



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «Московский институт
электронной техники»

Шокина пл., д.1, г. Зеленоград, Москва, 124498

Тел.: +7(499) 731 44 41 Факс: +7(499) 710 22 33

E-mail: netadm@miet.ru <http://www.miet.ru>

ОГРН 1027739615584

06.09.2024 № 96-4088/4-8
на № _____



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
работе НИУ «МИЭТ»

г.н., профессор

С. А. Гаврилов

_____ 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию и автореферат диссертации Алёшинцева Андрея Владимировича на тему " Разработка и исследование метода многочастотной передачи данных узкополосными финитными сигналами ", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Актуальность темы диссертационного исследования.

Развитие современных цифровых систем передачи (ЦСП) или телекоммуникационных систем связи стало возможным благодаря широкому использованию новых методов многочастотной модуляции (МЧМ). В первую очередь это связано с растущей необходимостью увеличения эффективности при эксплуатации каналов многоканальной связи (КС). В условиях частотно-ограниченного канала связи основными препятствиями в этом направлении являются шумы канала связи и межсимвольная интерференция. При этом с увеличением скорости передачи данных в ЦСП доминирующее влияние на снижение качества связи оказывает межсимвольная интерференция (МСИ). В этих условиях выбранная автором тема диссертации отражает своевременную и весьма перспективную задачу повышения эффективности и помехоустойчивости телекоммуникационных систем с разработкой новых методов многочастотной передачи данных с частичной или полной компенсацией межсимвольной интерференции.

004432

Структура и объём работы.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка основных сокращений, списка литературы и приложений.

Во **введении** обосновывается актуальность работы, определены цель и задачи исследований, указываются научная и практическая значимость работы, кратко излагается её содержание по разделам.

В **первом** разделе проводится обзор и краткий анализ методов повышения спектрально-энергетической эффективности ЦСП. Описывается система передачи двоичных сообщений по частотно-ограниченному КС, выясняются причины возникновения МСИ. Рассматриваются вопросы синтеза сигналов, согласованных с характеристиками искажающего КС, дается анализ различных методов компенсации МСИ. Исследуются различные методы повышения эффективности ЦСП путем организации многочастотных модемов с узкополосными (МЧМ-DMT) и широкополосными (МЧМ-OFDM) поднесущими колебаниями. Показывается, что альтернативой корректорам каналов в одночастотных ЦСП являются методы МЧМ, когда в ЦСП для высокоскоростной передачи данных используется ряд параллельных низкочастотных подканалов, более устойчивых к МСИ. Показывается, что большое внимание в литературе уделяется методам широкополосной МЧМ стандарта OFDM (МЧМ-OFDM) и её разновидностям OFDM- FBMC, OFDM- UFMC и др., но незаслуженно малое внимание уделено методам узкополосной МЧМ стандарта DMT (МЧМ-DMT). Описываются ранее неизвестные достоинства МЧМ-DMT по сравнению с МЧМ-OFDM, делаются выводы и предлагаются рекомендации для дальнейших исследований.

Во **втором** разделе, полагая, что в модуляторах ЦСП с МЧМ-DMT в качестве узкополосных канальных фильтров используются фильтры Баттерворта (ФБ), исследуются различные структуры и эффективность модемов МЧМ1-DMT, в которых используются оптимальные финитные сигналы первого вида (ОФС1) без МСИ, синтезируемых по критерию максимума откликов ФБ в центре символьного интервала. Исследуются общие свойства и характеристики ФБ произвольного порядка, а также временные и спектральные формы ОФС1 на входе и выходе ФБ. Разрабатываются структуры и рассматриваются принципы работы различных моделей МЧМ1.*i*-DMT, $i=1,2,3$ с ОФС-1.

Заслуживает внимания новая методика формирования узкополосных сигналов в канальных модемах ЦСП с МЧМ1.*i*-DMT, $i=1,2,3$, где индекс *i* определяет число ортогональных компонентов в канальных модуляторах, необхо-

димых для однозначного восстановления данных в демодуляторах ЦСП. Этот прием позволяет автору повысить показатель спектральной эффективности ЦСП с МЧМ1-DMT по сравнению с МЧМ-OFDM, так как в одной и той же полосе частот ФБ здесь организуется большее число передаваемых информационных данных.

Поиск новых структур для повышения спектральной эффективности ЦСП с МЧМ1-DMT привел к исследованию не только формы ОФС1 с его первой производной, но и второй производной. В результате разработана новая структурная схема канального модема с МЧМ1.3-DMT путем перехода от скалярной к векторной обработке сигналов с использованием ортогональных матриц, составленных из поднесущих гармонических колебаний и организации в каждом из каналов трёх ОФС1. Применительно к использованию ОФС1 в ЦСП с МЧМ1.3-DMT технологии xDSL, рассмотрены спектральные представления канальных сигналов и оценен реальный уровень межканальных искажений (МКИ). Дается расчет и сравнительная оценка спектрально-энергетической эффективности различных модемов с МЧМ1-DMT, и МЧМ-OFDM, показаны формы сигналов и спектров этих модемов. Таблично и графически иллюстрируются результаты расчетов спектрально-энергетической эффективности сравниваемых модемов. Установлено, что наилучшими характеристиками эффективности обладает новый модем МЧМ1.3-DMT.

В третьем разделе, с целью подавления МСИ в каналах ЦСП с ФБ, рассматривается синтез новых оптимальных финитных сигналов второго вида (ОФС2), максимизирующих средние значения откликов канальных ФБ и обладающих повышенной помехоустойчивостью к МКИ. Проводится обобщенный сравнительный анализ характеристик и параметров ОФС2 с ОФС1 при различных порядках ФБ. Исследуются энергетические характеристики ОФС1 и ОФС2, к которым относятся: энергии сигналов на входе E_x и выходе E_y ФБ, коэффициент передачи по энергии и пик фактор сигналов. Показано, что помехоустойчивость сигналов ОФС2 всегда выше по сравнению с ОФС1.

Четвертый раздел посвящен разработке нового адаптивного многочастотного модема с ОФС2 и повышенной спектрально-энергетической эффективностью. Представлена модернизированная структура одного из каналов ЦСП с МЧМ2.3-DMT. Приведены данные спектрально-энергетической эффективности разработанных модемов МЧМ1.3-DMT и МЧМ2.3-DMT и аналогичные данные для известных стандартных модемов V.34, МЧМ-OFDM и др. На основе полигармонической модели гауссовского КС (ГКС) впервые проводится теоретический анализ снижения помехоустойчивости модема с МЧМ при наличии неравномерности частотной характеристики реального

КС. Оптимальные рекуррентные оценки частотных и фазовых параметров модели реального ГКС иллюстрируются таблично и графически. Показано, что для достижения предельной спектральной эффективности МЧМ2.3-DMT, полученной для модели идеального ГКС, в адаптивном модеме требуется задержка, равная 6 мс. Разрабатывается и исследуется адаптивная ЦСП с новым модемом МЧМ2.3-DMT.

В приложении диссертации представлены акты о внедрении результатов диссертации в новые проекты АО «Нейроком» и ООО «Нова инженерная компания», а также в учебный процесс университета.

Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Содержание диссертации, автореферата и научных трудов автора позволяет сделать вывод о том, что научная новизна диссертационной работы обоснована и в ней получены автором лично, либо при его непосредственном участии следующие результаты:

1. Предложена методика повышения спектрально-энергетической эффективности цифрового модема с многочастотной модуляцией, основанная на синтезе узкополосных оптимальных финитных сигналов, согласованных с характеристиками канальных фильтров Баттерворта и не вызывающих на их выходах межсимвольную интерференцию.

2. Получено обобщенное аналитическое решение оптимизационной задачи на условный экстремум по синтезу форм, спектров, множителей Лагранжа и энергетических параметров для оптимальных финитных сигналов второго вида на основе критерия максимума отклика фильтра Баттерворта в середине символьного интервала.

3. Разработаны аналитические соотношения для точного расчета спектрально-энергетической эффективности многочастотных модемов с узкополосными оптимальными финитными сигналами первого вида и второго вида.

4. Разработан для адаптивного модема МЧМ2.3-DMT алгоритм рекуррентной оценки амплитуд и фаз полигармонической модели реального частотно-ограниченного гауссовского канала связи.

5. Разработан метод адаптивной передачи данных узкополосными оптимальными финитными сигналами без МСИ с повышенной спектрально-энергетической эффективностью.

Практическая значимость проведенных исследований.

Методы синтеза финитных сигналов с многоуровневой модуляцией, в составе новых многочастотных модемов с узкополосными поднесущими,

внедрены в практическую деятельность профильных организаций и в образовательный процесс ВУЗа.

1. Разработаны структуры модемов МЧМ-DMT с оптимальными узкополосными финитными сигналами, обладающие лучшими характеристиками в сравнение с модемами OFDM с широкополосными сигналами. Проведен сравнительный анализ спектрально-энергетической эффективности различных многочастотных модемов с широкополосными и узкополосными сигналами ОФС1. При различной значности цифровых данных выигрыш модема МЧМ1.3-DMT по сравнению с модемом МЧМ-OFDM по энергетической эффективности составляет 2.724 дБ или 32.46 %, по спектральной эффективности составляет 0.1589 (бит/с·Гц) или 13,7 %.

2. Разработана новая структура модема МЧМ2-DMT и впервые проведен теоретический анализ его спектрально-энергетической эффективности. Разработанный модем при изменении ОСШ в канале связи от 9 до 30 дБ, по сравнению со стандартизованным модемом V.34 обеспечивает выигрыш в спектральной эффективности от 2.5 раз или на 60.5% до 1.7 раза или на 42.2%. По сравнению с модемом на основе МЧМ-OFDM новый модем эффективнее в 2.05 раза или на 51.18%, при изменении ОСШ от 8.6 дБ при $M_{КАМ} = 2 \times 2$ до 36 дБ при $M_{КАМ} = 128 \times 128$. При различной значности цифровых данных выигрыш модема МЧМ2.3-DMT, по сравнению с модемом МЧМ-OFDM, по энергетической эффективности составляет 2.72 дБ или 32.4% при уровне внеполосных излучений, равного -50 дБ.

Обоснованность и достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации определяется результатами пробных расчётов, адекватностью моделей применительно к ЦСП с МЧМ, корректностью математических выкладок, согласованием результатов теоретического анализа с данными экспериментальных исследований, положительными результатами внедрения. Основные положения диссертации апробированы в рамках различных международных и всероссийских конференций.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать к применению в научно-исследовательских и проектных организациях, занимающихся разработкой и проектированием систем многочастотной передачи данных.

К недостаткам диссертации можно отнести следующие:

1. В диссертации имеется ряд опечаток и редакционных неточностей.
2. В первом разделе много внимания уделено общей теории связи, но недостаточно освещены вопросы многочастотной модуляции.

3. В работе слабо освещен анализ технической реализации структур разработанных модемов.
4. В четвертом разделе приводится структурная схема нового адаптивного модема с обратной связью по оценкам амплитуд частотной характеристики реального канала связи, но не ясно как учитываются оценки фаз?

Заключение.

Отмеченные недостатки носят частный характер и не сказываются существенно на научной и практической значимости полученных в диссертации результатов. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная задача по разработке научно-методических основ проектирования метода многочастотной передачи данных узкополосными финитными сигналами.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, а именно пп. 2 и 15, а также «Положению о присуждении ученых степеней», а ее автор, Алёшинцев Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Отзыв на диссертацию Алёшинцева А.В. обсужден и утверждён на заседании НТС кафедры телекоммуникационных систем ФГАОУ ВО НИУ МИЭТ, протокол № 1 от « 05 » сентября 2024г.

Заведующий кафедрой телекоммуникационных систем
ФГАОУ ВО НИУ МИЭТ,
к.т.н., доцент

А. А. Бахтин

Подпись зав. кафедрой ТКС
к.т.н., доцента А. А. Бахтина заверяю
Начальник ОРП



Е.И. Данилова

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (ФГАОУ ВО НИУ МИЭТ)

Юридический и фактический адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1 Тел/факс +7 (499) 720-85-12 Эл. почта: netadm@miee.m