

На правах рукописи



**Алёшинцев Андрей Владимирович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОЧАСТОТНОЙ  
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ УЗКОПОЛОСНЫМИ ФИНИТНЫМИ СИГНАЛАМИ**

Специальность 2.2.15 –  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) на кафедре «Общая теория связи».

Научный руководитель	<b>Санников Владимир Григорьевич</b> , кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры «Общая теория связи» МТУСИ
Официальные оппоненты	<b>Хазан Виталий Львович</b> , доктор технических наук, с.н.с., профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность», Омский государственный технический университет <b>Самойлов Сергей Александрович</b> , кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиотехники и радиосистем», ФГБОУВО "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых"
Ведущая организация	Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Защита состоится «24» сентября 2024 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.281.01 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте университета <https://diss.vlsu.ru/index.php?id=405>.

Автореферат разослан 5 июля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 24.2.281.01  
доктор технических наук, профессор



А. Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие цифровых телекоммуникационных систем передачи данных (ЦСП), предполагает постоянное повышение их эффективности и помехоустойчивости. В условиях частотно-ограниченного канала связи (КС) основными препятствиями повышения эффективности ЦСП являются шумы КС и эффект межсимвольной интерференции (МСИ). При этом с увеличением скорости цифровых данных доминирующее влияние на снижение качества связи оказывает МСИ. Поэтому актуальным направлением в решении задачи повышения эффективности и помехоустойчивости ЦСП является разработка новых методов передачи данных с компенсацией МСИ. В современных ЦСП для нивелирования МСИ отмечают два направления. К первому направлению относятся методы одноканальной передачи данных на одной несущей с использованием на приеме эквалайзера (корректора характеристик КС). Второе направление связано с концепцией передачи данных, когда «быстрый» поток данных разделяется на множество параллельных «медленных» потоков, модулирующих поднесущие с разными частотами. При уменьшении скоростей подканалов длительности их символьных интервалов увеличиваются, действие МСИ уменьшается.

Различают ЦСП с широкополосными и узкополосными поднесущими. В настоящее время широкую известность получила технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением широкополосных поднесущих (OFDM). В цифровых абонентских линиях широко распространен метод DMT (метод дискретной многочастотной модуляции (МЧМ) с узкополосными сигналами). Использование узкополосных формирующих фильтров позволяет синтезировать для них оптимальные финитные сигналы (ОФС), принципиально не вызывающие на их выходах МСИ, что не требует введения защитного интервала, а, следовательно, приводит к более высокой спектральной эффективности ЦСП. Другое достоинство таких ЦСП, заключается в возможности их эффективной адаптации к изменяющимся характеристикам КС. Важным результатом использования узкополосных ОФС является гибкость в формировании спектра передаваемого сигнала. Например, с учетом результатов изме-

рения состояния КС не использовать для передачи те области частот, в которых затухание сигнала, либо мощность помехи велики. Поэтому задача разработки новых методов МЧМ-DMT и повышенной спектрально-энергетической эффективностью (СЭЭ), рассматриваемая в работе, является актуальным направлением дальнейших исследований.

**Степень разработанности темы.** Международным союзом электросвязи (МСЭ) разработан целый ряд методов МЧМ для высокоскоростной передачи данных по частотно-ограниченным КС, нашедших свое практическое применение в современных ЦСП и закрепленных в стандартах: G 992 (ADSL), G 993 (VDSL) – проводные технологии, IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX), LTE – беспроводные технологии и др. Большой вклад в разработку указанных методов внесли многие зарубежные и российские ученые и инженеры: Bellamy J.C., Ebert P.M., Chang R.W., Salzberg B.R., Mosier R.R., Clabaugh R.G., Weinstein S.B., Peled F., Proakis J.G, Ruiz A., Hirosaki B., Morelli M, Mengali U., Omidji M.J., Gulak P.G., Агеев Д.В., Бакулин М.Г., Балашов В.А., Белов С.П., Борисов Ю.П., Быховский М.А., Ворожищев И.В., Витязев В.В., Гапанович О.Ю., Гельгор А.Л., Завьялов С.В., Ипатов В., Кловский Д.Д., Лагутенко О.И., Лев А.Ю., Макаров С.Б., Николаев Б.И., Рашич А.В., Родионов А.Ю., Санников В.Г., Тихвинский О.С., Трифонов П.В., Хазан В.Л. и др.

ЦСП с МЧМ имеют многочисленные технические решения. Различают МЧМ-DMT модемы с узкополосными и широкополосными поднесущими. Проблема высокоскоростной передачи данных по частотно-ограниченным КС в условиях действия шумов и МСИ не является полностью решенной и требует дальнейшего исследования.

**Объектом исследования** является многочастотный модем в ЦСП с узкополосными сигналами, не вызывающими МСИ в канале связи.

**Предметом исследований** являются методы повышения СЭЭ многочастотного модема с ОФС, синтезируемыми по критерию максимума отношения сигнал/шум на входах демодуляторов ЦСП.

**Цели и задачи работы.** Целью диссертационной работы является исследование и разработка новых методов многочастотной передачи данных с повышенной СЭЭ на основе оптимизации форм финитных сигналов, модули-

рующих узкополосные поднесущие, и позволяющих осуществлять их согласованную фильтрацию при поэлементном приеме.

Для достижения поставленной цели в работе решаются задачи:

1. Разработка структурных схем многочастотного модема с узкополосными ОФС первого вида, максимизирующих отклики канальных фильтров Баттерворта (ФБ) в середине символьного интервала и не вызывающих МСИ на их выходах; исследование СЭЭ различных модификаций данного модема;
2. Синтез новых ОФС второго вида, максимизирующих среднее значение откликов канальных ФБ, не вызывающих МСИ на их выходах, имеющих пониженный пик-фактор и повышенную СЭЭ по сравнению с ОФС первого вида;
3. Разработка усовершенствованного модема МЧМ-DMT с двумерной обработкой ОФС второго вида и повышенной СЭЭ;
4. Разработка нового адаптивного многочастотного модема с узкополосными ОФС второго вида и повышенным качеством оценок параметров нестационарного гауссовского канала связи;
5. Проверка работоспособности на ПЭВМ отдельных частей модема с ОФС.

**Методы исследований.** Методы многоканальной связи, приема и фильтрации сигналов дискретной модуляции, цифровой обработки, синтеза и статистического моделирования сигналов и систем.

**Область исследования.** Результаты работы соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, а именно пп. 2 и 15.

#### **Научная и практическая новизна диссертации**

1. Разработана методика повышения СЭЭ цифрового модема с МЧМ, основанная на синтезе узкополосных ОФС, согласованных с характеристиками канальных ФБ и не вызывающих на их выходах МСИ, что позволяет организовать посимвольный прием на фильтры согласованные с ОФС.
2. Разработано аналитическое решение оптимизационной задачи на условный экстремум по синтезу форм, спектров и множителей Лагранжа для ОФС2 второго вида, максимизирующих среднее значение отклика ФБ и не вызывающих на его выходе межсимвольной интерференции.

3. Разработаны аналитические соотношения для точного расчета СЭЭ многочастотных цифровых модемов с ОФС первого и второго вида.
4. Разработаны модемы МЧМ-DMT с узкополосными сигналами обладающие лучшими характеристиками в сравнение с модемами OFDM с широкополосными сигналами. Проведен сравнительный анализ СЭЭ различных многочастотных модемов с широкополосными и узкополосными сигналами ОФС1. Так 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 %.
5. Разработан новый модем и впервые проведен теоретический анализ его СЭЭ. Разработанный модем с МЧМ и узкополосными ОФС второго вида 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%. Кроме того, разработанный модем с узкополосными поднесущими эффективнее модема с широкополосными поднесущими на основе OFDM. Так при изменении ОСШ от 8.6 дБ при  $M_{КАМ} = 2 \times 2$  до 36 дБ при  $M_{КАМ} = 128 \times 128$  новый модем эффективнее модема МЧМ-OFDM в 2.05 раза или на 51.18%. Помимо этого, 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.
6. Разработан для адаптивного модема МЧМ2.3-DMT алгоритм рекуррентной оценки амплитуд и фаз полигармонической модели нестационарного частотно-ограниченного гауссовского канала связи позволяющий применять в каждом из каналов модема вместо приема в целом, как это в модеме МЧМ-OFDM, поэлементный прием на фильтры, согласованные с ОФС2; причем экспериментально показано, что рекуррентные оценки выборочных амплитуд и фаз, получаемых на основе их полигармонической фильтрации, достигают своих истинных значений за 50 итераций (6,25 мс) со среднеквадратической погрешностью  $5 \cdot 10^{-5}$  при отношении сигнал/шум в канале, равном 0 дБ.

7. Разработан метод адаптивной передачи данных узкополосными ОФС без МСИ и с повышенной СЭЭ по сравнению со стандартным методом OFDM, отличающийся от известных учетом оценок параметров прямого КС, передаваемых по каналу обратной связи и используемых как на передаче (в модуляторе), так и на приеме (в демодуляторе).

**Теоретическая значимость работы.** Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в исследовании известных и разработке новых методов синтеза ОФС, не вызывающих МСИ на выходах канальных ФБ в составе многочастотных модемов с узкополосными поднесущими, являющимися одними из основных методов модуляции/демодуляции наиболее перспективных технологий xDSL, закрепленных в стандартах МСЭ G 992, G 993 и др. Разработанные в диссертации новые модемы с многочастотной модуляцией и ОФС превосходят по СЭЭ известные модемы.

**Практическая значимость работы.** Изложенные в работе методы синтеза ОФС с многоуровневой модуляцией, согласованных с характеристиками канальных ФБ в составе новых многочастотных модемов с узкополосными поднесущими, были использованы при проведении НИР МТУСИ с организациями АО «Нейроком» и ООО «Нова инженерная компания» г. Москва. Материалы этих работ использованы при разработке рекомендаций по созданию средств высокоскоростной передачи цифровых данных по коммутируемой телефонной сети общего пользования для повышения её СЭЭ. Часть теоретических и практических результатов, полученных в работе, использованы в учебном процессе на кафедре МКиИТ МТУСИ.

Предложенный в работе новый адаптивный многочастотный модем с двумерной обработкой ОФС второго вида и повышенной СЭЭ может быть использован для организации высокоскоростной передачи данных на основе новых проводных технологий стандарта xDSL.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработанный метод МЧМ1.3-DMT с тремя попарно ортогональными ОФС1, согласованными с характеристиками канальных ФБ, и не вызывающих на их выходах МСИ при уровне внеполосных излучений - 20 дБ позволяет обеспечивать выигрыш модема МЧМ1.3-DMT по сравнению с модемом

МЧМ-OFDM: по спектральной эффективности в 1.16 раз (на 0.1589 бит/с/Гц) или 13,7 %, по энергетической эффективности на 2.724 дБ или 32.46 %.

2. Разработанный усовершенствованный метод МЧМ2.3-DMT с тремя парно ортогональными новыми ОФС2, и не вызывающих на выходах канальных ФБ МСИ, позволяет обеспечивать выигрыш модема МЧМ2.3-DMT по сравнению с модемом МЧМ-OFDM: при изменении ОСШ от 8.6 дБ для  $M_{КАМ} = 2 \times 2$  до 36 дБ для  $M_{КАМ} = 128 \times 128$  по спектральной эффективности в 2.05 раза или на 51.18% при сравнимой с МЧМ1.3-DMT энергетической эффективностью и уровне внеполосных излучений, равного -50 дБ.

3. 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%. Сравнительный анализ СЭЭ различных многочастотных модемов с широкополосными и узкополосными сигналами ОФС1, также проведенный теоретический анализ СЭЭ разработанного нового модема с МЧМ и узкополосными ОФС второго вида.

4. Разработанный для адаптивного модема МЧМ2.3-DMT алгоритм рекуррентной оценки амплитуд и фаз полигармонической модели нестационарного частотно-ограниченного гауссовского КС позволяет применять в каждом из каналов модема вместо приема в целом, как это в модеме МЧМ-OFDM, поэлементный прием на фильтры, согласованные с ОФС2; причем экспериментально показано, что рекуррентные оценки выборочных амплитуд и фаз, получаемых на основе их полигармонической фильтрации, достигают своих истинных значений за 50 итераций (6,25 мс) со среднеквадратической погрешностью  $5 \times 10^{-5}$  при отношении сигнал/шум в канале, равном 0 дБ.

**Степень достоверности результатов** исследования обусловлена адекватностью моделей применительно к системам с МЧМ, корректностью математических выкладок, согласованием результатов теоретического анализа с данными экспериментальных исследований, положительными результатами внедрения.

**Апробация результатов исследования.** Достоверность положений и выводов подтверждается апробацией ее результатов на следующих конфе-



ренциях различного уровня. Отраслевые 2<sup>ая</sup>, 10<sup>ая</sup> и 11<sup>ая</sup> научно-технические конференции: «Технологии информационного общества» (Москва, МТУСИ, 2008, 2016, 2017). Международная научно-техническая конференция: «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», INTERMATIC (Москва, 2011). Научно-техническая конференция: «Телекоммуникационные и вычислительные системы» (Москва, 2011, 2017, 2019). 17<sup>ая</sup>, 24<sup>ая</sup> международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» - (Москва, DSPA-2015, DSPA-2022). 9<sup>ая</sup> Всероссийская научно-техническая конференция: «Радиолокация и радиосвязь, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (Москва 2015). Международная конференция: «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (Москва, REDS –2016). XV Международная научно-практической конференция: «Актуальные проблемы науки XXI века» (Москва, 2016). 75-я Международная научная конференция: «Стратегии устойчивого развития мировой науки». (Москва, 2021). XXVII Международная научно-практическая конференция: «Наука в современном информационном обществе» (North Charleston, 2021). Международная научно-техническая конференция: «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» (СИНХРОИНФО-2018, 2022 (Минск, 2018), (Архангельск, 2022)).

**Публикации:** По материалам диссертационного исследования опубликовано 30 научных работ, из которых 8 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в журнале, индексируемом в базе Scopus, 1 статья в журнале, индексируемом в базе WoS, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад.** Все изложенные в диссертации результаты исследования получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и приложения. Общий объем диссертационной работы вместе с приложениями составляет 141 страница, в том числе 137 страниц основного текста, 65 рисунков, 15 таблиц, список литературы насчитывает 141 наименование.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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 СЭЭ 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.

Рассматриваются современные методы МЧМ с узкополосными и широкополосными сигналами, делаются выводы и предлагаются рекомендации для дальнейших исследований.

Во **втором** разделе, полагая, что в качестве узкополосных канальных фильтров МЧМ используются ФБ, исследуются структура и эффективность МЧМ1 первого вида с ОФС, синтезируемыми по критерию максимума откликов ФБ в центре символьного интервала. Исследуются общие свойства и характеристики канальных ФБ, квадраты передаточных функций которых равны

$$K_n^2(p, \omega) = \frac{1}{1 + v \left( (\omega - \omega_n) / \omega_\gamma \right)^{2p}}, \quad n = \overline{1, N}, \quad K^2(p, \omega) = \frac{1}{1 + v \left( \omega / \omega_\gamma \right)^{2p}}, \quad (1)$$

В (1) первое соотношение для узкополосных ФБ, а второе для НЧЭ ФБ. При фиксированной частоте  $F_\gamma$  НЧЭ ФБ полосу частот  $\Delta f = 2F_p$  в  $n$ -ых каналах МЧМ определяют по заданному уровню  $L_p$  дБ ослабления межканальной интерференции (МКИ), где

$$F_p = F_\gamma \cdot \delta_{p,\gamma}, \quad \delta_{p,\gamma} = \left( 10^{-0.1L_{p,\gamma}} - 1 \right)^{1/2p}. \quad (2)$$

Импульсные реакции НЧЭ ФБ, соответствующие (1) и используемые в дальнейших расчетах, приводятся к виду

$$q(p, t) = q_p \sum_{k=1}^{p/2} q_{pk} e^{-\alpha_k t} \sin(\beta_k t - \varphi_{pk}). \quad (3)$$

В разделе 2.2 по характеристикам НЧЭ ФБ (1)-(3) решается задача определения ОФС-1  $x(t)$ ,  $0 \leq t \leq T_s$  на его входе, обеспечивающих ту же длитель-

ность отклика  $y(t)$ ,  $0 \leq t \leq T_s$  и максимизирующей мгновенное значение отклика в момент  $t = T_s / 2$ . В результате получаем

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \varepsilon \left\{ q(p, 0.5T_s - t) - \sum_{m=0}^{p-1} \lambda_m [q^{(m)}(p, -t) + (-1)^m q^{(m)}(p, T_s - t)] \right\}, \\ y_1(t) &= \varepsilon \left\{ Q(p, 0.5T_s - t) - \sum_{m=0}^{p-1} \lambda_m [Q^{(m)}(p, -t) + (-1)^m Q^{(m)}(p, T_s - t)] \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

где  $Q(p, t) = \int_0^\infty q(p, \tau) q(p, \tau + |t|) d\tau$  - канальная функция ФБ определяемая как функция корреляции от ИР ФБ,  $\{\lambda_m\}$  - множители Лагранжа вариационной задачи, определяемые из решения следующей системы линейных уравнений

$$\begin{cases} 1 - \sum_{m=0}^{p-1} \lambda_m \omega_\gamma^m \left[ e^{\alpha_k T_s / 2} \cos \psi_{km}^+ + (-1)^m e^{-\alpha_k T_s / 2} \cos \psi_{km}^- \right] = 0, \\ \sum_{m=0}^{p-1} \lambda_m \omega_\gamma^m \left[ e^{\alpha_k T_s / 2} \sin \psi_{km}^+ - (-1)^m e^{-\alpha_k T_s / 2} \sin \psi_{km}^- \right] = 0, \end{cases} \quad k = \overline{1, p/2}, \quad (5)$$

где  $\psi_{km}^+ = \beta_k T_s / 2 + m\theta_k$ ,  $\psi_{km}^- = \beta_k T_s / 2 - m\theta_k$ ,  $\theta_k = \arctg(\beta_k / \alpha_k)$ .

Расчеты по (4)-(5) иллюстрируются графиками форм и спектров ОФС-1 для различных порядков ФБ.

В разделе 2.3 разрабатываются структуры и рассматриваются принципы работы различных моделей МЧМ с ОФС-1. Приведена схема ЦСП с МЧМ0, усовершенствованная схема МЧМ1 с ОФС-1, схема МЧМ2 которая в отличие от схемы МЧМ1 обладает в два раза большей эффективностью, так как в одной и той же полосе частот ФБ здесь организуется в два раза большее число каналов. В одном канале формируется ОФС-1 вида  $y_1(t)$ ,  $0 \leq t \leq T_s$  в (4), а во втором - ортогональный ему ОФС вида  $y_\perp(t) = dy_1(t) / dt$  и определяемый так

$$y_\perp(t) = \varepsilon \left\{ Q^{(1)}(p, 0.5T_s - t) - \sum_{m=0}^{p-1} \lambda_m [Q^{(m+1)}(p, -t) + (-1)^m Q^{(m+1)}(p, T_s - t)] \right\}. \quad (6)$$

Спектральную эффективность модема увеличим еще в два раза, переходя от скалярной к комплексной обработке при формировании сигналов КАМ с учетом длительности ОФС1 равной  $T_2 = 2T_1 = 4NT_b \cdot \lg M_{КАМ}$ . (7)

В модуляторе n-ого канала МЧМ2, дискретизированная двоичная последовательность  $a_{n,k}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , поступает в демультиплексор, в котором она разбивается на 8 подблоков (вместо 4 в МЧМ1) по  $m$  бит в каждом. Эти блоки преобразуются в символы МАМ с числом позиций  $M=2^m$ . Скалярные символы

МММ  $a_{il}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $l = 1, 2$ , при фиксированном  $k$  преобразуются в комплексные символы КАМ по правилу:

$$\dot{a}_1 = a_{11} + ja_{12}, \quad \dot{a}_2 = a_{21} + ja_{22}, \quad \dot{a}_3 = a_{31} + ja_{32}, \quad \dot{a}_4 = a_{41} + ja_{42}. \quad (8)$$

Здесь  $j = e^{j\pi/2}$  - компонента, ортогональная компоненте  $1 = e^{j0}$ . Символы КАМ, следующие через интервалы  $T_2 = 2T_1$  (7), перемножаются с взаимно ортогональными и равными энергиями ОФС1,1  $y_{1,1}(t)$  и ОФС1,2  $y_{1,2}(t)$ . В результате формируются четыре комплексных ОФС1 следующего вида:

$$\dot{a}_{11}(t) = \dot{a}_1 y_{1,1}(t), \quad \dot{a}_{22}(t) = \dot{a}_2 y_{1,2}(t), \quad \dot{a}_{31}(t) = \dot{a}_3 y_{1,1}(t), \quad \dot{a}_{42}(t) = \dot{a}_4 y_{1,2}(t). \quad (9)$$

Поиск новых структур для повышения эффективности ЦСП с МЧМ-DMT и ОФС1 привел к исследованию не только формы ОФС1  $y_{1,1}(t)$  с энергией  $E$  и его производной  $y_{1,2}(t) = v_1 dy_{1,1}(t) / dt$ , но и второй производной от  $y_{1,1}(t)$ , обозначаемой как  $y''(t) = d^2 y_{1,1}(t) / dt^2$ . В этом случае третья компонента, ортогональная  $y_{1,2}(t)$ , равна  $y_{1,3}(t) = v_2 y''(t)$ , где  $v_2 = \sqrt{E_{y_{1,1}} / E_{y''}}$ . Пример ОФС1 с тремя попарно ортогональными сигналами и их спектрами приведен далее на рис. 2.

Далее повышая эффективность модемов МЧМ-DMT путем перехода от скалярной к векторной (двумерной) обработке сигналов с использованием ортогональных матриц, составленных из поднесущих гармонических колебаний

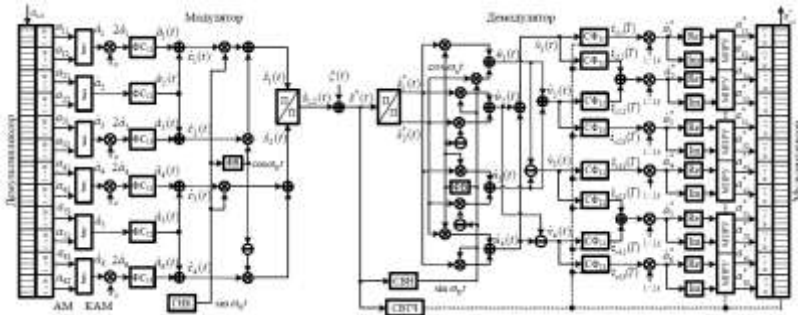


Рисунок 1 – Структурная схема одного из каналов ЦСП с МЧМ1.3-DMT

и организации в каждом из каналов трех ОФС1, в работе рассматривается усовершенствованный МЧМ модем, в котором используются три попарно ортогональных ОФС1:  $y_{1,1}(t) \perp y_{1,2}(t)$ ,  $y_{1,2}(t) \perp y_{1,3}(t)$  с учетом их форм и спектров. Третья структура одного из каналов ЦСП с МЧМ1.3-DMT и ОФС1 представлена на рисунке 1.

В модуляторе  $n$ -ого канала двоичные данные  $a_{n,k}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , поступают в демультиплексор, в котором они разбиваются на 12 блоков. В блоках  $2 \rightarrow M$  двоичные символы преобразуются в символы ДАМ с  $M=2^m$ , которые затем преобразуются в символы КАМ

$$\dot{a}_1 = a_{11} + ja_{12}; \dot{a}_2 = a_{21} + ja_{22}; \dot{a}_3 = a_{31} + ja_{32}; \dot{a}_4 = a_{41} + ja_{42}; \dot{a}_5 = a_{51} + ja_{52}; \dot{a}_6 = a_{61} + ja_{62}. \quad (10)$$

Применительно к использованию ОФС1 в многоканальной ЦСП с МЧМ1.3-DMT технологии xDSL рассмотрены также спектральные представления канальных сигналов и оценен реальный уровень МКИ соседних каналов с ОФС1, который составляет – 26 дБ, что является недостаточной величиной при использовании ОФС1 в технологиях 5G.

В разделе 2.4 дается расчет и сравнительная оценка спектрально-энергетической эффективности различных модемов с МЧМ-OFDM и МЧМ-DMT, показаны формы сигналов и спектров этих модемов.

Для структур МЧМ1, 2 и МЧМ3 спектральные эффективности равны

$$\eta_{F,1} = 2^1 \frac{C_{\gamma,1}}{\delta_{p,\gamma}} \text{ld}M, \quad \eta_{F,2} = 2^2 \frac{C_{\gamma,1}}{\delta_{p,\gamma}} \text{ld}M, \quad \eta_{F,3} = 6 \frac{C_{\gamma,3}}{\delta_{p,\gamma}} \text{ld}M = 0.75 \cdot 2^3 \frac{C_{\gamma,3}}{\delta_{p,\gamma}} \text{ld}M. \quad (11)$$

Значения энергетической эффективности модемов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения энергетической эффективности модемов с МЧМ1.*i*-DMT

<i>M</i>	2	4	8	16	32	64	128	Модемы
$\eta_{E,i}$ (dB)	8.678	12.48	16.80	21.48	26.42	31.54	36.79	МЧМ1. <i>i</i> -DMT <i>i</i> =0,1,2
$\eta_{E,3}$ (dB)	5.668	9.475	13.79	18.472	23.41	28.529	33.779	МЧМ1.3-DMT

В этом же разделе получена оценка СЭЭ МЧМ модема на основе OFDM

$$\frac{E_b}{G_0} = \left[ \text{erfcinv} \left( \frac{1 - \sqrt{1 - 2p_{\text{доп}} \text{ld}M}}{1 - 1/M} \right) \right]^2 \frac{(M^2 - 1)}{3 \text{ld}M} = \phi(p_{\text{доп}}, M), \quad (12)$$

$$\eta_{F,OFDM} = \text{ld}M_{\text{КАМ}} / (\tau_{\text{ЦП}} T_{\text{FFT}}^{-1} + 1)(\alpha + 1). \quad (13)$$

Иллюстрируются результаты расчета СЭЭ различных модемов. Анализ полученных результатов показывает, что при изменении значности *M* цифровых данных от 2 до 128 энергетическая эффективность модема МЧМ-OFDM изменяется от 8.3982 до 36.509 дБ, а его спектральная эффективность, соответственно, от 1 до 7 (бит/с · Гц).

Для многочастотных модемов, альтернативных модему МЧМ-OFDM, таких как МЧМ-GFDM, МЧМ-FBMC, МЧМ-UFMC, МЧМ-FTN, показано, что их энергетическая эффективность меньше, чем у МЧМ-OFDM, а спектральная эффективность, по сравнению с МЧМ-OFDM, изменяется незначительно; так при *M*=2 её увеличение составляет от 0.1 до 0.2 (бит/с · Гц).

Наилучшими характеристиками эффективности обладает новый модем МЧМ1.3-DMT. Так, при *M*=2, его выигрыш в энергетической эффективности, по сравнению с МЧМ-OFDM, составляет 2.724 дБ или 32.46 %, а выигрыш в спектральной эффективности составляет 0.1589 (бит/с · Гц) или 13,7 %.

В **третьем** разделе дается синтез новых оптимальных финитных сигналов второго вида (ОФС-2), максимизирующих средние значения откликов канальных ФБ при фиксированной энергии входного сигнала  $x(t), 0 \leq t \leq T$ ,

$$E_x = \int_0^{T_s} x^2(t)dt = const, \quad \frac{d^i}{dt^i} y(t) = 0|_{t=0}, \quad \frac{d^i}{dt^i} y(t) = 0|_{t=T_s}, \quad i = \overline{0, (p-1)}, \quad (14)$$

решается задача синтеза новых ОФС по критерию

$$\max_{\{x(t)\}} \bar{y}(t) = \max_{\{x(t)\}} \frac{1}{T} \int_0^T \bar{y}(t)dt = \max_{\{S_x(j\omega)\}} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(j\omega) K(p, j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (15)$$

где черта сверху означает усреднение по времени.

Решение данной задачи сводится к ОФС-2 вида

$$\begin{aligned} x_2(t) &= \varepsilon \left\{ T_s^{-1} \int_0^{T_s} q(\tau-t) d\tau - \sum_{i=0}^{p-1} \mu_i \left[ q^{(i)}(-t)|_{t \leq 0} + (-1)^i q^{(i)}(T_s-t)|_{t \leq T_s} \right] \right\}, \\ y_2(t) &= \varepsilon \left\{ T_s^{-1} \int_0^{T_s} Q(\tau-t) d\tau - \sum_{i=0}^{p-1} \mu_i \left[ Q^{(i)}(-t) + (-1)^i Q^{(i)}(T_s-t) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (16)$$

В разделе 3.2 доказано, что данные сигналы финитны на символьном интервале  $T_s$  тогда, когда множители Лагранжа в (16) удовлетворяют следующей системе линейных уравнений

$$\begin{aligned} \text{Re}(\cdot) &= \frac{1}{\omega_\gamma T} \left[ e^{a_\gamma T/2} \cos \psi_l^- - e^{-a_\gamma T/2} \cos \psi_l^+ \right] - \sum_{i=0}^{p-1} \mu_i \omega_\gamma^i \left[ e^{a_\gamma T/2} \cos \psi_{l,i}^+ + (-1)^i e^{-a_\gamma T/2} \cos \psi_{l,i}^- \right] = 0, \\ \text{Im}(\cdot) &= \frac{1}{\omega_\gamma T} \left[ e^{a_\gamma T/2} \sin \psi_l^- + e^{-a_\gamma T/2} \sin \psi_l^+ \right] - \sum_{i=0}^{p-1} \mu_i \omega_\gamma^i \left[ e^{a_\gamma T/2} \sin \psi_{l,i}^+ - (-1)^i e^{-a_\gamma T/2} \sin \psi_{l,i}^- \right] = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

где  $\omega_\gamma = \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}$ ,  $\psi_l^\mp = (\beta_l T_s / 2 \mp \theta_l)$ ,  $\psi_{l,i}^\mp = (\beta_l T_s / 2 \mp i \cdot \theta_l)$ ,  $\text{tg } \theta_l = \text{ctg } \varphi_l$ .

В разделе 3.3 проводится сравнительный анализ характеристик и параметров ОФС-2 с ОФС-1 при различных порядках ФБ. Для примера на рисунках 2 и 3 показаны формы и спектры ОФС-1 и ОФС-2 для ФБ-8, полученные в соответствии с (1)-(3), (16) и (17).

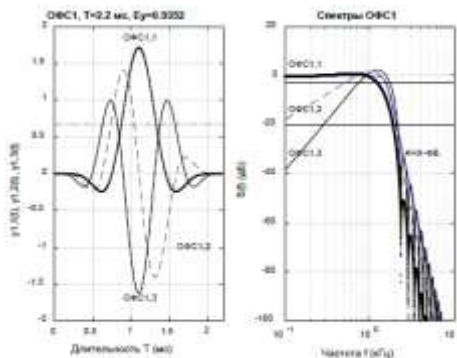


Рисунок 2 – Формы и спектры трех попарно ортогональных ОФС1

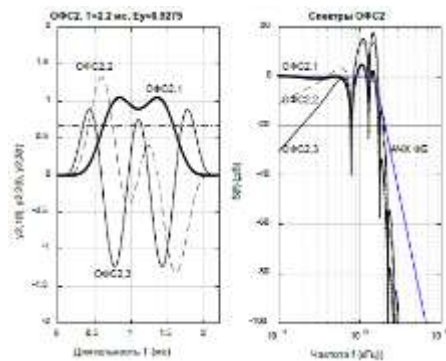


Рисунок 3 – Формы и спектры трех попарно ортогональных ОФС2

В разделе 3.4 исследуются энергетические характеристики ОФС-1 и ОФС-2, к которым относятся: энергии сигналов на входе  $E_x$  и выходе  $E_y$  НЧЭ ФБ, коэффициент передачи по энергии  $k_E = E_y / E_x$  и пик фактор сигналов  $\pi_E = y_{\max}^2 T / E_y, T = T_s$ . Получены общие соотношения для  $k_E$  и  $\pi_E$  вида

$$k_E = \int_0^\infty \frac{\Phi^2(2\pi f, T)}{[1+(f/F_\gamma)^{2p}]^2} df / \int_0^\infty \frac{\Phi^2(2\pi f, T)}{[1+(f/F_\gamma)^{2p}]} df, \quad (18)$$

$$\pi_E = \left[ \psi(T/2) - 2 \sum_{k=0}^{p-1} \mu_k Q^{(k)}(-T/2) \right] / T^{-1} \int_0^\infty \frac{\Phi^2(2\pi f, T)}{[1+(f/F_\gamma)^{2p}]^2} df, \quad (19)$$

где для **ОФС-1**  $\Phi_1^2(\omega, T) = \left\{ 1 - 2 \sum_{i=0}^{p-1} \mu_i \omega^i \cos \frac{(\omega T - i\pi)}{2} \right\}^2, \psi_1\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{\omega_\gamma}{2p} \sum_{l=1}^p \sin \varphi_l,$

для **ОФС-2**  $\Phi_2^2(\omega, T) = 2 \left\{ \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\omega T} - \sum_{i=0}^{p-1} \mu_i \omega^i \cos \frac{(\omega T - i\pi)}{2} \right\}^2, \psi_2\left(\frac{T}{2}\right) = T^{-1} \left[ 1 - p^{-1} \sum_{l=1}^p e^{-\alpha_l T/2} \cos \frac{\beta_l T}{2} \right].$

Анализ соотношений в (18), (19) показывает, что при любом порядке ФБ и любой скорости передачи  $V = 1/T$  величина  $k_E$  для ОФС-2 превышает аналогичную величину для ОФС-1. Зависимости пик фактора от скорости передачи для ОФС-2 всегда меньше, чем для ОФС-1.

Помехоустойчивость модемов с ОФС-2 и ОФС-1 оценивалась по формуле  $p_{b, \text{КАМ}} = \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\sqrt{M_{\text{КАМ}}} - 1}{\sqrt{M_{\text{КАМ}}}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{G_0} \frac{3 \operatorname{ld} M_{\text{КАМ}}}{2(M_{\text{КАМ}} - 1)} k_E(V)} \right) \right]^2 \right\} / \operatorname{ld} M_{\text{КАМ}}, \quad (20)$

Показано, что помехоустойчивость сигналов ОФС-2 практически не зависит от  $p$  и всегда выше по сравнению с ОФС-1.

**Четвертый** раздел посвящен разработке нового адаптивного многочастотного модема с ОФС-2 и повышенной СЭЭ. Проблема состоит в том, что в реальных ЦСП КС не идеален, так как его характеристики или параметры случайным образом изменяются. Поэтому с целью достижения потенциальной эффективности модемы должны подстраиваться под изменяющиеся характеристики канала, т.е. быть адаптивными. Предлагается структура усовершенствованного модема с ОФС2 (МЧМ2.3-DMT) и повышенной СЭЭ. Представлена мо-

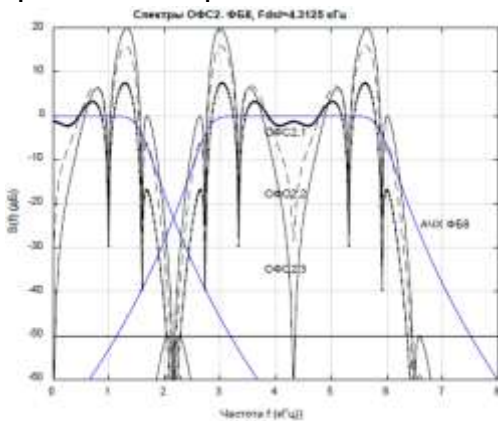


Рисунок 4 – Спектры ОФС2 в ЦСП с МЧМ2.3-DMT

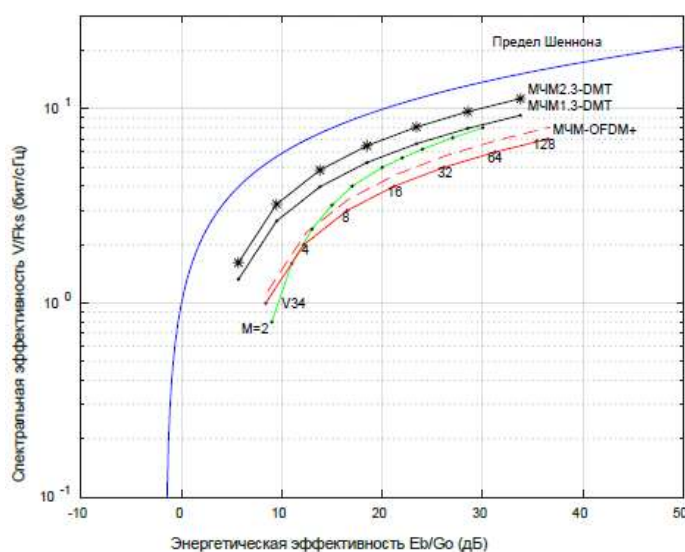
дернизированная структура одного из каналов ЦСП с МЧМ2.3-DMT. Принцип работы данного модема (МЧМ2.3-DMT) идентичен работе модема МЧМ1.3-DMT, изображенного на рис. 1. Отличие заключается в блоках ФС в модуляторе и в блоках СФ в демодуляторах, где индексы соответствуют формам ОФС1 и ОФС2.

На рисунке 4 показаны спектры соседних каналов, разнесенных на несущие частоты  $F_{ds1} = 4.3125$  кГц, при использовании канальных ФБ восьмого порядка (синие графики). Скорость спада амплитудного спектра ОФС третьего сигнала  $y_{2,3}(t)$  существенно больше скорости спада АЧХ ФБ8. При этом по сравнению со спектром ОФС1 спектр ОФС2 более компактен и реальный уровень межканальных искажений соседних каналов с ОФС2 составляет – 50 дБ, что является приемлемой величиной при использовании ОФС2 в технологиях 5G. Значение пик-фактора для ОФС2, приходящееся в среднем на один

сигнал: 
$$\pi_{\Sigma,2} = \frac{1.5^2 \cdot 1.8}{0.947 \cdot 3} = 1.426.$$

На рисунке 5 приведены данные спектрально-энергетической эффективности разработанных модемов МЧМ1.3-DMT и МЧМ2.3-DMT. На этом же рисунке приведены аналогичные данные для известных стандартных модемов V.34 и МЧМ-OFDM. Здесь штриховая зависимость характеризует эффективность модемов, альтернативных МЧМ-OFDM.

Анализ полученных результатов показывает, что при изменении значности  $M$  цифровых данных от 2 до 128 спектральная эффективность



нового модема МЧМ2.3-DMT изменяется, соответственно, от 1.6149 (бит/с·Гц) до 11.3046 (бит/с·Гц). Это, по сравнению с модемом МЧМ-OFDM и его альтернативным вариантам, определяет выигрыш разработанного модема, составляющий от 0.4649 (бит/с·Гц) или

Рисунок 5 – Спектрально-энергетическая эффективность модемов при  $p_{dop} = 10^{-4}$



28.79% до 3.3046 (бит/с·Гц) или 29.2323%.

Проводится теоретический анализ снижения помехоустойчивости модема с МЧМ при наличии неравномерности частотной характеристики КС, на основе полигармонической модели гауссовского КС, когда отклик КС принимает вид

$$s(t) = \sum_{n=0}^N A_{n,t} \cos(2\pi f_n t - \phi_{n,t}) + \xi(t), \quad f_n = f_0 + F_n, \quad F_n = n2F_p. \quad (21)$$

Используя векторно-матричные представления, соотношение (21) на основе метода пространства состояния характеризуется уравнениями наблюдения и состояния

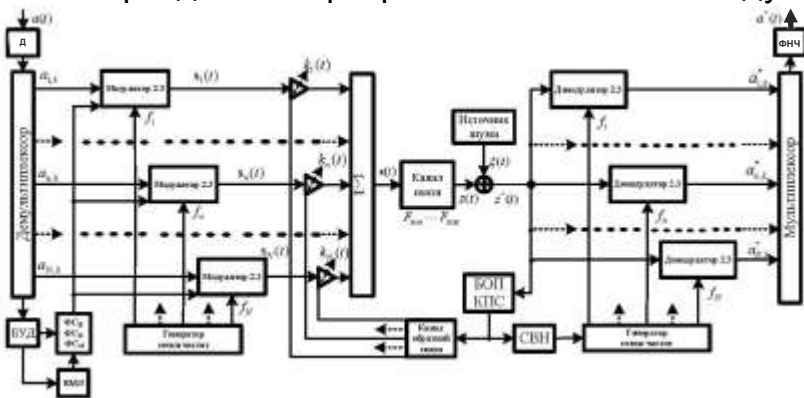
$$s_l = \mathbf{W}c_l + \xi_l, \quad z_l = c_l + \eta_l, \quad c_l = c_{l-1} + \zeta_l, \quad l = 1, 2, \dots, \quad (22)$$

Получен алгоритм оптимальных оценок компонент вектора  $c_l = (c_{l,0}, c_{l,1}, \dots, c_{l,N})^T$ , полигармонической модели ГКС:

$$\begin{aligned} \hat{c}_{n,l} &= \hat{c}_{n,l-1} + \underline{h}_{n,l} (z_{n,l} - \hat{c}_{n,l-1}), \quad \underline{h}_{n,l} = V_{n,l} / (V_{n,l} + \sigma_{\xi}^2), \\ V_{n,l} &= D_{n,l-1} + \sigma_{\zeta}^2, \quad D_{n,l} = V_{n,l} - \underline{h}_{n,l} V_{n,l}, \quad n = \overline{0, N}, \quad l = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (23)$$

по которому вычисляются оценки амплитуд  $\hat{A}_{n,l} = |\hat{c}_{n,l}|$  АЧХ и фаз  $\hat{\phi}_{n,l} = \arg \hat{c}_{n,l}$  ФЧХ КС. Результаты экспериментального исследования оценок АЧХ и ФЧХ КС, получены при ОСШ в ГКС равном  $hdB = 10 \lg P_z / P_{\xi} = 0$  дБ рекуррентной оценки параметров полигармонической модели канала связи. Оцениваемые параметры НЧЭ модели ГКС иллюстрируются таблично и графически.

В разделе 4.4 разрабатывается и исследуется адаптивная ЦСП (см. рис.



6) с новым модемом-2.3. Структуры модулятора 2.3 и демодулятора 2.3 приведены на рисунке 1. Особенность данной структуры состоит: 1) в использовании новых, синтезиро-

Рисунок 6 – Структурная схема адаптивной ЦСП с модемами МЧМ2.3-DMT ванных в разделе 3, ОФС2 с повышенной СЭЭ (рис. 3); 2) в применении новой структуры многочастотного модема МЧМ2.3-DMT (рис.1); 3) в применении на приеме БОП частотно-ограниченного ГКС с целью компенсации, вносимых каналом амплитудных и фазовых искажений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты.

1. На основе известного метода синтеза ОФС1, обеспечивающих максимум в центре символьного интервала отклика ФБ и не вызывающих МСИ в КС, впервые разработана и экспериментально исследована усовершенствованная структурная схема многочастотного модема МЧМ1.3-DMT в составе многоканальной системы передачи данных с узкополосными ОФС1 и с повышенной спектральной эффективностью, обусловленной использованием в каждом канале не одного, но трех 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 %. Выигрыш по спектральной эффективности составляет 0.1589 (бит/с·Гц) или 13,7 %.

2. Впервые проведен не приближенный, но точный расчет СЭЭ многочастотных модемов с узкополосными и широкополосными сигналами в условиях отсутствия линейных искажений, вносимых частотно-ограниченным КС.

3. На основе решения вариационной задачи на условный экстремум проведен синтез новых, с повышенной СЭЭ, ОФС2 по критерию максимума среднего значения отклика ФБ и не вызывающих МСИ в КС; впервые проведен расчет форм, спектров и множителей Лагранжа для ОФС2.

4. Впервые проведен сравнительный анализ форм, спектров и энергетических параметров ОФС1 и ОФС2, из которого следует, что энергетический выигрыш ОФС2 по сравнению с ОФС1 для различных порядков фильтра Баттерворта составляет от 2.74 до 0.14 дБ; для ФБ восьмого порядка получены следующие выигрыши: по коэффициенту передачи по энергии 2.1 %; по скорости передачи 10.04 %; по пик-фактору 40 %.

5. Впервые предложен алгоритм и разработана на его основе функциональная схема нового модема МЧМ2.3-DMT в ЦСП с повышенной СЭЭ на основе двумерной обработки ОФС2, не вызывающих МСИ в КС и синтезированных по критерию максимума среднего значения на символьном интервале. Данный модем при изменении ОСШ в КС от 9 до 30 дБ, по сравнению с модемом V.34, обеспечивает выигрыш в спектральной эффективности от 2.5 раз

или на 60.5 % до 1.7 раза или на 42.2 %. Кроме того, при изменении ОСШ от 8.6 дБ при  $M_{КАМ} = 2 \times 2$  до 36 дБ при  $M_{КАМ} = 128 \times 128$  новый модем эффективнее модема МЧМ-OFDM в 2.05 раза или на 51.18 %. Кроме того, при различной значности цифровых данных выигрыш модема МЧМ2.3-DMT, по сравнению с модемом МЧМ-OFDM, по энергетической эффективности составляет 2.724 дБ или 32.46 % при уровне внеполосных искажений, равного -50 дБ.

6. На основе полигармонической модели нестационарного частотно-ограниченного гауссовского канала связи с применением метода калмановской фильтрации решена задача оптимальной рекуррентной оценки амплитуд и фаз передаточной функции канала; экспериментально показано, что рекуррентные оценки выборочных амплитуд и фаз, получаемых на основе их оптимальной полигармонической фильтрации, достигают своих истинных значений за 50 итераций (6,25 мс) со среднеквадратической погрешностью  $5 \times 10^{-5}$  при ОСШ, равном 0 дБ.

7. Впервые, с учетом оптимальных оценок параметров прямого КС, передаваемых по каналу обратной связи, и используемых как на передаче (в модуляторе), так и на приеме (в демодуляторе), разработана адаптивная многоканальная ЦСП с новым многочастотным модемом и новыми ОФС второго вида с повышенной спектрально-энергетической эффективностью.

8. Все экспериментальные результаты получены на ПЭВМ в среде компьютерной системы проведения матричных вычислений - MatLab.

9. Реализация нового метода многочастотной передачи данных в цифровых телекоммуникационных системах позволит значительно повысить их СЭЭ. Предложенный подход может быть использован как для организации высокоскоростной передачи данных по частотно-ограниченным каналам связи на основе новых проводных технологий стандарта xDSL, так и при использовании в беспроводных технологиях.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России***

1. Алёшинцев, А.В. Обзор беспроводных систем с возможностью реализации принципов динамической маршрутизации при передаче сигналов и ко-

манд от одного узла к другому в интеллектуальных зданиях / А.В. Алёшинцев // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. - 2011. - Т.5. - № 9. - С. 8-13.

2. Алёшинцев, А.В. Многочастотный модем как один из основных элементов системы «Интеллектуальное здание» при удаленном управлении объектами / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. - 2015. - Т. 9. - № 6. - С. 21-27.

3. Алёшинцев, А.В. Структура и эффективность адаптивного многочастотного модема с оптимальными финитными сигналами / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // «ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ». 2016. - № 6. – С. 58 - 63.

4. Алёшинцев, А.В. Математическое моделирование многочастотного модема с повышенной помехоустойчивостью / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Т-Comm. 2016. - Т.10. - № 7. - С. 52-58.

5. Алёшинцев, А.В. Оптимизация структуры многочастотного модема / А.В. Алёшинцев // Т-Comm. 2021. - Том 15. - № 6. – С. 10 – 19.

6. Alyoshintsev, A.V. Segment routing in data transmission networks / A.V. Shvedov, D.V. Gadasin, A.V. Alyoshintsev // Т-Comm. 2022. Т. 16. - № 5. - С. 56-62.

7. Алёшинцев, А.В. Технологии МЧМ-DTM при реализации оконечного участка гибридной сети PON/xDSL / А.В. Алёшинцев, В.Г. Санников, А.Б. Семенов // Фотон-экспресс. - Сентябрь 2022. - №5. (181). - С. 6-9.

8. Алёшинцев, А. В. Динамическое распределение полосы пассивных оптических сетей / А. В. Алёшинцев, А. В. Шведов, А. Б. Семенов // Вестник связи. – 2023. – № 9. – С. 1-4.

#### ***Публикации в научных изданиях, индексируемых в базе Scopus***

9. Alyoshintsev, A.V. Telemetry in the life support system of an intelligent building / A.V. Alyoshintsev, N.V. Mokrova, A.N. Sak // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1030, VII International Scientific Conference (IPICSE 2020) 11th-14th November 2020, Tashkent, Uzbekistan <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1030/1/012054> **ISBN Information: DOI:** 10.1088/1757-899X/1030/1/012054 .

10. Alyoshintsev, A.V. Control modules in the “Intelligent building” system / A.V. Alyoshintsev, N.V. Mokrova, A.N. Sak // XXIV International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2021) Moscow, Russia, April 22-24, 2021. Published online: 28 May 2021. **ISBN Information: DOI:** <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126304020> .

11. Alyoshintsev, A.V. Advanced DMT modem as an element of the PON / xDSL system / A.V. Alyoshintsev, V.G. Sannikov, A.N. Sak // **ISBN Information: DOI:** 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840870 <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204896429>

**Публикации в научных изданиях, индексируемых в базе WoS**

12. Alyoshintsev, A.V. Method of boosting of spectral effectiveness of the coherent modem with discrete multi tone modulation / A.V. Alyoshintsev, V.G. Sannikov // **ISBN Information: DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457001**

Идентификационный номер **WOS:000454756300075**, **ISBN 978-1-5386-6474-2**

**Другие статьи и труды Международных научных конференций**

13. Алёшинцев, А.В. Анализ проблем, возникающих при внедрении интеллектуальных зданий / А.В. Алёшинцев // НТК «ТИО»: Труды МТУСИ: - М.: «ИД Медиа Паблишер». - 2008. – Т1. - С. 162-168.

14. Алёшинцев, А.В. Модель унифицированной системы контроля удаленным доступом / А.В. Алёшинцев // **Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения**. - 2011. - Т.11. - №3. - С. 182-185.

15. Алёшинцев, А.В. Методы динамической маршрутизации по беспроводным системам при передаче сигналов и команд от одного узла другому / А.В. Алёшинцев // Доклад МАИ / (МФИ-2011) «Телекоммуникационные и вычислительные системы» – М.: ООО «Информпресс-94». - 2011. - С. 215-216.

16. Алёшинцев, А.В. Многочастотный модем с повышенной спектральной эффективностью / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Сборник докладов 9-ой Всероссийской НТК «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН. Москва 23 – 25 ноября 2015 г. - С. 61- 65.

17. Алёшинцев, А.В. Математическое моделирование многочастотного модема с повышенной помехоустойчивостью / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Тезисы докладов 10<sup>ой</sup> МО НТК " ТИО ". – М.: МТУСИ, 2016. – С. 283.

18. Алёшинцев, А.В. Синтез финитных сигналов, согласованных с характеристиками фильтра Баттерворта, по критерию максимума среднего значения его отклика / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Труды Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». REDS – 2016. Москва, 2016. – Том 2. - С. 477-482.

19. Алёшинцев, А.В. Сравнительный анализ двух методов оптимальной передачи двоичных сигналов по частотно-ограниченному каналу связи / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Сборник статей МИО "Cognitio" по материалам XV МНПК: «Актуальные проблемы науки XXI века». Москва, 2016. - С. 100-107.

20. Алёшинцев, А.В. Синтез оптимальных финитных сигналов с пониженным пик-фактором, не вызывающих межсимвольной интерференции на выходе фильтра Баттерворта с комплексно сопряженными полюсами / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Тезисы докладов 11<sup>ой</sup> Международной отраслевой НТК: " ТИО ". – М.: МТУСИ, 2017. – С. 228-229.

21. Алёшинцев, А.В. Моделирование модемов в условиях многосвязной сетевой топологии с динамической маршрутизацией // А.В. Алёшинцев // Научный журнал «Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе». – 2017. - № 3. - С. 4-6.

22. Алёшинцев, А.В. Методы моделирования модемов, объединенных в сеть / А.В. Алёшинцев // Доклады (МФИ-2017); Труды МНТК: «ТиВС». - М.: Горячая линия-Телеком. - 2017. - С. 85-86.

23. Алёшинцев, А.В. Метод повышения спектральной эффективности когерентного модема с многочастотной модуляцией / А.В. Алёшинцев, В.Г. Санников // Научный журнал «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов». – 2018. - № 1. - С. 15-20.

24. Алёшинцев, А.В. Анализ эффективности использования гибридного многоканального когерентного модема в системе информационного оповещения / А.В. Алёшинцев // Доклады (МФИ-2018); Труды МНТК: «ТиВС», - М.: Горячая линия-Телеком. - 2018. - С. 356-358.

25. Алёшинцев, А.В. Перспективы развития проводных технологий последней мили / А.В. Алёшинцев // Доклады (МФИ-2018); Труды МНТК: «ТиВС», - М.: Горячая линия-Телеком. - 2018. - С. 13-15.

26. Алёшинцев, А.В. Эффективность цифрового когерентного модема оптимальных финитных сигналов, не вызывающих межсимвольной интерференции на выходе частотно-ограниченного радиоканала / А. В. Алешинцев, Х. В. Герасименко, А. А. Корольков, В. Г. Санников // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 12-17.

27. Алёшинцев, А.В. Адаптивный когерентный модем с многочастотной модуляцией в системах IMT-2020 / А.В. Алёшинцев // Доклады (МФИ-2019); Труды МНТК: «ТиВС», - М.: Горячая линия-Телеком. - 2019. - С. 7-9.

28. Алёшинцев, А.В. Когерентный МЧМ модем с неортогональным уплотнением оптимальных финитных сигналов КАМ / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Материалы 75 МНК: «Стратегии устойчивого развития мировой науки». Москва, Россия, 27–28 мая 2021 г. – М.: «ЕНО», 2021. – С. 45-50.

29. Алёшинцев, А.В. Метод повышения спектрально-энергетической эффективности когерентного МЧМ модема с оптимальными финитными сигналами КАМ / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Наука в современном информационном обществе: XXVII Международная НПК, North Charleston, 10 ноября 2021 г. / НИЦ «Академический». – Morrisville: LuluPress, Inc., 2021. – С. 82-88.

30. Алёшинцев, А.В. Синтез оптимальных финитных сигналов для фильтров Баттерворта / В.Г. Санников, А.В. Алёшинцев // Доклады 24 Международной конференции «ЦОС и её применение - DSPA-2022». Выпуск: XXIV. Секция № 3. – М.: РНТО РЭС им. А.С. Попова, 2022. – С. 141-146.

### ***Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ***

31. Алёшинцев, А.В. Математическая модель демодулирующего блока модернизированного когерентного модема с повышенной эффективностью / А.В. Алёшинцев Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614689 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – Дата регистрации 26 апреля 2017.

Подписано в печать 27.06.24.  
Формат бумаги 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.  
Заказ №  
Издательство НИУ МГСУ  
Москва, Ярославское шоссе, 26

