

На правах рукописи



Луферчик Павел Валерьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ
СИГНАЛОВ В OFDM-МОДЕМАХ ТРОПОСФЕРНО-
РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СТАНЦИЙ СВЯЗИ**

Специальность 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2022

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

Научный руководитель

доктор технических наук **Галеев Ринат Гайсеевич**

Официальные оппоненты:

- **Иванов Вячеслав Элизбарович**, доктор технических наук, профессор; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра Радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий, профессор;
- **Дворкович Александр Викторович**, доктор технических наук, член-корр. РАН, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», лаборатория мультимедийных систем и технологий, главный научный сотрудник-заведующий лабораторией.

Ведущая организация – Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», г. Томск

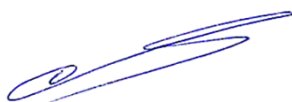
Защита состоится 28 декабря 2022 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.03, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 13а, ауд. 1-07.

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

Автореферат разослан «____» _____ 2022 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Тропосферные линии связи (ТЛС) являются одним из наиболее эффективных видов связи. В народном хозяйстве они широко используются для связи с морскими буровыми платформами, удаленными от материка островами, расположенными в высокоширотных областях земного шара; для связи в труднодоступных и малонаселенных районах. Благодаря минимальному привлечению средств и личного состава ТЛС эффективно применяются в вооруженных силах для связи с удаленными объектами, например, с радиолокационными постами, испытательными площадками на полигонах, с удаленными постами и гарнизонами и др.

Несмотря на огромные достижения в области спутниковых систем радиосвязи, объективные достоинства тропосферной радиосвязи определяют широкое её использование 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.

К числу основных ограничений тропосферной связи следует отнести, прежде всего, 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. Для преодоления указанных ограничений необходимо использовать как известные методы (пространственное и частотное разнесение и пр.), так и разрабатывать новые подходы. Одним из них является поиск новых методов модуляции и помехоустойчивого кодирования сигналов и создание на основе современной элементной базы новых типов радиомодемов, реализующих эти методы. Модемы современных станций 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 и помехозащищённости систем тропосферной связи стимулирует поиск новых видов энергетически- и спектрально-эффективных сигнально-кодовых конструкций (СКК) и алгоритмов их обработки в модемах станций нового поколения. Ортогональное частотное разделение с мультиплексированием (OFDM) в настоящее время рассматривается как одна из наиболее перспективных технологий передачи

для построения широкополосных систем цифровой радиосвязи по многолучевым каналам.

Важным направлением в практическом применении OFDM в сочетании с перспективными СКК является разработка унифицированных модемов с интеграцией тропосферных и радиорелейных режимов связи. Сочетая достоинства тропосферных и радиорелейных линий, унифицированные модемы станций связи позволяют обеспечить ряд преимуществ, основными из которых являются высокая устойчивость связи, обусловленная возможностью управления режимами работы станций, включая возможность адаптации по энергетике и скорости передачи.

Актуальность данного исследования определяется недостаточной проработкой в известной литературе вопросов, связанных с унификацией модемного оборудования OFDM тропосферно-радиорелейных систем связи, позволяющей создавать системы с гибкой архитектурой, которая может изменяться при помощи программного обеспечения. Необходимость разработки новых алгоритмов адаптации модемного оборудования OFDM-систем связи к условиям тропосферного распространения путем изменения режима работы и оперативного выбора оптимальных СКК определяется недостаточным отражением в известной литературе таких методов.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам теории и практики тропосферных систем радиосвязи посвящено большое число работ отечественных и зарубежных учёных: И.Р. Сиваков, В.В. Серов, Б.А. Введенский, М.А. Колосов, А.И. Калинин, Я.С. Шифрин, О.И. Яковлев, Л.Г. Назарова, А. Румфильд, Р.К. Крейн, Р. Шофф, Б.А. Вейвлет и др. Из работ этих авторов следует, что основными причинами снижения энергетической эффективности тропосферных систем связи являются многолучёвость распространения и частотно-селективные замирания в тропосферном радиоканале, для борьбы с которыми используют пространственное и частотное разнесение, остронаправленные антенны с большим коэффициентом усиления, адаптивные приёмники (модемы), обеспечивающие согласованную фильтрацию сигнала.

Применению OFDM-сигналов в тропосферных каналах связи с замираниями посвящено достаточно много работ, в частности, таких авторов как Е. В. Богатырев, Ф. Ванг, Л. Пенг, А. Робертсон, К. Копп, и др. В большинстве работ рассматривают вопросы применения методов снижения пик-фактора и видов модуляции с минимальным пик-фактором.

В известных работах не нашли должного отражения такие вопросы как:

- снижение негативного влияния частотно-селективных замираний OFDM-сигналов за счёт внутрисигнального частотного разнесения;
- исследование эффективности использования режимов адаптации по мощности сигнала и скорости передачи данных в унифицированных модемах тропосферных станций;
- разработка и исследование алгоритмов компенсации влияния многолучевого канала на характеристики OFDM-сигналов.

Важным направлением повышения энергетической эффективности тропосферных систем связи является использование методов помехоустойчивого кодирования, развитых в работах Дж. Кларка, Дж. Кейна, Т. Касами, Э. Берлекэмпа, К. Б. Шлегела, Л. К. Переза и др. Однако вопросы практического применения помехоустойчивого кодирования в OFDM-системах тропосферной радиосвязи до сих пор не нашли должного отражения в научных публикациях.

Кроме того, в литературе отсутствуют данные, посвящённые реализации унифицированных модемов, удовлетворяющих современным требованиям по помехоустойчивости, скорости передачи данных и другим параметрам.

Целью работы является повышение энергетической эффективности и скорости передачи данных в станциях тропосферно-радиорелейной связи за счёт использования технологии OFDM и помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций, а также унификации модемного оборудования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Анализ основных направлений повышения эффективности станций тропосферно-радиорелейной связи.

2. Разработка и исследование алгоритмов для уменьшения пик-фактора OFDM-сигналов.

3. Исследование преимуществ новейших сигнально-кодовых конструкций на основе многопозиционных видов модуляции OFDM-сигналов, а также возможности их унификации для тропосферных и радиорелейных линий связи.

4. Разработка алгоритма внутрисигнального частотного разнесения с использованием повторения спектра информационного символа в сочетании с адаптивным эквалайзером и сумматором максимальных отношений в приемнике OFDM-сигнала.

5. Исследование эффективности использования режимов адаптации по мощности сигнала и скорости передачи данных в унифицированных модемах тропосферно-радиорелейных станций.

6. Разработка и исследование алгоритмов компенсации влияния многолучевого канала на характеристики OFDM-сигналов.

7. Разработка имитационной модели в среде *matlab/simulink* OFDM-модема тропосферно-радиорелейной радиолинии связи с предложенными сигнально-кодовыми конструкциями.

8. Разработка имитационной модели в среде *matlab/simulink* радиочастотного тракта унифицированного модема тропосферно-радиорелейной станции.

9. Натурные испытания разработанных OFDM-модемов тропосферных станций связи по оценке их энергетической эффективности и пропускной способности.

Объектом исследований являются унифицированные OFDM-модемы тропосферно-радиорелейных станций радиосвязи.

Предметом исследования является совокупность эффективных методов и средств повышения скорости и достоверности передачи данных унифицированных OFDM-модемов тропосферно-радиорелейных станций радиосвязи.

Научная новизна полученных в диссертации результатов состоит в том, что впервые показаны:

1. Эффективность унифицированных OFDM-модемов тропосферно-радиорелейных станций связи с гибкой архитектурой на основе *SDR*-технологий и оперативного выбора сигнально-кодовой конструкции и информационной скорости в зависимости от помеховой обстановки и условий распространения радиоволн.

2. Перспективность использования OFDM-сигналов в тропосферных каналах связи.

3. Эффективность использования перспективных сигнально-кодовых конструкций на основе модуляции QPSK и QAM с турбо-кодированием в унифицированных OFDM-модемах тропосферно-радиорелейных станций связи.

4. Энергетическая эффективность алгоритма внутрисигнального частотного разнесения с использованием повторения спектра информационного символа в сочетании с адаптивным эквалайзером и сумматором максимальных отклонений в приемнике OFDM-сигнала.

5. Эффективность комбинированного алгоритма уменьшения пик-фактора OFDM-сигнала с последовательным применением алгоритмов активного расширения созвездия (ACE) и тонового резервирования (TR).

6. Возможность нейтрализации узкополосных помех путём автоматической режекции пораженных помехами поднесущих OFDM-сигнала.

Теоретическая значимость работы:

1. Усовершенствована методика нейтрализации частотно-селективных замираний в OFDM-станциях тропосферно-радиорелейной связи.

2. Разработана модель для высокоточного воспроизведения нелинейных свойств усилителя мощности.

3. Модифицированы алгоритмы адаптивной OFDM в радиорелейных станциях связи для оптимизации распределения передаваемой мощности в полосе частот в соответствии с АЧХ канала.

Практическая значимость работы:

1. Разработана системная модель радиочастотного тракта в среде matlab/simulink, позволяющая выполнять высокоточные оценки нелинейности, неравномерности АЧХ, спектрального состава выходного сигнала, уровня фазовых шумов и устойчивости OFDM сигнала к частотно-селективным замираниям.

2. Применение предложенного двухступенчатого алгоритма снижения пик-фактора OFDM сигналов и алгоритмов цифровых предскажений позволяет существенно ослабить требования к линейности усилителя передатчика и тем самым повысить эффективность системы связи в целом.

3. Применение предложенного алгоритма внутрисигнального частотного разнесения для OFDM-модема повышает устойчивость системы связи к частотно-селективным замираниям в тропосферном канале.

4. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют проектировать унифицированные OFDM-модемы тропосферно-

радиорелейных станций связи на основе SDR-технологий с перспективными видами модуляции сигналов и вариантами помехоустойчивого кодирования.

Результаты работы используются при разработке и модернизации предприятием АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) комплексов станций тропосферной связи, что подтверждается соответствующими актами.

Методология и методы исследования

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

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Комбинированный алгоритм ACE/TR позволяет уменьшить пик-фактор OFDM-сигнала не менее чем на 5 и 4.5 дБ соответственно для видов модуляции QPSK и QAM.

2. Алгоритм цифровых предскажений для линеаризации радиопередающего тракта тропосферно-радиорелейной станции обеспечивает снижение уровня побочных спектральных составляющих OFDM-сигнала на 10 дБ и модуля вектора ошибки EVM для многопозиционных видов модуляции PSK и QAM не менее, чем на 13 дБ.

3. Алгоритм нейтрализации узкополосных помех, включающий автоматическую блокировку поднесущих, пораженных помехами, и динамическое перераспределение информационного потока между остальными поднесущими OFDM-сигнала, устойчив к одновременному воздействию до трех узкополосных помех, обеспечивая требуемую достоверность приёма при превышении помехами сигнала до 30 дБ.

4. Способ внутрисигнального частотного разнесения с использованием повторения спектра информационного символа с кратностью разнесения, зависящей от информационной скорости, в сочетании с адаптивным эквалайзером и сумматором максимальных отношений в приемнике OFDM-сигнала обеспечивает энергетический выигрыш от 3 до 17 дБ.

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

Апробация работы. Материалы работы докладывались на всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2022).

Публикации. По результатам работы опубликовано: семь статей в журналах из перечня ВАК, один патент РФ на изобретение и один – на промышленный образец.

Личный вклад автора. Все результаты диссертации, выносимые на защиту, получены автором лично, опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК России. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем д.т.н. Р. Г. Галеевым. Экспериментальная часть работ выполнена совместно с Е. В. Богатыревым, П. В. Штро, Г. А. Непомнящих.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Основная часть работы изложена на 197 страницах, содержит 111 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 146 наименований.

Основные научные результаты были получены в рамках выполнения ОКР «Унификация-1» при разработке предприятием АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) комплексов станций тропосферно-радиорелейной связи.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, определены научная новизна работы, научная и практическая значимость проведённого исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дана общая характеристика применения технологии OFDM в тропосферных системах связи. Перспективность использования в тропосферных каналах связи OFDM-сигналов обусловлена тем, что они позволяют эффективно бороться с селективными замираниями, обеспечивают высокую спектральную эффективность, скорость и достоверность передачи информации, устойчивость к узкополосным помехам и межсимвольным искажениям (МСИ). Одним из основных ограничений практического применения технологии OFDM в тропосферных каналах связи является высокое значение пик-фактора PAPR.

Проведён сравнительный анализ различных видов OFDM. Отмечается, что наиболее целесообразным для тропосферной связи является использование технологии OFDM в сочетании с помехоустойчивым кодированием (кодированной OFDM). В качестве перспективных вариантов помехоустойчивого кодирования в модемах тропосферных систем связи можно рекомендовать турбокоды со скоростью от $1/3$ до $5/6$. Применение помехоустойчивого кодирования в тропосферном канале с быстрыми замираниями существенно отличается от канала без замираний. В тропосферном канале длительность пакета ошибок может составлять несколько тысяч. Эффективным методом борьбы с такими ошибками является разнесение во времени, т.е. сочетание кодирования с объёмным псевдослучайным перемежением.

В случае адаптивной OFDM оптимальное частотное распределение передаваемой мощности в многолучевом канале с неравномерной АЧХ затрудняется тем, что задержка передачи информации по каналу обратной связи может существенно превышать время стационарности канала. В свою очередь, отказ от перемежителя, определяющего задержку передачи информации, также приведет к существенным энергетическим потерям. Поэтому в отсутствие обратного канала наилучшим с точки зрения энергетической эффективности следует считать равномерное частотное распределение передаваемой мощности, что достаточно близко спектральной плотности мощности (энергетическому спектру) OFDM-сигнала. В то же время для радиорелейного режима адаптивная OFDM является вполне оправданной.

Практическое применение OFDM с кодовым разделением (OFDM-CDM) в тропосферной связи ограничивается большими вычислительными затратами, связанными с реализацией эффективных методов устранения межпоточковой интерференции (итеративное декодирование с мягкими или жесткими решениями).

Дано описание структурной схемы OFDM-модема тропосферной станции, реализованного с использованием SDR-технологий и гибкой архитектурой, которая может изменяться при помощи программного обеспечения. Модем поддерживает различные виды модуляции: QPSK, 8-PSK, QAM16...QAM256.

В передающей части модема последовательно осуществляются операции помехоустойчивого кодирования, сверточного перемежения, вставки псевдослучайных синхронизирующих последовательностей, QPSK(QAM)-модуляции, вставки пилот-тонов, циклического кодирования для снижения пик-фактора, OFDM-модуляции (ОБПФ), дополнительного ограничения пик-фактора, коррекции АЧХ (преэквалайзер), цифро-аналогового преобразования, фильтрации и усиления.

Отличительной особенностью модема является использование внутри сигнального частотного разнесения, основанного на повторении спектра информационного символа с кратностью разнесения (от 2 до 256), зависящей от информационной скорости. Такая возможность обусловлена тем, что частотный ресурс станции, определяемый полосой 80 МГц, является избыточным для режимов с относительно невысокой информационной скоростью. В сочетании с сумматором максимальных отношений в приемнике указанное расширение спектра позволяет реализовать оптимальное частотное разнесение и подавление узкополосных помех.

В приемной части OFDM-модема тропосферной станции последовательно выполняются операции предварительного усиления и фильтрации, IQ-демодуляции (преобразования на видеочастоту), аналого-цифрового преобразования, устранения смещения сигнальных созвездий, логарифмической АРУ, блоковой синхронизации, OFDM-демодуляции (БПФ), оценки канала (фазы и амплитуды информационных поднесущих), деперемежения, сжатия по спектру,

частотного разнесения и нормировки сигнального созвездия (эквализации), QPSK(QAM)-демодуляции, сверточного деперемежения, турбо-декодирования.

Для повышения эффективности тропосферной станции в унифицированном модеме используются режимы адаптации по энергетике и по скорости (информационной и кодовой).

В главе 2 представлены результаты анализа основных направлений повышения эффективности OFDM-систем тропосферно-радиорелейной связи.

Проведён сравнительный анализ методов снижения пик-фактора OFDM-сигналов. Эффективными алгоритмами снижения пик-фактора в OFDM тропосферных системах являются алгоритмы Tone Reservation (TR) и Active Constellation Extension (ACE), имеющие хорошую производительность (снижение пик-фактора на 4,5-5 дБ) при средней сложности.

Для повышения эффективности тропосферных станций предлагается реализовать режимы адаптации по энергетике и по информационной скорости. Адаптация по энергетике используется для обеспечения максимально энергетически эффективного (скрытного) режима. Оператором задается информационная скорость, полоса сигнала 28, 56 или 80 МГц и шаг адаптации по энергетике (0,5, 1 или 3 дБ). Модем автоматически выбирает минимальную мощность для обеспечения заданной информационной скорости при максимальной скрытности сигнала. Адаптация по скорости используется для обеспечения максимальной информационной скорости. Оператором задается выходная мощность и полоса сигнала (28, 56 или 80 МГц), а система автоматически подбирает максимально возможную информационную скорость в канале связи. Время (цикл) адаптации по скорости и энергетике задается оператором (1, 5, 10, 30 или 60 мин).

Для оценки эффективности алгоритмов адаптации была разработана нелинейная модель усилителя мощности на основе сигналов входа и выхода, полученных от реального усилителя мощности. Основой модели является аналитическое описание на базе обобщённой полиномиальной модели с памятью. Коэффициенты модели рассчитывались с помощью рекурсивного метода наименьших квадратов. Оценка точности модели проводилась с использованием нормализованной среднеквадратичной ошибки (NMSE) относительно реального сигнала. В таблице 1 представлены результаты измерения NMSE для различных сочетаний полосы и несущей частоты сигнала.

Таблица 1 – Значения среднеквадратичной ошибки (NMSE), дБ

Полоса сигнала, МГц / Несущая частота, ГГц				
28 /4.4	28 /5	56 /4.4	56/5	80/5
минус 65	минус 68	минус 72	минус 55	минус 63

Как видно из таблицы 1, значения NMSE значительно меньше величины реальных нелинейных искажений. Уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка составляет минус 27 дБ.

С использованием нелинейной модели усилителя разработана модель радиочастотного тракта тропосферной станции, позволяющая с высокой точностью проводить оценку нелинейности, неравномерности АЧХ, спектрального состава выходного сигнала и уровня фазовых шумов радиочастотного тракта. Основные параметры РЧ-тракта: неравномерность АЧХ – не более 3 дБ; уровень дискретных и побочных излучений – не более минус 63 дБ; уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка – минус 27 дБ. В качестве иллюстрации на рисунке 1 представлен спектр фазового шума.

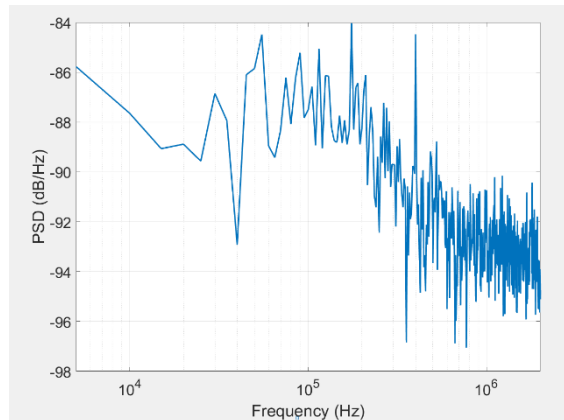


Рисунок 1 – Спектр фазового шума радиочастотного тракта

Как видно из представленного графика, уровень фазовых шумов не превышает минус 84 дБ/Гц при частотной отстройке от несущей до 2 МГц.

Рассмотрены вопросы линейаризации радиопередающего тракта путём ввода цифровых предискажений. Использование системы ввода цифровых предискажений предполагает наличие в тракте формирования сигналов функционального блока, позволяющего исказить полезный сигнал в соответствии с инверсной передаточной характеристикой радиочастотного тракта.

Адаптацию коэффициентов блока ввода предискажений, выполненного на основе аналитической модели, целесообразно выполнять с помощью алгоритма косвенного обучения, не требующего априорных данных о параметрах радиопередающего тракта (рисунок 2).

Адаптация параметров системы ввода предискажений проводится по сигналу ошибки - разностью между сигналами на выходе блока ввода предискажений и на выходе обучающегося фильтра. Рекурсивный алгоритм адаптации для системы с косвенным обучением использует один из известных методов, например, метод наименьших квадратов (LMS).

Проведен анализ использования в модеме адаптивного режима по кодовой скорости. В этом случае по обратному каналу связи передается требование об использовании заданной СКК в зависимости от отношения сигнал/шум на входе демодулятора. Для этого используется кадровый дескриптор, который вставляется перед блоком полезных данных в каждом новом кадре.

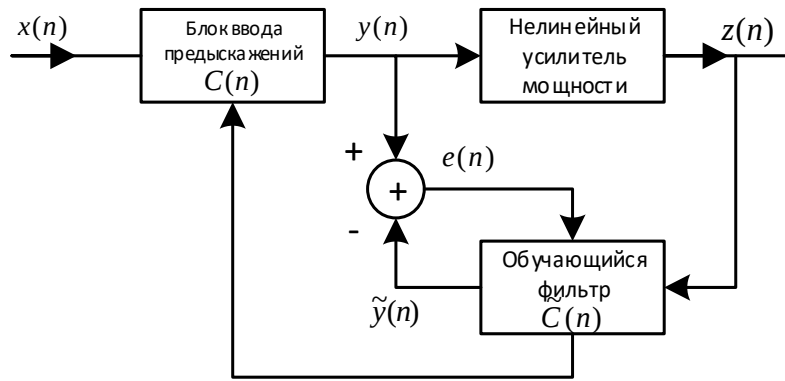


Рисунок 2 – Структурная схема системы ввода предсказаний с косвенным обучением

Оценку отношения сигнал/шум SNR проводят согласно формуле:

$$SNR = \frac{P_c}{\sigma^2} = \frac{E_b}{N_0} \frac{R}{W}. \quad (1)$$

где $E_b = P_c / R$ – энергия на один информационный бит; $R / W = d \cdot \log_2 M$ – спектральная эффективность; d – скорость кода, т.е. число информационных бит, приходящихся на каждый кодовый символ; M – число позиций модуляции.

При записи (1) учтено, что мощность полезного сигнала P_c нормируется к единице и поэтому требуется только оценка дисперсии шума σ^2 .

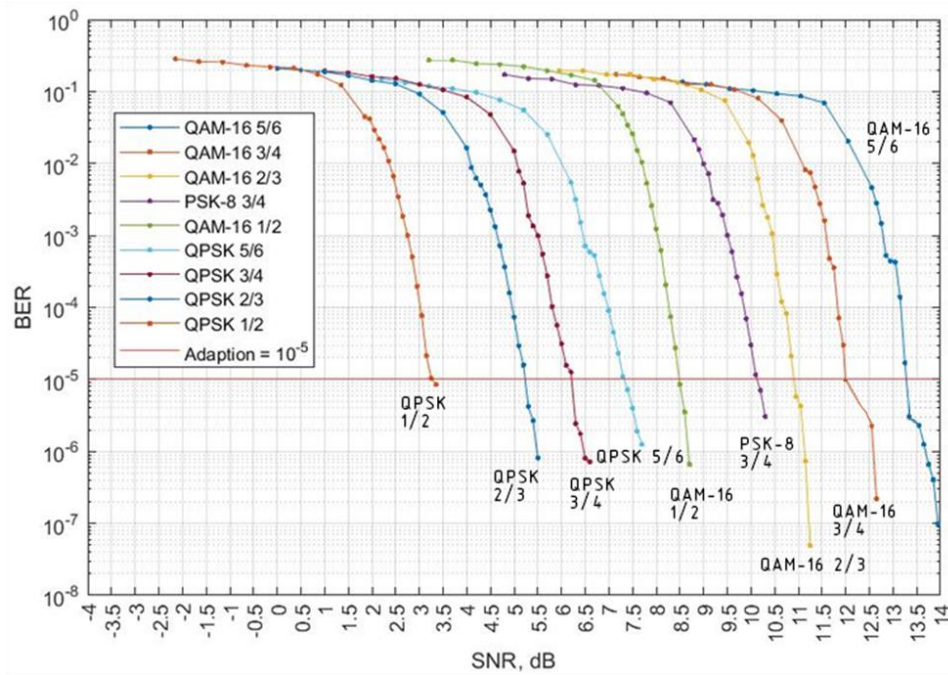
Для разработки алгоритмов компенсации искажений сигнала в тропосферном канале предложена модель в среде *matlab/simulink*. Компенсация искажений сигнала проводится с использованием LMS-оценки канала, сформированной в частотной области после OFDM-демодуляции, в сочетании с MMSE-эквалайзером.

Вероятность битовой ошибки BER при применении алгоритмов выравнивания зависит от точности оценки канала, которая в свою очередь, зависит от параметра обучения: чисел $N_{dataHav}$ и $N_{headHav}$ «усредняемых» символов.

На рисунке 3 приведены графики зависимости BER от отношения сигнал/шум SNR для ряда СКК. Графики BER приведены для MMSE-эквалайзера при $N_{dataHav} = N_{headHav} = 10$ для тропосферного (рисунок 3а) и $N_{dataHav} = N_{headHav} = 50$ – радиорелейного (рисунок 3б) режимов.

Как видно из рисунков, при вероятности ошибки на бит $BER=10^{-5}$ для наиболее энергетически эффективной СКК QPSK 1/2 пороговое значение SNR составляет около 3 дБ как для тропосферного, так и радиорелейного режимов. По сравнению с QPSK 2/3 энергетический выигрыш в этом случае не менее 2 дБ. При равной кодовой скорости СКК на основе QPSK обеспечивают значительный энергетический выигрыш по отношению к СКК на основе QAM: от 6 до 12 дБ соответственно для 16-QAM и 256-QAM. Сигнально-кодовые конструкции, использующие 8-PSK, занимают промежуточное положение, проигрывая в помехоустойчивости QPSK около 4 дБ.

а



б

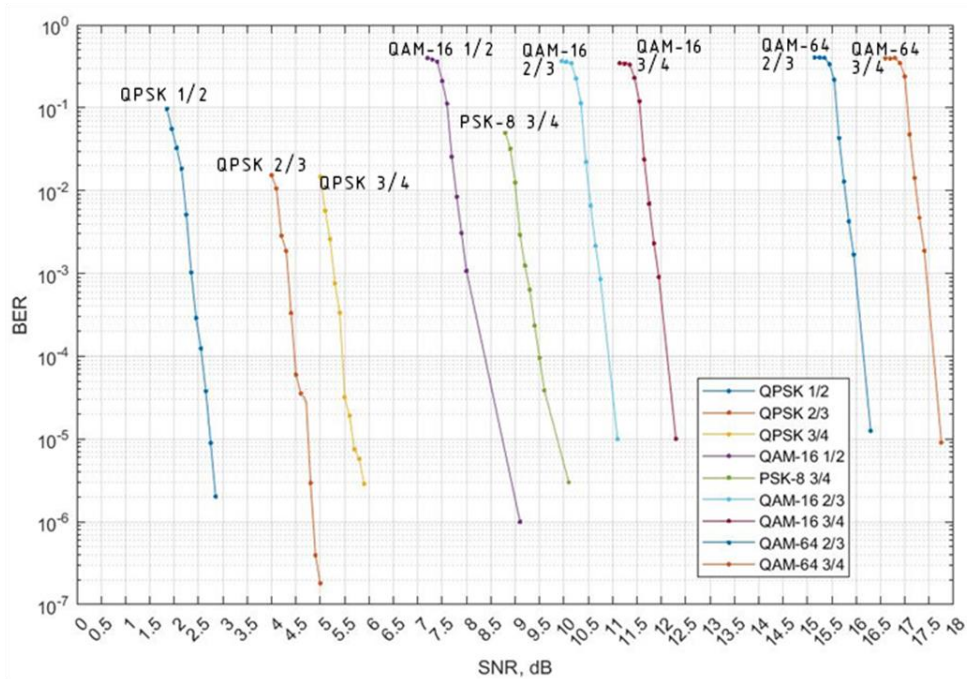


Рисунок 3 – Графики BER с MMSE-эквалайзером для тропосферного (а) и радиорелейного режима (б)

Разработан алгоритм нейтрализации до трех одновременно воздействующих узкополосных помех, обеспечивающий требуемую скорость и достоверность передачи данных при превышении помехами полезного сигнала до 30 дБ. Алгоритм нейтрализации узкополосных помех включает автоматическую блокировку поднесущих, пораженных помехами, и динамическое перераспределение информационного потока между остальными поднесущими OFDM-сигнала.

Исследован эффективный способ борьбы с частотно-селективными замираниями с использованием внутри сигнального частотного разнесения, основанного на повторении спектра информационного символа, с кратностью разнесения (от 2 до 256), зависящей от информационной скорости. В сочетании с сумматором максимальных отношений в приемнике указанное повторение спектра позволяет реализовать оптимальное частотное разнесение и подавление узкополосных помех.

На рисунке 4 представлен экспериментально полученный спектр широкополосного сигнала на входе приемника тропосферной станции. Для сравнения там же приведён спектр исходного сигнала с полосой 80 МГц на входе тропосферного радиоканала. Как видно из рисунка 4, частотные искажения, вносимые тропосферным радиоканалом, весьма ощутимы и без использования внутри сигнального частотного разнесения негативного влияния частотно-селективных замираний в тропосферном канале было бы не избежать.

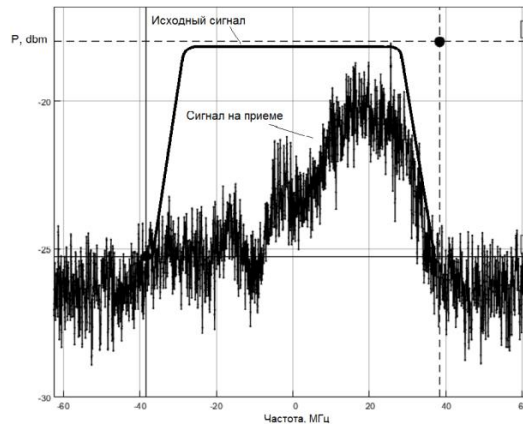


Рисунок 4 – Спектр сигнала на входе приемника тропосферной станции

В сумматоре максимальных отношений реализуется оптимальное частотное разнесение в соответствии с алгоритмом:

$$S_i = \frac{\sum_{k=1}^L \hat{h}_k^* s_k^i}{\sum_{k=1}^L |\hat{h}_k|^2}, \quad (2)$$

где S_i – передаваемый символ, $\hat{h}_k$ – комплексный коэффициент передачи канала на k -й поднесущей, s_k^i – амплитуда части i -го символа, принятая с k -й поднесущей, L – число поднесущих, на которых передавался символ (равно кратности разнесения).

В соответствии с (2) отношение сигнал/шум увеличивается относительно приема на одной поднесущей с коэффициентом передачи $|\hat{h}_0|$ согласно соотношению:

$$SNR_{increase} = 10 \lg \sum_{k=1}^L \left(\frac{|\hat{h}_k|}{|\hat{h}_0|} \right)^2. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что в идеальном канале с независимыми релевскими замираниями между поднесущими алгоритм частотного разнесения

(2) обеспечивает энергетический выигрыш равный $10\lg L$ децибел. При максимально возможной кратности разнесения $L=256$ выигрыш составит 24 дБ. Однако реальный канал является коррелированным, ввиду чего энергетический выигрыш меньше указанного значения. Как показывают результаты моделирования, при кратности разнесения L от 2 до 256 энергетический выигрыш составляет от 3 до 17 дБ.

С выхода сумматора максимальных отношений сигнал поступает на MMSE-эквалайзер, предназначенный для приведения амплитуд сигналов к целевым, что необходимо для корректной работы демодулятора (нормировка сигнального созвездия). MMSE-эквалайзер работает по критерию минимума СКО, обеспечивая компромисс между усилением шума и точным восстановлением амплитуды с целью минимизации вероятности ошибки на бит. Эквалайзер учитывает, что каждый символ получен суммированием частей с разных поднесущих в сумматоре максимальных отношений.

После эквализации сигнал поступает на QPSK-демодулятор, выполняющий вычисление логарифмического отношения правдоподобия (LLR) для каждого бита в составе символа на основе значения принятого символа. Мягкая демодуляция с использованием LLR необходима для наиболее эффективной работы турбо-декодера. Вычисление LLR выполняется в соответствии с алгоритмом:

$$L(b) = \lg \frac{\sum_{s \in S_0} e^{-\frac{1}{\sigma^2}((x-s_x)^2 + (y-s_y)^2)}}{\sum_{s \in S_1} e^{-\frac{1}{\sigma^2}((x-s_x)^2 + (y-s_y)^2)}}. \quad (4)$$

где s – точка идеального сигнального созвездия; s_x и s_y – соответственно синфазная и квадратурная координаты идеальной точки созвездия; x и y – соответственно синфазная и квадратурная координаты принятого символа; S_0 и S_1 – множества точек сигнального созвездия, в которых рассматриваемый бит b соответственно равен 0 и 1, σ^2 – дисперсия шума.

Формула (4) применима для канала с гауссовским шумом – для канала с замираниями необходимо учитывать частотную зависимость дисперсии шума, обусловленную обработкой смеси сигнала и шума эквалайзером. Мягкая демодуляция в виде отношения правдоподобия (4) необходима для наиболее эффективной работы турбо-декодера.

Дано описание перспективного способа пространственно-частотного разнесения в тропосферном канале, основанного на использовании двух передающих антенн, работающих каждая на своей несущей частоте, и двух приемных антенн, каждая из которых принимает сигнал с обеих передающих антенн (четыреждыкратный разнесенный прием).

В третьей главе представлены результаты разработки и исследования модели OFDM-модема тропосферно-радиорелейной станции связи. Разрабо-

танная модель модема позволяет реализовать 6 независимых режимов для тропосферного и радиорелейного каналов, отличающихся СКК (QPSK, 8-PSK, QAM16...QAM256/турбо-кодирование со скоростью 1/3, 1/2, 2/3, 3/4 или 5/6), значением полосы 28, 56 и 80 МГц, а также возможностью адаптации.

Проведено исследование помехоустойчивости СКК, используемых в модели модема. Результаты моделирования (кривые помехоустойчивости для АБГШ) для режимов QPSK приведены на рисунке 5.

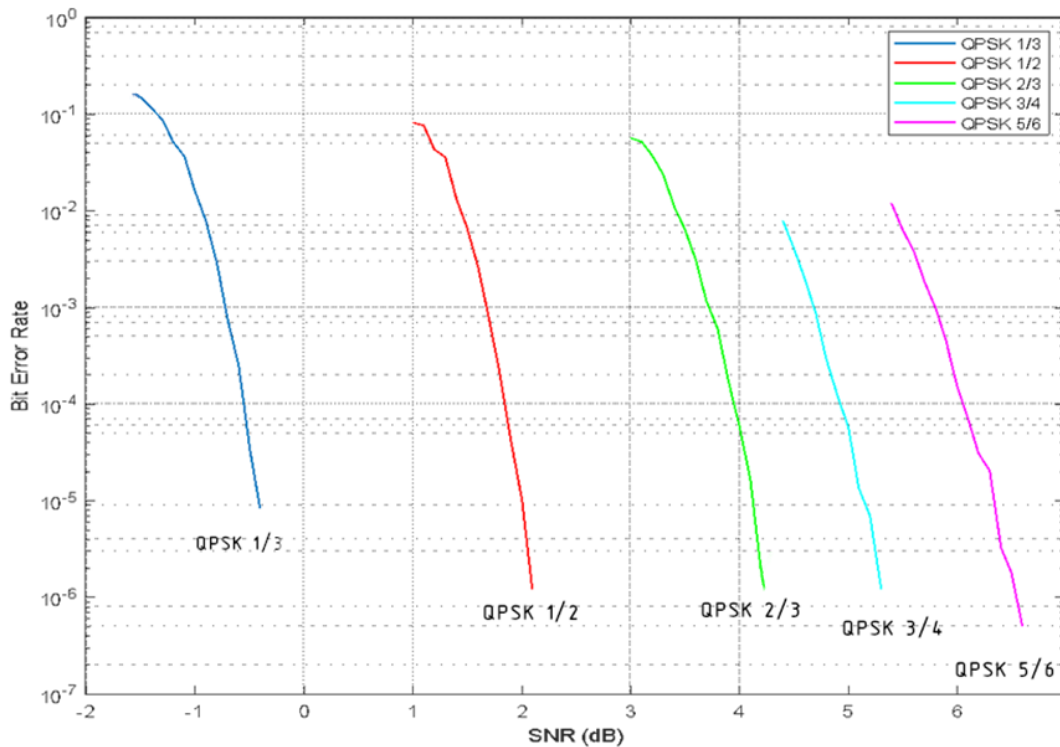


Рисунок 5 – Кривые помехоустойчивости QPSK

Как видно из рисунка, при вероятности ошибки на бит $BER=10^{-5}$ для наиболее энергетически эффективной СКК QPSK 1/3 пороговое значение SNR составляет около минус 0,5 дБ, что на 2,5 дБ меньше, чем для QPSK 1/2. При равной кодовой скорости СКК на основе QPSK обеспечивают значительный энергетический выигрыш по отношению к СКК на основе QAM: от 5 до 12 дБ соответственно для 16-QAM и 256-QAM. Сигнально-кодовые конструкции, использующие 8-PSK, занимают промежуточное положение, проигрывая в помехоустойчивости QPSK около 3 дБ.

Сравнительный анализ эффективности алгоритмов снижения пик-фактора, проведенный с использованием модели, свидетельствует о том, что применение только одной ступени (алгоритма ACE) в зависимости от вида модуляции позволяет уменьшить пик-фактор OFDM сигналов на 2,5–3,5 дБ. Комбинация алгоритмов ACE и TR (первая и вторая ступени соответственно) для всех рассмотренных видов модуляции дает дополнительное снижение пик-фактора около 2 дБ, обеспечивая суммарный результат от 4,5 дБ для 8-PSK, QAM-16, QAM-64, QAM-128 и QAM-256 до 5 дБ для QPSK потоков данных.

Результаты моделирования для модуляции QPSK приведены на рисунке 6 для радиорелейного (а) и тропосферного (б) каналов соответственно. На рисунках показаны графики вероятности превышения PAPR OFDM-символа фиксированного уровня (интегральное распределение PAPR), полученные для 10^4 OFDM-символов. Правый график на рисунках соответствует случаю без применения алгоритмов ACE и TR.

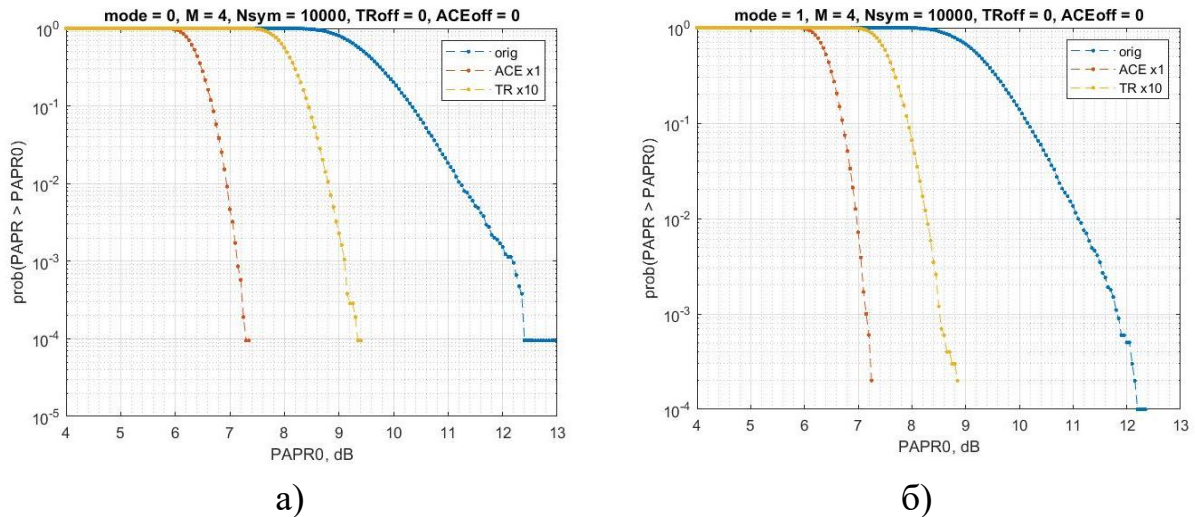


Рисунок 6 – Результат снижения PAPR алгоритмами ACE и TR для QPSK сигнала для радиорелейного (а) и тропосферного (б) каналов

Разработана обобщённая имитационная модель алгоритмов адаптации и ввода цифровых предсказаний, позволяющая оценить спектральные характеристики сигналов (ACPR): скорость сходимости алгоритмов, модуль вектора ошибки (EVM) относительно входного сигнала. Результаты исследования, проведенного с использованием данной модели для разных полос пропускания, частот излучения и излучаемой мощности, свидетельствуют о том, что разработанный модифицированный вариант алгоритма адаптации на основе рекурсивного метода наименьших квадратов (RLSm) обеспечивает наилучшие результаты.

Для примера на рисунке 7 представлен спектр сигнала на выходе модели усилителя мощности для полосы 28 МГц, несущей частоты 5 ГГц и мощности 100 Вт. Как видно из рисунка, использование предсказаний позволяет существенно снизить уровень нелинейных искажений (на 10 дБ).

На рисунке 8 представлены сигнальные созвездия на выходе модели без использования и с использованием предсказаний (соответственно левый и правый рисунки) с алгоритмом адаптации RLS для полосы 28 МГц, частоты несущего сигнала 5 ГГц и мощности 100 Вт.

Как видно из рисунков, использование предсказаний позволяет снизить величину модуля вектора ошибки (EVM) на 13.5 дБ, а также увеличить соотношение модуляция/ошибка (MER) на 13.6 дБ. 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 частотный интервал корреляции составляет от 2 до 5 МГц соответственно для 300 и 150 км. Эффективным методом борьбы с быстрыми замираниями в тропосферном канале является разнесенный прием. В разработанной модели реализовано одновременное пространственное и частотное разнесение на двух несущих частотах (четырёхкратное разнесение).

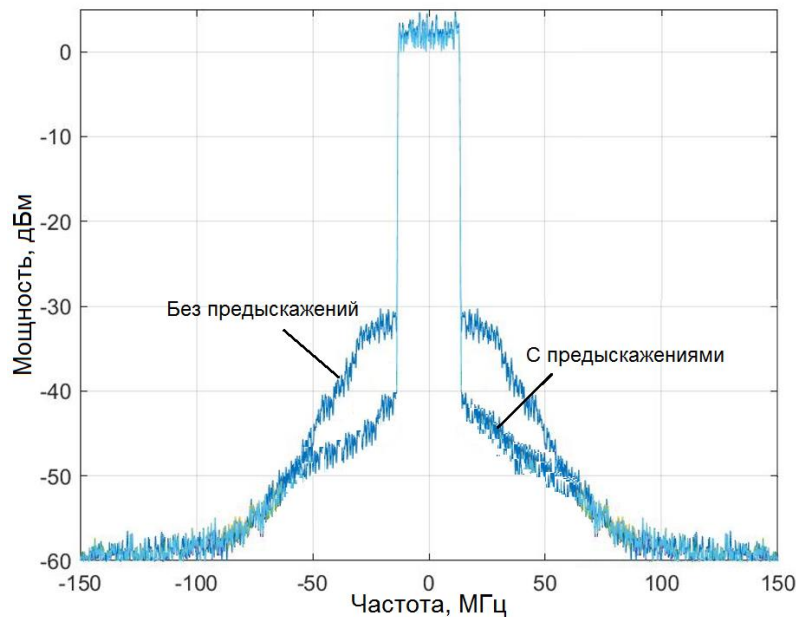


Рисунок 7 – Спектр сигнала на выходе модели усилителя мощности

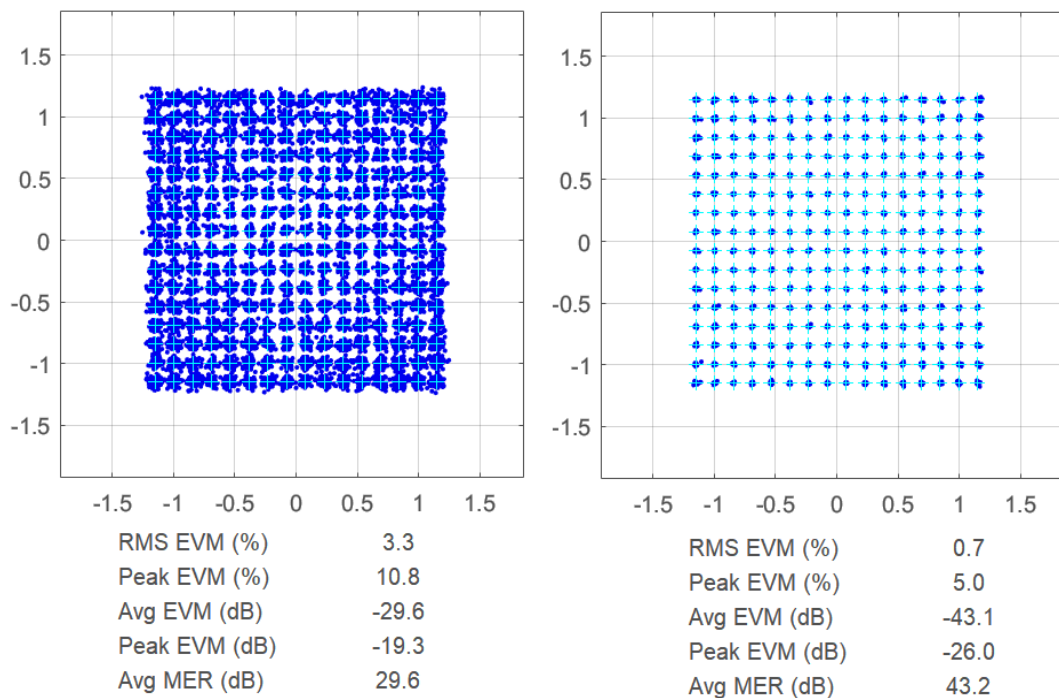


Рисунок 8 – Сигнальные созвездия с алгоритмом адаптации RLS
для полосы 28 МГц

В четвёртой главе приведены основные результаты проведённых на протяжении последних лет натурных трассовых испытаний тропосферных станций связи как серийно выпускаемых АО «НПП «Радиосвязь», так и опытных образцов, которые разрабатывались при непосредственном участии автора с использованием результатов его диссертационных исследований. Испытания проводились на реальных радиолиниях в различных климатических зонах от Забайкальского края до Мурманской области.

В рамках реализации пилотного проекта по обеспечению оказания услуг подвижной телефонной связи и предоставления высокоскоростного доступа к сети «Интернет» с 4 по 6 июня 2018 года проводились испытания в Республике Бурятия с использованием тропосферных станций связи производства АО «НПП «Радиосвязь» и модемного оборудования совместной разработки АО «НПП «Радиосвязь», МГУ им. Ломоносова и ООО «Микроволновая электроника». В ходе испытаний была организована устойчивая связь с передачей данных по стыку Ethernet со скоростью до 25 Мбит/с.

В период с 15 по 16 февраля 2018 г. на территории Красноярского края проводились испытания цифровой тропосферной станции с OFDM-сигналом. Испытания проводились в реальной тропосферной радиолинии протяжённостью 140 км. Передаваемый сигнал содержал преамбулу (255 символов) и следующий за ней пакет OFDM-символов (1110 символов). Частотный разнос поднесущих составляет 5 кГц. Вид модуляции поднесущих – QPSK. Применено свёрточное кодирование ($k=7$, $R=1/2$) и перемежение. Формат сигнала обеспечивает информационную скорость 1,1 Мбит/с.

В ходе испытаний было исследовано влияние амплитудного ограничения OFDM-символов, позволяющего снизить пик-фактор, на устойчивость синхронизации приёмника. На индикаторе пульта управления приёмником отображалось созвездие демультимплексированных поднесущих с QPSK. Результаты испытаний показали возможность устойчивой синхронизации системы связи с OFDM при работе в дневное время суток при благоприятных погодных условиях, а также позволили наметить важные для дальнейшего развития тропосферных систем связи задачи.

Натурные трассовые испытания модема тропосферной станции связи проходили в период с 22 по 24 мая 2018 года. Испытаниям подвергались опытные образцы модема для тропосферной линии связи («Модем-ТРС»). Целью испытаний являлся сравнительный анализ алгоритмов приёма в условиях частотно-селективных и плоских замираний при различных видах модуляции сигналов и скорости передачи данных. Испытания проводились в реальной тропосферной радиолинии протяжённостью 140 км.

Параметры сигналов и алгоритмов исследуемого модема: вид модуляции – BPSK, SR-FQPSK; помехоустойчивое кодирование – турбо код с кодовой скоростью $1/3$, алгоритм декодирования – Max scale, 10 итераций; алгоритм приёма в условиях частотно-селективных замираний – итеративный эквалайзер на основе нейронных сетей Хопфилда-Танка с обучением; алгоритм компенсации

плоских замираний – свёрточный перемежитель Форни, длительность 200 мс – 4 с. полоса передачи/приёма – 80 МГц по уровню -3 дБ; коэффициент расширения спектра псевдослучайной последовательностью: 1 (11.6 Мбит/с), 2 (5.8 Мбит/с), 3 (3.8 Мбит/с), 4 (2.9 Мбит/с), 5 (2.3 Мбит/с), 6 (2 Мбит/с).

В ходе испытаний была проведена оценка достоверности (вероятности ошибки и потерь пакетов), а также максимальной скорости передачи данных.

В период с 22 по 26 октября 2018 г. на территории Красноярского края проводились испытания опытного образца высокоскоростного цифрового модема тропосферной связи («Модем-ТРС») при работе в реальной радиолинии протяжённостью 144 км при средних климатических условиях. Испытания проводились с целью проверки различных режимов работы, а также оценки качества организованного канала связи и проверки режима автоматической регулировки скорости передачи данных в зависимости от качества канала связи.

Как показали испытания, для передачи данных на скорости 6 Мбит/с имеется запас по энергетике, а на скорости 12 Мбит/с энергетика тропосферного канала не всегда достаточна. Это приводило к увеличению числа пакетов, переданных с ошибками, и к потере скорости передачи данных на 20–30% относительно скорости группового потока. Возможность установки информационной скорости с малым шагом (до 1 бит/с) позволяет реализовать в тропосферных станциях адаптивный режим по скорости с учетом характеристик тропосферного канала.

Трассовые испытания опытного образца высокоскоростного цифрового модема релейно-тропосферной связи при работе в реальной радиолинии проводились 29 мая 2019 г. на территории Красноярского края. Передача данных в модеме радиорелейной связи осуществляется в пакетном режиме, длина информационного пакета в зависимости от сигнально-кодовой конструкции для скоростей кодирования 1/2, 3/4, 9/10 составляет 1728, 1152, 960 бит соответственно, длина преамбулы всегда 64 бита. Данные модулируются в зависимости от требуемого режима (QPSK, QAM16, QAM32, QAM64) и мультиплексируются с модулированной QPSK преамбулой во временной области (передаются последовательно). Испытания проводились с целью проверки различных режимов работы, а также оценки качества организованного канала связи и проверки режима автоматической регулировки скорости передачи данных в зависимости от качества канала связи.

В ходе испытаний были произведены записи сигнала тропосферного канала на информационных скоростях 1, 2, 4, 8 и 16 Мбит/с с шириной полосы сигнала 1,35; 2,7; 5,4; 10,8 и 21,6 МГц соответственно. На приемной стороне с использованием отладочной платы записывали 10^6 отсчетов принятого сигнала. На основе записанных данных было установлено, что мощность сигнала на входе приемника в информационной полосе уменьшалась до 7,7 дБ. Глубина искажений сигнала (селективных замираний) доходила до 10 дБ.

Были проведены испытания режимов радиорелейной связи с сигнально-кодовой конструкцией QPSK ТК 1/2 на скоростях 2, 4 и 8 Мбит/с. Результаты

испытаний для указанных условий и режимов работы (отношение сигнал/шум, глубина селективных и групповых замираний и др.) приведены в диссертации.

Трассовые испытания серийного изделия «Модема-ТРС» релейно-тропосферной связи при работе в реальной радиолинии проводились с 26-27 мая 2022г. в реальной радиолинии в Красноярском крае. Испытания проводились в режиме автоскорости при дальности радиолинии 140 км. Проверка проводилась в течение 24 часов непрерывной работы. Обобщенные показатели пропускной способности канала станций представлены в диссертации.

Результаты испытаний подтверждают перспективность для развития тропосферной связи таких направлений как интеграция технологии OFDM с турбо-кодированием, с частотным и пространственным разнесением, а также различными видами перемежения с целью увеличения достоверности при быстрых замираниях. Испытания подтвердили выигрыш по энергетике до 6 дБ за счёт использования новых сигнально-кодовых конструкций по сравнению с ССК, применяемыми в серийных станциях тропосферной связи.

В результате многочисленных испытаний опытных образцов и серийной аппаратуры тропосферной связи был наработан большой практический опыт для построения серийных станций связи, как в интересах Вооружённых Сил РФ, так и для гражданского применения.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. Проведён анализ современного состояния и тенденций развития технологии OFDM, показавший перспективность её использования в тропосферных каналах связи.

2. Исследована эффективность применения сигнально-кодовых конструкций на основе модуляции QPSK и QAM с турбо-кодированием в унифицированных OFDM-модемах тропосферно-радиорелейных станций связи.

3. Предложен способ внутрисигнального частотного разнесения с использованием повторения спектра информационного символа с кратностью разнесения, зависящей от информационной скорости, в сочетании с адаптивным эквалайзером и сумматором максимальных отношений в приемнике OFDM-сигнала.

5. Показана перспективность применения комбинированной схемы эквализации с преэквалайзером в передающей части OFDM-модема радиорелейных станций связи для оптимизации передаваемой мощности на каждой поднесущей в соответствии с характеристикой канала.

6. Показана перспективность использования режимов адаптации по энергетике и по скорости (информационной и кодовой) в унифицированных модемах для повышения эффективности тропосферно-радиорелейных станций.

7. Разработана модель OFDM-модема тропосферно-радиорелейных линий связи для анализа эффективности предложенных СКК и методов адаптации.

8. Показана эффективность адаптации к помеховой обстановке и условиям распространения радиоволн путём оперативного выбора сигнально-кодовой конструкции, энергетики и информационной скорости в OFDM-модеме тропосферно-радиорелейной станции.

9. Разработана имитационная модель в среде *matlab/simulink* радиочастотного тракта тропосферной станции связи, позволяющая выполнять высокоточные оценки нелинейности, неравномерности АЧХ, спектрального состава выходного сигнала и уровня фазовых шумов.

10. Модифицированы алгоритмы адаптивной OFDM в радиорелейных станциях связи для оптимизации распределения передаваемой мощности в полосе частот в соответствии с АЧХ канала.

11. Предложен двухступенчатый алгоритм снижения пик-фактора OFDM-сигналов и алгоритм цифровых предискажений, позволяющие существенно ослабить требования к линейности усилителя передатчика.

12. Предложены алгоритмы построения и программная реализация модемов с гибкой архитектурой на основе SDR-технологий для станций тропосферно-радиорелейной связи с адаптацией к помеховой обстановке по энергетике и информационной скорости, обеспечивающие высоконадёжную передачу дискретных сообщений с повышенными требованиями к помехоустойчивости.

Публикации автора по теме диссертации

1. Экспериментальное исследование модема станции тропосферной связи с энергетически эффективным режимом работы / П.В. Луферчик и [др.] // Радиотехника, 2022. №4. С. 67-75.

2. Повышение энергетических характеристик модема тропосферной связи / П.В. Луферчик и [др.] // Успехи современной радиоэлектроники, 2022. №5. С. 50-54.

3. Моделирование алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и реализация наилучшего метода для канала с замираниями / П.В. Луферчик, А.Н. Конев, Е.В. Богатырев, Р.Г. Галеев // Сибирский аэрокосмический журнал, 2022. Т. 23, № 2. С. 177-188.

4. Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями / П.В. Луферчик, А.Н. Конев, Е.В. Богатырев, Р.Г. Галеев // Сибирский аэрокосмический журнал, 2022. Т. 23, № 2. С. 189-196.

5. Энергетически эффективный OFDM-режим с возможностью адаптации к условиям распространения в каналах с многолучевостью / П.В. Луферчик и [др.] // Радиотехника, 2022. №8. С. 122-131.

6. Разработка адаптивной системы связи на основе OFDM для тропосферного и радиорелейного канала / П.В. Луферчик, А.А. Комаров, П.В. Штро, А.Н. Конев // Известия ЮФУ. Технические науки, 2022. №4. С. 244-250.

7. Разработка энергетически эффективной системы связи в тропосферном радиоканале на базе OFDM сигналов / П.В. Луферчик, П.В. Штро, А.Н. Конев, А.А. Комаров // Известия ЮФУ. Технические науки, 2022. №4. С. 251-256.

8. Пат. 208491 РФ, U1 МПК H04B 1/50, H04B 7/165 Цифровая тропосферно-радиорелейная станция связи / Р.Г. Галеев, А.Н. Фролов, Г.А. Непомнящих, П.В. Луферчик ; заявитель и патентообладатель АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь». – № 2021118050; заявл. 21.06.2021; опубл. 21.12.2021; бюл. № 36.

9. Пат. 129645 РФ, МПКО 14-03 Тропосферный модем / Р.Г. Галеев, Е.В. Богатырев, Г.А. Непомнящих, И.В. Аникьев, А.В. Луферчик, П.В. Луферчик, П.В. Штро ; заявитель и патентообладатель АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь». – № 2021503127; заявл. 21.06.2021; опубл. 03.02.2022; бюл. № 2.