

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Богатырева Евгения Владимировича «Разработка и исследование модемов помехозащищённых станций спутниковой и тропосферной связи», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Основные направления развития средств спутниковой и тропосферной связи характеризуются возросшими требованиями потребителей к пропускной способности и помехозащищённости систем. Как известно, тропосферная связь относится к технологически сложному роду связи. В результате, как это отмечается ведущими отечественными и зарубежными специалистами, в конце 20 и начале 21 века по размаху использования наметилось существенное отставание тропосферных линий связи от спутниковой связи.

Исследованные в диссертации Богатырева Е.В. новые виды спектрально-эффективных сигнально-кодовых конструкций на основе использования широкополосных сигналов и алгоритмы их обработки в модемах спутниковых и тропосферных станций нового поколения, можно отнести к одному из наиболее перспективных направлений развития спутниковых и особенно тропосферных линий связи. Можно сказать, что результаты диссертационной работы Богатырева Е.В. вносят существенный вклад по выводу тропосферной связи из тупикового состояния.

В диссертации исследована и показана возможность увеличения надёжности канала связи, средней скорости передачи данных в условиях воздействия помех в спутниковых и тропосферных системах связи, использующих широкополосные сигналы, за счёт использования *SDR*-технологий, позволяющих производить оперативный выбор оптимальной сигнально-кодовой конструкции и информационной скорости в зависимости от помеховой обстановки и условий распространения радиоволн. Проведённые Богатыревым Е. В. исследования являются **актуальными и практически значимыми**.

Автор корректно применяет известные положения математического и спектрального анализа, статистической радиотехники. Научные положения,

выводы и рекомендации, сделанные в работе на основе результатов имитационного моделирования и проведенных экспериментов, являются логически обоснованными и достоверными.

Результаты проведенных автором диссертации исследований достаточно полно опубликованы в 17 научных работах, в том числе в 3-х статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Содержание диссертации изложено грамотным научно-техническим языком. Материал достаточно хорошо проиллюстрирован. Автор продемонстрировал хорошее знание предмета и методов исследования.

Анализ содержания диссертации показывает следующее.

В качестве наиболее значимых можно указать следующие новые научные результаты:

1. Предложены новые перспективные сигнально-кодовые конструкции для модемов спутниковых систем связи и тропосферных радиолиний, отличающиеся от известных лучшими характеристиками спектральной эффективности, помехозащищённости и помехоустойчивости.

2. Показано, что использование широкополосных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) в комбинации ФМ-2 с турбокодированием позволяет обеспечить по сравнению с традиционными сигналами ППРЧ и фазоманипулированными широкополосными сигналами (ФМ-ШПС) выигрыш в помехозащищённости до 4 дБ. Вместе с тем, заключение о возможности получения выигрыша в уровне помехозащищённости сигналов ППРЧ-ШПС по сравнению с сигналами ППРЧ относительно шумовых помех требует подтверждения при практической реализации этого заключения.

3. 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.

4. 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.

5. Разработана методика расчета параметров сигналов *OFDM* для тропосферных радиолиний (ТРЛ), позволяющая рассчитывать для заданной

пропускной способности ТРЛ и рабочей полосы частот количество поднесущих, требуемый разнос между поднесущими и величину защитных интервалов между поднесущими.

В первой главе диссертации представлен аналитический обзор литературных источников, посвящённых современным спутниковым и тропосферным системам радиосвязи. На основании проведённого сравнительного анализа сигналов спектрально-эффективных форматов модуляции автор делает вывод о преимуществах сигналов с квадратурной ФМ со скруглением по Найквисту (*NQPSK*) перед сигналами с традиционной модуляцией *QPSK* для линейных трактов спутниковых станций связи. Определены основные направления повышения эффективности спутниковых систем связи и тропосферных радиолиний на основе: применения широкополосных сигналов, перспективных вариантов помехоустойчивого кодирования, использование сигналов *OFDM* и *SDR*-технологий. В качестве перспективных широкополосных сигналов для защиты от преднамеренных помех спутниковых и тропосферных станций связи предлагаются сигналы с фазовой модуляцией и с псевдослучайной перестройкой рабочих частот, а также с комбинированным видом модуляции ФМ-ШПС/ППРЧ. В качестве перспективных вариантов помехоустойчивого кодирования в модемах спутниковых и тропосферных систем связи рекомендованы коды Рида-Соломона, свёрточные коды (в сочетании с кодированием Рида-Соломона), турбо коды.

Использование сигналов *OFDM* представляет определенный интерес для ТРЛ при наличии требования увеличения пропускной способности, позволяя эффективно бороться с селективными замираниями и обеспечивая высокую спектральную эффективность, скорость и достоверность передачи информации, устойчивость к узкополосным помехам и межсимвольным искажениям (МСИ). Использование *SDR*-технологий в станциях тропосферной связи позволяет создавать системы с гибкой архитектурой, которая может изменяться при помощи программного обеспечения. Использование указанных сигналов в системах спутниковой связи требует более глубоких исследований, учитывающих использование в системе многостанционного доступа с обработкой сигналов на борту, необходимости эффективного использования мощности передатчиков ретрансляторов и образования интермодуляционных помех в режимах прямой ретрансляции.

Во второй главе представлены результаты исследования помехозащищённости широкополосных систем связи с шумоподобными сигналами.

В материалах главы показано, что применение ФМ-ШПС для защиты от преднамеренных помех обеспечивает достаточную скрытность сигнала, возможность работы в стволах, полностью загруженных узкополосными станциями без создания им заметных помех, возможность применения различных методов модуляции и способов приёма сигнала, в том числе и когерентного приёма. Эффективность использования псевдослучайной перестройки рабочей частоты 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. Показано, что при совместном использовании ФМ-ШПС и ППРЧ во многом нивелируются недостатки каждого из методов. Прежде всего при ППРЧ-ШПС исключается возможность постановки помехи «в след» и достигаются лучшие характеристики по электромагнитной совместимости (ЭМС), что и отмечается в материалах.

Проведено исследование эффективных сигнально-кодовых конструкций по применению корректирующих кодов для повышения помехозащищённости широкополосных систем связи. Результаты исследования позволили автору выработать рекомендации по улучшению характеристик СКК для спутниковых систем связи. Рекомендовано для радиолиний сетей магистральной связи использовать эффективные СКК на основе многофазных сигналов типа ФМ-4 и ФМ-8 с мощным кодированием, включая каскадное кодирование на основе турбо кодов, кодов *LDPC* и *PC*. Показано, что применение турбо свёрточного кодирования целесообразно для борьбы с преднамеренными помехами, например, при ППРЧ.

В третьей главе изложены материалы исследований вопросов построения модемов цифровых станций спутниковых связи с использованием *SDR*-технологий на примере использования ПЛИС большого объёма. Исследованные и разработанные автором алгоритмы построения спутниковых и тропосферных модемов с гибко изменяемой архитектурой на основе *SDR*-технологий позволяют производить оперативный выбор оптимальной сигнально-кодовой конструкции и информационной скорости в

зависимости от помеховой обстановки и условий распространения радиоволн.

Проведённые исследования позволили при непосредственном участии автора выработать рекомендации по совершенствованию характеристик СКК спутниковых радиолиний. Показано, что в модемах спутниковых станций в условиях энергетического дефицита радиолиний целесообразно использование Турбо Продукт Кодирования (*TPC*) на скорости кода $3/4$. Для сетей с зональным обслуживанием следует использовать сигналы *NBPSK*, *NQPSK* и *NOQPSK* с кодированием типа *TCC* (турбо свёрточное кодирование) со скоростью кода $1/2$. Для высокоскоростных магистральных модемов целесообразно иметь возможность выбора скорости и типа кодирования (из набора, например, Витерби, Витерби + Рида-Соломона, турбо кодирования *TPC* и *TCC*). Выбор же конкретного режима должен диктоваться энергетикой радиолинии, помеховой обстановкой и частотными резервами КА.

В четвертой главе исследованы перспективные тропосферные модемы, разработанные с использованием *SDR*-технологий при непосредственном участии автора диссертационной работы. Исследованы особенности реализации модема перспективной малогабаритной тропосферно-радиорелейной станции связи пятого поколения, разработанной с использованием процессоров, ПЛИС и другой современной элементной базы. Проведённое автором теоретические и экспериментальные исследования модема тропосферной станции с *OFDM*-сигналами подтвердили перспективность использования таких сигналов для тропосферных линий связи, обеспечивающих высокую эффективность ТРЛ в условиях многолучевого распространения сигналов. Автором разработана методика расчета параметров сигналов *OFDM* для ТРЛ.

В диссертации показано, что перспективным способом борьбы с замираниями в тропосферных линиях связи с учетом ограничений энергетики ТРЛ является псевдослучайная перестройка рабочей *OFDM*-полосы сигнала. Для достижения максимального эффекта от *ППРЧ* скорость перестройки должна не менее чем на порядок превышать скорость замираний в канале (около 100 Гц). Другим важным результатом является то, что применение в тропосферных системах связи сигналов с многопозиционной ФМ в сочетании с четырёхкратным пространственным разнесением позволяет довести информационную скорость в ТРЛ до 8...16 Мбит/с.

В последней, **пятой главе**, приведены результаты экспериментальных исследований модемов спутниковых и тропосферных станций, разрабатываемых предприятием АО «НПП Радиосвязь», в которых использованы результаты диссертационных исследований автора. Предлагаемые на основе результатов моделирования новые нормы фазовых шумов гетеродина отличаются от известного регламента *IESS-309* возможностью применения для более широкого диапазона скоростей передачи информации и видов модуляции, включая многофазные сигналы. Проведённые натурные трассовые испытания цифровых станций тропосферной связи показали, что способ разнесения с использованием частотно-временной матрицы выигрывает по сравнению с другими способами разнесения сигнала, в том числе и со 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, охватывающими практически всю рабочую полосу частот.

Можно констатировать, что результаты, полученные Богатыревым Е.В. в диссертации, развивают теорию и практику цифровой обработки таких перспективных сигналов как многофазные сигналы и *OFDM*-сигналы, обеспечивающие повышение надёжности линий связи, использующих такого рода сигналы. Автор посредством имитационного моделирования и трассовых испытаний полностью подтвердил выносимые на защиту положения.

Замечания по диссертационной работе

1. В материалах в целом правильно отмечается существенное различие характеристик каналов спутниковой и тропосферной связи. Вместе с тем констатацию факта, что в случае спутниковой и тропосферной связи, работающих в сантиметровых диапазонах волн, характеристики каналов связи существенно различны (канал с постоянными параметрами для спутниковой связи (СС) и с переменными параметрами для ТРЛ) необходимо было отметить с первых строк работы. Но даже во введении не акцентируется внимание на существенное различие каналов ТРЛ и СС. В ходе дальнейшего изложения материалов этот недостаток устранен, поэтому данное замечание, скорее всего, следует отнести к недостатку редакционного характера.

2. Имеются замечания по оформлению диссертации. Название Главы 5 не в полной мере соответствует ее содержанию, посвященному моделированию каналов в условиях фазовых шумов и экспериментальным исследованиям модемов спутниковых и тропосферных станций. Встречаются неудачные термины: скругление формы огибающей, степень помехозащиты, разведдоступность, шумоподобные сигналы ППРЧ, ППРЧ-ШПС и пр. Для обозначения одного и того же параметра используются разные термины: вероятность битовой ошибки и уровень битовых ошибок. Имеются неточности и ошибки. Например, обозначения величин на рисунках 1.3, 1.4 и в тексте диссертации не совпадают. В тексте и в выводах, встречаются слишком длинные предложения, трудные для восприятия (стр. 81). Диссертация и автореферат содержат большое количество аббревиатурных сокращений, при этом не все из них являются широко известными и введены без необходимых пояснений.

Дублирование выводов по отдельным главам в Заключение представляется излишним.

3. Следует отметить определенную некорректность в названии Главы 2: к шумоподобным сигналам необоснованно отнесены сигналы ППРЧ, да и ППРЧ-ШПС, характеристики спектров которых весьма отдаленно напоминают спектры шумов.

4. Из текста диссертации не ясно, почему комбинированные широкополосные сигналы ФМ-ШПС/ППРЧ по сравнению с традиционными сигналами ППРЧ и ФМ-ШПС обеспечивают выигрыш в помехозащищенности до 3 дБ при равных исходных данных на частотный и энергетический ресурсы.

5. Автор не поясняет, чем обусловлен выбор минимального по числу позиций, поражённых преднамеренной помехой, значения коэффициента помехозащиты (формула 2.20).

6. При рассмотрении ШПС автором дано определение базы сигналов при отсутствии кодирования. При использовании сигнально кодовых конструкций определение базы ШПС отсутствует.

7. Диссертационная работа посвящена разработке модемов перспективных станций спутниковой и тропосферной связи, но автор не защитил оригинальные решения по модемам патентами на изобретения.

Заключение по диссертации

Указанные выше замечания не снижают ценности диссертационной работы Богатырева Е. В., которая по актуальности темы, научной новизне исследований и содержащимся в работе результатам, обоснованности и

достоверности последних, их теоретической и практической значимости в целом заслуживает положительной оценки. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Считаю, что диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук, а её автор, Богатырев Евгений Владимирович, достоин присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник отдела средств, комплексов и сетей спутниковой связи
Федерального государственного бюджетного учреждения «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт Министерства обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А.И. Белова»

«16» октября 2018 г.

Владимир Макарович Николаенко

141006, Московская обл., г. Мытищи, пр. Олимпийский, д. 15
тел. 8-916-379-37-90, E-mail: nikolaenko36@mail.ru

Подпись Николаенко Владимира Макаровича заверяю
Начальник отдела кадров ФГБУ «16 ЦНИИИ» МО РФ Р.Мезин
«16» октября 2018 г.

