

*На правах рукописи*



Никишкин Павел Борисович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЕРЕДАЧИ  
ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСКОРОСТНОЙ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

Специальность:

2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» на кафедре «Телекоммуникации и основы радиотехники».

**Научный руководитель:** **Витязев Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

**Официальные оппоненты:** **Приоров Андрей Леонидович**, доктор технических наук, профессор кафедры инфокоммуникаций и радиофизики ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль

**Самойлов Сергей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Владимир

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж

Защита состоится «19» января 2024 г. в 12 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте [www.rsgeu.ru](http://www.rsgeu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.375.03  
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Постоянное развитие широкополосной передачи данных, в частности систем цифрового телерадиовещания, подталкивает к поиску более экономичных и рациональных технологий передачи данных для максимального использования существующих частотных диапазонов. Сигналы на основе ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – OFDM) показывают очевидные преимущества в подавлении межсимвольных помех, но для подавления помех между каналами необходимо полагаться на другие технологии уменьшения помех. Исследование методов борьбы с помехами между каналами является актуальной задачей для увеличения пропускной способности и надежности работы систем вещания на основе технологии OFDM.

Поскольку новые стандарты передачи данных требуют более эффективного и гибкого использования доступного частотного диапазона, обеспечения высокого качества работы при передаче данных на высоких скоростях, возникает задача разработки и исследования альтернативных технологий, способных удовлетворить постоянно растущие требования к передаваемому радиосигналу.

Системы на основе OFDM позволяют одновременное подключение к сети большого числа абонентов в одном доступном частотном диапазоне. У технологии OFDM наблюдаются очевидные преимущества в подавлении помех внутри символа. Вместе с тем подавление помех внутри символа снижает спектральную эффективность из-за необходимости использования защитных интервалов. При этом в полной мере сохраняется ортогональность поднесущих. Для подавления межканальных помех необходимо полагаться на другие способы, что является самой большой проблемой, с которой в настоящее время сталкиваются системы на основе OFDM. Эта проблема является актуальной и активно исследуется, поэтому постоянно предлагаются все новые варианты решения.

С другой стороны, системы передачи данных на основе OFDM (в основе которых лежит свойство ортогональности поднесущих) по сравнению с системами связи с одной несущей более уязвимы к ошибкам синхронизации. Поэтому еще одной сложностью в реализации технологии OFDM является получение точной синхронизации. Предъявляются строгие требования к синхронизации по времени и частоте, так как при её отсутствии ухудшаются

характеристики демодулятора, что может привести к полной потере информации. Рассинхронизация по времени приводит к межсимвольным помехам (ISI – intersymbol interference), рассинхронизация по частоте аналогична эффекту сдвига частоты, что приводит к помехам между несущими (ICI – intercarrier interference).

**Степень разработанности темы.** Вопросами исследования алгоритмов широкополосной передачи данных, а также оптимизацией характеристик OFDM сигналов, занимались Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П., Витязев В.В., Овинников А.А., Майков Д.Ю., Вершинин А.С., Ушаков Д.И., Воронков Г.С., Слипечук К.С., Иртюга В.А., Колесников А.В., Рубцов А.Е., Карташевский В.Г., Козлова С.В., Кузнецова И.В., Макаров С.Б., Мишин Д.В., Николаев Б.И., Хабаров Е.О., Слюсар В., Цикин И.А., Гельгор А.Л., Попов Е.А., Ворожищев И.В., Бочечка Г.С., Тихвинский В.О. и др., а также Чанг Р.В., Прасад Р., Ву Ю., Лаврей Е.П., Рабинер Л., Гоулд Б., Фарханг-Боруджени, Б., Вундер Г., Каспарик М., Уайлд Т., Шайх Ф., Чен Й., Дрянски М., Бучковский М., Пьетржик С., Михайлов Н., Матте М., Д., Берг, В., Эгед, Б., Ваго, П., Шейх Ф., Уайлд Т., Чен Ю., Абдоли Дж., Джиа М., Ма Дж. и др.

В работах перечисленных выше авторов можно встретить алгоритмы, способы, методы и результаты исследований по улучшению и оптимизации технологии OFDM, а также различных её модификаций. Однако в известных работах рассмотрены только принципы работы предлагаемых нововведений для технологий, совместимых с OFDM, но не исследуется в достаточной мере поведение предлагаемых технологий при наличии различных мешающих воздействий в канале связи.

**Объект исследования.** Объектом исследования являются широкополосные системы передачи данных, основанные на применении технологий с ортогональным частотным мультиплексированием сигналов.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются модели и методы формирования сигналов в широкополосных системах передачи данных на основе технологии OFDM со спектрально эффективным и гибким использованием доступного частотного диапазона.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является уменьшение межсимвольной и межканальной интерференции и повышение спектральной эффективности ши-

рокополосных систем передачи данных при использовании многоскоростной обработки сигналов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ существующих методов и алгоритмов обработки сигналов в широкополосных системах передачи данных;
- 2) разработать методы и алгоритмы передачи/приема данных на основе МОС (многоскоростной обработки сигналов) и комбинированного подхода, сочетающего в себе технологии OFDM и FBMC (Filter Bank Multi-Carrier);
- 3) исследовать работу предлагаемых методов и алгоритмов в условиях различных мешающих воздействий;
- 4) сравнить эффективность предлагаемого метода и алгоритма передачи/приема сигналов с известными методами и алгоритмами;
- 5) подготовить рекомендации по использованию предлагаемого алгоритма передачи/приема сигналов в широкополосных системах передачи информации.

**Методы проведения исследований.** В ходе проведения работы основные исследования были выполнены на основе методов многоскоростной обработки сигналов, компьютерного моделирования, математической статистики, вычислительной математики, теории оптимального приема сообщений, позволяющих подготовить результаты и сравнить теоретические данные с экспериментальными. Экспериментальные исследования в диссертации проводились с использованием имитационного моделирования и вычислительных алгоритмов, реализованных в программной системе для математических вычислений GNU Octave и среде разработки Xilinx Vivado.

**Научная новизна исследования.** Научная новизна диссертационной работы заключается в:

- 1) разработанной модели широкополосной системы передачи данных с использованием технологии OFDM для различных помех и искажений в канале связи;
- 2) разработанном методе и алгоритмах на основе МОС и комбинированного подхода, сочетающего технологии ортогонального частотного мультиплексирования сигналов и банка цифровых фильтров;
- 3) разработанной модели субполосного ортогонального формирования сигналов с применением банков фильтров.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертации.**

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов состоит в возможности снижения требований к формированию широкополосных сигналов, а также эффективном использовании доступного и разрешенного частотного диапазона.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в диссертации задач использовались математические и статистические методы анализа с помощью компьютерного моделирования. Результаты диссертации подтверждены проводимыми экспериментами и соответствуют экспериментальным данным, представленным в различных источниках.

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

1. Использование пирамидальной структуры для построения фильтра на основе цифровых гребенчатых и сглаживающего фильтров позволяет в 15 раз сократить вычислительные затраты и в 2,5 раз сократить требуемые ресурсы на хранение коэффициентов фильтров.
2. Способ адаптивной широкополосной передачи данных на основе комбинированного подхода, сочетающий технологии банка фильтров и ортогонального частотного мультиплексирования, позволяет уменьшить межканальные искажения до 60 дБ и увеличить спектральные характеристики используемого диапазона от 3 до 20 %.
3. Метод анализа и синтеза сигналов в системах передачи данных на основе комбинированного подхода с применением технологий банка цифровых фильтров и OFDM при передаче информации в субполосных частотных диапазонах с различными частотными расстояниями между поднесущими позволяет передавать информацию без дополнительных защитных интервалов.
4. Воздействие эффекта Доплера на беспроводные системы передачи данных, при уходе частоты несущего колебания менее 1,5% от значения частотного интервала между поднесущими OFDM-сигнала, не приводит к искажениям сигнала, и может рассматриваться как линейное смещение несущей частоты OFDM-сигнала.

**Апробация работы.** Достоверность результатов подтверждается проводимыми исследованиями, списком публикаций и выступлениями на российских и зарубежных конференциях. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и форумах:

- 17-й Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2015”, Россия, Москва, 2015 г.

- 18-й Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2016”, Россия, Москва, 2016 г.
- 24th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers, Serbia, Belgrade, 2016 г.
- Форуме «Наука будущего – наука молодых», Россия, Казань, 2016 г.
- 19-й Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2017”, Россия, Москва, 2017 г.
- 1-й Всероссийской конференции «Современные технологии обработки сигналов», Россия, Москва, 2018 г.
- 21-й Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2019”, Россия, Москва, 2019 г.
- 22-й Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2020”, Россия, Москва, 2020 г.
- 24-й Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2022”, Россия, Москва, 2022 г.
- 27-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Россия, Рязань, 2022 г.
- 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства», Россия, Рязань, 2022 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ: 5 статей в научно-технических журналах рекомендованных ВАК, 1 статья в научно-техническом сборнике TELFOR Proceedings of Papers, публикуемом в IEEE Xplore и входящим в базы Scopus и Web Of Science и 8 тезисов докладов на конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 70 наименований и 3-х приложений. Диссертация содержит 177 страниц, в том числе 158 страниц основного текста, 14 таблиц и 117 рисунков.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены основные этапы развития широкополосных систем передачи информации, указаны достоинства и недостатки технологии передачи данных на основе ортогонального мультиплексирования частот. Сформулированы цели и задачи данной работы, показана научная новизна и практическая значимость получаемых результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации описаны существующие технологии передачи данных с помощью широкополосных систем. Приводится описание методов и технологий, с помощью которых, на данный момент, происходит широкополосная передача данных. В последнее десятилетие активно развивается беспроводная цифровая широкополосная передача данных, в частности в системах телевидения. Необходимость перехода от аналогового сигнала к цифровому обусловлена растущими требованиями к качеству и помехозащищенности передаваемых сигналов, а также упрощению приемопередающих устройств. На текущий момент известны такие стандарты цифрового вещания, как DVB-T/T2, ATSC, ISDB, DTMB, DMB. Стоит отметить, что все рассмотренные выше стандарты широкополосного вещания используют OFDM-модуляцию как основную, что доказывает тот факт, что и по сей день сигналы на основе OFDM остаются актуальными. OFDM представляет собой технологию параллельной передачи данных по многим поднесущим частотам. Технология OFDM способствует более эффективному использованию частотного ресурса (по сравнению с другими похожими технологиями) путем ортогональности сигналов, что позволяет передавать сигналы между поднесущими без искажений.

Сигнал на основе OFDM представляет собой сумму ортогональных сигналов, каждый из которых передается на своей поднесущей частоте и получается с использованием фазовой или квадратурной амплитудной модуляций, показанный в выражении (1).

$$s(t) = \begin{cases} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+\frac{N_s}{2}} \exp \left[ j2\pi \left( f_c - \frac{i+0,5}{T} \right) (t - t_s) \right] \right\}, & \text{при } t_s \leq t \leq t_s + T \\ 0, & \text{при } t < t_s, t > t_s + T \end{cases} \quad (1)$$

где  $d_i$  – комплексные символы,  $N_s$  – число поднесущих,  $T$  – длительность символа,  $f_c$  – несущая частота и  $t_s$  – момент начала символа.

Приведены преимущества и недостатки OFDM сигнала, анализ устойчивости к помехам, принцип формирования сигнала на основе стандарта DVB-T2, а также анализ перспективных направлений применения OFDM сигналов.

Исследованы технологии, предназначенные для передачи данных в субполосе (определенной области частот из доступного частотного диапазона). Для повышения спектральной эффективности, эффективной борьбы с межканальными помехами и увеличением пропускной способности используются такие технологии, как



FBMC (Filter Bank Multi-Carrier), UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier), F-OFDM (Filtered-OFDM) и RB-F-OFDM (Resource Block Filtered-OFDM). Принцип работы данных технологий предполагает наличие относительно небольших частотных диапазонов и формирование сигналов в данных субполосах. Все перечисленные выше технологии осуществляют фильтрацию сигнала в субполосе, что позволяет существенно снизить уровень боковых лепестков. На основе этого рассматриваемые технологии, позволяющие работать в субполосах и при этом не оказывающие влияние на соседние субполосы, являются весьма привлекательными кандидатами на роль основной технологии анализа/синтеза сигналов в системах телевидения.

**Во второй главе** рассматриваются методы и алгоритмы широкополосной передачи данных на основе субполосного ортогонального мультиплексирования и банка цифровых фильтров (SUB-OFDM).

Технология SUB-OFDM предполагает использование нескольких частотных диапазонов и фильтрацию каждого из них. Системы на основе субполосного ортогонального мультиплексирования подразумевают разделение на субканалы и фильтрацию каждого из них.

В результате такого построения системы можно применять адаптацию к характеристикам канала связи, т.е. искать и определять зоны затухания и подавления, тем самым можно управлять скоростью передачи данных, уменьшая её или увеличивая в зависимости от состояния канала. В процессе создания SUB-OFDM сигнала будут задействованы только те субканалы, в которых будут соблюдены требуемые характеристики передачи данных.

Синтез оптимальной структуры системы широкополосной передачи данных зависит от эффективной реализации и минимизации затрат на создание банка цифровых фильтров.

В работе предложен метод построения банка фильтров с использованием МОС на основе пирамидальной структуры цифровых гребенчатых фильтров, отличающийся высокой вычислительной эффективностью и отсутствием шума децимации. Схема построения предлагаемого банка на основе цифровых гребенчатых фильтров показана на рисунке 1. Формирование банка фильтров происходит в несколько этапов. На первом этапе формируются базовые фильтры на пониженной частоте дискретизации (частота дискрети-

зации ниже в  $\nu$  раз, где  $\nu$  – коэффициент децимации). На втором этапе происходит повышение частот дискретизации базовых фильтров до частоты дискретизации группового сигнала, тем самым получают гребенчатые фильтры  $H_1(j\omega)$  и  $H_2(j\omega)$ .

Дальнейшая фильтрация сигналов выполняется с помощью ЦГФ фильтров (см. рисунок 1).

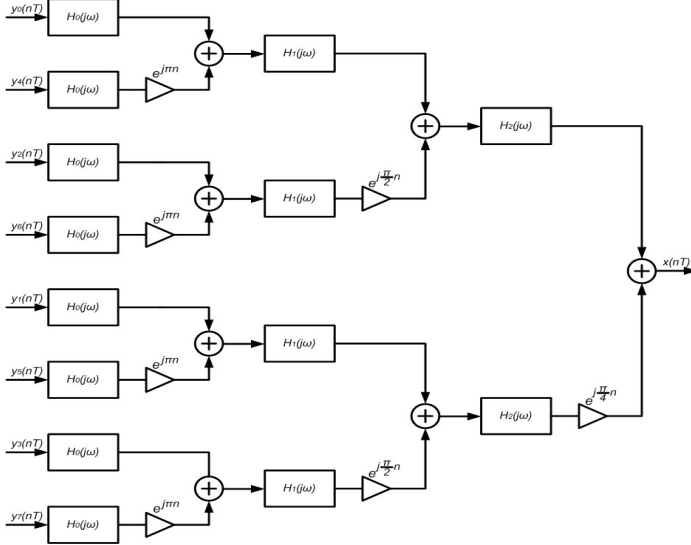


Рисунок 1 – Пирамидальная структура синтезатора сигнала, на основе цифровых гребенчатых фильтров

На рисунке 2 показаны АЧХ получаемые при построении банка цифровых гребенчатых фильтров. АЧХ первой ступени преобразования  $H_0(j\omega)$  является характеристикой сглаживающего фильтра, т.е. можно сказать, что происходит предварительное разделение  $M$  частотных каналов и селекция высокочастотной составляющей шума. Предположим, что доступный частотный диапазон разделяется на 8 субполос (от 0 до 7). Таким образом, частота дискретизации первого базового фильтра должна быть в  $\nu = 2$  раза меньше частоты группового сигнала, а для второго базового фильтра в  $\nu = 4$ . Коэффициент децимации  $\nu$  принимает значения, кратные степени двойки. На второй ступени происходит фильтрация с помощью первого гребенчатого фильтра с передаточной функцией  $H_1(j\omega)$  и коэффициентом децимации равным  $\nu = 2$ . В результате происходит разделение частотных каналов с номерами 0, 4 от кана-

лов с номерами 2, 6, а также с номерами 1, 5 от каналов с номерами 3, 7. С помощью второго гребенчатого фильтра  $H_2(j\omega)$  формируется результирующий выходной групповой сигнал пирамидальной структуры ЦСФ и ЦГФ. На этой ступени происходит разделение частотных каналов с четными и нечетными номерами, обеспечивая высокую прямоугльность АЧХ всех частотных каналов одновременно.

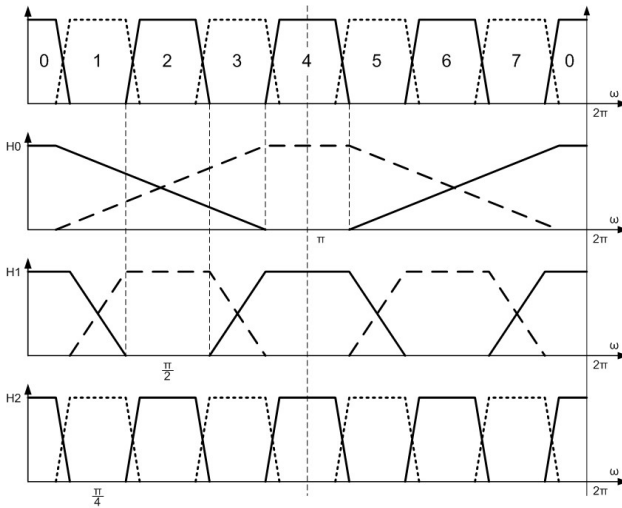


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика банка ЦГФ

Разработка методов проектирования цифровых фильтров на основе использования эффектов прореживания по частоте сохраняет свою актуальность и дает положительный результат при построении многокаскадных и пирамидальных структур систем частотной селекции сигналов.

Прежде чем сигнал поступит на вход банка фильтров предполагается, что последовательный входной поток двоичных данных поступает на адаптивный коммутатор каналов, где преобразовывается в  $M$  параллельных потоков данных, где  $M$  – это количество субполос. Далее происходит формирование OFDM сигнала на пониженной частоте дискретизации с последующим повышением частоты. Получаемые OFDM-сигналы фильтруются и их совокупность формирует групповой сигнал.

На рисунке 3 показана схема формирования SUB-OFDM сигнала на основе комбинированного подхода, сочетающего использование банка фильтров и технологии OFDM.

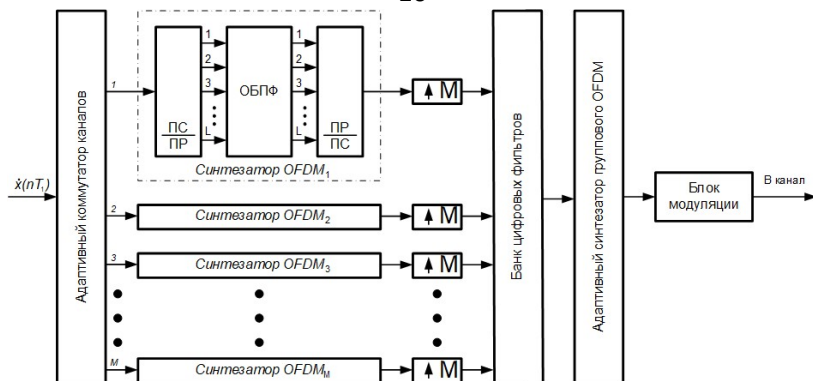


Рисунок 3 – Схема синтезатора группового широкополосного OFDM сигнала

На приемной стороне выполняются операции в противоположном порядке относительно передающей схемы. Дополнительно для восстановления исходного вида сигнала присутствует эквалайзер. Эквалайзер, работающий на пониженной в  $M$  раз частоте дискретизации, выравнивает только ту часть частотной характеристики канала связи, которая соответствует обрабатываемой субполосе. Анализатор OFDM по схеме, дуальной синтезатору OFDM, формирует последовательность выходных данных по каждому частотному каналу. Адаптивный коммутатор каналов формирует общий высокоскоростной поток, совпадающий с передаваемым потоком.

Идея построения такой широкополосной системы заключается в том, что по результатам предварительного тестирования канала связи и определения зон затухания и подавления, можно управлять скоростью передачи данных, уменьшая или увеличивая ее в зависимости от числа пораженных частотных каналов.

Оценку вычислительных затрат и ресурсов памяти на реализацию пирамидальной структуры можно записать в виде (2):

$$R_T(M) = \left( M + \sum_{i=0}^{m-1} 2^{m-i} \frac{N_i}{v_i} \right) f_{KB}, \quad S = 2 \sum_{i=0}^{m-1} 2^i N_i \quad (2)$$

где  $N_i$  – порядки ЦГФ,  $v_i$  – коэффициенты прореживания, а  $N_{сф}$  – порядок ЦСФ.

При этом вычислительные затраты на реализацию НЧ фильтра составят (3) операций умножений в секунду.

$$R_T = M \cdot N_{НЧ} \cdot f_{KB}, \quad S = N_{НЧ} \quad (3)$$

где  $N_{НЧ}$  – порядков цифрового НЧ фильтра.

При исследовании эффективности построения банка фильтров с помощью 8-ми канальной пирамидальной структуры наблюдается уменьшение вычислительных затрат в 14 раз, а также уменьшение занимаемой памяти под хранение коэффициентов банка фильтра в 7 раз.

**В третьей главе** приведены результаты исследования работы предлагаемой технологии субполосного ортогонального мультиплексирования (SUB-OFDM) и банка фильтров на основе МОС, а также сравнение её работы с существующими.

Применение фильтрации с помощью пирамидальной структуры ЦСФ и ЦГФ к входному и выходному сигналам позволяет уменьшить межканальные искажения и увеличить спектральную эффективность. На рисунке 4 показаны спектральные плотности мощности для OFDM и SUB-OFDM сигналов. Как можно заметить по рисунку 4, уровень боковых лепестков значительно ниже у SUB-OFDM сигналов, что означает меньший уровень межканальных искажений до 60 дБ.

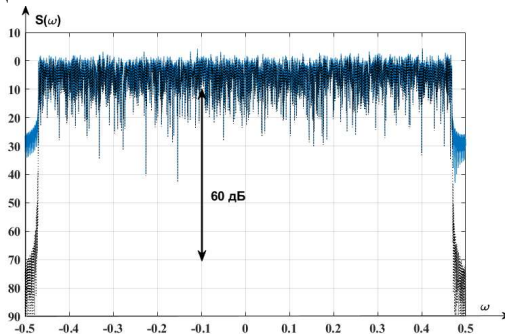


Рисунок 4 – Спектральные плотности мощности для OFDM и SUB-OFDM сигналов

Увеличение спектральной эффективности до 20% достигается за счет использования переходных процессов после фильтрации вместо циклического префикса. В работе было исследовано прохождение сигнала через многолучевой канал при различных видах защитного интервала (циклический префикс, защитный интервал в виде нулей, защитный интервал в виде переходного процесса после фильтрации).

Наличие субполосной передачи данных позволяет передавать сигналы не ортогональные друг другу между субполосами. В диссертационной работе проводились исследования на передачу

OFDM-сигналов с разным частотным расстоянием между поднесущими для технологий OFDM и SUB-OFDM (рисунок 5).

Проводимые исследования показали, что изменение мощности сигнала, расстояния между поднесущими при передаче OFDM-символов приводят к существенным искажениям на приемной стороне при использовании классической системы на основе OFDM.

Формирование сигнала в каждой субполосе с применением фильтрации устраняет данные проблемы, позволяя передавать в каждом диапазоне свой независимый сигнал. При этом систему на основе SUB-OFDM можно считать обратно совместимой (способной работать) с классическими системами на основе OFDM-сигналов.

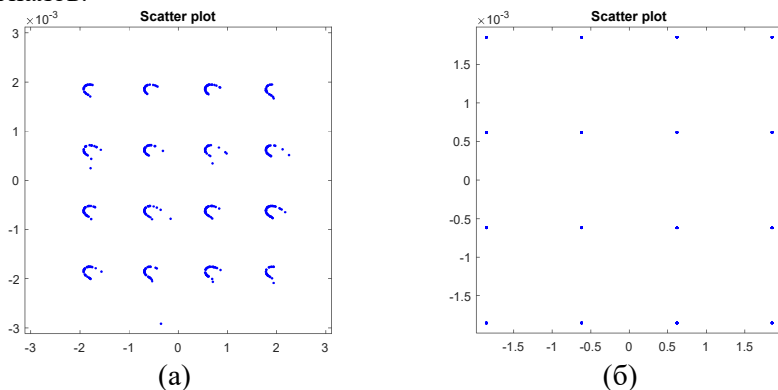


Рисунок 5 – Сигнально-кодовые созвездия сигналов при OFDM (а) и SUB-OFDM (б)

Результаты исследования при наличии замирования показаны на рисунке 6(a). Системы на основе OFDM позволяют работать при воздействии частотно-селективных замираний, однако стоит отметить, что эффективная борьба с частотно-селективными замираниями возможна только при наличие скользящих пилот сигналов, иначе обнаружение полосы частот подверженной замираниям, становится трудоемкой задачей.

В диссертационной работе было проведено моделирование влияния эффекта Доплера для технологий OFDM и SUB-OFDM на примере стандарта цифрового телевидения. Для проведения исследований частота дискретизации равна  $F_d = 9,14 \cdot 10^6$  Гц (в соответствии со стандартом DVB-T2) и тип модуляции QAM-64.

Для исследования влияния эффекта Доплера на OFDM сигнал, исследовались сигналы различной длительности, как показано на

рисунке 6(б). Оценка эффективности работы OFDM в зависимости от эффекта Доплера производилась как вероятность битовых ошибок. Из рисунка 6(б) можно сделать вывод, чем больше длина сигнала, тем больше влияние оказывает эффект Доплера.

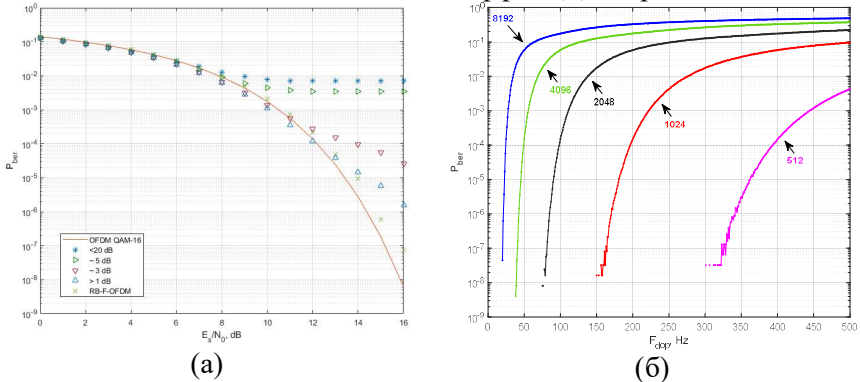


Рисунок 6 – Характеристика работы системы при наличии замираний в принимаемом сигнале (а), и количество ошибок демодуляции OFDM сигнала различной длительности при наличие доплеровского смещения частоты

**В четвертой главе** представлена реализация предлагаемой технологии на базе ПЛИС Zynq XC100. В результате реализации на этой платформе, были получены следующие модули:

- модуль формирования группового широкополосного сигнала;
- модуль приема широкополосного сигнала;
- модуль подсчета количества ошибок, обнаруживаемых при обработке сигнала.

Сборка макета, оценка ресурсов, скорости и производительности производилась в среде разработки Xilinx Vivado.

Реализация модуля формирования группового сигнала включает в себя несколько модулей. Основным ядром модуля являются блоки: нахождение обратного преобразования Фурье, повышение частоты дискретизации, цифровой фильтр и перенос на поднесущую частоту. На приемной стороне происходят полностью противоположные операции, поэтому ядро модуля приема широкополосного сигнала будет содержать следующие блоки: - перенос сигнала с поднесущей частоты в область нулевых частот, цифровой фильтр и понижение частоты дискретизации сигнала.

Предполагается, что на вход модуля поступают модулированные данные, которые разбиваются на несколько потоков и обрабатываются независимо. Скорость работы получается в результате нескольких показателей модуля, но в итоге является неким компромиссом между занимаемыми ресурсами и временем получения сигнала.

По результатам синтезирования можно отметить, что разрабатываемые блоки работают на частоте 200 МГц. На основе полученных синтезированных конструкций можно судить о пропускной способности получаемого устройства. Для одного канала с размерностью OFDM в 512 точек пропускная способность получается равной 65 Мбит/сек.

### **Заключение**

В результате проделанной работы были получены следующие научные результаты:

1. На основе анализа потенциальных кандидатов на роль технологии для формирования сигнала в современных системах передачи данных был сделан вывод, что необходима технология ортогонального мультиплексирования с применением фильтрации сигналов для удовлетворения растущих требований к скорости передачи и занимаемому частотному диапазону.

2. Разработан метод синтеза банка фильтров на основе децимации-интерполяции входного сигнала и импульсной характеристики фильтра с целью уменьшения вычислительных затрат и затрат по хранению коэффициентов.

3. Апробирован алгоритм субполосной передачи данных со многими несущими. Текущие исследования показывают выигрыш и эффективность использования предлагаемого метода, а также устойчивую работу в шумах при наличии различных источников помех.

4. Проведено сравнение имеющихся технологий широкополосной передачи данных с предлагаемой технологией на основе комбинированного подхода с использованием банка фильтров и ортогональных сигналов.

5. Построена имитационная модель технологии субполосного ортогонального мультиплексирования с использованием банка фильтров.

6. Произведено исследование анализа/синтеза цифровых фильтров для ортогональных сигналов. Даны рекомендации по использованию и формированию банка цифровых фильтров.



7. Реализован тракт приемо-передатчика на ПЛИС фирмы Xilinx. Оценены ресурсы, а также рассчитана получаемая в данной реализации пропускная способность.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:**

1. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Метод анализа/синтеза сигналов в системах передачи данных с частотным уплотнением каналов // Электросвязь. 2014. № 12. – с. 4-9.
2. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Банки фильтров и OFDM в системах широкополосной передачи данных со многими несущими. // Научно-технический журнал “ЦОС”. -2015. - №4. -с.30-34.
3. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Многоскоростная обработка сигналов в задачах режекции узкополосных помех. // Научно-технический журнал “ЦОС”. -2017. - №2. -с.31-36.
4. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Методы широкополосной передачи данных на основе сигналов с частотным разделением каналов. // Научно-технический журнал “ЦОС”. -2020. - №3. -с.45-49.
5. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Многоскоростная обработка сигналов в системах передачи данных. // Научно-технический журнал “ЦОС”. -2022. - №1. -с.57-67.

### **Работы, индексируемые в базе данных Web of Science и Scopus:**

6. P.B. Nikishkin, S.V. Vityazev, I.V. Subbotin, A.V. Kharin, V.V. Vityazev – Sub-band OFDM Implementation on Multicore DSP // 2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers, Belgrade, Serbia, 2016.

### **Работы, опубликованные в других изданиях:**

7. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Метод синтеза группового сигнала в системах передачи данных с частотным уплотнением каналов. // 17-я Международная конференция “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2015”, Москва, Россия, доклады. - 2015. -с. 130-135.
8. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Субполосная OFDM в системах широкополосной передачи данных со многими несущими. // 18-я Международная конференция “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2016”, Москва, Россия, доклады. - 2016. - Том 1. -с. 96-100.

9. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Субполосная OFDM в системах широкополосной передачи данных // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых» – Казань, 2016. – Том 1, –с. 258-259

10. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Цифровые системы частотной селекции с высокой прямоугольностью АЧХ. // 19-я Международная конференция “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2017”, Москва, Россия, доклады. - 2017. - Том 1. -с. 152-157.

11. Витязев В.В., Никишкин П.Б. - Исследование эффектов Доплера на OFDM и SUB-OFDM сигналы // 1-я Всероссийская конференция «Современные технологии обработки сигналов», Москва, Россия, доклады конференции, 2018.

12. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Сравнение эффективности технологий OFDM и SUB-OFDM при различных мешающих воздействиях в канале связи. // 21-я Международная конференция “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2019”, Москва, Россия, доклады. - 2019. - Книга 1. -с. 6-10.

13. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Исследование технологий OFDM и SUB-OFDM при различных мешающих воздействиях в канале связи. // 22-я Международная конференция “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2020”, Москва, Россия, доклады. - 2020. - Книга 1. -с. 130-133.

14. Витязев В.В., Никишкин П.Б. – Исследование технологий OFDM, F-OFDM и SUB-OFDM при работе в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом. // 24-я Международная конференция “Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2022”, Москва, Россия, доклады. - 2022. - Том 1. -с. 101-103.

15. Никишкин П.Б. – Исследование эффективности применения субполосной передачи данных при наличии частотно-селективных искажений // 27-я Всероссийская научно-техническая конференции студентов, молодых ученых и специалистов; Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet) - 2022. – Том 1. -с. 168-170

16. Никишкин П.Б. – Методы широкополосной передачи данных на основе сигналов с частотным разделением каналов для использования в стандарте DVB-T2 // 7-я Всероссийскую научно-техническую конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства», Рязань - 2022. -с. 93-101

Никишкин Павел Борисович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ  
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МНОГОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1