ON ACTIVE-PASSIVE METHOD**

**Yu.Yakushenkov**

The main development tendencies of compact third generation infrared systems working by active-passive method are considered. The examples of these systems based on focal plane arrays for near-, short- and long-wave infrared ranges of optical spectrum are given.

**Keywords:** infrared system, spectral range, focal plane array.

*Yuri Yakushenkov* – Moscow State University of Geodesy and Cartography, Department head, D.Sc., Professor, [yakush@miigaik.ru](mailto:yakush@miigaik.ru)

### **COMPATIBILITY ANALYSIS OF FLUORINE SILICATE AND BOROSILICATE GLASS LAYERS FOR OPTICAL FIBER MANUFACTURING**

**A. Korobeynikov, Yu. Gatchin, K. Dukel'skiy, M. Eron'yan, E. Ter-Nersesyan, N. Nesterova**

Research results of MCVD optical fiber workpieces receipt of fluorine borosilicate and compatibility of glass layers and quartz glass doped with fluorine and  $B_2O_3$  are given. Studies indicate the mutual incompatibility of these additives.

**Keywords:** optical fibers, fibers optical waveguides, MCVD.

*Anatoliy Korobeynikov* – Saint Petersburg Branch Foundation of the Russian Academy of Sciences «Institute for Earth Magnetism, Ionosphere and Radiowaves n. a. N.V.Puchkov RAS», Deputy director for science, D.Sc., Professor, [Korobeynikov\\_A\\_G@mail.ru](mailto:Korobeynikov_A_G@mail.ru)

*Yury Gatchin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, Professor, [Gatchin@mail.ifmo.ru](mailto:Gatchin@mail.ifmo.ru)

*Konstantin Dukel'skiy* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, [KDukel@GOI.ru](mailto:KDukel@GOI.ru)

*Michael Eron'yan* – The Scientific and Industrial Corporation «Vavilov State Optical Institute» (SIC SOI), Senior research fellow, D.Sc., [volokno@goi.ru](mailto:volokno@goi.ru)

*Egishe Ter-Nersesyan* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior lecturer, PhD, [volokno@goi.ru](mailto:volokno@goi.ru)

*Natalia Nesterova* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior research scientist, [natkorspb@mail.ru](mailto:natkorspb@mail.ru)

### **PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY: MODERN RECORDING METHODS OF MICRO OBJECTS HOLOGRAMS**

**V. Gendin, I. Gurov**

Principles of digital holography and holographic microscopy as well as peculiarities of hologram recording are considered. Basic schemes of digital holograms recording for micro-objects, methods of resolution improving in digital holography and new methods of digital holography application for studying of micro objects are presented.

**Keywords:** digital holographic microscopy, hologram resolution, zero-order diffraction, biological object.

*Vladislav Gendin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, vlad.gendin@gmail.com

*Igor Gurov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Department, D.Sc., Professor, gurov@mail.ifmo.ru

#### **GENERATION OF RADIATION ON MULTIPLE FREQUENCIES IN GASES AT PLASMA EXCITATION BY A STRONG FIELD OF FEW-CYCLE PULSES**

**S. Shtumpf, A. Korolev, S. Kozlov**

High-frequency radiation generation at neon optical breakdown by femtosecond few-cycle pulses is considered. It is shown that as the number of oscillations per pulse decreases up to just one, a shift of multiple harmonics to shorter wavelengths grows. The plasma dielectric nonlinearity leads to amplified redistribution of radiation energy to shorter wavelengths.

**Keywords:** few-cycle pulses, plasma nonlinearity, multiple harmonics generation.

*Svyatoslav Shtumpf* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, stumpf@rain.ifmo.ru

*Alexander Korolev* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, korolev@phd.ifmo.ru

*Sergey Kozlov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

#### **RADIATION INTERFERENCE ON TRIPLE AND COMBINATION FREQUENCIES AT THE SIMULTANEOUS NONLINEAR REFLECTION OF TWO FEMTOSECOND PULSES AT THE FUNDAMENTAL AND DOUBLED FREQUENCIES FROM A DIELECTRIC MEDIUM**

**O. Stolpovskaya, S. Putilin, V. Bespalov, S. Kozlov**

The paper presents theoretical and experimental results of simultaneous nonlinear reflection of two femtosecond pulses at the fundamental  $\omega_1$  and doubled  $\omega_2 = 2\omega_1$  frequencies from a dielectric medium. It is shown that the reflection of the two-component radiation leads to light pulses generating at the triple and combination frequencies. Moreover, the reflected triple frequency radiation spectrum represents a superposition of two components: the triple  $3\omega_1$  and combination  $2\omega_2 - \omega_1$ . Interference between these two components leads to spectrum modulation at  $3\omega_1$  frequency while the time delay changing between the incident pulses.

**Keywords:** nonlinear reflection, triple and combination frequencies, femtosecond pulse.

*Olga Stolpovskaya* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, o.stolpovskaya@gmail.com

*Sergey Putilin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior scientific researcher, PhD, Associate professor, seputilin@yandex.ru

*Victor Bespalov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Deputy department head, D.Sc., Professor, victorbespaloff@gmail.com

*Sergey Kozlov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

#### **INTERPOLATION METHOD OF DIGITAL IMAGES BASED ON DISCRETE WAVELET TRANSFORM**

**D. Fyodorov**

Investigation results of a scaling method for digital images based on discrete wavelet transform (DWT) are presented. Estimates of image distortions under image interpolation using the DWT are obtained. Influence of the basis wavelets choice on the transform errors of images under scaling is investigated.

**Keywords:** scaling, image interpolation, discrete wavelet transform.

*Dmitriy Fyodorov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, End-ik@ya.ru

#### **INVESTIGATION OF MATERIALS INTERNAL MICROSTRUCTURE BY OPTICAL COHERENCE MICROSCOPY WITH A TUNABLE WAVELENGTH**

**I. Gurov, E. Zhukova, N. Margaryants**

The studying possibilities of materials internal microstructure by optical coherence tomography with tunable wavelength ( $1305 \pm 75$  nm) on an example of biological and artificial origin tissues are discussed. The images of tomograms (B-scans) and 3D-image of research areas are given.

**Keywords:** optical coherence microscopy, tomogram, microstructure of materials, diagnostics, 3D – image.

*Igor Gurov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Department, D.Sc., Professor, gurov@mail.ifmo.ru

*Ekaterina Zhukova* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, zhukova-ifmo@mail.ru

*Nikita Margaryants* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior lecture, fosp@grv.ifmo.ru

## ANALYSIS OF CHARACTERISTICS AND OPTIMIZATION OF IMAGE REPRESENTATION FOR OPTICAL COHERENT TOMOGRAPHY

P. Skakov

The choice of optimal image representation format is examined for data obtained by methods of optical coherent tomography in microstructure researches for random inhomogeneous mediums.

Formats analysis is done meeting the requirements of knowledge domain and experimental results of efficiency test for images representation in different formats are considered. Efficient formats and choice of their parameters are recommended.

**Keywords:** optical coherent tomography, data exchange, encoding, image representation.

*Pavel Skakov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, pavelssx@gmail.com

## LASER AND MEDICAL TECHNOLOGIES

### LASER CLEANING: ASPECTS OF INDUSTRIAL APPLICATION

V. Veiko, A. Kishalov, T. Mutin, V. Smirnov

The article deals with the main mechanisms of a metal surface laser cleaning. Experimental results of the metal surface cleaning with using of two laser types are given. The first laser works on 1,07 μm wavelength and has a 200 ns pulse duration and a 1 mJ pulse energy, the second laser works on 1.064 μm wavelength and has a 10 ns pulse duration, and 20 mJ pulse energy. Additionally, ranges of the laser cleaning application and its perspectives are given.

**Keywords:** laser cleaning, fiber laser, YAG:Nd laser, Q-switched pulse.

*Vadim Veiko* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, veiko@lastech.ifmo.ru

*Anton Kishalov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, grinfo@mail.ru

*Timofey Mutin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, timofeymutin@yandex.ru

*Valentin Smirnov* – Laser Technologies Ltd. General director, PhD, Associate professor, valentin56@mail.ru

## OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY METHOD APPLICATION FOR ART OBJECTS

### INVESTIGATING PERFORMED IN TARSIA TECHNIQUE

I. Gurov, E. Zhukova, A. Levshina

Possibilities of optical coherence tomography method application with tunable wavelength ( $1305 \pm 75$  nm) for decorative and applied arts objects research, made by wood tarsia technique are considered. The images of B-scans and 3D-images of research areas are presented.

**Keywords:** optical coherence tomography, 3D-image, incrustation, tarsia, decorative and applied arts.

*Igor Gurov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Department, D.Sc., Professor, gurov@mail.ifmo.ru

*Ekaterina Zhukova* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, zhukova-ifmo@mail.ru

*Anna Levshina* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, l\_a\_v\_sun@mail.ru

## TERAHERTZ ABSORPTION SPECTRA OF 2,3- BIPHOSPHOGLYCERATE IN RED BLOOD CELLS AND THEIR PRACTICAL SIGNIFICANCE

L. Kamysheva, Y. Grachev, L. Kiseleva, N. Vashurin, O. Lopatiev, I. Zeldi, I. Popov, V. Bespalov

The article deals with the study of 2,3-bifosfoglitserata diagnosis - an important organic phosphorus compound in the red blood cells of mammals. Experimentally obtained transmission spectra of blood with the addition of riboxin, which is an inhibitor of 2,3-biphosphoglycerate (2,3-BFG) **mutase**, in the range of 0.1 to 1 THz are presented.

**Keywords:** THz radiation, transmission spectrum, blood, red (blood) cells, hemoglobin, 2,3- biphosphoglycerate.

*Lyudmila Kamysheva* – Ministry of Education and Science of the Mari El Republic, leading expert, kamilalaiva@mail.ru

*Yaroslav Grachev* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, grachev\_y@mail.ru

*Lyudmila Kiseleva* – Federal State Budgetary Institution of Higher Education (FSBI HE) «Mari State University», Associate professor, PhD, Associate professor, zeldiwe@gmail.com

*Nikita Vashurin* – Federal State Budgetary Institution of Higher Education (FSBI HE) «Mari State University», student, Nickita\_Vashurin@mail.ru

*Oleg Lopatiev* – Military Regiment 31265, commanding officer, popov@marsu.ru

*Ivan Zeldi* – Federal State Budgetary Institution of Higher Education (FSBI HE) «Mari State University», Associate professor, PhD, Associate professor, zeldiwe@gmail.com

*Ivan Popov* – Federal State Budgetary Institution of Higher Education (FSBI HE) «Mari State University», Department head, D.Sc., Professor, popov@marsu.ru

*Victor Bespalov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Deputy department head, D.Sc., Professor, victorbespaloff@gmail.com

## **ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS NONLINEAR SYSTEMS CONTROL ON THE BASE OF HYBRID MODELS WITH ADAPTATION**

**S. Kolyubin, D. Efimov, V. Nikiforov, A. Bobtsov**

The paper deals with the task of hybrid model synthesis for approximating of nonlinear systems dynamics. The model should be accurate as well as easy to implement for control algorithms development. Proposed approach provides real-time hybrid model adjustment. Combined control scheme has been considered.

**Keywords:** nonlinear system, hybrid model, combined control, identification.

*Sergey Kolyubin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, s.kolyubin@gmail.com

*Denis Efimov* – INRIA-LNE, NON-A Group, France, researcher, D.Sc., efde@mail.ru

*Vladimir Nikiforov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice President for Development, D.Sc., Professor, nikiforov@mail.ifmo.ru

*Alexey Bobtsov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department head, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

## **OUTPUT CONTROL ALGORITHM WITH DISTURBANCE CANCELLATION FOR LINEAR PLANT WITH PARAMETRIC AND STRUCTURAL UNCERTAINTIES**

**A. Bobtsov, S. Kolyubin, A. Pyrkin**

The paper deals with an output stabilization problem for a linear plant disturbed by an external unknown sinusoidal perturbation. The solution is obtained for a class of linear systems with parametric and structural uncertainties.

**Keywords:** output control, disturbance cancellation, parametric and structural uncertainty.

*Alexey Bobtsov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department head, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

*Sergey Kolyubin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, s.kolyubin@gmail.com

*Anton Pyrkin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, PhD, a.pyrkin@gmail.com

## **INFRARED TELESCOPE SCANNING AXIS ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM ACCURACY IMPROVING PROBLEM**

**V. Tolmachev, D. Subbotin**

The accuracy improving problem of scanning axis electric drive control system based on the contactless electromagnetic converter with limited rotation angle was discussed. Vector-matrix model and modeling methodology of the closed speed control loop with proportional differential regulator was proposed. Scanning process simulation was performed and long-term structural solutions for the control system were proposed.

**Keywords:** electromagnetic converter, speed control system, modeling methodology, mathematical model, scanning modes, infrared telescope.

*Valeriy Tolmachev* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, tolmachev@ets.ifmo.ru

*Dmitriy Subbotin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, Subb-Dm@yandex.ru

## **COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES EVALUATION METHOD OF SPEECH SIGNAL CLIPPING LEVEL**

**S. Aleinik, Yu. Matveev, A. Raev**

The article deals with different evaluation methods of speech signal clipping level. A new method for a speech signal clipping level evaluation is presented. It is shown that the new method has better characteristics than other well-known methods.

**Keywords:** clipping, speech signal.

*Sergey Aleinik* – «Speech Technology Center-Innovation», Ltd, scientific researcher, aleinik@speechpro.com

*Yuri Matveev* – «Speech Technology Center-Innovation», Ltd, chief scientific researcher, D.Sc., matveev@speechpro.com

*Andrey Raev* – «Speech Technology Center », Ltd, Director of Research Department, raev@speechpro.com

## INITIALIZATION PROBLEMS OF SPEAKERS' SEGMENTATION SYSTEMS BASED ON VARIATION BAYESIAN ANALYSIS

**O. Kudashev, T. Pekhovsky**

This paper presents a model description used for the speakers' segmentation task. The iterative formulas approximating distribution of a posteriori speakers' model parameters based on the made assumptions are given and the new original method for initializing model parameters is offered. The scheme of a speakers' segmentation system based on developed approach is presented. The application of developed system gives relative reduction in error rate up to 26% both at Russian and English speech data bases.

**Keywords:** Bayesian analysis, variation method, speakers' segmentation.

*Oleg Kudashev – «Speech Technology Center-Innovation», Ltd, programmer, oleg-kudashev@yandex.ru*

*Timur Pekhovsky – «Speech Technology Center-Innovation», Ltd., leading scientific researcher, PhD, tim@speechpro.com*

## THE USE OF DICTIONARY INFORMATION IN TEXT ANALYSIS

**K. Boyarsky, E. Kanevsky, S. Stafeev**

Approaches to some problems solving at computer analysis of Russian text are described. The issues associated with lexical and morphological ambiguity removal, with complex objects-phrases allocation in the text and using features of the context to improve the accuracy of text analysis are considered. It is shown that the use of dictionary information can play a crucial role in removing both morphological and part of speech and lexical homonymy.

**Keywords:** text analysis, lexeme, morphology, homonymy, semantics, syntax, dictionary.

*Kirill Boyarsky – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, Boyarin9@yandex.ru*

*Eugenij Kanevsky – Saint Petersburg Economic and Mathematic Institute of the Russian Academy of Sciences, leading researcher, PhD, kanev@emi.nw.ru*

*Sergey Stafeev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department head, D.Sc., Professor, stafeev@phd.ifmo.ru*

## MTBEAM SOFTWARE PRODUCT FOR VISUALIZATION OF THE OPTICAL WAVE PACKETS DYNAMICS FROM A FEW OSCILLATIONS

**D. Kislin, M. Knyazev, V. Zvyagin, S. Kozlov**

A software product is developed including a visualizer and calculation management program, able to solve the evolution fields modeling problem and spectra of electromagnetic wave packets that can have both spatial and temporal superbroadening spectra. The software package allows calculating not only locally, but on a remote computer or a supercomputer, and display calculation results in the form of charts and graphs. Examples of calculation visualization for diffraction on one-period terahertz pulse slit.

**Keywords:** visualizer, plug-in, client-server technology, waves of a few oscillations, ultra-wide radiation spectrum.

*Dmitry Kislin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, dexicekiller@gmail.com*

*Mikhail Knyazev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, knyazev.michael@gmail.com*

*Victor Zvyagin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, victor\_zviagin@mail.ru*

*Sergey Kozlov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru*

## DYNAMIC PROPERTIES OF A NEURAL NETWORK MODEL OF SPATIAL MEMORY

**V. Lyakhovetskiy, A. Potapov**

A model for movements sequences memorizing (spatial positions) based on the hetero-associative neural network is considered. An estimating criterion for correctness of memorized data is proposed as the number of iterations necessary for transition into some steady state. This criterion is in good agreement with psychophysiological facts and can be utilized for unsupervised training of the neural network model. Interpretation of different error types from the position of nonlinear dynamics is given.

**Keywords:** hetero-associative neural networks, working storage, repeating errors.

*Vsevolod Lyakhovetskiy – Pavlov Institute of Physiology Russian Academy of Sciences, junior research worker, PhD, v\_la2002@mail.ru*

*Alexey Potapov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., pas.aicv@gmail.com*

**COMPRESSION OF THREE-DIMENSIONAL BIOMEDICAL IMAGES BASED ON OCTREE REPRESENTATION****I. Zhdanov, A. Potapov, O. Scherbakov**

The method of compression without losses based on octree representation in application to three-dimensional biomedical images was considered. The modification of this method that implements compression with losses using noises pre-filtering was suggested. It is shown that this method is better in quality of compression than methods of two-dimensional compression with losses or without them (PNG and JPEG) applied to three-dimensional images layer-by-layer.

**Keywords:** image compression, biomedicine, octree.

*Innokenty Zhdanov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, avenger15@yandex.ru

*Alexey Potapov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., pas.aicv@gmail.com

*Oleg Scherbakov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ScherbakovOlegDK@yandex.ru

**MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES****MEASUREMENT OF STEEL MAGNETIC SUSCEPTIBILITY UNDER CRYOGENIC CONDITIONS****I. Ivanov, A. Vasiliev, M. Vznuzdaev, S. Vorobyov, A. Getalov,  
S. Kotov, P. Kravtsov, A. Nadtochy, V. Trofimov**

Device for investigation of steel magnetic susceptibility at the cryogenic conditions has been designed and created in Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI). Experimental setup gives the possibility to measure the dynamic magnetic susceptibility in a wide range of temperatures (10-300K). Different types of stainless steel were tested and results are presented in the paper. Practical aim of the measurements was to find materials for the experiment MuSun with low magnetic susceptibility.

**Keywords:** dynamic magnetic receptivity, cryogenics, magnetometer.

*Ilya Ivanov* – Petersburg Nuclear Physics Institute, postgraduate, ivannov\_ilya@mail.ru

*Alexander Vasiliev* – Petersburg Nuclear Physics Institute, Department head, PhD, senior scientist, vassilie@pnpi.spb.ru

*Marat Vznuzdaev* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, PhD, senior scientist, marat@pnpi.spb.ru

*Sergey Vorobyov* – Petersburg Nuclear Physics Institute, Department head, senior scientist, vsiloa@pnpi.spb.ru

*Alexander Getalov* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, PhD, senior scientist, getalov@pnpi.spb.ru

*Sergey Kotov* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, kotoff@pnpi.spb.ru

*Peter Kravtsov* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, PhD, senior scientist, pkraft@gmail.com

*Alexander Nadtochy* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, PhD, senior scientist, avnad@pnpi.spb.ru

*Victor Trofimov* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, PhD, senior scientist, vtrof@gmail.com

**POLARIZED ATOMIC BEAM SOURCE FOR POLFUSION EXPERIMENT****S. Terekhin, A. Vasilyev, M. Mikirtychyants, P. Kravtsov, M. Vznuzdaev**

Laboratory for Cryogenic and Superconducting of Petersburg Nuclear Physics Institute in collaboration with Saint Petersburg National Research University ITMO is creating a source of polarized atoms of hydrogen and deuterium for the international experiment to study nuclear fusion reaction of polarized deuterons (PolFusion). The experiment is taking place in Russia. Special experimental system will be done in frame of the project at Petersburg Nuclear Physics Institute. This article describes the basic design principles of one set module - a source of polarized deuterium atoms. Radiofrequency dissociator and beam parameters control system are described in details.

**Keywords:** polarization, reaction cross section, nuclear fusion, dissociation.

*Sergey Terekhin* – Petersburg Nuclear Physics Institute, scientific researcher, lab19@yandex.ru, serzh@gtn.ru

*Alexander Vasiliev* – Petersburg Nuclear Physics Institute, Laboratory head, PhD, senior scientist, vassilie@pnpi.spb.ru

*Maxim Mikirtychyants* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, PhD, senior scientist, maxmik@gmail.com

*Peter Kravtsov* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, PhD, senior scientist, pkraft@gmail.com

*Marat Vznuzdaev* – Petersburg Nuclear Physics Institute, senior scientist, PhD, senior scientist, marat@pnpi.spb.ru

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF TWO-COMPONENT POLYMER BLENDS FORMATION

**A. Podshivalov, V. Zuev, S. Bronnikov**

The method of electronic microscopy is used to investigate morphology of the polymer blends containing polyethylene of low density (LDPE)/polyamide-6 (PA-6) in 75 %/25 % proportion with emulsifier and compatibilizer additives. Histograms of the PA-6 particles size, obtained at statistical analysis of the blend microphotographs are described using the model of aggregation, constructed within thermodynamics of irreversible processes. It is established that at the components blending the PA-6 particles are dispersing in the LDPE phase and subsequently coalescence. The influence of the quantity of both compatibilizer and emulsifier entered into the blend and on the mean size of the PA-6 particles and on the mechanical properties of the blends is revealed.

**Keywords:** morphology, polymer blend, compatibilizer, emulsifier, thermodynamics of irreversible processes.

*Aleksander Podshivalov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, podshivalov2005@mail.ru

*Vyacheslav Zuev* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, zuev@hq.macro.ru

*Sergei Bronnikov* – Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences, leading research scientist, D.Sc., Professor, sergei\_bronnikov@yahoo.com

## THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING

### THERMAL MODE OF A TWO-RANGE FLOATING GYRO

**D. Gromov**

The results of a thermal mode investigation of a two-range floating gyro are described. Calculations of stationary and non-stationary thermal modes of a gyro are carried out, its thermal model is presented and recommendations to design optimization for reducing of temperature perturbations influence are given. The direction of further researches for present investigation development is proposed.

**Keywords:** floating gyro, thermal model, thermal mode, CAD-system.

*Dmitry Gromov* – State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI “Elektropribor”, JSC, design-engineer, dmitrygromov17@gmail.com

## COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

### CONVERGENCE IMPROVING OF THE FINITE DIFFERENCE METHOD BY INTERIM

#### SOLUTION CALCULATING

**A. Grishentsev, A. Korobeynikov**

The article deals with application currency of the finite difference method for differential equations solving with boundary conditions. A method for interim solution calculating for efficiency improvement of the finite difference method is suggested. Software implementation results of this method are given. Algorithmic implementation of the method in two-dimensional space is considered.

**Keywords:** finite difference method, differential equations.

*Alexey Grishentsev* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, tigerpost@ya.ru

*Anatoliy Korobeynikov* – Saint Petersburg Branch Foundation of the Russian Academy of Sciences “Institute for Earth Magnetism, Ionosphere and Radiowaves n. a. N.V.Puchkov RAS”, Deputy director for science, D.Sc., Professor, Korobeynikov\_A\_G@mail.ru

## INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

### DYNAMIC BAYESIAN NETWORK APPLICATION IN THE INTRUSION DETECTION SYSTEMS

**S. Arustamov, V. Dayneko**

Issues of known intrusion detection systems operation are stated. Architecture description of the developed intrusion detection system is given. The descriptions of used dynamic Bayesian network, learning algorithms and test domain network are cited. Errors of the first and second kind are defined during the operation of intrusion detection system. Comparative test results are given after the application of developed system and Snort system.

**Keywords:** intrusion detection system, dynamic Bayesian network, Bayesian inference.

*Sergei Arustamov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, sergey.arustamov@gmail.com

*Vyacheslav Dayneko* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, daynekovy@yandex.ru

## INTERNET USER IDENTIFICATION METHOD

**E. Bessonova, I. Zikratov, Yu. Kolesnikov, V. Roskov**

The article deals with mechanisms for user identification in the Internet. A way of feature space forming for user identification is suggested and an identification method based on secondary characteristics of working environment is proved. A computational experiment was conducted for results verification.

**Keywords:** identification, self-descriptiveness, feature, tuple, user.

## **SUMMARY**

---

*Ekaterina Bessonova* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, bessonova@cit.ifmo.ru

*Igor Zikratov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, zikratov@cit.ifmo.ru

*Yury Kolesnikov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice-president for educational, organizational and administrative affairs, D.Sc., Professor, kolesnikov@mail.ifmo.ru

*Vladislav Roskov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, vos@vos.uz

### **ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT INFORMATION TECHNOLOGIES FOR SYSTEM-DYNAMIC MODELS DEVELOPMENT OF REGIONAL INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS**

**I. Datyev, A. Masloboev**

For the purpose of information support efficiency enhancement of regional information and communication systems (RICS) development forecasting a comprehensive analysis method of RICS development dynamics in view of socio-economic environment characteristics has been proposed. Information technologies and software tool-kits for RICS system-dynamic models automated engineering have been developed.

**Keywords:** information technologies, simulation, system dynamics, regional information and communication systems, forecasting.

*Igor Datyev* – Federal State Budgetary Establishment of Science Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, junior research officer, datyev@iimm.kolasc.net.ru

*Andrey Masloboev* – Federal State Budgetary Establishment of Science Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, PhD, Associate professor, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

### **STAKEHOLDERS INTERACTION DURING FORMATION AND REALIZATION OF THE COMMERCIAL POLICY IN SAINT PETERSBURG**

**R. Lugovskoy, D. Solov'yov, V. Sysoev**

Interested parties in formation and realization of an effective commercial policy are revealed. The analysis of stakeholders modern mutual relations is carried out and directions of their interaction are offered.

**Keywords:** trade, business, state regulation.

*Roman Lugovskoy* – Saint Petersburg Institute of Commerce and Economics, assistant, PhD, rlugovskoy@yandex.ru

*Denis Solov'yov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior teacher, 9218964588@mail.ru

*Vitaliy Sysoev* – The Legislative Assembly of Saint Petersburg, applicant, 9136434@mail.ru

### **BRIEF REPORTS CASCADE REDUCTION APPROACH FOR IDENTIFICATION PROBLEMS**

**S. Aranovskiy, A. Bobtsov, A. Pyrkin**

Identification problem of the partial set of unknown parameters in the linear regression model was considered. The reduction procedure was proposed allowing rewriting of the original model in the reduced form containing less unknown parameters. The existence conditions of the reduced model were investigated coming to the linear independence of the exciting signals.

**Keywords:** linear regression model, reduction, identification.

*Stanislav Aranovskiy* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior scientific researcher, PhD, s.aranovskiy@gmail.com

*Alexey Bobtsov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department head, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

*Anton Pyrkin* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, PhD, a.pyrkin@gmail.com

### **FEATURE SELECTION FOR SPEAKER'S EMOTION RECOGNITION**

**A. Sholokhov**

The article deals with the problem of the most informative features selecting for automatic emotional speaker's state recognition. Genetic algorithm was used to obtain the optimal subset of features for a given quality criterion of recognition.

**Keywords:** emotion recognition, speech features, genetic algorithms.

*Alexey Sholokhov* – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, sholokhovalexey@gmail.com

**HIDDEN MARKOV MODELS-BASED RUSSIAN SPEECH SYNTHESIS****P. Chistikov**

This paper presents the approach to speech synthesis based on hidden Markov models for the Russian language. State clusterization algorithm is used to improve the flexibility of the system. The scheme of excitation generation is also presented.

**Keywords:** speech synthesis, hidden Markov models, speech parameterization, data clusterization.

*Pavel Chistikov – «Speech Technologies Center», Ltd., scientific researcher, chistikov@speechpro.com*

**ESTIMATION AND INPUT AUTOMATION OF HOMEWORK RESULTS IN LOCAL E-ZINE OF PROGRESS****Y. Kitaev**

The article deals with construction and functioning of the automated gathering and performance estimation of homework carrying out with Internet technologies in remote learning.

**Keywords:** remote learning, Internet technologies.

*Yuri Kitaev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, senior scientific researcher, KitaevUV@km.ru*

**AUTOMATED SYSTEM DEVELOPMENT FOR NEUROSURGERY****Y. Skupov, S. Kiselev, A. Anichkov, Y. Polonsky, A. Seregin**

The article deals with analysis of modern systems for stereotactic surgery. Calculation method for brain aims coordinates and pointing method are described. A new automated system and its operation principles are described.

**Keywords:** stereotactic neurosurgery.

*Yuri Skupov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, starosta-61@yandex.ru*

*Sergey Kiselev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate professor, kiselev@mail.ifmo.ru*

*Andrey Anichkov – Institute of the Human Brain Russian Academy of Sciences, Deputy director, D.Sc., Professor, stereo@ihb.spb.ru*

*Yuri Polonsky – Institute of the Human Brain Russian Academy of Sciences, leading scientific researcher, D.Sc., yzpol@qip.ru*

*Alexander Seregin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, PhD, perikl@yandex.ru*

**APPLICABILITY CRITERIA OF THE COLOR SPACES FOR OPTICAL-ELECTRONIC MINERALS COLOR ANALYSIS SYSTEMS****A. Vakulenko, E. Gorbunova, A. Chertov**

Evaluation criteria of the color space applicability for mineral objects color description in terms of analysis, identification, and automatic separation efficiency by optical-electronic methods in automatic mode are discussed

**Keywords:** color description, color model, optical-electronic method, mineral object, photometric sorting.

*Anatoly Vakulenko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, voron5266@yandex.ru*

*Elena Gorbunova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, vredina\_ia@mail.ru*

*Aleksander Chertov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, a.n.chertov@mail.ru*

**SYNCHRONIZATION PROBLEMS OF FLOW PROCESSES IN THE SUPPLY CHAINS****V. Fetisov, D. Golovtsov**

This paper discusses the causes of errors in production planning and management policy at customer order intake in the supply chains.

**Keywords:** supply chains management.

*Vladimir Fetisov – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department head, D.Sc., Professor, fet1@aanet.ru*

*Dmitriy Golovtsov – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Laboratory head, kaf16@list.ru*



## ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....

Редакция принимает к рассмотрению оригинальные (нигде ранее не опубликованные, за исключением материалов научных конференций) работы по тематике журнала, представляющие новые научные результаты, полученные лично авторами статьи. Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние актуальных направлений развития науки и техники, сообщения о научных конференциях, материалы научных дискуссий и рецензии на новые книги.

Тематика журнала включает разделы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения по направлениям: оптика, оптические системы и технологии, оптическое материаловедение и нанотехнологии, информационные и компьютерные системы и технологии, методы и системы защиты информации, системный анализ, системы автоматического управления, мехатроника, системы автоматизированного проектирования, микроэлектроника, биомедицинские технологии. В качестве дополнительных разделов журнал также публикует работы по экономике и финансам.

Материал статьи должен быть изложен в соответствии со следующей структурой.

В аннотации, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо кратко (объемом до 100 слов) изложить научное содержание статьи.

В введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, краткий анализ известных из научной литературы решений, критику их недостатков и преимущества (особенности) предлагаемого подхода.

В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи может быть разбит на отдельные разделы: «Постановка задачи», «Основной результат», «Результаты моделирования» и т.п.

В заключении необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований.

Все статьи проходят процедуру рецензирования. После ее завершения автору направляется экземпляр рукописи с замечаниями рецензента и научного редактора для доработки. При опубликовании статьи указываются даты ее поступления и последующих переработок.

### ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ .....

Объем статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 6 страниц.

Оригинал-макет статьи выполняется в редакторе Word for Windows. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 pt, межстрочный интервал одинарный, поля сверху 20 мм, остальные поля 25 мм. Абзацный отступ 10 мм.

Аннотация печатается шрифтом Times New Roman 10 обычный, межстрочный интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. В аннотации не допускаются ссылки на цитированную литературу и громоздкие формулы.

Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полуторной пустой строкой, а от последующего текста одной пустой строкой.

Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, пустыми строками не отделяется.

Формулы набираются в редакторе Microsoft Equation Ed. 3.0. Параметры стиля: текста — Times New Roman, прямой; функции — Times New Roman, прямой; переменной — Times New Roman, наклонный; греческих букв — Symbol, прямой; символов — Symbol, прямой; матрицы-вектора — Times New Roman, прямой, полужирный; чисел — Times New Roman, прямой. Размеры: обычный — 12 pt, крупный индекс — 10 pt, мелкий индекс — 8 pt, крупный символ — 16 pt, мелкий символ — 12 pt. Отдельные переменные в тексте допускается набирать в текстовом режиме с соблюдением требований, указанных для формул. Разделительный знак десятичных дробей — запятая.

При оформлении рисунков и графиков используется шрифт Times New Roman. Стиль написания переменных должен соответствовать требованиям к основному тексту.

Используются только единицы измерения, соответствующие системе СИ.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Нумерация позиций — согласно очередности ссылок в тексте.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Более подробную информацию смотрите на сайте <http://books.ifmo.ru/ntv/>

Подписано к печати 15.05.2012 Тираж 350 экз. Заказ № 27(79)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»  
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций,  
свидетельство ПИ № ФС77-47243 от 10.11.2011 г.  
Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать  
(Газеты. Журналы)

# SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS

MAY-JUNE 2012

NUMBER 3 (79)



ISSN 2226-1494

NAUČNO-TEHNIČESKIJ VESTNIK INFORMACIONNYH TEHNOLOGIJ, MEHANIKI I OPTIKI

## REVIEW ARTICLE

Reconfigurable and nonlinear metamaterials

## OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

Development tendencies of compact third generation infrared systems based on active-passive method

Compatibility analysis of fluorine silicate and borosilicate glass layers for optical fiber manufacturing

## PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

Digital holographic microscopy: modern recording methods of micro objects holograms

Generation of radiation on multiple frequencies in gases at plasma excitation by a strong field of few-cycle pulses

Radiation interference on triple and combination frequencies at the simultaneous nonlinear reflection of two femtosecond pulses at the fundamental and doubled frequencies from a dielectric medium

Interpolation method of digital images based on discrete wavelet transform

Investigation of materials internal microstructure by optical coherence microscopy with a tunable wavelength

Analysis of characteristics and optimization of image representation for optical coherent tomography

## LASER AND BIOMEDICAL TECHNOLOGIES

Laser cleaning: aspects of industrial application

Optical coherence tomography method application for art objects investigating performed in tarsia technique

Terahertz absorption spectra of 2,3- biphosphoglycerate in red blood cells and their practical significance

## ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

Nonlinear systems control on the base of hybrid models with adaptation

Output control algorithm with disturbance cancellation for linear plant with parametric and structural uncertainties

Infrared telescope scanning axis electric drive control system accuracy improving problem

## COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

Evaluation method of speech signal clipping level

Initialization problems of speakers' segmentation systems based on variation Bayesian analysis

The use of dictionary information in text analysis

MTBeam software product for visualization of the optical wave packets dynamics from a few oscillations

Dynamic properties of a neural network model of spatial memory

Compression of three-dimensional biomedical images based on octree representation

## MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

Measurement of steel magnetic susceptibility under cryogenic conditions

Polarized atomic beam source for PolFusion experiment

Thermodynamic analysis of two-component polymer blends formation

## THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING

Thermal mode of a two-range floating gyro

## COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

Convergence improving of the finite difference method by interim solution calculating

## INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

Dynamic Bayesian network application in the intrusion detection systems

Internet user identification method

## ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

Information technologies for system-dynamic models development of regional information and communication systems

Stakeholders interaction during formation and realization of the commercial policy in Saint Petersburg

## BRIEF REPORTS

Cascade reduction approach for identification problems

Feature selection for speaker's emotion recognition

Hidden Markov models-based Russian speech synthesis

Estimation and input automation of homework results in local e-zine of progress

Automated system development for neurosurgery

Applicability criteria of the color spaces for optical-electronic minerals color analysis systems

Synchronization problems of flow processes in the supply chains

## SUMMARY

Yu. Kivshar, A. Orlov

1

Yu. Yakushenkov

11

A. Korobeynikov, Yu. Gatchin, K. Dukel'skiy, M. Eron'yan, E. Ter-Nersesantz, N. Nesterova

15

V. Gendin, I. Gurov  
S. Shtumpf, A. Korolev, S. Kozlov

19

27

O. Stolpovskaya, S. Putilin, V. Bespalov, S. Kozlov

31

D. Fyodorov

37

I. Gurov, E. Zhukova, N. Margaryants

40

P. Skakov

45

V. Veiko, A. Kishalov, T. Mutin, V. Smirnov  
I. Gurov, E. Zhukova, A. Levshina

50

55

L. Kamysheva, Y. Grachev, L. Kiseleva, N. Vashurin, O. Lopatiev, I. Zeldi, I. Popov, V. Bespalov

59

S. Kolyubin, D. Efimov, V. Nikiforov, A. Bobtsov  
A. Bobtsov, S. Kolyubin, A. Pyrkin

64

68

V. Tolmachev, D. Subbotin

73

S. Aleinik, Yu. Matveev, A. Raev  
O. Kudashev, T. Pekhovsky

79

83

K. Boyarsky, E. Kanevsky, S. Stafeev  
D. Kislin, M. Knyazev, V. Zvyagin, S. Kozlov

87

91

V. Lyakhovetskiy, A. Potapov  
I. Zhdanov, A. Potapov, O. Scherbakov

96

100

I. Ivanov, A. Vasiliev, M. Vznyzdaev, S. Vorobyov, A. Getalov, S. Kotov, P. Kravtsov, A. Nadtochy, V. Trofimov  
S. Terekhin, A. Vasilyev, M. Mikirtychants, P. Kravtsov, M. Vznyzdaev  
A. Podshivalov, V. Zuev, S. Bronnikov

105

109

114

D. Gromov

119

A. Grishentsev, A. Korobeynikov

124

S. Arustamov, V. Dayneko

128

E. Bessonova, I. Zikratov, Yu. Kolesnikov, V. Roskov

133

I. Datyev, A. Masloboev

138

R. Lugovskoy, D. Solov'yov, V. Sysoev

144

S. Aranovskiy, A. Bobtsov, A. Pyrkin

149

A. Sholokhov

150

P. Chistikov

151

Yu. Kitaev

152

Y. Skupov, S. Kiselev, A. Anichkov, Y. Polonsky,

153

A. Seregin

A. Vakulenko, E. Gorbunova, A. Chertov

156

V. Fetisov, D. Golovtsov

157

158