АО «Завод им. С.М.Кирова»

|  |  |
| --- | --- |
|  | **УТВЕРЖДАЮ**  Генеральный директор  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.С.Аргимбаев  \_\_\_.03.2021 |

УДК 621.396.13: 623.611(001.891.32)

ГРНТИ 78.25.33

ОТЧЁТ

О ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

По теме «Исследование возможности маломощных цифровых приемопередатчиков для использования в индивидуальных тактических средствах радиосвязи».

Шифр «Медеу»

|  |  |
| --- | --- |
| Руководитель  Советник генерального директора | Поротиков А.В.  \_\_\_.03.2021 |

Петропавловск 2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Руководитель,  Советник Генерального директора |  | Поротиков А.В. |
| Ответственный исполнитель,  Инженер ТД |  | Карманов А.А. |
| Исполнители |  |  |
| Инженер ТД |  | Костырев В.С. |
| Инженер ТД |  | Решетар А.Ю. |
|  |  |  |

РЕФЕРАТ

Отчет на 22 стр., с 5 приложениями.

ПЕРЕЧЕНЬ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ: модем; модуляция; мощность; чувствительность; амплитуда; прием; передача; сигнал; вокодер; радиостанция; связь.

Настоящий отчет обобщает и систематизирует данные, полученные в результате исследований по теме: «Исследование возможности маломощных цифровых приемопередатчиков для использования в индивидуальных тактических средствах радиосвязи» (шифр темы: «Медеу»). Основаниями для выполнения являются Программа развития АО «Завод им. С.М.Кирова», приказ Генерального директора от 20.12.20 № 371-1

Целью научно-исследовательской работы является исследование возможностей использования современных цифровых видов радиосвязи с малой мощностью излучения для разработки радиостанции, исследование индивидуальных тактических средств радиосвязи низового звена управления войсками используемых в боевых условиях, создание макета радиолинии для определения оптимальных параметров тактического средства радиосвязи.

Работа проведена методом анализа имеющейся информации, сопоставления и синтеза данных для сравнения и классификации. Для подтверждения использовался метод моделирования.

В результаты работы определены оптимальные тактико-технические характеристики индивидуального тактического средства радиосвязи низового звена управления войсками выполненного с использованием современных цифровых видов радиосвязи с малой мощностью излучения (персональная радиостанция солдата). Создан проект тактико-технического задания для проведения опытно конструкторской разработки.

Степень внедрения. Результаты работы будут использованы для разработки тактико-технического задания на проведение ОКР.

Область применения - разработка и производство продукции электронной промышленности

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7

Раздел 1. Исследования современных технологий беспроводных коммуникаций и аппаратных платформ для передачи информации с использованием широкого спектра частот и низкой мощности. 9

Раздел 2. Исследование индивидуальных тактических средств радиосвязи низового звена управления войсками (солдат-отделение-взвод) используемых в боевых условиях. 12

Раздел 3. Проведение эксперимента для подтверждения возможности построения линии радиосвязи с использованием БИС приемопередатчиков LPWAN. 16

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 20

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 21

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 на 35 страницах

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 на 40 страницах

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 на 3 страницах

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 на 11 страницах

ПРИЛОЖЕНИЕ 5 на 13 страницах

**НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящем отчете о НИР использованы ссылки на следующие стандарты:

#### IEEE 802.15 Стандарты беспроводных персональных сетей (WPAN).

MIL-STD-810F Устойчивость оборудования к воздействиям окружающей среды

ETSI EN 300 220 Электромагнитная совместимость и радиочастотный спектр. Радиооборудование малого радиуса действия диапазона частот от 25 МГц до 1000 МГц с уровнем мощности до 500 мВт.

#### ГОСТ 16600-72 Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных измерений.

#### ГОСТ 7.32—2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.90-2007 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу универсальная десятичная классификация. Структура, правила ведения и индексирования

СТ РК В 13.50-2017 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие механических факторов

СТ РК В 13.51-2017 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие климатических факторов

СТ РК В 13.52-2017 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия на взаимодействие специальных сред

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Бюджет канала связи (бюджет радиоканала) - разность в дБ между выходной мощностью передатчика в дБм и пределом чувствительности радио в -дБм. Бюджет канала ≈ Выходная мощность TX (дБм) – Чувствительность RX (-дБм).

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ:

ВВТ - вооружения и военная техника;

ПО – программное обеспечение;

РЭБ – радиоэлектронная борьба;

РЭР – радиоэлектронная разведка;

КРУС - комплекс разведки управления и связи;

8PSK — восьмеричная фазовая манипуляция;

16‑QAM — 16‑позиционная квадратурная амплитудная модуляция;

BPSK — двоичная фазовая модуляция;

ЛЧМ (CSS) — расширение спектра методом линейной частотной модуляции;

D-BPSK — дифференциальная двоичная фазовая манипуляция;

GMSK — минимальная гауссовская манипуляция;

OFDMA — множественный доступ с ортогональным частотным разделением;

OQPSK — квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом;

QPSK — квадратурная фазовая манипуляция;

TDMA — множественный доступ с временным разделением;

ПРС – персональная радиостанция (радиостанция солдата);

АнСУ – Антенно – согласующее устройство;

LPWAN - энергоэффективные сети радиосвязи дальнего радиуса действия

# **ВВЕДЕНИЕ**

#### Радиосвязь в системе управления силовыми структурами должна предоставлять возможность личной коммуникации для каждого члена отделения/команды (солдата). К персональной радиостанции солдата предъявляются требования по габаритам и массе, они предназначены для приема и передачи голосовых сообщений и обмена данными. Дальность связи обычно обеспечивают на дистанции 1000 метров в условиях открытой местности или в пределах двух - трех этажей в бетонных зданиях. Современные цифровые виды радиосвязи используют широкополосные сетевые каналы для затруднения перехвата, радиоканал имеет хорошую устойчивость к мешающим сигналам, низкую вероятность перехвата и низкую вероятность обнаружения [1.1.].

#### Необходимость проведения исследований обусловлена развитием современных видов связи, представляемых группой стандартов IEEE 802.15, а так же готовых решений в виде БИС для возможности их использования при организации персональной радиосвязи.

Новизна темы заключается в обосновании использования базовых технических решений для организации цифровых видов связи, в совокупности с современными технологиями, позволяющими разрабатывать и производить продукцию с наименьшими габаритами наибольшей функциональностью и оптимальными функционально-стоимостными характеристиками.

Актуальность проблемы обусловлена необходимостью разработки отечественных радиостанций для обеспечения силовых структур средствами персональной радиосвязи. Связь является неотъемлемой частью системы управления войсками и другими силовым ведомствами. От надежности и защищенности связи зависит оперативность и своевременность принятия решений, качество и результат боевого применения, охраны границы, сохранение жизни гражданского населения и военнослужащих.

В настоящее время, в Вооруженных силах Республики Казахстан и других силовых ведомствах используются несколько видов и модификаций средств радиосвязи (радиостанций), разработанных и производимых зарубежными компаниями, в частности Elbit Systems, THALES, Barrett Communications, Motorola, Kenwood и др.

Как правило, производители средств радиосвязи разрабатывают, и в дальнейшем используют различные алгоритмы и методы преобразования, модуляции и шифрования сигналов, алгоритмы управления, загрузки и конфигурации. Для управления сетями связи, построенными на их основе, используется уникальное программное обеспечение.

Таким образом, совместимость средств радиосвязи для передачи служебной информации с уровнем ДСП и выше, и радиосетей построенных на их основе отсутствует. Отсутствует унификация оборудования, нет возможности организовать комплексное сервисное обслуживание и ремонт радиостанций. Кроме того, несмотря на сертификацию радиостанций и многочисленные проверки их функционирования, существует реальная опасность отключения радиосвязи, или перехвата их управления противником.

Так, во время Греко-Турецкого конфликта на острове Кипр 1974 г. была частично блокирована работа радиостанций турецкой армии, поставляемых странами НАТО, и перехвачено управление войсками. 21 июля 1974 г. было спровоцировано крупномасштабное сражение между турецким флотом и турецкой авиацией, в ходе которого морская ударная группа была разбита, потери также понесла и воздушная ударная группа. По итогам конфликта Турецким правительством была поставлена задача создания собственных систем и средств радиосвязи, которая успешно решена компанией «Аселсан» в 1983г.

Современные возможности и цифровые технологии многократно повысили опасность отключения радиосвязи, или перехвата их управления противником. Недокументированные возможности и функции программного обеспечения радиостанций все труднее обнаружить. Например, имеются случаи блокировки работы радиостанций в заранее определенной местности с использованием координат глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС, и т.д.). Использование современных систем РЭБ позволяет успешно подавлять радиосвязь. Современные типы радиостанций используют различные методы ухода от радиоподавления, эти методы постоянно совершенствуются, и является коммерческой или государственной тайной.

Собственная разработка и производство радиостанций ведется всеми ведущими странами мира, а так же такими государствами как Нигерия, Судан, ЮАР, Австралия, Малайзия и др. что можно наблюдать на военных выставках, таких как IDEX (ОАЭ), LIMA (Малайзия), IDEF (Турция) и других. Ввиду быстрого развития систем РЭБ и РЭР аппаратура радиосвязи подвержена быстрому моральному устареванию. Так, радиостанции и системы связи войск армии США, используемые в боевых условиях с 2005 по 2010 годы, продаются на ежегодных выставках военных излишков и тактической продукции, таких как ANME Trade Show.

Поставляемые в Казахстан радиостанции тактического звена в основном разработаны в 1995 – 2005г.г., частично имеют режимы работы, защищающие от РЭБ и РЭР. Однако они хорошо изучены и легко поддаются противодействию. В силу сложившихся обстоятельств, конструктивных особенностей и закрытого программного обеспечения, для дальнейшего развития и модернизации они не пригодны.

Исходя из вышеизложенного, разработка и производство отечественных радиостанций для армии и силовых ведомств дает гарантию целостности систем радиосвязи. Обеспечит возможность выполнять требования заказчика по функциональности и комплектности и проводить комплексное сервисное обслуживание и обучение личного состава. Постоянно усовершенствовать и обновлять аппаратуру связи.

Кумулятивным эффектом будет развитие собственной промышленности и отраслевой науки. Так, для выполнения ГОЗ предприятия Казахстана вынуждены ежегодно производить закуп средств связи зарубежного производства на сумму более чем 1.5 млрд тенге. При этом не выдерживаются сроки поставок, проводится ценовой диктат. За неимением альтернатив Заказчик вынужден закладывать в тех. спецификации оборудование, которое морально устарело, изготавливается для стран 3 мира.

#### 

**Раздел 1**

**Исследования современных технологий беспроводных коммуникаций и аппаратных платформ для передачи информации с использованием широкого спектра частот и низкой мощности.**

1.1 Выполнен поиск информации и проведены сравнительные исследования протоколов широкополосной радиосвязи с использованием низкой мощности.

В качестве базовых ориентиров для исследования выбраны энергоэффективные сети радиосвязи дальнего (более 100м.) радиуса действия - LPWAN. Технические решения, принятые стандартами сетей, обеспечивают оптимизацию энергопотребления, радиуса действия и помехоустойчивость. Проведен анализ сетей связи построенных на принципах сотовой связи: LTE-M; NB-IoT; EC-GSM-IoT, а так же сетей на основе стандартов LoRa; Symphony Link; Sigfox Ingenu (RPMA); Weightless; Nwave (Приложение 1 п.1.).

Сделан вывод о том, что использование сетей связи на основе LTE-M для построения тактических радиолиний управления войсками используемых в боевых условиях неприемлемо. Наиболее предпочтительно использование стандарта LoRa как оптимального по скорости передачи, использованию спектра частот и доступности выбора аппаратных средств реализации радиолинии. Проведено исследование возможностей протокола LоRa для оптимальных режимов работы радиолинии (Приложение 1 п.2.).

1.2. Проведен анализ сигналов по помехоустойчивости (Приложение 1. п.2.3) и сделан вывод о возможности их применения в качестве основы для создания тактических радиосетей. Использовалась информация по радиосетям группы стандартов IEEE 802.15, а так же информация по видам модуляции FSK, GFSK, MSK, GMSK.

Анализ и обобщение информации показывает возможность применения технических решений группы стандартов IEEE 802.15, имеющих возможность использования методов модуляций основанных на FSK с различными кодовыми конструкциями для построения линий радиосвязи тактического звена. Применение модуляции FSK позволит организовать радиолинию удовлетворяющую минимальным требованиям к передаче информации со скоростью не менее 2400 бит/с для кодированной речи.

1.3. Проведен сравнительный анализ доступных аппаратных платформ для реализации радиолинии передачи информации с использованием широкого спектра частот и низкой мощности. Рассмотрены БИС для беспроводных приемопередающих систем, доступные на рынке полупроводниковых приборов, которые производят фирмы «Analog Device», «Granansen AS», «Honeywell Infineon Technologies AG», «Inova», «Maxim», «Microchip», «NEC Electronics», «RF Monolithics Inc.», «Semtech», «STMicroelectronics», «Texas Instruments», «Xemics» (Приложение 1 п.3.).

Сделан вывод о том, что наиболее перспективные БИС, построенные с использованием гибридных технологий и имеющие в своем составе модем, это микросхемы – приемопередатчики компании «Semtech» и их аналоги. Эти БИС имеют большую базу данных программного обеспечения с открытым кодом для разработки приложений. Диапазон рабочих частот включает применяемые для построения радиолиний тактического звена 137 – 175 МГц, 410 – 525 МГц, 862 – 1020 МГц. Имеется возможность выбора видов модуляции и кодовых конструкций. Используются стандартные виды последовательных интерфейсов.

Альтернативным решением может быть использование БИС фирмы «Analog Device», однако они используют безлицензионные частоты в узком диапазоне ISM и имеют меньшую чувствительность приемной части при использовании модуляций FSK. Кроме того, выходная мощность передающей части требует использования дополнительных усилительных структур для удовлетворения энергетических потребностей радиолинии (Приложение 1 п.3.).

1.4 Для подтверждения полученных в ходе исследования результатов проведено макетирование радиолинии с использованием необходимых наборов БИС, средств кодирования речи (вокодеров) и преобразования данных.

#### Раздел 2.

#### Исследование индивидуальных тактических средств радиосвязи низового звена управления войсками (солдат-отделение-взвод) используемых в боевых условиях.

2.1. Выполнен поиск информации и проведен анализ имеющихся на рынке ВВТ персональных радиостанций солдата (ПРС) компаний «Aselsan» (Турция), «Dicom» (Чехия), «EID Tactical Radio Systems» (Португалия), «Elbit Systems» (Израиль), «ITT Exelis» (США), «L3Harris» (США), Kongsberg (Норвегия), Radmor (Польша), «Selex» (Англия) и Thales (Франция), «Созвездие» (Россия). Сравнительные характеристики и функции радиостанций приведены Приложении 2.

2.2. Анализ и обобщение полученной информации позволяет сделать вывод о том, что ПРС это, малогабаритные и легкие устройства, предназначенные для голосовой радиосвязи и обмена данными с использованием тактических планшетов, передачи карт, изображений и видео. Для радиостанций солдата используется диапазон частот UHF (300 МГц – 3 ГГц), в том числе в диапазоне ISM [1.7]. В современных моделях для привязки к местности используется спутниковая система позиционирования, дающая возможность реализации функции ситуационной осведомленности, а так же используется широкополосные сетевые каналы. При этом радиообмен имеет хорошую устойчивость к помехам, РЭБ и РЭР, что обеспечивает низкую вероятность перехвата и подавления. ПРС являются частью систем, участвующих в боевом управлении и разведке, например КРУС "Стрелец" и "Стрелец-М" (РФ) для боевой экипировки военнослужащего "Ратник" комплектуется радиостанцией Р-168-0.5.

2.3. С учетом имеющейся информации, полученной в ходе исследования возможностей современных цифровых видов радиосвязи с малой мощностью излучения, а также сопоставления с параметрами доступных технических решений БИС модемов, определены основные показатели и параметры радиостанции, удовлетворяющей большинству требований. (Таблица 1) Учитывалась необходимость существенного уменьшения габаритов и массы ПРС, небольшой радиус действия и потребляемая мощность обуславливают использование частот верхнего метрового и дециметрового диапазона волн, как наиболее оптимальных с точки зрения основных закономерностей распространения радиоволн и условия осуществления радиосвязи [1.3] [1.4]

Выбор нескольких диапазонов рабочих частот обусловлен необходимостью использования всех возможностей радиочастотного спектра, разрешенных для применения потребителем, а так же различиями в тактике применения связи на открытых пространствах, в городской застройке, внутри зданий и сооружений. При этом ПРС можно рассматривать как систему беспроводной связи. [1.5] [1.7]

Таблица 1. Общие технические требования к ПРС

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Показатель | Параметры | |  |
| 1 | Диапазоны рабочих частот | I:  II:  III: | 137 – 175 МГц  410 – 525 МГц  862 – 1020 МГц | |
| 2 | Выходная мощность передатчика | от 100 мВт до 1000 мВт (регулируемая) | | |
| 3 | Максимальная скорость передачи данных | до 230 кбит/с | | |
| 4 | Модуляция | FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa, OOK | | |
| 5 | Дальность связи в условиях прямой радиовидимости | до 3000 м | | |
| 6 | Количество каналов | 100 | | |
| 7 | Продолжительность автономной работы от АКБ при цикле 1:2:17  (передача : прием : ожидание) | до 24 часов | | |
| 9 | Поддержка протоколов TCP/IP | присутствует | | |

2.4. Анализ информации о функциях ПРС различных производителей позволяет сделать вывод о том, что большое значение имеют методы и способы тактического применения радиосвязи в низовом звене управления войсками. При этом необходимо гарантированно довести до подчиненных боевую задачу и получить соответствующее подтверждение в боевых условиях и стрессовых ситуациях. В этом случае, количество органов управления ПРС сводится к необходимому минимуму – выбор канала связи, включение - выключение, выбор уровня громкости. Во всех видах современных радиостанций используются голосовые сообщения о состоянии органов управления и функционирования ПРС. При этом наличие световых индикаторов сводится к минимуму. Исходя из перечисленного выше, можно сформулировать технические требования к органам управления и индикации ПРС (Таблица 2)

Таблица 2. Требования к органам управления и индикации ПРС.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Функция | Требования |
| 1 | Индикатор включения/ выключения | Голосовое сообщение/ отключаемый световой индикатор |
| 2 | Индикатор выбранного канала | Голосовое сообщение/ отключаемый световой индикатор |
| 3 | Индикатор заряда-разряда батареи | Голосовое сообщение/ отключаемый световой индикатор |
| 4 | Индикатор режима работы | Голосовое сообщение/ отключаемый световой индикатор |
| 5 | Управление включением | Нажимная кнопка |
| 6 | Управление выбором канала | Нажимная кнопка |
| 7 | Управление громкостью | Нажимная кнопка/регулятор |
| 8 | Управление режимом работы | Нажимная кнопка |

2.5. Анализ и обобщение укомплектованности ПРС различных производителей дополнительным имуществом и аксессуарами связано с особенностью их применения.

Потребность в выполнении различных функций обеспечивается набором антенн, зарядных устройств, кабелей интерфейсов и т.д. в том числе программным обеспечением для конфигурирования в составе системы связи. В частности, ПРС компаний «Elbit Systems» (Израиль), «L3Harris» (США) и других, перечисленных в п.2.1. укомплектовано несколькими видами зарядных устройств, сумок для переноса, интерфейсными кабелями для программирования и соединения с периферийными устройствами, а так же различными гарнитурами, в том числе и для скрытного ношения. Анализируя состав комплектации ПРС ранее поставляемых в войска, а так же технические спецификации ПРС принимавших, участие в гособоронзаказах прошлых лет, можно сделать вывод о необходимости ограничить перечень имущества и аксессуаров необходимым набором, обеспечивающих функционирование по прямому назначению с базовым и максимальным уровнем комплектации (Таблица 3)

Таблица 3. Комплектация ПРС

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Комплектация\*** | **Тип комплектации** | |
| **Базовый** | **Расширенный** |
|  | Приёмопередатчик | + | |
|  | Антенна широкополосная (137 – 1020 МГц) | + | |
|  | Антенна диапазон I (137 – 175 МГц) | – | + |
|  | Антенна диапазон II (410 – 525 МГц) | – | + |
|  | Антенна диапазон III (862 – 1020 МГц) | – | + |
|  | Микротелефонная гарнитура тип I (проводная) | – | + |
|  | Микротелефонная гарнитура тип II (беспропроводная) | – | + |
|  | Аккумуляторная батарея (LiPo) | + | |
|  | Индивидуальное зарядное устройство (~220/27 В) | + | |
|  | Групповое зарядное устройство (~220/27 В) | – | + |
|  | Ручной электрогенератор (для питания зарядных устройств) | – | + |
|  | Солнечная панель (для питания зарядных устройств) | – | + |
|  | Чехол | – | + |
|  | Снаряжение для переноски | – | + |
|  | Комплект ЗИП | – | + |
|  | Комплект электрических схем | – | + |
|  | Программное обеспечение | + | |
|  | Инструкция по эксплуатации | + | |
|  | Инструкция по техническому обслуживанию | + | |
|  | Формуляр | + | |
| \* Уточняется при согласовании ТТХ ПРС и ТЗ на ОКР | | | |

2.6. Анализ условий эксплуатации и связанные с ними тактико – технические характеристики ПРС.

ПРС эксплуатируются в индивидуальном порядке, в основном закреплены на обмундировании, или внутри него. Условия эксплуатации большинства ПРС зарубежного производства регламентируются стандартом MIL-STD-810F для носимого оборудования и изложены в материалах Приложения 2. Условия эксплуатации ВВТ принятые в Республике Казахстан и методики их контроля изложены в СТ РК В 13.50-2017, СТ РК В 13.51-2017, СТ РК В 13.52-2017. Исходя из этого, предварительные параметры условий эксплуатации для ПРС определены в Таблице 4

Таблица 4. Климатические и механические требования

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№** | **Показатель** | **Значение** |
|  | Пиковое ударное ускорение механических ударов, при длительности удара 16 мс | 10 g |
|  | Высота свободного падения на бетонный пол, покрытый войлочной прокладкой толщиной 15 мм | 1000 мм |
|  | Пониженная рабочая температура, \* с уменьшением показателя автономности | минус 10 ºС  (минус 40ºС)\* |
|  | Повышенная рабочая температура | + 40 ºС |
|  | Относительная влажность воздуха, при температуре + 25 ºС | 93 % |
|  | Допустимая глубина погружения в воду на 60 мин | 500 мм |

2.7 Проведены исследование индивидуальных тактических средств радиосвязи и приведены требования к разработке ПРС, наиболее оптимального варианта для выбранных цифровых видов радиосвязи с малой мощностью излучения. Проект технического задания на ПРС приведен в Приложении 3.

**Раздел 3**

**Проведение эксперимента для подтверждения возможности построения линии радиосвязи с использованием БИС приемопередатчиков LPWAN.**

3.1. Для проведения эксперимента выбраны готовые модули разработчиков систем, которые позволяют в лабораторных условиях создавать макеты различной конфигурации, программировать, проводить измерения и подбирать оптимальные режимы работы. Схема экспериментальных установок для построения радиолинии приведена в Приложении 4. состоит из модулей радиотракта, кодирования речи, управления и электроснабжения.

Для кодирования речи применен модуль PE0601 CML на основе БИС CMX7262 [1.8] в конфигурации, рекомендованной производителем.

Для управления использован модуль STM32 NUCLEO-F746ZG с контроллером STM32F746ZG и программным обеспечением, позволяющим управлять параметрами радиолинии [1.9].

Для радиотракта использованы модули Dragino LoRa Shield v1.4 на основе БИС SX1276 [1.10].

3.2. Экспериментальные радиолинии испытаны с параметрами, определенными расчетным путем с использованием рекомендаций производителя для оптимальных значений выходной мощности, вида модуляции, ширины полосы пропускания, скорости передачи данных, формата передачи аудиосемплов. (Таблица 5).

Таблица 5. Расчетные параметры экспериментальной радиолинии\*

| **Параметр SX1276** | **Значение** | |
| --- | --- | --- |
| **для диапазона**  **137 – 175 МГц** | **для диапазонов**  **410-525 и 862 -1020МГц** |
| Spreading Factor (SF) | 7 | 9 |
| Bandwidth (BW) | 125 кГц | 500 кГц |
| Coding Rate (CR) | 2 | |
| Payload Length | 32 | |
| Low Data Rate Optimize (DE) | 0 | |
| Preamble Length (PL) | 10 (total 14.25) | |
| Implicit Header Mode On (IH) | 0 | |
| Sync Word | 0 – широковещательный ID  1…51; 53…255 – избирательный ID  52 – зарезервирован производителем | |
| CRC On Payload | 1 | |
| Rx Payload CRC On | 1 | |
| **Рассчитанные выходные результаты (на основе вышеуказанных настроек):** | | |
| Техническая скорость | ~ 4,55729 кбит/с | ~ 5,85938 кбит/с |
| Информационная скорость | ~ 3,278 кбит/с | ~ 3,891 кбит/с |
| Продолжительность использования радиоканала (для передачи 1-го аудиосэмпла длиной 80 мс + 8 резервных байт) | 78,08 мс | 65,79 мс |
| Чувствительность приёмника | минус 123 дБ | |
| Бюджет канала связи (при мощности 1 Вт) | ~150 дБ | |

Примечания к Таблице 5:

**а)** Настройки БИС SX1276 для передачи/приёма голоса в режиме LoRa, при скорости вокодера 2400 бит/с, фрагментировании аудиопотока сэмплами по 80 мс (24 байт) без FEC и общей длине пользовательских данных 32 байт + 2 байта CRC;   
**б)** Одинаковые настройки для всех диапазонов не могут быть использованы, так как в диапазоне 137 – 175 МГц аппаратно недоступна ширина полосы более 125 кГц;   
**в)** длина одного аудиосэмпла принята равной 80 мс (4 фрейма CMX7262 по 20 мс без FEC) так как фрагментирование меньшими порциями, при прочих равных условиях, приводит к превышению длительность аудиосэмпла из за особенности работы радиомодуля (чем меньше пакет – тем больше избыточность и меньше информационная скорость);  
**г)** Длина пользовательских данных (Payload Length без учёта CRC) принята равной 32 байт для аудиосэмпла длиной 80 мс так как такая длина пакета (2х128 бит) необходима для шифрования по алгоритму AES. Шифруемые данные должны быть разбиты на блоки по 16 байт (128 бит);

**д)** Отказ от FEC в фреймах CMX7262 сделан по причине его избыточности, так как FEC CMX7262 работает до шифрования пакета, битовые ошибки в шифрованном пакете не удастся исправить после его дешифрования. Полезный FEC шифрованного трафика реализуется радиомодулем;

**е)** Минимальный шаг сетки частот = FOSC/219 = 32 МГц/219 = 61,03515625 Гц. Доступный пользователю шаг сетки частот = 125 кГц (2048 минимальных шага).

Формат пакета в режиме голосовой связи приведен в Таблице 6.

Таблица 6. Формат пакета в режиме голосовой связи

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Preamble  \*\*\*\* | Sync Word\*\*\*\* | Payload 32 байта\*\*\* | | | | | | CRC\*\*\*\*  2 байта |
| Фрейм №3 (20 мс)  6 байт\*\* | Фрейм №2 (20 мс)  6 байт\*\* | Резерв  4 байт\* | Фрейм №1 (20 мс)  6 байт\*\* | Фрейм №0 (20 мс)  6 байт\*\* | Резерв  4 байт\* |
|  |  | Блок для шифрования/дешифрования №1  (128 бит) | | | Блок для шифрования/дешифрования №0  (128 бит) | | |  |
|  | | | | | | | | |
| \*\*\*\* | - служебные данные, формируются радиомодулем автоматически; | | | | | | | |
| \*\*\* | - пользовательские данные (Payload); | | | | | | | |
| \*\* | - блоки аудиофреймов CMX7262; | | | | | | | |
| \* | - дополнительные байты, чтобы длина пакета быта кратна 128 бит (требование AES). | | | | | | | |

Обобщенные результаты экспериментальных исследований и протоколы испытаний радиолинии приведены в Приложении 4.

Для измерений и тестирования использовано следующее измерительное и контрольное оборудование:

а) Анализатор спектра «RIKOL DSA815»

б) Генератор сигналов «GWinstek AFG-2125»

в) Осциллограф лабораторный «GWinstek GDS-2104F»

г) Многофункциональный антенный анализатор «NanoVNA-F (10 кГц-1,5 ГГц)»

д) Мультиметр «KEYSING U3402»

е) Компьютер офисный «ZIK computers»

ж) Лабораторный источник питания «GWinstek SPS-606»

3.3. Результаты тестирования и измерений показали, что при использованных режимах работы и конфигурации экспериментальная радиолиния обеспечивает параметры, приведенные в Таблице 5.

Параметры потребляемой мощности соответствуют заявленным производителем характеристикам и позволяют разрабатывать ПРС с бюджетом потребления не более 100 ма/ч и временем работы при цикле 1:2:17 более 24 часов.

При использовании вокодера на базе БИС CMX7262 разборчивость речи в соответствии с требованиями ГОСТ 16600-72 методика 2.5 удовлетворяла II классу на всех установленных режимах.

По результатам анализа полученных данных сделан вывод о пригодности современных БИС приемопередатчиков стандартов LPWAN для использования в качестве основы для разработки индивидуальных тактических средств радиосвязи низового звена управления войсками.

Для полного использования возможностей БИС при проектировании ПРС необходимо проработать вопросы применения нитрид галлиевых GaN-транзисторов и многополюсные ВЧ переключателей на которых возможна реализация усилителя мощности, ВЧ дуплексеров и АнСУ [1.6].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы по результатам НИР, выполненной по теме «Исследование возможности маломощных цифровых приемопередатчиков для использования в индивидуальных тактических средствах радиосвязи»:

1. Задачи, поставленные в техническом задании на проведение НИР, выполнены. В ходе проведения эксперимента получен практический результат по построению ПРС на основе БИС радиоканала. Составлен проект технического задания на проведение ОКР отечественной ПРС.
2. Получены данные по современным средствам радиосвязи тактического звена, определены оптимальные параметры и функциональные требования. На основании исследований сделаны рекомендации по оснащению ПРС необходимым комплектом дополнительного оборудования.
3. Научно технический уровень проведенной работы позволяет использовать модель исследования для дальнейшего развития средств беспроводной связи тактического звена используемых в качестве ранцевых радиостанций, радиостанций устанавливаемых на бронеобъекты, в мобильные и стационарные комплексы связи.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1.1. Антонюк, Л. Я. Эффективность радиосвязи и метод ее оценки / Л. Я. Антонюк, В. В. Игнатов. – Санкт-Петербург : ВОЛКАС, 1994. – 138 с.

1.2. Обзор технологии LoRa. Журнал К.С. Верхулевский Журнал «Технологии связи» 1/2016 https://wireless-e.ru/

1.3 Оценка условий осуществления радиосвязи на радиолиниях различной протяженности с учетом особенностей распространения радиоволн / В. С. Лазоренко, В. В. Сергеев, А. М. Кокорин. – Орёл : Академия ФСО России, 2011. – 172 с.

1.4 Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Г. А. Ерохин, О. В. Чернышев, Н. Д. Козырев, В. Г. Кочержинский ; подред. Г. А. Ерохина. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. – 491 с.

1.5. Принятие оптимальных решений при проектировании сетей датчиков Шмидбауэр Харди (Hardy Schmidbauer) Журнал «Беспроводные технологии» 4/2013 https://wireless-e.ru//

1.6. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн /Г. А. Ерохин, О. В. Чернышев, Н. Д. Козырев, В. Г. Кочержинский ; под ред. Г.А. Ерохина. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. – 491 с.

1.7. Стандарты Беспроводной связи диапазона ISM. Д.Петров журнал «Беспроводные технологии» www.elcomdesign.ru

1.8. PE0601-xxxx Evaluation Kit User Manual. Официальное издание CML Microcircuits COMMUNICATION SEMICONDUCTORS.

1.9. STM32 Nucleo-144 boards (MB1137). Официальное издание Life.Augmentec.

1.10. Lora Shield v1.4 SX1276 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver. Официальное издание Semtech Corporation.

Электронные ресурсы

2.1. www.aselsan.com.tr

2.2. www.dicom.cz/en/product/296-personal-role-radio

2.3. http://www.eid.pt/cat/245/tactical\_radio\_systems

2.4. https://elbitsystems.com/products/c4i-systems/

2.5. https://www.l3harris.com/

2.6. https://www.thalesgroup.com

2.7. https://www.kongsberg.com/kda/

2.8. https://www.radmor.com.pl/products/military

2.9. http://www.sozvezdie.su

2.10. https://www.3gpp.org/

2.11 https://lora-alliance.org/

2.12 https://sigfoxrussia.com/sigfoxtechnology

2.13 https://www.ingenu.com/

2.14 https://www.ubiik.com/

2.15 https://www.analog.com/

2.16 https://www.semtech.com/