

На правах рукописи



Богатырев Евгений Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕМОВ
ПОМЕХОЗАЩИЩЁННЫХ СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ
И ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук Галеев Ринат Гайсеевич

Официальные оппоненты:

- Носков Владислав Яковлевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», департамент Радиоэлектроники и связи, профессор;

- Николаенко Владимир Макарович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт Министерства обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А.И. Белова», отдел средств, комплексов и сетей спутниковой связи, главный научный сотрудник.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-производственный центр «Вигстар», г. Москва.

Защита состоится 20 ноября 2018 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.21 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 13а, ауд. 1-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень её разработанности

В последние десятилетия в связи с созданием во всём мире глобальной информационной структуры наблюдается бурное развитие средств и методов связи, среди которых особое место занимают системы спутниковой и тропосферной радиосвязи. Несмотря на огромные достижения в области спутниковых систем радиосвязи, тропосферная радиосвязь в настоящее время продолжает играть важную роль при передаче информации как гражданскими ведомствами, так и силовыми структурами. По сравнению со спутниковой связью, тропосферная связь обладает рядом преимуществ, основными из которых являются меньшие экономические затраты и более высокая помехозащищённость. Однако и в этом направлении развития средств радиосвязи также имеются свои ограничения. Прежде всего, это многолучевое распространение и обусловленное им замирание сигнала, а также ограниченность скорости передачи информации из-за частотного и временного рассеяния. Кроме того, для тропосферных систем характерна зависимость уровня сигнала от времени суток и года, от метеорологических и климатических условий. Это создаёт серьёзные трудности, для преодоления которых необходимо использовать как известные подходы (пространственное и частотное разнесение и пр.), так и разрабатывать новые методы.

Для преодоления указанных выше ограничений и трудностей развития систем спутниковой и тропосферной радиосвязи, как показано в диссертации, перспективным является поиск новых методов модуляции и помехоустойчивого кодирования сигналов и создание на основе современной элементной базы новых типов модемов, реализующих эти методы. Модемы современных станций спутниковой и тропосферной связи должны удовлетворять разнообразным и зачастую противоречивым требованиям. С одной стороны, они должны обладать высокой помехоустойчивостью и скрытностью, а с другой – высокой скоростью передачи данных. Высокопомехоустойчивые модемы необходимы для станций военного назначения в каналах дистанционного управления, передачи сигналов тревоги и иной конфиденциальной информации. Высокоскоростные модемы востребованы для быстрой передачи больших объёмов данных, передачи видео, организации магистральных каналов связи.

Постоянный рост требований к пропускной способности систем спутниковой связи (до 34 Мбит/с для Единой системы спутниковой связи третьего поколения – ЕССС-3) стимулирует поиск новых видов спектрально-эффективных сигналов и алгоритмов их обработки в модемах спутниковых станций нового поколения.

Помехозащищённость модемов современных станций спутниковой и тропосферной связи не в полной мере удовлетворяет возрастающим требованиям ряда гражданских потребителей и силовых структур, что обуславливает актуальность разработки эффективных способов «сигнальной помехозащиты».

Вопросам теории и практики систем радиосвязи посвящено большое число работ отечественных и зарубежных учёных: Л.М. Финка, Дж. Прокиса, Б. Скляра,

Дж. Спилкера, А.Д. Витерби, Дж. К. Омуры, Л.Е. Варакина, М. Б. Свердлика, С. Голomba, Р. К. Диксона, Д. Хаффмена и др. Из работ этих авторов следует, что для повышения помехоустойчивости связи необходимо увеличение базы сигналов. Она определяет уровень подавления помех в широкополосных системах с шумоподобными сигналами. На сегодня достижимым уровнем «сигнальной помехозащиты», по литературным источникам, являются значения порядка 40 дБ. Этой величины подавления в решении ряда практических задач систем радиосвязи недостаточно, что требует принятия дополнительных мер по подавлению помех.

Важным направлением повышения помехозащищённости систем радиосвязи является использование методов помехоустойчивого кодирования, развитых в работах Дж. Кларка, Дж. Кейна, Т. Касами, Э. Берлекэмпа, С.В. Schlegel, L.C. Perez и др. Однако вопросы практического применения помехоустойчивого кодирования в широкополосных системам спутниковой и тропосферной радиосвязи до сих пор не нашли должного отражения в научных публикациях. Кроме того, в литературе отсутствуют данные, посвящённые реализации модемов, удовлетворяющих современным требованиям по помехоустойчивости, скорости передачи данных и другим параметрам.

Поскольку системы радиосвязи предназначены для предоставления массовых услуг, то существенную роль играет решение ряда технических проблем. С одной стороны – это обеспечение массового производства доступных по цене образцов связной аппаратуры. С другой стороны – обеспечение высокой помехоустойчивости и скорости передачи данных. Эти два технических аспекта вступают в противоречие: повышение помехоустойчивости и скорости передачи данных диктует усложнение аппаратуры, а требование массового производства ориентирует на уменьшение массы, габаритов и стоимости станций.

Разрешить данное противоречие удаётся в условиях стремительного прогресса в развитии радиоэлектронной элементной базы, микроэлектроники, техники цифровой обработки сигналов. Использование современной элементной базы позволяет воплощать в малогабаритном, малоэнергоёмком и недорогом (при условии массового производства) модеме сложные оптимальные алгоритмы обработки сигналов, обеспечивающие значительное повышение помехозащищённости спутниковых и тропосферных станций связи.

Таким образом, тема диссертации, посвящённая повышению помехоустойчивости и пропускной способности модемов станций спутниковой и тропосферной радиосвязи, является актуальной и полностью согласуется с запросами практики.

Цель и задачи диссертационной работы

На основании вышеизложенного, целью диссертационной работы является разработка и исследование новых научно-технических решений для реализации модемов станций спутниковой и тропосферной связи с использованием современной элементной базы, направленных на повышение помехозащищённости и пропускной способности систем связи.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

- 1) на основе анализа современного состояния и тенденций развития систем радиосвязи определены основные направления повышения помехозащищённости и пропускной способности спутниковых и тропосферных систем связи;
- 2) выбраны и обоснованы методы модуляции и кодирования сигналов, обеспечивающие повышение помехозащищённости и пропускной способности широкополосных систем связи с шумоподобными сигналами;
- 3) разработаны и исследованы новые технические решения модемов помехозащищённых станций спутниковых и тропосферных систем связи;
- 4) практически реализованы результаты диссертационных исследований в станциях спутниковой и тропосферной радиосвязи;
- 5) разработана методика натурных испытаний разработанных модемов и проведены вычислительные и натурные эксперименты по оценке их помехоустойчивости.

Объектом исследований являются модемы цифровых станций спутниковой и тропосферной радиосвязи.

Предметом исследований является совокупность методов и средств повышения помехозащищённости и пропускной способности цифровых систем спутниковой и тропосферной радиосвязи с шумоподобными сигналами.

Научная новизна результатов работы

1. Предложены новые перспективные сигнально-кодовые конструкции (СКК) для модемов спутниковых и тропосферных систем связи, отличающиеся от известных СКК более высокими характеристиками спектральной эффективности и помехозащищённости.
2. Впервые показано, что использование шумоподобных сигналов с комбинированным видом модуляции ФМ-ШПС/ППРЧ и турбокодированием позволяет повысить помехозащищённость спутниковых и тропосферных каналов связи на 20 дБ и более, обеспечивая по сравнению с традиционными сигналами ППРЧ и ФМ-ШПС выигрыш в помехозащищённости до 4 дБ.
3. Исследованы возможности ранее не применявшейся в модемах систем тропосферной связи технологии *OFDM*, позволяющей эффективно бороться с селективными замираниями и межсимвольными искажениями сигналов.
4. Впервые предложены новые нормы фазовых шумов, отличающиеся от известного регламента IESS-309 возможностью применения для более широкого диапазона скоростей передачи информации и видов модуляции, включая многофазные сигналы *8PSK*, *16PSK*, *32PSK* (*16APSK*, *32APSK*).
5. Разработаны и исследованы новые алгоритмы построения спутниковых и тропосферных модемов с гибкой архитектурой на основе *SDR*-технологий, позволяющие производить оперативный выбор оптимальной сигнально-кодовой конструкции и информационной скорости в зависимости от помеховой обстановки и условий распространения радиоволн.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы

Научные результаты диссертационной работы вносят вклад в теоретические основы методов повышения спектральной эффективности и помехозащищённости радиосистем передачи дискретной информации.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют проектировать и рассчитывать параметры модемов:

- спутниковых станций связи со спектрально-эффективными сигналами форматов *NQPSK*, *NOQPSK*, *NBPSK*;
- тропосферных станций связи с использованием *OFDM*-технологии;
- спутниковых и тропосферных станций связи на основе *SDR*-технологий;
- помехозащищённых спутниковых и тропосферных станций связи с шумоподобными сигналами с фазовой модуляцией и с псевдослучайной перестройкой рабочих частот;
- помехозащищённых спутниковых и тропосферных станций связи с перспективными вариантами помехоустойчивого кодирования.

Методы диссертационного исследования

В диссертационной работе использованы методы математического и спектрального анализа, теории сигналов, статистической радиотехники, теории передачи дискретных сообщений и цифровой обработки сигналов, имитационное моделирование в среде *MATLAB* с использованием разработанных автором программ. Для подтверждения полученных результатов выполнены лабораторные и натурные (трассовые) испытания разработанных модемов.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Применение в модемах станций спутниковой связи с зональным обслуживанием сигнально-кодовых конструкций на основе спектрально-эффективных видов модуляции *NBPSK*, *NQPSK* и *NOQPSK* и турбосвёрточного кодирования со скоростью кода $1/2$ обеспечивает пороговое значение отношения сигнал/шум не более 1,5 дБ для вероятности битовой ошибки 10^{-5} .

2. Применение в модемах станций спутниковой связи сигнально-кодовых конструкций на основе шумоподобных сигналов с комбинированным видом модуляции ФМ-ШПС/ППРЧ по сравнению с традиционными сигналами ППРЧ и ФМ-ШПС обеспечивает выигрыш в помехозащищённости до 3 дБ при равных ограничениях на частотный и энергетический ресурсы.

3. Для обеспечения вероятности битовой ошибки не более 10^{-5} в диапазоне скоростей передачи информации от 1,2 кбит/с до 20 Мбит/с нормы фазовых шумов, определённые регламентом IESS-309, необходимо дополнить допустимыми уровнями в области частотной отстройки 10 и 50 МГц: соответственно минус 100 и 110 дБс/Гц для модуляции *BPSK* и *QPSK*. Для сигналов с модуляцией *8PSK*, *16APSK*,

32APSK допустимый уровень фазовых шумов соответственно на 10, 15 и 20 дБ ниже, чем при BPSK (QPSK).

4. Алгоритмы построения спутниковых и тропосферных модемов с гибкой архитектурой на основе SDR-технологий, позволяющие производить оперативный выбор оптимальной сигнально-кодовой конструкции и информационной скорости в зависимости от помеховой обстановки и условий распространения радиоволн.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением методов теории систем передачи дискретных сообщений, согласованностью аналитических результатов с результатами имитационного моделирования и экспериментальных исследований на действующих опытных и серийных образцах модемов связных станций, разработанных при непосредственном участии автора диссертационной работы.

Апробация и использование результатов диссертации

Основные результаты работы обсуждались на всероссийских и международных конференциях: VI Российской НТК «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (Санкт-Петербург, 2007 г.); Всероссийской НТК «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2003, 2004, 2005, 2007 и 2009 гг.); Всероссийской НТК «Системы связи и навигации» (Красноярск, 2014, 2015, 2016 гг.); Всероссийской НТК «Расплетинские чтения» (Москва, 2016 г.); 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (Санкт-Петербург, 2018); 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (Екатеринбург, 2018).

Результаты диссертационного исследования использованы при разработке и модернизации предприятием АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) комплексов станций спутниковой и тропосферной связи:

- комплекс базовых станций спутниковой связи для тактического звена управления – ОКР «Легенда-МД»;
- комплекс наземных подвижных и стационарных базовых станций спутниковой связи – ОКР «Ливень-ВМ»;
- малогабаритные станции спутниковой связи для надводных кораблей на базе технических решений станции «Легенда-МД» – ОКР «Прицеп-М»;
- комплекс базовых станций спутниковой связи для тактического звена управления – ОКР «Ладья»;
- комплекс абонентских станций для подвижных командных пунктов П155М, выполненный на основе унифицированных станций ЕССС-2 «Легенда-МД» – ОКР «Пустырь»;
- самолётная станция спутниковой связи для ФГУП «НПП «Полет» – СЧ ОКР «Фореитор»;
- модернизация цифровых тропосферных станций «Сосник-АМ», «Сосник-ПМ».

Акты об использовании результатов диссертационной работы прилагаются.

Личный вклад диссертанта. В диссертации представлены только те результаты работы, в которых автору принадлежит определяющая роль. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем д-ром техн. наук Р.Г. Галеевым. Основная часть работ опубликована в соавторстве с А.Н. Фроловым, В.Н. Бондаренко, Т.В. Красновым. В совместных работах диссертант принимал участие в разработке математических моделей, выполнении расчётов и экспериментов. При обсуждении работы осуществлял объяснение и интерпретацию результатов исследований. Ряд докладов на конференциях представлены автором единолично, шесть докладов в соавторстве с сотрудниками научной группы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 179 страниц текста, включая 57 рисунков, 29 таблиц, список использованных источников из 127 наименований и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследования, определены основные научные результаты, их новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе дана общая характеристика спутниковых и тропосферных систем радиосвязи. Проведён сравнительный анализ видов модуляции сигналов, определяющих такие важнейшие показатели систем связи как помехоустойчивость и спектральная эффективность. Важным требованием к сигналам является также возможность использования нелинейных трактов передатчиков без потери помехоустойчивости. Выполнение этих требований одновременно бывает труднодостижимо и зачастую приходится принимать компромиссные решения.

Показано, что наилучшими по спектральной эффективности и помехоустойчивости для линейных трактов станций связи являются сигналы с бинарной и квадратурной ФМ со скруглением по Найквисту (*NBPSK* и *NQPSK*), а для нелинейных трактов – сигналы *BPSK* с плавным изменением фазы.

Рассмотрены пути повышения эффективности спутниковых и тропосферных систем связи. Эффективным способом повышения скорости передачи информации и борьбы с межсимвольной интерференцией (МСИ) является применение *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – ортогональное частотное разделение с мультиплексированием). Технология *OFDM* представляет наибольший интерес для систем тропосферной связи, позволяя эффективно бороться с селективными замираниями и обеспечивая высокую спектральную эффективность, скорость и достоверность передачи информации, устойчивость к узкополосным помехам и МСИ. Современная элементная база микроэлектроники позволяет создавать относительно недорогие модемы для поддержки этой технологии.

Для защиты от преднамеренных помех спутниковых и тропосферных станций связи перспективны шумоподобные сигналы (ШПС) с фазовой модуляцией и с псевдослучайной перестройкой рабочих частот, а также с комбинированным видом модуляции фазоманипулированный шумоподобный сигнал / сигнал с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ФМ-ШПС/ППРЧ).

При защите канала от преднамеренных помех с использованием ФМ-ШПС в качестве информационной модуляции целесообразно применять двухпозиционную относительную фазовую манипуляцию (ОФМ). Она достаточно хорошо сочетается с ФМ-ШПС в реализационном плане и обеспечивает совместно с эффективным кодированием достаточно высокую помехоустойчивость приёма. К достоинствам ФМ-ШПС как способа защиты от преднамеренных помех следует отнести ряд качеств: устойчивость к структурным помехам (имитационная, ретранслированная и, в частности, «помеха вслед»); возможность работы в стволах, загруженных узкополосными станциями; возможность применения различных методов модуляции и способов приёма сигнала, в том числе когерентного приёма.

Высокий уровень помехозащищённости достигается при больших значениях тактовой частоты ФМ-ШПС, определяющей ширину спектра и базу сигнала. Это обуславливает реализационные трудности, основными из которых являются трудности получения высокого быстродействия, требуемой линейности тракта и сложности построения системы кодовой синхронизации. Для преодоления указанных трудностей целесообразно ограничивать тактовую частоту ФМ-ШПС значениями до 100 МГц.

Степень помехозащиты в случае ППРЧ, как и при ФМ-ШПС, определяется базой сигнала, т.е. соотношением используемой полосы рабочих частот и ширины спектра информационного сигнала. Поскольку расширение полосы рабочих частот в меньшей мере, чем при ФМ-ШПС, повышает требования к быстродействию элементной базы, то при ППРЧ может быть достигнута более высокая помехозащищённость. При наличии соответствующего частотного ресурса это является основным преимуществом ППРЧ перед ФМ-ШПС. Технически степень помехозащиты при ППРЧ ограничивается возможностями построения линейного тракта.

Помимо существенно меньших реализационных трудностей к достоинствам ППРЧ как способа защиты от преднамеренных помех следует отнести менее жёсткие требования к системе синхронизации, а также устойчивость к возмущениям среды распространения.

К числу основных недостатков ППРЧ следует отнести потенциальную возможность создания постановщиком ретранслированной помехи («помехи вслед») и сложность, а в большинстве случаев и практическую невозможность когерентного приёма.

Рассмотрены перспективные варианты помехоустойчивого кодирования в моделах спутниковых и тропосферных систем связи. В настоящее время известен ряд кодов, обеспечивающих приближение к границе Шеннона и обладающих приемлемой сложностью кодирования/декодирования. Это параллельно-каскадные (турбо) и

последовательно-каскадные на основе как свёрточных, так и блоковых компонент, низкоплотностные (*LDPC – low density parity check*) и некоторые другие. Проблема практического использования таких кодов состоит в том, что их преимущества являются лишь при весьма большой длине (несколько тысяч). Применение кодов большой длины сопровождается существенной задержкой с выдачей декодированного сообщения.

В модемах спутниковых и тропосферных систем связи широко применяются коды Рида-Соломона, свёрточные коды, турбо коды. Теоретическое исследование таких кодов часто наталкивается на некоторые ограничения. Однако огромный объём информации, полученной моделированием, совместно с многолетним опытом использования во многих действующих сетях связи позволяют оптимизировать их характеристики применительно к любой системе связи.

Использование свёрточного кодирования в сочетании с подходящими алгоритмами декодирования (обычно с алгоритмом Витерби) позволяет эффективно обнаруживать и исправлять ошибки передачи на приёмной стороне. Этот способ кодирования зачастую используется в сочетании с кодированием Рида-Соломона, что существенно повышает достоверность передачи информации.

Радикальным выходом для снижения порога помехоустойчивости является применение турбо кодов (ТК), являющихся разновидностью блоковых систематических кодов и обеспечивающих малую вероятность ошибки на бит. Их достоинством является также то, что для них имеются эффективные итерационные алгоритмы декодирования, сопоставимые по сложности с широко используемым на практике алгоритмом декодирования Витерби для свёрточных кодов.

В модемах спутниковых станций связи перспективно использование турбо кодирования типа ТСС (турбо свёрточные коды), обеспечивающее весьма близкое приближение к границе Шеннона: для вероятности битовой ошибки 10^{-5} требуемое отношение сигнал/шум составляет от 0,4 до 2,25 дБ. Достигается такая помехоустойчивость ценой значительного расширения полосы. По этой причине применение турбо свёрточного кодирования целесообразно для борьбы с преднамеренными помехами, например, при ППРЧ.

Выбор типа кодирования, скорости кода, длины пакета должны проводиться с учётом параметров конкретной радиолинии, поскольку от выбора этих параметров зависит компромиссное соотношение «спектральная эффективность/помехоустойчивость». В частности, для малых скоростей целесообразно иметь среднюю величину пакета для уменьшения задержки декодера, но скорость кода лучше использовать большую ($1/4$ или $1/5$), чтобы повысить помехоустойчивость за счёт расширения требуемой полосы. Для больших скоростей лучше увеличить длину пакета, т.к. абсолютное увеличение задержки не будет большим, но понизить скорость до $R = 1/2$, чтобы сэкономить полосу при приемлемом проигрыше в помехоустойчивости.

Одним из важных направлений повышения эффективности спутниковых и тропосферных систем связи является использование *SDR*-технологий (*Software Defined Radio* – программно определяемая радиосистема). На рисунке 1 приведена схема «идеального» *SDR*-модема, в котором сигналы с антенны и на антенну передаются непосредственно на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и с цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). На практике *SDR*-технологии позволяют реализовать приёмопередатчики на частотах до 2...3 ГГц.

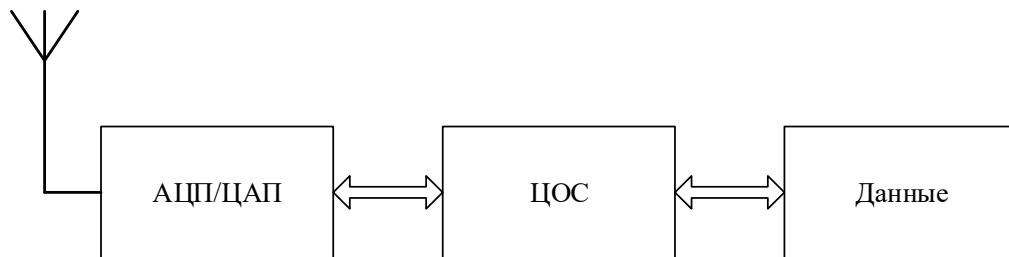


Рисунок 1 – Упрощённая архитектура «идеального» *SDR*-модема

Используемый частотный диапазон в станциях тропосферной и спутниковой связи находится в области более высоких частот, поэтому в станциях применяются преобразователи частоты, и на входы АЦП подаётся сигнал с выхода промежуточной частоты (ПЧ). Также и сигнал, сформированный с помощью широкополосного ЦАП, подаётся на вход преобразователя частоты, который осуществляет перенос сигнала в высокочастотную область.

Технология *SDR* использует комбинацию методов, затрагивающих аппаратную и программную части. Аппаратная часть включает многодиапазонные антенны и радиочастотные преобразователи, широкополосные ЦАП и АЦП, а обработка сигналов ПЧ, демодулированных сигналов и результирующего цифрового потока производится с помощью программируемых систем на кристалле. Традиционный аналоговый приёмник имеет ряд недостатков: необходимость точной настройки, чувствительность к температуре и разбросу параметров компонентов, нелинейные искажения, сложность построения перестраиваемых фильтров и фильтров с подавлением более 60 дБ. От этих недостатков свободен *SDR*-приёмник, который не требует настройки, практически нечувствителен к температуре и разбросу параметров компонентов, обеспечивает простую реализацию перестраиваемых фильтров с подавлением более 80 дБ, а также высокую точность и широкий диапазон перестройки фазы и частоты гетеродина.

Использование *SDR*-технологий в станциях спутниковой и тропосферной связи весьма перспективно, так как позволяет создавать системы с гибкой архитектурой, которая может изменяться при помощи программного обеспечения.

В главе 2 представлены результаты исследования помехозащищённости широкополосных систем связи с шумоподобными сигналами. Численной мерой помехозащищённости служит запас помехоустойчивости в децибелах:

$$K_{\Pi} = B - h_{\min}^2 - L_{\text{сист}}, \quad (1)$$

под которым понимается предельно допустимое отношение помеха/сигнал $K_{\Pi} = P_{\Pi}/P_c$, соответствующее требуемой достоверности приёма (вероятности битовой ошибки P_b). Запас помехоустойчивости (1), выраженный в децибелах, определяется тремя факторами, определяющими рациональный выбор сигнально-кодовой конструкции (СКК). Это база B сигналов, пороговое значение h_{\min}^2 отношения сигнал/шум на входе демодулятора и аппаратурные потери $L_{\text{сист}}$ в системе.

При фиксированном частотном ресурсе с увеличением скорости передачи информации база сигнала уменьшается. Соответственно снижается запас помехоустойчивости. Так при полосе частот 400 МГц изменение скорости передачи от 1 до 100 кбит/с приводит к уменьшению базы сигнала от 56 дБ до 36 дБ.

Пороговое значение h_{\min}^2 отношения сигнал/шум на входе демодулятора (отношение E_b/N_0 энергии информационного бита к спектральной плотности мощности шума) определяется структурой сигналов, способом их приёма и эффективностью помехоустойчивого кодирования.

В случае применения ППРЧ с высокой скоростью переключения рабочих частот применение информационной модуляции *BPSK* и когерентного приёма трудно реализуемо. В этих условиях целесообразно применение многопозиционных ортогональных сигналов, которые уступают в помехоустойчивости двоичным сигналам с когерентным приёмом 1–2 дБ. При некогерентном приёме ортогональных сигналов с использованием эффективного помехоустойчивого кодирования вероятность битовой ошибки 10^{-5} может быть достигнута при отношении сигнал/шум $h_{\min}^2 = (3,5-4)$ дБ.

Аппаратурные потери $L_{\text{сист}}$ в системе определяются потерями пропускной способности канала на реализацию служебных функций (синхронизацию, регулировку излучаемой мощности и др.); реализационными потерями; потерями из-за некогерентного накопления (от 0,5 до 4,5 дБ относительно когерентного накопления).

Проведён анализ эффективности использования M -ичных сигналов для информационной модуляции шумоподобных сигналов. В таблице 1 приведены результаты оценки спектральной эффективности сигналов с многопозиционной фазовой (*MPSK*) и частотной (*MFSK*) модуляцией для скорости передачи данных 13 Мбит/с. Там же представлены показатели энергетической эффективности E_b/N_0 для вероятности битовой ошибки $P_b=10^{-5}$, рассчитанные с использованием формул

$$P_b \approx \sum_{i=1, \neq k}^M \frac{\exp\left(-\frac{h_s^2(1-r_{ik})}{2}\right)}{\sqrt{2\pi h_s} \sqrt{1-r_{ik}}}, \quad (2)$$

$$P_b \approx (M-1) \frac{\exp\left(-\frac{h_s^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi h_s}}, \quad (3)$$

где $h_s = \sqrt{E_s / N_0}$ – отношение сигнал/помеха на интервале T_s информационного символа; $E_s = kE_b$ – энергия информационного символа ($k = \log_2 M$); r_{ik} – коэффициент корреляции сигналов $s_i(t)$ и $s_k(t)$. Формулы (2), (3) для *MPSK*- и *MFSK*-сигналов соответственно обеспечивают приемлемую для приложений точность при $P_{\text{ош}} < 10^{-2}$.

Таблица 1 – Спектральная эффективность *MPSK*- и *MFSK*-сигналов при скорости передачи данных 13 Мбит/с

M	k	R , Мбит/ с	R_s , сим- вол/с	<i>MPSK</i> мини- мальная по- лоса, МГц	<i>MPSK</i> R/W	<i>MPSK</i> E_b/N_0 , дБ для $P_b = 10^{-5}$	<i>MFSK</i> мини- мальная по- лоса, МГц	<i>MFSK</i> R/W	<i>MFSK</i> E_b/N_0 , дБ для $P_b = 10^{-5}$
2	1	13	13,0	13,0	1	9,6	26,0	1/2	13,4
4	2	13	6,5	6,5	2	9,6	26,0	1/2	10,6
8	3	13	4,3	4,3	3	13,0	34,4	3/8	9,1
16	4	13	3,25	3,25	4	17,5	52,0	1/4	8,1
32	5	13	2,6	2,6	5	22,4	83,2	5/32	7,4

Как видно из таблицы 1, при использовании M -ичных сигналов либо достигается выигрыш по полосе частот ценой проигрыша по энергетике, как это имеет место при фазовой модуляции *MPSK*, или же – выигрыш по энергетике, ценой ухудшения спектральной эффективности (при *MFSK*). При фиксированном частотном ресурсе увеличение объёма алфавита M от 2 до 32 в случае *MPSK* увеличивает базу ШПС на 7 дБ и в то же время увеличивает пороговое значение отношения сигнал/шум на 13 дБ. Это приводит к снижению помехозащищённости на 6 дБ по сравнению с *BPSK*. При тех же условиях ($M = 32$) в случае *MFSK* уменьшает базу ШПС на 5 дБ, но зато уменьшает и значение отношения сигнал/шум на 2.2 дБ. Так что и в этом случае имеет место проигрыш в помехозащищённости на 2.8 дБ по сравнению с *BPSK*.

Весьма эффективным методом защиты от преднамеренных помех широкополосных систем спутниковой и тропосферной связи является псевдослучайная перестройка рабочей частоты. Эффективность использования данного метода определяется рядом преимуществ ППРЧ перед ФМ-ШПС, главным из которых является то, что расширение полосы рабочих частот в меньшей мере связано с повышением требований к быстродействию применяемых элементов и ограничено лишь частотным ресурсом системы. Метод ППРЧ позволяет использовать полосы частот до нескольких ГГц, что намного превышает допустимое расширение полосы при ФМ-ШПС.

Вместе с тем, обеспечить когерентность частот при ППРЧ в широкой полосе частот является нелёгкой задачей. Поэтому в таких системах применяются преимущественно многопозиционные ортогональные сигналы. При некогерентном приёме ортогональных сигналов с использованием эффективного помехоустойчивого кодирования вероятность битовой ошибки 10^{-5} может быть достигнута при отношении сигнал/шум (3,5...4) дБ. С учётом влияния только преднамеренных помех запас помехоустойчивости при ППРЧ определяется как

$$\frac{P_n}{P_c} = \frac{k}{2 \ln \frac{k}{2NP_1}}, \quad (4)$$

где P_1 – вероятность ошибки в приёме одного информационного бита; k – число частотных позиций, поражённых помехой; N – общее число независимых (непересекающихся) частотных позиций.

Минимальное по k значение запаса помехоустойчивости

$$\left(\frac{P_n}{P_c} \right)_{\min} = eNP_1 \text{ при } k = 2eNP_1. \quad (5)$$

При этом в миллиметровом диапазоне волн (в полосе 2 ГГц) обеспечивается весьма высокий уровень помехозащиты. Полагая, что полоса частот системы (луча) $F = 400$ МГц; полоса частот, занимаемая сигналами сети $F_c = 30$ МГц; полоса частот, занимаемая одним каналом $F_k = 5$ МГц и вероятность ошибки $P_1 = 0,1$, находим общее число частотных позиций $N = 74$ и запас помехоустойчивости (5)

$$(P_n/P_c)_{\min} = 2eNP_1 = 40 \approx 16 \text{ дБ.}$$

Таким образом, в каждой из 5 полос частот по 400 МГц можно обеспечить передачу 6 магистральных направлений по 2048 кбит/с с уровнем помехозащиты не менее 16 дБ.

Приведены результаты исследования по применению корректирующих кодов для повышения помехозащищённости широкополосных систем связи. Требования, предъявляемые к кодированию при использовании ФМ-ШПС и ППРЧ, не имеют существенных различий. Помехоустойчивое кодирование в каналах, защищённых от преднамеренных помех при помощи ФМ-ШПС, снижает эффективность импульсных помех, а также помех пакетного вида.

В таблице 2 приведены основные параметры кодов БЧХ (коды Боуза — Чоудхури — Хоквингема), которые можно рекомендовать для режима ППРЧ в спутниковых и тропосферных системах. Так код БЧХ (15,5) обеспечивает исправление 3-х ошибок, в то время, как код БЧХ (15,7) исправляет только 2 ошибки. Поэтому можно рекомендовать для применения в сетях персональной связи (ПСС) в качестве метода помехозащиты ППРЧ с БЧХ (15,5).

Таблица 2 – Основные параметры кодов БЧХ

(n, k)	$(n - k)/k, \%$	k/n	Степень расширения полосы n/k	d	$t = (d - 1)/2$	P
15,5	200	1/3	3	7	3	$4,0 \cdot 10^{-2}$
15,7	114	1/2	2	5	2	$2,2 \cdot 10^{-2}$
127,8	1600	1/16	16	63	31	$8,0 \cdot 10^{-1}$
127,36	252	1/4	3,5	31	15	$7,5 \cdot 10^{-2}$
127,64	98	1/2	2	21	10	$7,0 \cdot 10^{-2}$

Код БЧХ (127,36) имеет избыточность 3,53. Код позволяет исправить 15 ошибок. Вероятность битовой ошибки 10^{-3} обеспечивается при вероятности ошибки на элемент сигнала $P = 0,09$. По мере увеличения избыточности кода (и снижения степени кодирования) сложность реализации этого кода повышается, особенно для высокоскоростных устройств. Поэтому, хотя такие коды, как БЧХ (127,64) или БЧХ (127,36) и обеспечивают $t=10$ и $t=15$, соответственно, но возможность их практического использования должна быть многократно оценена с точки зрения сложности аппаратуры.

В таблице 3 приведены результаты оценки уровня помехозащищённости радиоканалов сетей ПСС, радио АТС (РАТС) и сетей магистральной связи (МС) для ППРЧ с кодом Рида-Соломона (RS), имеющим параметр избыточности $n/k = 2$ и 1,33. Преимуществом кодов RS перед другими блочными кодами является возможность реализации большой длины блока и высокой кратности исправляемых или обнаруживаемых ошибок. Это обеспечивает высокую эффективность кодов при небольшой избыточности. Кроме того, код RS позволяет варьировать в широких пределах длину блока и кратность исправляемых или обнаруживаемых ошибок. Благодаря этим особенностям коды RS получили широкое применение во многих системах связи.

Таблица 3 – Уровень помехозащищённости радиоканалов сетей ПСС, РАТС и МС для ППРЧ с кодом Рида-Соломона

Тип сети	ПСС		РАТС			МС	
	B , бит/с	3	6,0	1,5	6,0	12,0	2304
F_p , кГц	4Сэл						
P_n/P_c , дБ при $n/k = 2$	39,2	36,2	42,2	36,2	33,2	11,8	23,8
P_n/P_c , дБ при $n/k = 1,33$	38,8	35,8	41,8	35,8	32,8	11,4	23,4

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает:

1. Помехозащищённость радиолинии земная станция – космический аппарат (ЗС-КА) при использовании кода RS с $n/k = 2$ на 2,2 дБ выше, чем при использовании расширенного кода Голея с такой же избыточностью, и на 6,4 дБ – относительно кода БЧХ (15,7).

2. При использовании в режиме ППРЧ кода RS (32,24) с избыточностью 1,33 проигрыш в помехозащищённости относительно кода RS (32, 16) не превышает 0,4 дБ.

С учётом широкого распространения больших интегральных схем для кодов RS , их использование для кодеров и декодеров в станциях спутниковой и тропосферной связи представляется целесообразным.

Использование турбо кодов позволяет получить значения энергетического выигрыша от кодирования, существенно превосходящие другие системы кодирования при умеренной сложности устройств декодирования. В ряде работ показана возможность получения с помощью турбо кодирования вероятности ошибки на бит около 10^{-5} при отношении сигнал/шум 0,1 дБ, что всего лишь на 0,7 дБ больше, чем предельное значение по Шеннону, равное минус 0,6 дБ.

На рисунке 2 приведены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для турбо кодека, полученные экспериментальным путём для 8 итераций процесса декодирования, длины информационного пакета 1024 бита при использовании тонкой и грубой обработки в блоке выработки мягких решений. Здесь же приведены аналогичные зависимости для системы без кодирования и с 3-дуальным кодом (кодированная скорость 1/2), предложенным А.Ж. Витерби в качестве не бинарного кода, оптимального для каналов с 8 ортогональными сигналами и некогерентным приёмом.

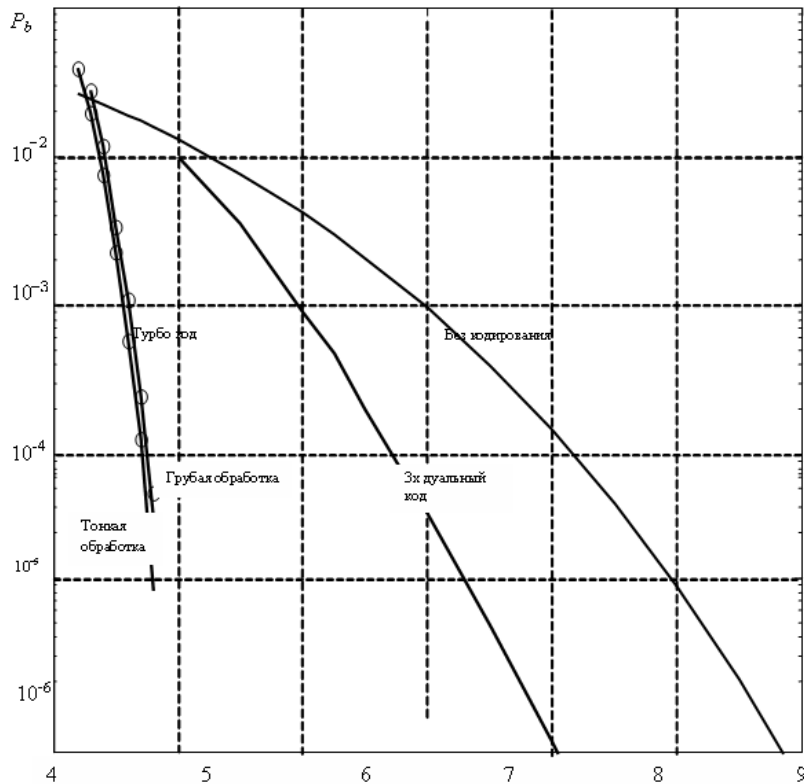


Рисунок 2 – Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

Сравнение представленных на рисунке зависимостей позволяет сделать вывод о преимуществе турбо кодов перед другими достаточно мощными типами кодов, в том числе и в некогерентных системах. При вероятности ошибки на бит 10^{-6} использование турбо кода позволяет улучшить энергетическую эффективность канала связи на 3 дБ по сравнению с 3-дуальным кодом и на величину около 5 дБ по сравнению с системой без кодирования. В то же время использование тонкой обработки в блоке выработки мягких решений увеличивает энергетический выигрыш от кодирования всей сигнально-кодовой конструкции лишь на 0,1 дБ. Столь незначительный выигрыш оптимальной обработки перед неоптимальной позволяет существенно упростить построение аппаратной части кодека и повысить его быстродействие особенно при использовании для передачи информации ансамблей ортогональных сигналов большого объёма.

В третьей главе рассмотрены вопросы построения модемов цифровых станций спутниковых систем связи с использованием SDR-технологий. В частности, на предприятии АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) указанная технология базируется на

использовании программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) большого объёма фирмы Xilinx и цифровой обработки, начиная с тракта промежуточной частоты. Современные станции связи имеют много режимов работы, в том числе такие, в которых применяется расширение спектра наложением псевдослучайной последовательности (ПСП). Поэтому используются универсальные модемы, работающие со многими типами сигналов, в том числе и широкополосными с полосой 40...50 МГц. Исходя из этого определено значение промежуточной частоты, равное 140 МГц.

Квантование сигнала ПЧ производится быстродействующим АЦП. Цифровой сигнал поступает в ПЛИС, где с помощью квадратурных преобразователей производится перенос его спектра с рабочей цифровой ПЧ на видеочастоту. Далее выполняются операции фильтрации, демодуляции и декодирования. Для демодуляции формируется когерентная опора с помощью петли фазовой автоподстройки частоты. Тактовая частота синхронизируется под приходящую информацию, выполняется поиск по частоте в диапазоне нестабильности с использованием быстрого преобразования Фурье, захват и сопровождение частоты, осуществляется автоматическая регулировка усиления, формируются сервисные сигналы и индикации. Все эти операции производятся с использованием высоко интегрированной библиотеки перепрограммируемых элементов. В той же ПЛИС осуществляется и операция декодирования.

Проведено исследование эффективных сигнально-кодовых конструкций для спутниковых систем связи. Важнейшими показателями спутниковых систем связи являются помехоустойчивость и спектральная эффективность. Помехоустойчивость характеризуется зависимостью вероятности $P_{\text{ош}}$ ошибочного приёма бита информации от отношения h^2 энергии E_b бита сигнала к спектральной плотности N_0 мощности шума. Спектральная эффективность оценивается как процентное отношение мощности полезной части спектра к полной мощности излучаемого сигнала. В разных условиях неизбежен выбор между этими взаимосвязанными параметрами: или обеспечить заданную вероятность ошибки при дефиците мощности, пожертвовав в какой-то степени полосой, или сэкономить занимаемую полосу при приемлемой вероятности ошибок. Эти компромиссы достигаются применением различных типов модулированных сигналов и помехоустойчивого кодирования.

Анализ информации по спутниковым модемам зарубежных и отечественных фирм позволил выработать соответствующие рекомендации по улучшению характеристик СКК спутниковых станций связи:

1. Сигналы BPSK, QPSK и OQPSK без кодирования имеют одинаковую помехоустойчивость и различаются тем, что BPSK имеет вдвое более широкий спектр, но «терпит» большую величину паразитной ЧМ, т.е. может использоваться с более «грязными» несущими. Сигналы QPSK и OQPSK имеют близкую ширину спектра, но OQPSK несколько терпимее к нелинейности тракта. Очевидно, станция связи должна иметь, по крайней мере, режимы BPSK и QPSK, а подключение нужного режима – в зависимости от условий работы.

2. Применение кодирования одновременно с выигрышем в помехоустойчивости даёт расширение полосы занимаемых частот, причём, чем больше выигрыш, тем шире полоса. Очевидно, станция связи должна иметь, по крайней мере, кодек Витерби со скоростями 1/2, 3/4, 7/8; (Витерби + внешний код Рида-Соломона) со скоростями 1/2, 3/4, 7/8; турбо кодек. Применение же конкретного режима может определяться, исходя из ситуации путём размена «выигрыш в помехоустойчивости /полоса».

3. В модемах спутниковых станций целесообразно использование Турбо Продукт Кодирования (TPC), при котором достаточно малое значение h^2 достигается при малой ширине спектра сигнала: при вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = 10^{-6}$ отношение сигнал/шум $h^2 = 3,4$ дБ на скорости кода 3/4. Ширина спектра при этом составляет всего 0,67 от скорости информации для манипуляции QPSK. Худший на 0,3 дБ результат получается при кодировании Витерби с внешним кодом Рида-Соломона, но со скоростью кода 1/2, что даёт ширину спектра 1,12 от скорости информации. Дополнительно увеличивается задержка.

4. Для сетей с зональным обслуживанием следует использовать сигналы NBPSK, NQPSK и NOQPSK с кодированием типа ТСС (турбо свёрточное кодирование) со скоростью кода 1/2. Такие СКК обеспечивают пороговое значение отношения сигнал/шум не более 1,5 дБ для $P_{\text{ош}} = 10^{-5}$, приемлемое расширение спектра и приемлемую величину задержки декодирования.

5. Выбор типа кодирования, скорости кода, длины пакета должны проводиться, исходя из параметров конкретной радиолинии, поскольку от выбора этих параметров зависит компромиссное соотношение «спектральная эффективность/помехоустойчивость». В частности, для малых скоростей передачи целесообразно иметь среднюю величину пакета для уменьшения задержки декодера и большую скорость кода (1/4 или 1/5) для увеличения помехоустойчивости. Для больших скоростей передачи лучше увеличить длину пакета, т.к. абсолютное увеличение задержки не будет большим, но понизить скорость до $R = 1/2$, чтобы сэкономить полосу и не очень проиграть в помехоустойчивости.

6. Для высокоскоростных магистральных модемов целесообразно иметь возможность выбора скорости и типа кодирования (из набора, например, Витерби, Витерби + Рида-Соломона, турбо кодирования ТРС и ТСС). Выбор же конкретного режима должен диктоваться энергетикой радиолинии, помеховой обстановкой и частотными резервами КА. Такой подход позволит обеспечить гибкость системы.

7. Сигнально-кодовые конструкции на основе ППРЧ-ОФМ сигналов и турбо свёрточного кодирования целесообразны для борьбы с преднамеренными помехами в спутниковых каналах связи как наилучшие по спектральной эффективности и помехозащищённости.

В четвертой главе рассмотрены вопросы построения модемов цифровых тропосферных станций связи. Приведены примеры перспективных тропосферных моде-

мов, выполненных с использованием SDR-технологий при непосредственном участии автора диссертационной работы. Исследованы особенности реализации модема перспективной малогабаритной тропосферно-радиорелейной станции. Перспективная станция с пропускной способностью E2 (8,448 Мбит/с) и дальностью одного интервала связи 125...150 км является цифровой высокоскоростной станцией тропосферной связи пятого поколения, разработанной с использованием процессоров, ПЛИС и другой современной элементной базы. Станция обеспечивает режимы тропосферной, дифракционной и релейной связи. Для тропосферной связи в станции используются сигналы с модуляцией ФМ-2 и ФМ-4 и информационной скоростью 64...2048 кбит/с в режимах с пространственным и частотным разнесением (таблица 4). В качестве помехоустойчивого кодирования используется свёрточное кодирование с декодированием по алгоритму Витерби. Относительная скорость кода $R=1/2$ для режимов со скоростью до 2048 кбит/с и $R=3/4$ для скорости 2048 кбит/с.

Таблица 4 – Характеристики сигналов для тропосферной связи

Режим работы	Длительность символа, нс	Интервал времени следования ОП, мкс	Объем перемежителя
64 ФМ-2, ЧВМ-4, $R = 1/2$	1728,0	138,266	120
256 ФМ-2, ЧВМ-4, $R = 1/2$	439,9	35,195	280
512 ФМ-2, ЧВМ-4, $R = 1/2$	219,9	17,597	440
2048 ФМ-4, ЧВМ-4, $R = 3/4$	164,9	13,1984	880
256 ФМ-2, ПР, $R = 1/2$	1759	35,195	280
512 ФМ-2, ПР, $R = 1/2$	879,6	17,597	440
2048 ФМ-2, ПР, $R = 3/4$	329,9	6,599	880

ПР – пространственное разнесение; ЧВМ – частотно-временная матрица.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование модема тропосферной станции с OFDM-сигналами. Модем реализован с использованием OFDM-сигналов и SDR-технологии (рисунок 1). Использование OFDM-технологий весьма перспективно для тропосферных станций, поскольку позволяет практически полностью решить проблему многолучевого распространения сигналов. Основную опасность для OFDM-сигнала представляют быстрые замирания сигнала в тропосфере (частота замираний до 100 Гц), возникающие вследствие многолучевой интерференции. В зависимости от длины трассы значения частотного интервала корреляции составляют от 2 до 5 МГц соответственно для 300 и 150 км.

Структуру OFDM-сигнала во многом определяет скорость передачи на каждой поднесущей, которая ограничена сверху максимальной дисперсией задержки канала передачи данных и допустимыми энергетическими потерями на защитный интервал, а снизу – нестабильностью частоты опорного генератора.

В таблице 5 приведены параметры OFDM-сигнала для режима со скоростью передачи 8448 кбит/с. Конкретные параметры (количество поднесущих, скорость на

каждой поднесущей, ширина спектра OFDM-сигнала, способы кодирования, скорость ППРЧ) могут изменяться программным путём.

Таблица 5 – Параметры OFDM-сигнала

Информационная скорость канала, кбит/с	8448
Кодирование Рида-Соломона	255,239
Свёрточное кодирование	1/2
Защитный интервал, доли от длит. симв.	1/32
Количество поднесущих частот	205
Скорость поднесущих, кбит/с	100
Количество пилот-сигналов	10
Использование ППРЧ	да
Занимаемая полоса частот, кГц	20500

Проведён анализ способов повышения скорости передачи в тропосферных системах связи: четырёхкратное пространственное разнесение, применение сигналов с многопозиционной ФМ, а также шумоподобных OFDM-сигналов.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию модемов спутниковых и тропосферных станций, разрабатываемых предприятием АО «НПП Радиосвязь», в которых использованы результаты диссертационных исследований автора.

С использованием программного обеспечения Matlab проведено моделирование для определения уровня ошибок BER в каналах с фазовыми шумами гетеродина по стандарту IESS-309 и с идеальной несущей (без фазовых шумов). Рекомендуемые нормы фазовых шумов, предлагаемые на основе результатов моделирования, для сигналов с различными видами модуляции приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Нормы фазовых шумов для сигналов с различными видами модуляции

Отстройка от несущей, Гц	IESS-309	<i>BPSK</i> , <i>QPSK</i> 64...2048 кбит/с	<i>BPSK</i> 1,2...10000 кбит/с <i>QPSK</i> 64...20000 кбит/с	<i>8PSK</i> 4...20 Мбит/с	<i>16APSK</i> 8...30 Мбит/с	<i>32APSK</i> 16...56 Мбит/с
10	-30	-30	-37	-47	-52	-57
10 ²	-60	-60	-60	-70	-75	-80
10 ³	-70	-70	-70	-80	-85	-90
10 ⁴	-80	-80	-80	-90	-95	-100
10 ⁵	-90	-90	-90	-100	-105	-110
10 ⁶	-90	-90	-90	-100	-105	-110
10 ⁷		-100	-100	-110	-115	-120
5*10 ⁷			-115	-125	-130	-135

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что нормы фазовых шумов, определённые регламентом IESS-309, актуальны для скоростей передачи информации от 64 кбит/с до 2 Мбит/с и модуляции *BPSK* и *QPSK*. При использовании

более сложных видов модуляции и других скоростей передачи информации необходимо задаться более жёсткими требованиями, в частности добавив допустимые уровни в области частотной отстройки 10 МГц и более.

Для обеспечения вероятности битовой ошибки не более 10^{-5} в диапазоне скоростей передачи информации от 1,2 кбит/с до 20 Мбит/с нормы фазовых шумов, определённые регламентом IESS-309, необходимо дополнить допустимыми уровнями в области частотной отстройки 10 и 50 МГц: соответственно минус 100 и 110 дБс/Гц для модуляции *BPSK* и *QPSK*. Для сигналов с модуляцией *8PSK*, *16APSK*, *32APSK* допустимый уровень фазовых шумов соответственно на 10, 15 и 20 дБ ниже, чем при *BPSK* (*QPSK*).

На протяжении последних десяти лет проведено несколько десятков натуральных трассовых испытаний цифровых тропосферных станций связи производства АО «НПП «Радиосвязь». Испытания проводились в различных климатических зонах от Красноярского края до Мурманской области. Во время испытаний на реальных тропосферных радиоприемах испытывались различные виды сигналов: ФМ-2, ФМ-4, OFDM и др. на скоростях от 64 до 4096 кбит/с со свёрточным кодом и турбо кодом. Исследования показали, что способ разнесения с использованием частотно-временной матрицы выигрывает по сравнению с другими способами разнесения сигнала, в том числе и способом зондирования тропосферы с выбором оптимальной частоты. В ходе испытаний с OFDM-сигналами на низких скоростях передачи данных с рабочей полосой частот 2 МГц и ниже установлено, что применение OFDM без ППРЧ не целесообразно в связи с замираниями практически во всей рабочей полосе частот.

В Заключении приведены основные результаты работы:

1. Проведён выбор и обоснование вида модуляции сигналов для спутниковых и тропосферных систем связи с использованием критериев спектральной эффективности и помехоустойчивости.

2. Исследованы возможности применения технологии *OFDM* в модемах систем тропосферной связи, позволяющей эффективно бороться с селективными замираниями и обеспечивающей высокую спектральную эффективность, скорость и достоверность передачи информации, устойчивость к узкополосным помехам и МСИ.

3. Разработаны алгоритмы повышения помехозащищённости спутниковых и тропосферных каналов связи с использованием шумоподобных сигналов с ФМ, ППРЧ, а также с комбинированной кодовой модуляцией формата ФМ-ШПС/ППРЧ, обеспечивающие запас помехоустойчивости более 25дБ.

4. Предложены перспективные сигнально-кодовые конструкции для модемов спутниковых и тропосферных систем связи с каскадным кодированием на основе турбо кодов, кодов Рида-Соломона, свёрточных кодов (в сочетании с кодированием Рида-Соломона), наилучших по спектральной эффективности и помехозащищённости.

5. Проведён анализ эффективности предложенных сигнально-кодовых конструкций для повышения пропускной способности и помехозащищённости систем спутниковой и тропосферной связи;

6. Предложены алгоритмы построения и программная реализация модемов с гибкой архитектурой на основе *SDR*-технологий для спутниковых и тропосферных станций связи с адаптацией к помеховой обстановке по скорости манипуляции и сигнально-кодovому созвездию, обеспечивающие высоконадёжную передачу дискретных сообщений с повышенными требованиями к помехозащищённости.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ:

1. Помехоустойчивость квазиоптимального корреляционного приёмника шумоподобного сигнала с минимальной частотной манипуляцией / В.Н. Бондаренко, Е.В. Богатырев, Т.В. Краснов, В.Ф. Гарифуллин // Радиотехника и электроника. – 2013. Т. 58. №12. С. 1236–1242. (Noise immunity of a quasi-optimal correlation receiver of noiselike signals with minimum frequency-shift keying / V. Bondarenko, E. Bogatyrev, T. Krasnov, V. Garifullin // Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 58 (12), 2013. pp. 1194–1199).

2. Narrow band interference immunity of correlation receiver with BOC and MSK-BOC modulation type / D.S. Feoktistov, V.N. Bondarenko, V.F. Garifullin, T.V. Krasnov, E.V. Bogatyrev // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018; St. Petersburg.

3. Comparative analysis of narrow band interference immunity for BOC and MSK-BOC receivers / T.V. Krasnov, V.N. Bondarenko, V.F. Garifullin, D.S. Feoktistov, E.V. Bogatyrev // 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT, 2018; Ekaterinburg.

4. Помехоустойчивость корреляционного приёмника MSK-BOC сигнала к сосредоточенной помехе / В.Н. Бондаренко, В.Ф. Гарифуллин, Т.В. Краснов, Д.С. Феоктистов, Е.В. Богатырев // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. №12. С. 71–74.

5. Применение адаптивных методов коррекции и эхоподавления при организации высокоскоростной дуплексной связи по двухпроводной линии / И.А. Макаев, А.В. Мишанов, И.В. Аникьев, Е.В. Богатырев // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. №12. С. 150–154.

6. Богатырев, Е. В. Формирование сложных ЧВМ сигналов в современных тропосферных станциях связи / Е.В. Богатырев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. С. 19–23.

7. Богатырев, Е. В. Современные тропосферные станции связи / Е.В. Богатырев // Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: сб. науч. тр. – Красноярск, 2003. С. 31–33.

8. Богатырев, Е. В. Реализация методов разнесенного приема в мобильных тропосферных станциях связи / Е.В. Богатырев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. С. 40–44.

9. Богатырев, Е. В. Высокоточная радионавигационная система «Спрут-Н1» / Е.В. Богатырев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: КГТУ, 2005. С. 11–15.

10. Богатырев, Е. В. Контрольно-поверочная аппаратура высокоточной радионавигационной системы «Спрут-Н1» / Е.В. Богатырев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. ст. – Красноярск: СФУ, 2007. С. 27–31.

11. Имитатор сигналов морской радионавигационной системы / В.Н. Бондаренко, А.М. Алёшечкин, В.И. Кокорин, Е.В. Богатырев и др. // VI Росс. науч.-техн. конф. «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» НО-2007: сб. тр. конф. – СПб, 2007.

12. Богатырев, Е.В. Проектирование модуляторов на микросхемах с программируемой структурой / Сб. материалов НТК ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва. – Железногорск, 2008. – С. 53–54.

13. Богатырев, Е. В. Малогабаритный навигационный приёмник / Е.В. Богатырев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 17-20.

14. Перспективы применения OFDM в системах спутниковой и тропосферной связи / А.Н. Фролов, Е.В. Богатырев, А.Ю. Строкова // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: ОАО «НПП «Радиосвязь», 2014. С. 16–18.

15. Статистический анализ сигналов тропосферных станций связи / А.Н. Фролов, Е.В. Богатырев, Г.А. Непомнящих // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: ОАО «НПП «Радиосвязь», 2014. С. 36–38.

16. Особенности построения бортового приёмоответчика ЗУР / Е.В. Богатырев, И. И Рыжков // Всероссийская НТК «Расплетинские чтения – 2016»: сб. материалов. – М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2016. С. 44.

17. Передача сигналов С1-ФЛ-БИ через сеть ETHERNET / Е.В. Богатырев, В.В. Терехович // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: ОАО «НПП «Радиосвязь», 2014. С. 28–30.