

На правах рукописи



**Абенов Ренат Рамазанович**

**Формирование и обработка сигналов в системах связи  
на основе ортогонального частотного мультиплексирования  
с использованием банка фильтров**

Специальность 05.12.04 –  
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

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

Томск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: **Рогожников Евгений Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Абрамов Сергей Степанович**,  
доктор технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой радиотехнических устройств  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
университет телекоммуникаций и  
информатики», г. Новосибирск

**Черников Дмитрий Юрьевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий базовой кафедрой  
инфокоммуникаций ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет», г. Красноярск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Новосибирский государственный  
технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится 23 декабря 2020 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте:  
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/ig5ck9o8>

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор



Мандель Аркадий Евсеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В 2015-м году Международный Союз Электросвязи разработал план развития сетей пятого поколения мобильной связи (5G). Для совершенствования физического уровня сети был предложен ряд технологий в качестве альтернативы для замены ныне используемой технологии OFDM. Данные технологии призваны устранить ключевые недостатки OFDM: низкая спектральная эффективность вследствие необходимости использования защитного интервала в виде циклического префикса, а также высокое внеполосное излучение, которое увеличивает защитные полосы в спектре. В число альтернативных методов передачи вошли UFMC (Universal Filtered MultiCarrier, многочастотная передача с универсальной фильтрацией), GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование на основе обобщенного частотного разделения) и FBMC (Filter Bank MultiCarrier, многочастотная передача с использованием банка фильтров), а также ряд технологий NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access, неортогональный множественный доступ). Поэтому в настоящее время в данном направлении многими мировыми корпорациями и научно-исследовательскими институтами проводится активная исследовательская работа.

Актуальность данной работы подтверждается высоким интересом разработчиков и исследователей к новым методам передачи. Среди перечисленных технологий FBMC отличается максимальной эффективностью, что влечет за собой усложнение построения системы связи на ее основе. В данный момент технология имеет статус альтернативной и пока в стандарте 5G не применяется. Несмотря на это многие исследовательские институты и корпорации, такие как Samsung, Huawei и ZTE, активно поддерживают развитие данной технологии.

Мультиплексирование OFDMA уже много лет используется в различных стандартах связи и телевидения, поэтому в настоящее время имеется множество учебных пособий и научных публикаций, которые описывают основные принципы работы, схемы построения системы, методы и алгоритмы. Среди учебных пособий встречаются не только англоязычные источники, но и отечественные. Однако новые методы передачи, в частности, FBMC/OQAM, уже сегодня могут начать внедрение в различные стандарты телекоммуникаций. Несмотря на это открытых источников, описывающих оптимальные схемы построения, эффективные и экономичные методы и алгоритмы обработки по направлению FBMC пока очень мало. Это связано с тем, что разработкой систем будущих стандартов связи занимаются корпорации, конкурирующие между собой на мировом рынке телекоммуникационного оборудования. На сегодняшний день нет единой универсальной схемы формирования и обработки сигнала для систем связи, основанных на ортогональном частотном мультиплексировании с использованием банка фильтров. Различные авторы научных публикаций

публикуют отдельные блоки данной системы и используют свои методы обработки и моделирования системы передачи в целом.

**Цель и задачи исследований.** Целью диссертационной работы является разработка метода формирования и обработки сигнала для систем связи беспроводного широкополосного доступа на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- обзор технологии ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров;
- сравнительный анализ систем стандартного ортогонального частотного мультиплексирования и частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров;
- разработка метода формирования и обработки сигнала для системы связи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров;
- моделирование системы передачи на основе разработанного метода;
- экспериментальное исследование предлагаемого метода формирования и обработки сигнала.

Теоретической и методологической основой диссертационной работы являются разработки отечественных и зарубежных ученых в области физического уровня сетей 4G и 5G. Информационную базу составляют монографические работы, материалы научно-технических конференций, технические спецификации стандартов мобильной связи, объекты интеллектуальной собственности, статьи в периодических изданиях и научных сборниках по исследуемой проблеме, а также описание сертифицированных измерительных приборов.

#### **Методы исследования**

При проведении исследований были использованы методы теории вероятности и математической статистики, методы имитационного компьютерного моделирования, методы статистической теории радиотехнических систем, методы вычислительной математики, методы обработки цифровых сигналов и программирования, а также экспериментальное исследование с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

#### **Научная новизна работы**

1. Приведен сравнительный анализ систем на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров и стандартных систем на основе ортогонального частотного мультиплексирования. Показано, что спектральная эффективность системы на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров может быть выше до 1.25 раза, а внеполосное излучение может быть ниже на 131 дБ по сравнению с системами на основе ортогонального частотного мультиплексирования.

2. Предложена схема формирования и обработки для систем беспроводной связи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров, позволяющая работать в многолучевом канале без использования циклического префикса. Показано, что использование полифазной реализации фильтра снижает вычислительную нагрузку до 3.71 раз по сравнению с алгоритмом стандартного оконного преобразования Фурье.

3. Проведено экспериментальное исследование системы на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров. Показано, что она способна обеспечить такую же помехоустойчивость, как и система OFDM, а также обеспечить выигрыш в спектральной эффективности.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод формирования и обработки сигнала в системе на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров при использовании линейного эквалайзера и метода дополнительного пилота позволяет получить в канале для пешехода коэффициент ошибок  $10^{-6}$  при отношении энергии, приходящейся на бит информации, к энергии шума меньше на 1.3 дБ по сравнению с системой на основе стандартного ортогонального частотного мультиплексирования.

2. Метод формирования и обработки сигнала в системе на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров с коэффициентом перекрытия, равном 2, 3 и 4, может обеспечить уровень мощности сигнала на границе полосы на 15.5, 124 и 131.6 дБ ниже, чем в системе на основе стандартного ортогонального частотного мультиплексирования, при использовании 641 поднесущей и размерности преобразования Фурье 1024.

3. При использовании метода формирования и обработки сигнала в системе на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров спектральная эффективность системы передачи данных возрастает с увеличением длины кадра и может быть выше, чем в системе LTE на основе стандартного ортогонального частотного мультиплексирования, до 7-25% за счет отсутствия циклического префикса.

*Оригинальные результаты соотносятся с паспортом специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения по п. 4 Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов в радиосистемах телевидения и связи при наличии помех. Разработка методов разрушения и защиты информации, и п. 6 Исследование и разработка радиотехнических систем и устройств передачи информации, в том числе радиорелейных и телеметрических, с целью повышения их пропускной способности и помехозащищенности.*

### **Практическая значимость и реализация результатов работы:**

Результаты диссертационной работы позволяют обеспечить низкое внеполосное излучение в системах связи с множеством несущих, а также избавиться от необходимости использования циклического префикса. Полученный метод формирования и обработки сигналов может быть использован при проектировании систем связи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров для повышения спектральной эффективности.

Результаты диссертационной работы были использованы на предприятии ООО НПК «Тесарт» (г. Томск) при разработке программного обеспечения для формирования и обработки сигналов в системах беспроводной связи (х/д 46/17). Также результаты диссертационной работы используются в образовательном процессе на кафедре телекоммуникаций и основ радиотехники с 2018/2019 учебного года по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Материалы, полученные при выполнении работы, вошли в учебное пособие по дисциплине «Системы радиодоступа».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих научно-технических и научно-практических конференциях:

1. Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2016.
2. XII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2016.
3. International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, Tomsk, 2019.

**Достоверность результатов работы** обеспечивается проведением экспериментальных исследований беспроводной системы передачи данных в реальных каналах распространения радиоволн, сопоставлением результатов, полученных с помощью экспериментов и моделирования, а также сравнением с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 публикаций: 5 статей в журналах из перечня ВАК, 2 монографии, 1 доклад в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus, 2 доклада в трудах международных конференций, 2 доклада в трудах всероссийских конференций.

**Объем и структура диссертации.** В структуру диссертации входит четыре основные главы, введение, заключение, список сокращений и список использованных источников. Диссертационная работа содержит 112 стр. машинописного текста, 57 рисунков и 20 таблиц. Библиографический список включает 107 наименований.

**Личный вклад.** Автором совместно с доцентом кафедры ТОР А.Я. Демидовым поставлены цель и задачи работы. Основные результаты диссертации, в том числе математические модели и программы, получены

автором лично. Программа экспериментального исследования разработана совместно с сотрудниками кафедры ТОР Е.В. Рогожниковым, Д.А. Покаместовым, Я.В. Крюковым. Результаты экспериментального исследования обработаны автором лично.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Обзор технологии частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров

Первая глава посвящена обзору технологии FBMC (Filter Bank Multicarrier). Это метод передачи на множестве поднесущих с использованием гребенчатого фильтра для формирования сигнала с низким внеполосным излучением. Реализация такой структуры передатчика сложнее, чем системы на основе OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), однако быстрое развитие цифровой обработки сигналов, в частности, полифазной фильтрации, дает возможность реализации такой системы связи в ближайшем будущем.

Схема, называемая FBMC-Offset, более известная как FBMC-OQAM (Filter Bank Multicarrier/Offset Quadrature Amplitude Modulation, частотное мультиплексирование с использованием банка фильтров/квадратурная амплитудная модуляция со смещением) или SMT (Staggered Multi-Tone, многотональные сигналы со сдвигом квадратурных компонент), позволяет достичь более высокую спектральную эффективность чем ортогональное частотное мультиплексирование с использованием циклического префикса (CP-OFDM). Такая схема обеспечивает наибольшее затухание для фиксированной длины фильтра и количества поднесущих. Также явным достоинством данной схемы является устойчивость к замираниям канала и более низкие требования к синхронизации при правильном выборе фильтра-прототипа.

При описании систем FBMC/OQAM ключевым параметром является коэффициент перекрытия, который определяет отношение длины импульсной характеристики фильтра к длине исходного символа. Большой вклад в развитие FBMC внес проект PHYDYAS, который предложил ряд фильтров для различных коэффициентов перекрытия. В частотной области характеристика фильтра состоит из  $2K-1$  импульсов, как показано на рисунке 1.1 для  $K = 4$ .

Для снижения вычислительной нагрузки применяется алгоритм полифазной фильтрации. Блок-схема передачи данных с использованием полифазного фильтра показана на рисунке 1.2. На практике размерность ДПФ равна степени двойки, поэтому реализуется алгоритм быстрого преобразования Фурье. Разница между схемой на рисунке 1 состоит только в наличии блока PPN (Polyphase Network, полифазная цепь) на приемнике и передатчике. Задержка сигнала равна  $KT$ , где  $T$  – период символа.

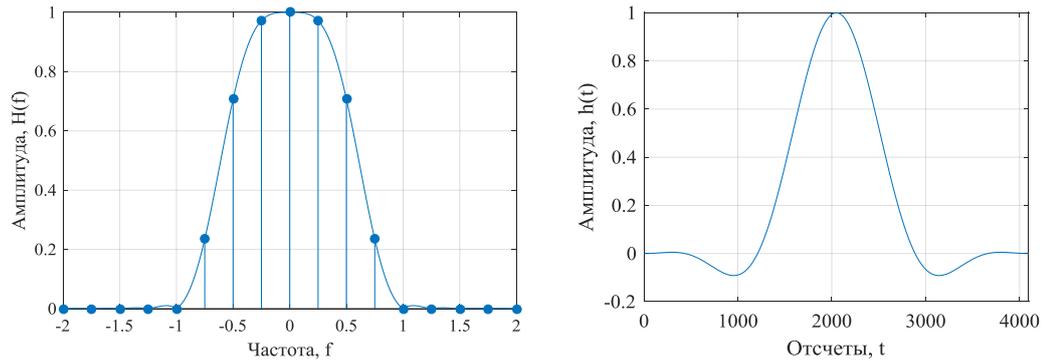


Рисунок 1.1 – Частотная и импульсная характеристика фильтра PHYDYAS

Что касается сложности, в каждой секции выполняется  $K$  операций умножений, как показано на рисунке 1.3 для  $K = 4$ , а в целом полифазный фильтр содержит  $KM$  умножений, что меньше, чем ОБПФ при больших значениях  $M$ .

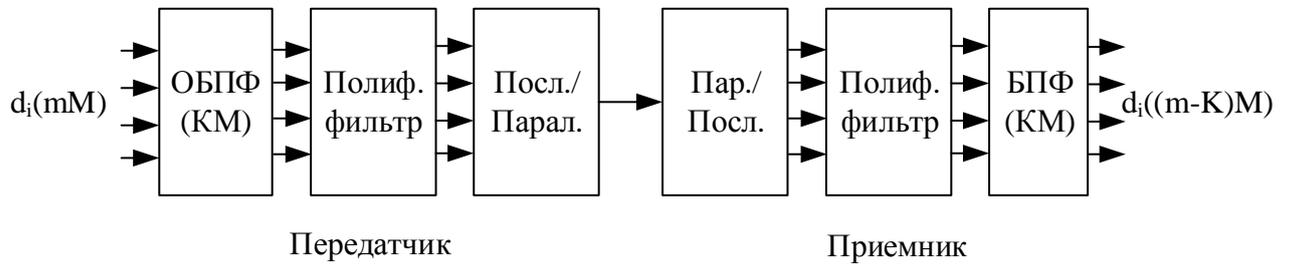


Рисунок 1.2 – Блок-схема передачи данных.

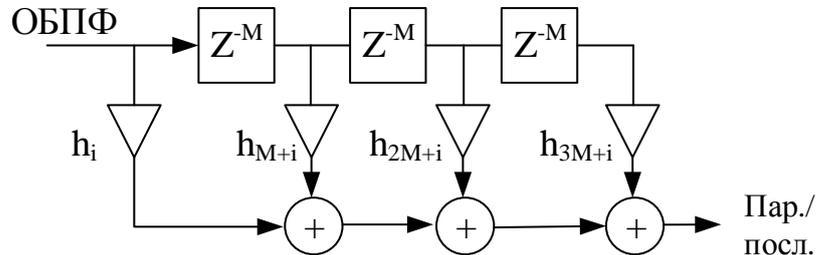


Рисунок 1.3 – Полифазная структура фильтра.

Передатчик может генерировать реальную последовательность со схожей вычислительной сложностью. В таблице 1.1 представлено сравнение вычислительной сложности алгоритма полифазной фильтрации и стандартного оконного преобразования Фурье.

Таблица 1.1 – Сравнение вычислительной сложности алгоритмов оконного БПФ и полифазной реализации фильтра с БПФ.

	Количество операций сложения	Количество операций умножения
Оконное преобразование Фурье	-	53248
Полифазная структура	3072	14336

## 2. Формирование и обработка сигнала FBMC/OQAM

Вторая глава посвящена описанию проблемы межсимвольной интерференции в системах FBMC/OQAM, возникающих вследствие перекрытия символов во временной области. В работе зарубежных авторов предложены методы оценки на основе встраиваемых пилотов. Для компенсации влияния интерференции предлагается использовать метод с дополнительным пилотом, суть которого заключается в выборе положения дополнительного пилота  $m_p$  и  $n_p$  и вычислении его значения таким образом, чтобы значение помехи в пилотной ячейке обращалось в ноль. Значение дополнительного пилота может быть вычислено как

$$a_{m_a, n_a} = - \frac{\sum_{\substack{(m,n) \in \Omega_{m_p, n_p} \\ (m,n) \neq (m_p, n_p) \\ (m,n) \neq m_a, n_a}} a_{m,n} t_{m_p - m, n_p - n}}{t_{m_p - m_a, n_p - n_a}},$$

где  $\Omega_{m_p, n_p}$  – окно расчета дополнительных пилотов в частотно-временной сетке.

В таблице 2.1 показан выбор окна расчета и значение  $t_{m,n}$ . Красным цветом обозначено расположение пилотного символа  $(m_p, n_p)$ , желтым – расположение дополнительных пилотных символов  $(m_a, n_a) = (m_p, n_p \pm 1)$ , зеленым цветом выделены дополнительные окна расчета  $\Omega_{m_p, n_p}$ . Можно заметить, что действительные и мнимые части значения помехи чередуются. Интерференция действительной части символа складывается из мнимых частей других символов, и наоборот.

После добавления пилота возможна оценка канала стандартными методами, как показано в таблице 2.1. В данной работе для оценки канала используется метод Zero Forcing (метод зануления) с линейным интерполятором.

Таблица 2.1 – Окно расчета дополнительного пилота для FBMC/OQAM (широкое окно).

	-4	-3	-2	-1	$0(n_p)$	+1	+2	+3	+4
-2	0	0,0006	-0,0001	0	0	0	-0,0001	0,0006	0
-1	0,0054	0,0429i	-0,1250	0,2058i	0,2393	-0,2058i	-0,1250	-0,0429i	0,0054
$0(m_p)$	0	-0,0668	0,0002	0,5644	1	0,5644	0,0002	-0,0668	0
+1	0,0054	-0,0429i	-0,1250	-0,2058i	0,2393	0,2058i	-0,1250	0,0429i	0,0054
+2	0	0,0006	-0,0001	0	0	0	-0,0001	0,0006	0

## 3. Система передачи данных на основе FBMC/OQAM

В третьей главе представлена разработанная модель системы передачи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров. На рисунке 3.1 представлена упрощенная модель обработки сигнала и эквалайзирования в FBMC/OQAM. Данная схема соответствует типовому эквалайзеру CP-OFDM за исключением обработки OQAM.

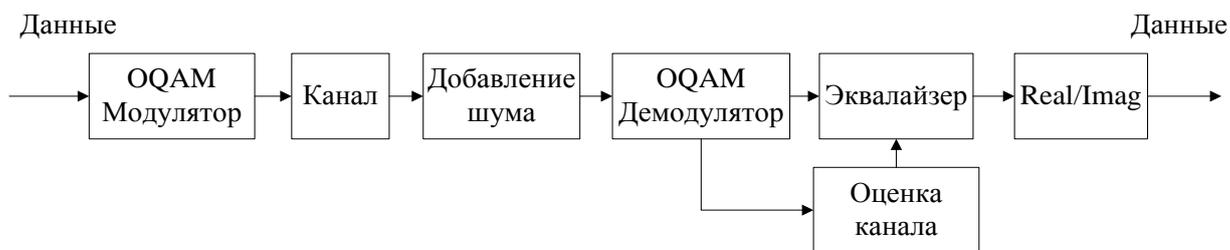


Рисунок 3.1– Схема передачи FBMC/OQAM с оценкой канала.

Представленная упрощенная схема обладает рядом недостатков. Среди них необходимо отметить то, что зачастую на практике обработка на OQAM демодуляторе невозможна без предварительного эквалайзирования. К тому же данная схема слишком упрощена и не позволяет провести полную обработку FBMC/OQAM сигнала. Поэтому была разработана новая схема обработки. Предлагаемая схема показана на рисунке 3.2.

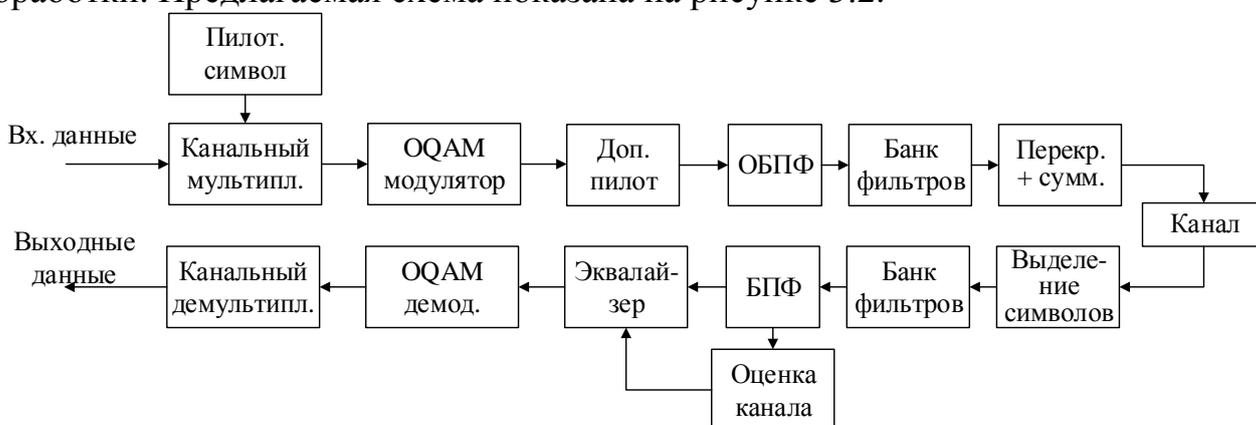


Рисунок 3.2 Предлагаемая схема обработки сигнала FBMC/OQAM.

Обработка начинается с канального мультиплексора, который имеет два канала на входе. Канальный мультиплексор позволяет распределить данные между абонентами при назначении им различных поднесущих. На один из них подается информационный поток данных, а на другой – пилотные символы. В данном случае канальный мультиплексор соответствует схеме OFDMA. Далее рассмотрен процесс обработки на примере системы с размерностью преобразования Фурье, равным 16. На рисунке ниже представлено пояснение к работе мультиплексора.

В системе OFDM подготовленная последовательность поступает сразу на блок обратного быстрого преобразования Фурье. В FBMC/OQAM сигнал сначала подается на OQAM модулятор. Как было сказано ранее, мнимая часть символа OQAM должна быть смещена относительно действительной на половину длительности суммарного символа FBMC. Для этого исходный OFDM-символ в частотной области разбивается на 2, как показано на следующем рисунке. Комплексные значения информационных символов располагаются в шахматном порядке. В первом символе FBMC первый подканал содержит реальную часть символа ( $r1$ ), второй – мнимую ( $i2$ ), и так далее. Во втором символе сохраняется обратный порядок: первый подканал содержит мнимую часть символа ( $i1$ ), второй – реальную ( $r2$ ). Такое

расположение символов гарантирует отсутствие межсимвольной интерференции вследствие перекрытия символов во временной области.

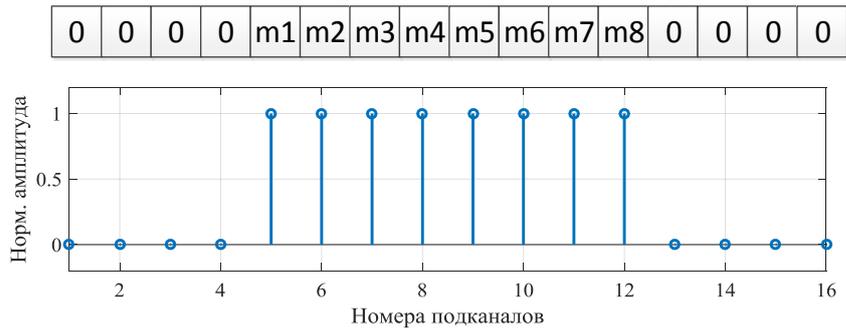


Рисунок 3.3 – Формируемый символ в частотной области.

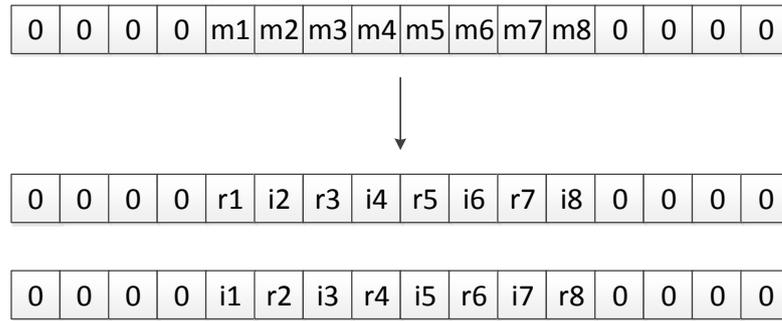


Рисунок 3.4 – Обработка OQAM.

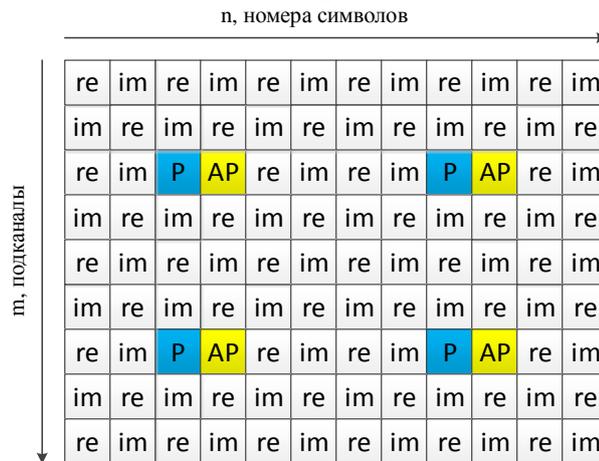


Рисунок 3.5 – Расположение дополнительного пилота в частотно-временной сетке.

В качестве метода компенсации межсимвольной интерференции был выбран метод AP, или дополнительный пилот. За каждым пилотным символом в частотно-временной сетке располагается дополнительный пилот, его значение зависит от близлежащих информационных символов. Полученное частотно-временное поле показано на рисунке 3.5. Синим цветом выделены частотно-временные ячейки, содержащие пилотный символ, желтым – ячейки с дополнительным пилотом. После этого выполняется стандартная обработка FBMC: обратное преобразование Фурье, фильтрация, перекрытие с суммированием.

После прохождения сигнала через канал производится выделение символов, фильтрация и прямое преобразование Фурье. Затем выполняется

оценка канала и эквалайзирование, после этого данные подаются на демодулятор OQAM и каналный демультимплексор.

Для оценки работоспособности схемы, показанной на рисунке 3.2, было проведено моделирование в среде Матлаб. Были разработаны две модели системы передачи: OFDM и FBMC. Для получения сравнительных характеристик параметры данных моделей были выбраны одинаковыми. Параметры показаны в таблице ниже. В качестве моделей канала распространения радиоволн были выбраны три модели канала, рекомендуемые 3GPP. Параметры каналов PPV и моделирования показаны в таблицах 3.1 и 3.2. Результат расчета среднеквадратичной ошибки оценки канала и коэффициента ошибок показан на рисунке 3.6.

Таблица 3.1 – Модели каналов распространения радиоволн.

№ луча	Канал №1		Канал №2		Канал №3	
	Задержка, нс	Мощность, дБ	Задержка, нс	Мощность, дБ	Задержка, нс	Мощность, дБ
1	0	-1.0	0	0.0	0	0.0
2	50	-1.0	30	-1.0	30	-1.5
3	120	-1.0	70	-2.0	150	-1.4
4	200	0.0	90	-3.0	310	-3.6
5	230	0.0	110	-8.0	370	-0.6
6	500	0.0	190	-17.2	710	-9.1
7	1600	-3.0	410	-20.8	1090	-7.0
8	2300	-5.0			1730	-12.0
9	5000	-7.0			2510	-16.9

Таблица 3.2 – Параметры модели.

Параметр	FBMC	OFDM
Размерность преобразования Фурье	1024	1024
Частота дискретизации	10.24 МГц	10.24 МГц
Тип манипуляции	OQAM-4	QAM-4
Циклический префикс	-	128 отсчетов
Коэффициент перекрытия	4	-
Длительность символа, отсчетов	4096	1152
Шаг расположения пилотов по частоте (поднесущие)	8	8
Шаг расположения пилотов по времени (символы)	12	6
Количество информационных поднесущих (общее), из них пилотных поднесущих	641, пилотных 81	641, пилотных 81
Количество генерируемых бит	$10^5$	$10^5$
Количество итераций симуляции (для усреднения результата)	1500	1500

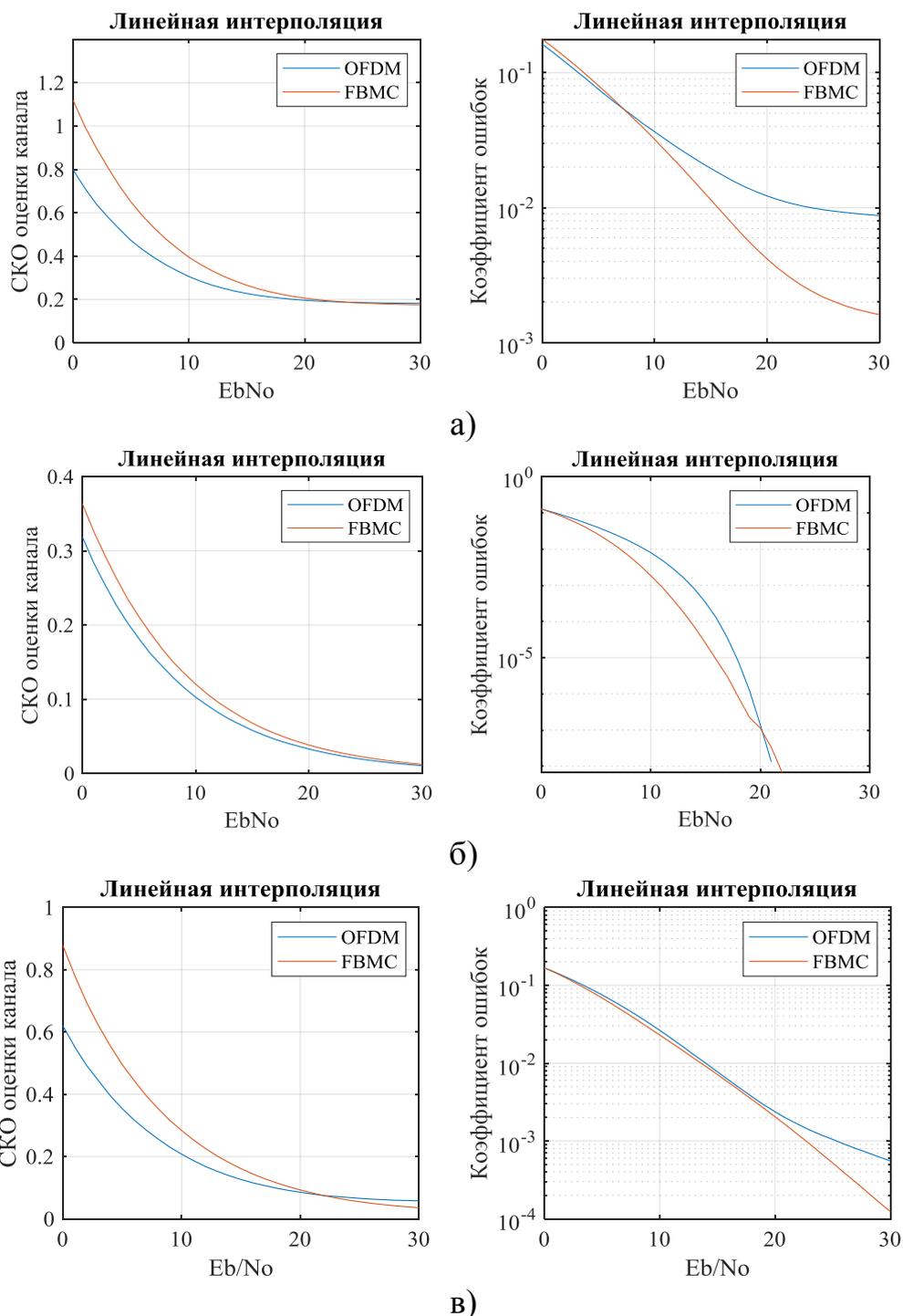


Рисунок 3.6 – Зависимость среднеквадратичной ошибки оценки канала и коэффициента ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит информации, к мощности шума, а) канал №1, б) канал №2, в) канал №3.

Также в главе 3 представлен сравнительный анализ систем FBMC/OQAM и OFDM. OFDM получили широкое распространение в системах радиосвязи, так как характеризуются эффективным мультиплексированием и простотой реализации. Однако вследствие плотного расположения поднесущих в полосе такие системы чувствительны к эффектам многолучевости в канале распространения радиоволн. Без использования защитного интервала между символами передача OFDM

сигнала возможна лишь в канале Гаусса. Для работы в канале Райса или Релея требуется защитный интервал в виде циклического префикса, который является копией части символа с обратной стороны. Циклический префикс необходим для сохранения ортогональности поднесущих в многолучевом канале. На рисунках 3.7 и 3.8 показана последовательность символов CP-OFDM и FBMC/OQAM во временной области. За счет отсутствия циклического префикса системы FBMC/OQAM обладают более высокой спектральной эффективностью. Данный выигрыш зависит от длины префикса, который в системе LTE составляет 7-25% от длины символы. Таким образом, спектральная эффективность систем на основе FBMC/OQAM может быть выше, чем систем OFDM, до 7-25%.



Рисунок 3.7 – Последовательность символов в системе CP-OFDM

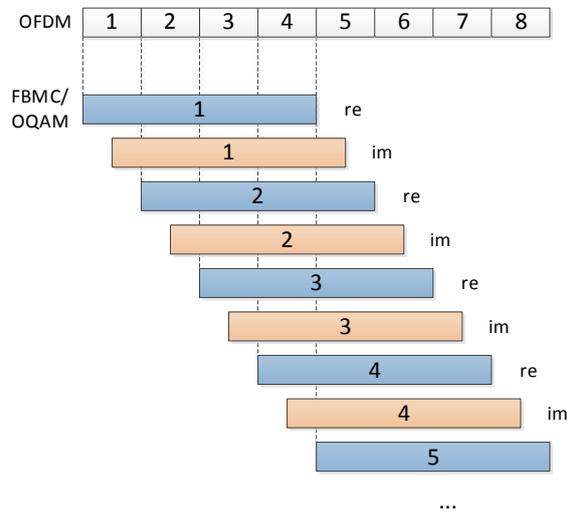


Рисунок 3.8 – Последовательность символов FBMC/OQAM и символов OFDM без циклического префикса

В частотной области OFDM-символ содержит набор гармонических сигналов с прямоугольным окном, поэтому форма спектра каждой поднесущей описывается функцией  $\sin(x)/x$ . Что касается системы FBMC/OQAM, то форма спектра в ней полностью зависит от фильтра. В данной работе используется фильтр PHYDYAS, который представлен тремя видами с коэффициентом перекрытия  $K = 2, 3, 4$ . На рисунке 3.9(а) показан спектр символа OFDM и FBMC/OQAM при  $NFFT = 1024$  и различных  $K$ . На рисунке 3.9(б) показана спектральная маска из спецификации стандарта LTE, определяющая максимальный уровень сигнала в полосе для исключения влияния на соседние каналы. Таким образом, использование метода FBMC/OQAM на физическом уровне системы связи может значительно сократить защитные полосы в спектральной области, что также позволит повысить спектральную эффективность.

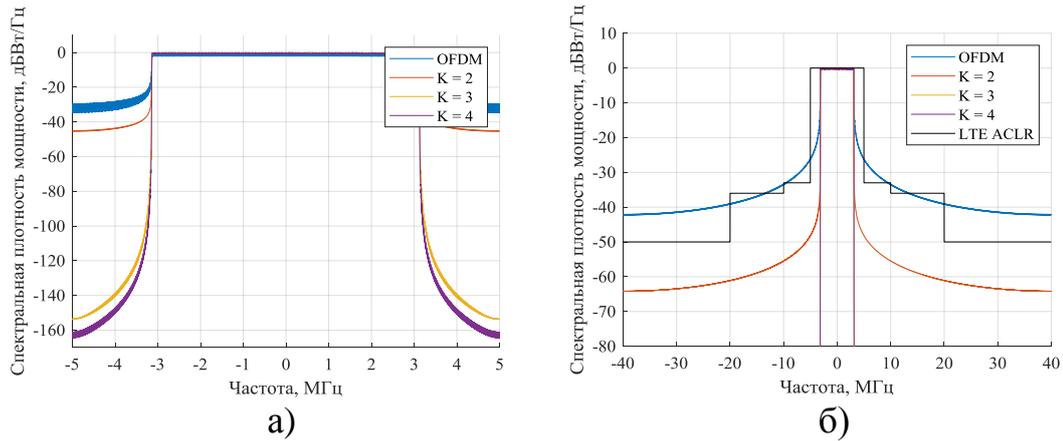


Рисунок 3.9 – Спектральная плотность мощности сигнала FBMC/OQAM в полосе частот 10 МГц (а), спектральная маска LTE ACLR для сигнала полосой 10 МГц (б).

Таблица 3.3 – Уровень мощности сигнала в спектре OFDM и FBMC/OQAM.

	Максимальный уровень боковых лепестков в спектре	Уровень мощности на границе полосы
OFDM	-13.15 дБ	-29.47 дБ
FBMC/OQAM, K=2	-20.95 дБ	-45 дБ
FBMC/OQAM, K=3	-32.57 дБ	-153.5 дБ
FBMC/OQAM, K=4	-39.87 дБ	-161.1 дБ

#### 4. Экспериментальное исследование системы FBMC/OQAM

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию системы передачи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров. Был использован экспериментальный стенд, структурная схема которого имела следующий вид:

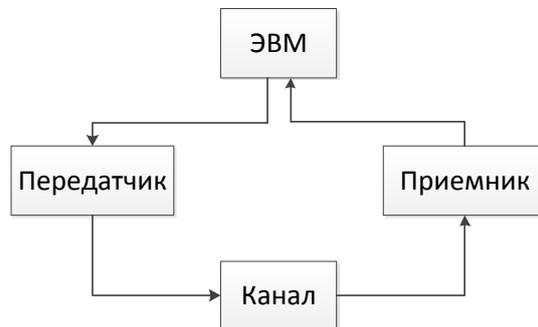


Рисунок 4.1 – Структурная схема экспериментального стенда.

В качестве приемника использовался анализатор спектра Rohde & Schwarz FSV3. Для генерации сигнала использовался генератор сигналов произвольной формы Keysight 33600A, для переноса сигнала на несущую – генератор Keysight N9310A.

Для передачи сигнала в канале распространения радиоволн была разработана структура кадров для каждой системы. Кадр OFDM состоял из

преамбулы с двумя символами, пятнадцати слотов по 6 символов и одного добавочного символа для полноценной оценки канала в последнем слоте. Длина кадра была выбрана в соответствии с системой LTE. Два символа преамбулы необходимы для обнаружения начала кадра и частотной синхронизации. Каждый слот состоит из шести символов OFDM. В первом символе каждого слота располагался пилотный сигнал, распределенный по подканалам с шагом 8. Изображение кадра в частотно-временной сетке показано на рисунке 4.2.

Кадр FBMC/OQAM представлен на рисунке 4.3. В свою очередь он состоит из двух символов преамбулы, пятнадцати слотов по 12 символов в каждом, а также двух символов после.

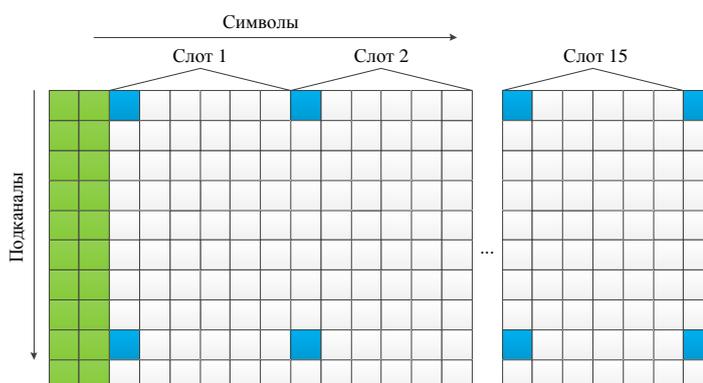


Рисунок 4.2 – Структура кадра OFDM. Зеленая ячейка – символ преамбулы, белая – символ с данными, синяя – пилотный символ.

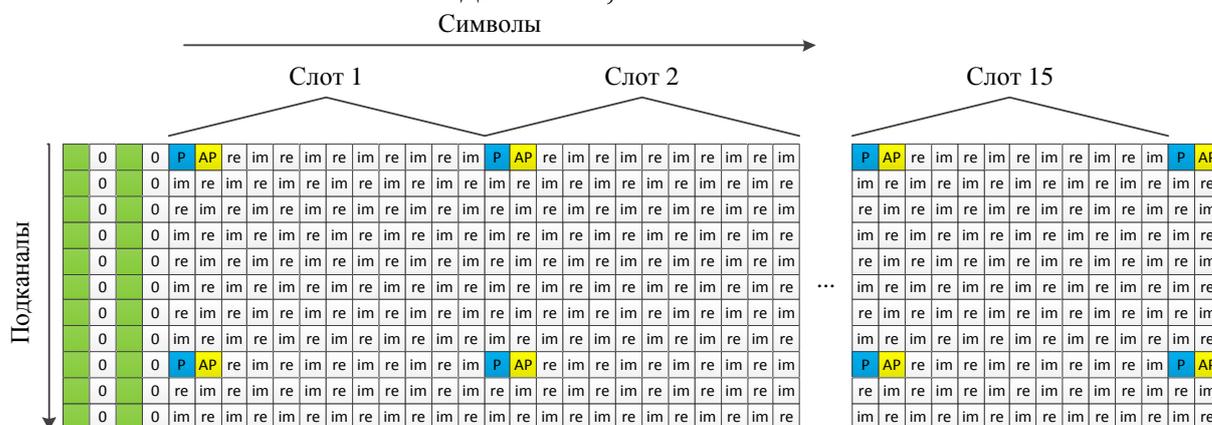


Рисунок 4.3 – Структура кадра FBMC/OQAM. Зеленая ячейка – символ преамбулы, серая – защитный интервал между преамбулой и кадром, re/im – символ с данными, синяя – пилотный символ, желтая – дополнительный пилот.

Эксперимент проводился на третьем этаже здания радиотехнического корпуса Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Измерения были проведены в трех различных сценариях: передача в пределах одной аудитории (канал №1), передача в соседнюю аудиторию при отсутствии прямой видимости (канал №2), передача в коридоре корпуса (канал №3). Трассы радиоканалов представлены ниже.

Одно измерение в каждом канале проводилось до накопления  $10^5$  бит, измерения повторялись 20 раз.

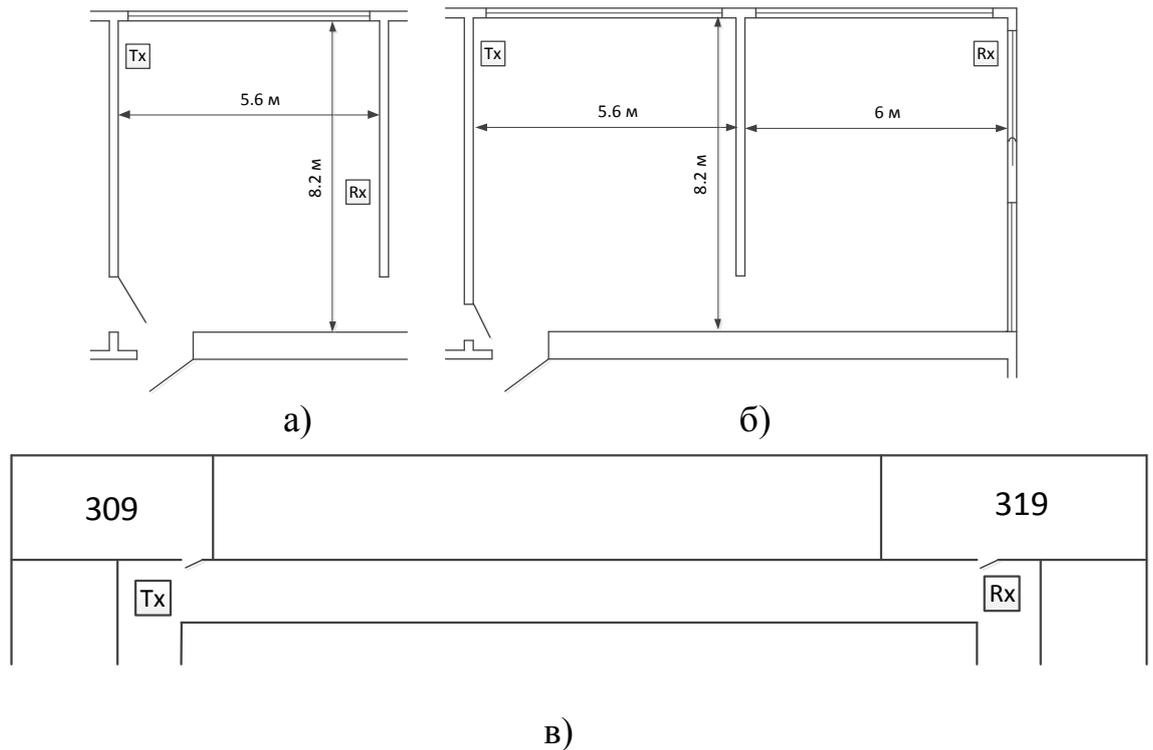


Рисунок 4.4 – Трасса канала №3. Tx – передатчик, Rx – приемник. Расстояние между передатчиком и приемником  $\approx 30$  м.

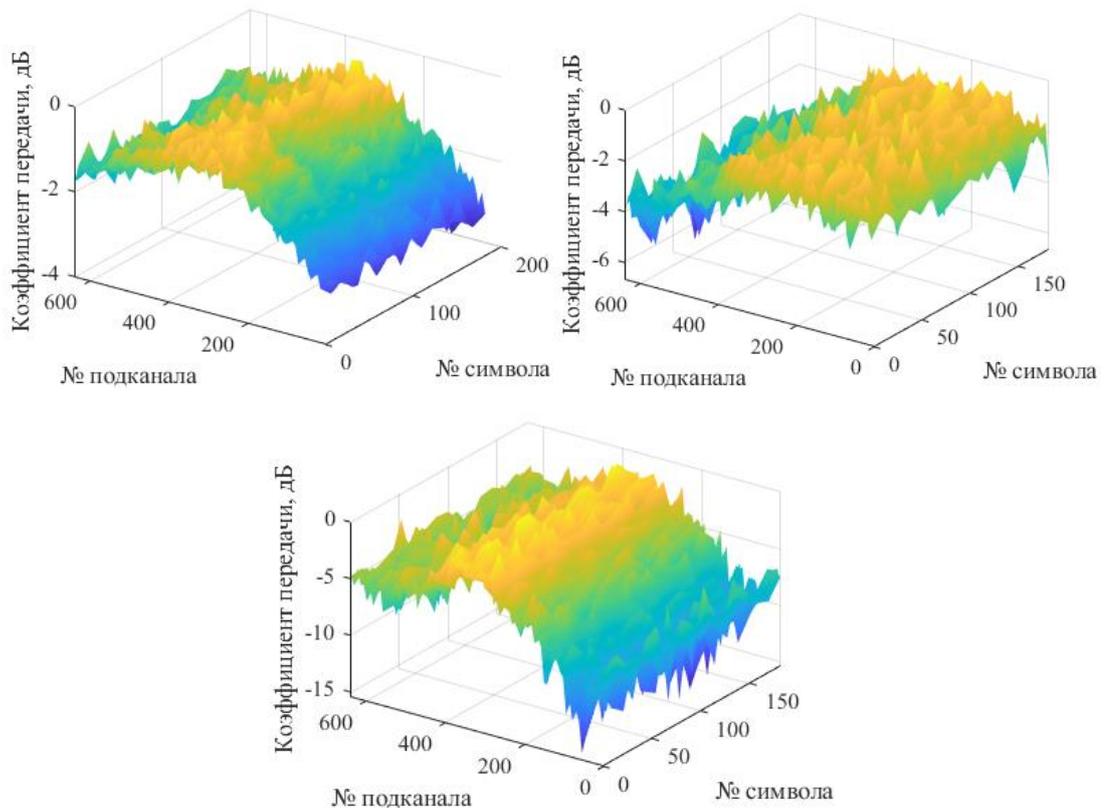


Рисунок 4.5 – Модуль канальной матрицы каналов №1-3.

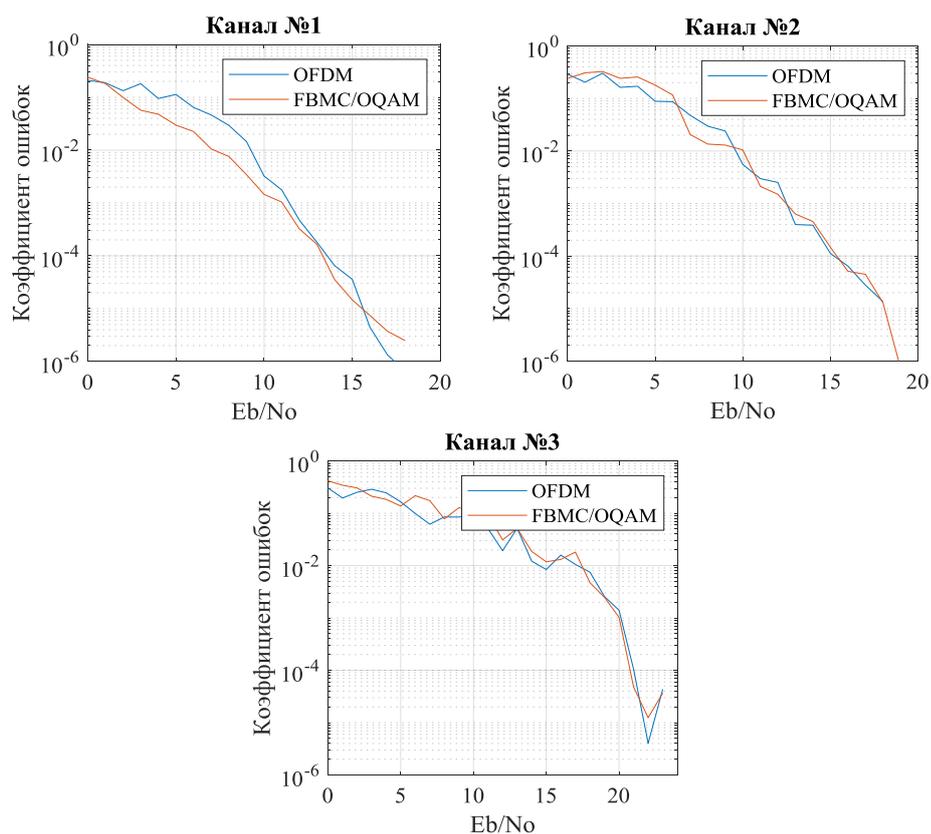


Рисунок 4.6 – Зависимость коэффициента ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит информации, к мощности шума.

На рисунке 4.5 показана нормированная оценка канала для каждого сценария. Рисунок 4.6 демонстрирует усредненное значение рассчитанного коэффициента битовых ошибок в зависимости от отношения энергии, приходящейся на бит информации, к мощности шума.

Таким образом, экспериментальное исследование показало, что система на основе FBMC/OQAM в реальном канале РРВ показывает схожий коэффициент битовых ошибок на уровне  $10^{-4}$ , как и система на основе OFDM, с погрешностью измерения отношения энергии, приходящейся на бит информации, к энергии шума около 1 дБ. Также было показано, выигрыш в спектральной эффективности FBMC/OQAM относительно OFDM повышается с увеличением длины кадра и стремится к пределу, зависящему от длины префикса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена методу ортогонального частотного мультиплексирования на основе применения банка цифровых фильтров. Актуальность данного направления подтверждается множеством исследований и публикации как научно-исследовательских институтов, так и мировых производителей оборудования 4G и 5G в данной области.

В диссертации представлен развернутый литературный обзор по данной тематике, включающий работы зарубежных и отечественных авторов. Рассмотрено большое количество актуальных авторских работ на английском

языке. В обзоре изложены история развития и основы технологии. Описаны сложности построения системы связи на основе FBMC/OQAM. Показано, что применение полифазных методов обработки позволяет существенно снизить вычислительную нагрузку.

Серьезной проблемой реализации системы на основе FBMC/OQAM является межсимвольная интерференция, которая усложняет проектирование таких функциональных блоков как оценка канала и эквалайзирование. В работе продемонстрированы проблемы, связанные с возникновением межсимвольной интерференции, а также показаны методы их устранения.

Было показано, что спектральная эффективность систем связи на основе FBMC/OQAM может быть выше системы LTE на 7-25% за счет удаления защитного интервала в виде циклического префикса. Существенное снижение уровня внеполосного излучения системы FBMC/OQAM позволит сократить защитные полосы в спектре, что также может увеличить спектральную эффективность. Внеполосное излучение зависит от коэффициента перекрытия, который прямо пропорционален длине фильтра.

Проведенное моделирование продемонстрировало работоспособность системы FBMC/OQAM в многолучевом канале. Полученные в результате моделирования данные показали, что FBMC/OQAM имеет более высокую помехоустойчивость, чем OFDM. Выигрыш составляет 0.4-2.3 дБ при различных условиях и уровнях коэффициента ошибок.

Экспериментальное исследование подтвердило возможность работы системы FBMC/OQAM в условиях реального канала распространения радиоволн. Методы оценки канала, призванные устранить влияние межсимвольной интерференции, позволяют корректно оценивать состояние канала и демонстрируют такую же помехоустойчивость, что и OFDM. В процессе выбора длины кадра было показано, что выигрыш в спектральной эффективности зависит от количества символов в кадре, так как группа символов FBMC/OQAM имеет переходную зону с обеих сторон.

Метод ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров имеет ряд преимуществ перед ныне используемой технологией OFDM и может быть применен в широкополосных системах связи будущих поколений. Проблемы реализации данного метода в основном связаны с высокой вычислительной сложностью.

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

*В изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Абенев Р. Р. и др. Исследование методов эквалайзирования для систем связи с использованием OFDM-сигналов //Вестник СибГУТИ. – 2013. – №. 1. – С. 50-56.
2. Абенев Р. Р. и др. Проблемы оценки канала в системе с частотным мультиплексированием с использованием банка фильтров //Вестник СибГУТИ. – 2018. – №. 1. – С. 72-78.

3. Покаместов Д.А., Демидов А.Я., Крюков Я.В., Рогожников Е.В., Абенов Р.Р. Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом // *Электросвязь*. – 2016. № 10. С. 56-61.

4. Покаместов Д.А. и др. Концепция физического уровня систем связи пятого поколения // *ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА*. – 2017. – Т. 60. – №. 7.

5. Я. В. Крюков, А. Я. Демидов, Д. А. Покаместов, Е. В. Рогожников, Р. Р. Абенов Метод множественного доступа с разделением каналов по мощности // *Омский научный вестник* № 6 (162) 2018. С. 184-188.

*В сборниках трудов конференций Web of Science, Scopus:*

6. Abenov R. R. et al. FBMC/OQAM Equalization Scheme with Linear Interpolation // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2019. – С. 0130-0133.

*Монографии:*

7. Цифровая обработка сигналов в беспроводных широкополосных системах. Ворошилин Е.П., Рогожников Е.В., Вершинин А.С., Чигринец В.А., Долгих Д.А., Абенов Р.Р., Гельцер А.А., Коротков Д.А., Лобанов Н.А., Майков Д.Ю. Томск: В-Спектр, 2012. – 244 с. ISBN 978-5-91191-273-4.

8. Алгоритмы обработки и преобразования сигналов в системе «Мобильный WiMax». Ворошилин Е.П., Рогожников Е.В., Вершинин А.С. Демидов А.Я., Каратаева Н.А., Коротков Д.А., Лобанов Н.А., Майков Д.Ю., Абенов Р.Р. – Томск: В-Спектр, 2012. – 172 с. ISBN 978-5-91191-274-1.

*В сборниках трудов международных конференций:*

9. Абенов Р.Р., Рогожников Е.В. Способы эквалайзирования для систем широкополосного беспроводного доступа диапазона (2.4 – 2.7) ГГц. – Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции (8-10 ноября 2012 г.): В 2ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2012. – 208 с.

10. И. Сагиева, аспирант каф. ТУ, Р.Р. Абенов, аспирант каф. ТОР, ТУСУР. Метод передачи данных на множестве поднесущих с использованием банка фильтров (FBMC) // XII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», 16-18 ноября 2016г., г. Томск.

*В сборниках трудов всероссийских конференций:*

11. И. Сагиева, магистрант каф. ТОР, Д. Ыканов, магистрант каф. ТОР, Р.Р. Абенов, аспирант каф. ТОР, ТУСУР. Моделирование FBMC в SystemVue // Научная сессия ТУСУР – 2016 Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016»

12. Т.Е. Жукембаева, магистрант каф. ТОР, Р.Р. Абенов, аспирант каф. ТОР, ТУСУР. Перспективы применения модуляции OFDM/OQAM в системах связи // Научная сессия ТУСУР – 2016 Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016»