МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Елеулов Алибек Ажбаевич

Тема: «Исследование OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации
имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭТи КТ
_____Е.Таштай
“ 27 “ 05 2022г

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации»

по специальности 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Выполнил (а) Елеулов Алибек Ажбаевич

Рецензент
Кандитат технических наук
Уч.степень, звание
_____ Абдуллаев М.А.
“ 27 “ 05 2022г.

Научный руководитель
Лектор каф. ЭТиКТ
Уч.степень, звание
_____ Джунусов Н.А.
“ 27 ” 05 2022г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
_____/Е.Таштай
"27" 05 2022г

ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы

Обучающемуся *Елеулову Алибеку Ажбаевичу*

Тема: *Исследование OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации*

Утверждена *приказом ректора университета* № 140-Б от «24» 01 2022г.

Срок сдачи законченной работы "30" мая *2022г.*

Исходные данные к дипломной работе: *трансивер BARRETT 2050 с макс. мощностью 125 Вт; Антенна типа «ШТЫРЬ» длиной 1.5 м; макс. ширина спектра сигнала 1800 Гц; скорости передачи 9600 бит/с; OFDM- DPSK-8-скорость кода R=2/3, рабочая полоса 6200 Гц; скорость модема в условиях хорошего канала до 12290 бит/с; эффекта Доплера в пределах ±40 Гц.*

Краткое содержание дипломной работы:

а) Анализ OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации

б) Выбор параметров модема, реализованного по технологии OFDM, для цифровой дуплексной системы связи

в) Построения модемов, реализованных по технологии OFDM

г) Расчеты основных параметров OFDM модуляторов и демодуляторов

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Упрощенная схема OFDM модема*
2. *Блок-схема декаметрового (ДКМ) канала связи КС*

3. Схема имитатора Ваттерсона

4. Схема проверки работы модема с реальным радиоканалом

5. Алгоритм построения и программная реализация OFDM-модема

ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации, построения модемов реализованных по технологии OFDM	1.02.2022	Выполнено
Выбор параметров модема, реализованного по технологии OFDM, для цифровой дуплексной системы связи	1.03.2022	Выполнено
Расчеты основных параметров OFDM модуляторов и демодуляторов	25.04.2022	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Магистр технических наук Досбаев Ж.М.	23.05.2022	

Научный руководитель_____ Джунусов Н.А.

Задание принял к исполнению студент_____ Елеулов А.А.

Дата « 23 » 05 2022

АҢДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста ЖЖ радиоарналары бойынша дискретті хабарламаларды жіберуші және қабылдаушы жақтары арасында максималды мүмкін болатын жиілікті реттеу болған жағдайда жоғары жылдамдықты және төмен жылдамдықты жоғары сенімді (жасырын) тарату үшін OFDM технологиясына негізделген модем әзірленеді. кең диапазондағы хабар жылдамдығының өзгеруіне байланысты байланыс жағдайларына бейімделуге қабілетті Доплер эффектісіне байланысты радиобайланыс.

Қойылған міндеттерді шешу үшін математикалық және спектральды талдау әдістері, статистикалық радиотехника, радиотолқындардың таралу теориясы, хабарламаларды дискретті тарату және цифрлық сигналдарды өңдеу теориясы қолданылды.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе будет проведена разработка модема на основе технологии OFDM для высокоскоростной и низкоскоростной высоконадежной (скрытной) передачи дискретных сообщений по КВ радиоканалам при наличии предельно возможной расстройки по частоте между передающей и приемной сторонами радиолинии обусловленной эффектом Доплера, способного адаптироваться к условиям связи за счет изменения скорости передачи сообщений в широких пределах.

Для решения поставленных задач были использованы методы математического и спектрального анализа, статистической радиотехники, теории распространения радиоволн, теорииПередачи дискретных сообщений и цифровой обработки сигналов.

ANNOTATION

In this thesis, a modem based on OFDM technology will be developed for high-speed and low-speed highly reliable (covert) transmission of discrete messages over HF radio channels in the presence of the maximum possible frequency detuning between the transmitting and receiving sides of the radio link due to the Doppler effect, capable of adapting to communication conditions due to changes in the message rate over a wide range.

To solve the tasks set, the methods of mathematical and spectral analysis, statistical radio engineering, the theory of radio wave propagation, the theory of transmission of discrete messages and digital signal processing were used.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение		9
1	Анализ OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации	10
1.1	Основные понятия OFDM	10
1.2	Применение OFDM модуляторов и демодуляторов	11
1.3	Разработка OFDM	12
1.4	Пример применения	13
1.5	Ключевые функции	14
1.6	Характеристики и принципы работы	15
1.7	Реализация с использованием алгоритма БПФ	16
1.8	Защитное взаимодействие для межсимвольного взаимодействия	17
1.9	Расширение OFDM с множественным доступом	17
1.10	Применение технологии OFDM	20
1.11	Общие принципы построения модемов, реализованных по технологии OFDM	24
2	Выбор параметров модема, реализованного по технологии ofdm, для цифровой дуплексной системы связи	29
3	Расчеты основных параметров OFDM модуляторов и демодуляторов	34
Заключение		43
Список использованной литературы		44

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для каналов связи декаметрового диапазона радиоволн активно разрабатываются модемы, в которых используется технология OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов). OFDM–сигналы позволяют создавать как предельно высокоскоростные модемы, так и модемы с большой базой, обладающие высокой помехоустойчивостью и скрытностью. Высокоскоростные модемы необходимы для передачи факсимильных сообщений, цифровой передачиречи, экстренных команд управления и другого рода сообщений, требующих срочной доставки адресату. Высокопомехоустойчивые модемы требуются в каналах обратной связи, каналах дистанционного управления, каналах передачи сигналов тревоги и т. п. Для передачи конфиденциальной информации используются модемы, обладающие энергетической скрытностью, т. е. способные передавать сообщения малой мощностью, когда на приемном конце радиолинии имеет место отношение сигнал/помеха многоменьше единицы.

1 АНАЛИЗ OFDM МОДУЛЯТОРОВ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ В СЕТЯХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

1.1 Основные понятия OFDM

На сегодняшний день большое развитие в области передачи данных получили беспроводные сети — сети радиосвязи. Это связано с удобством их использования, экономичностью и приемлемой пропускной способностью. Исходя из текущей динамики развития инфокоммуникационных систем, следует, что по количеству и распространенности беспроводные сети в скором времени превзойдут проводные сети. Эта динамика непосредственным образом влияет на требования к защите информации в беспроводных сетях. Одним из наиболее перспективных методов построения надежных и высокоскоростных систем связи является использование сигналов OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing — ортогональное частотное разделение подканалов).

Сигналы OFDM широко используются при передаче данны Фх в условиях многолучевого распространения, это позволяет решить проблемы межсимвольной интерференции (МСИ) и частотно-селективных замираний (ЧСЗ). При этом эффективно используется выделенная полоса частот канала и сохраняется высокая скорость передачи информации. OFDM основан на идее FDM, но все потоки являются частями одного исходного потока. Битовый поток разделяется на несколько параллельных потоков данных, каждый из которых передается через свою собственную поднесущую с использованием некоторой традиционной схемы цифровой модуляции. Модулированные поднесущие суммируются для формирования сигнала OFDM. Во временной области поток данных делится на отрезки некоторой длины (OFDM-символы), содержащие в качестве префикса специальный защитный интервал. Из определенного числа OFDM-символов формируются кадры, которые, в свою очередь, образуют суперкадры. Помимо информационных данных в символах передаются служебные данные о режиме работы, а также заранее известные на приемной стороне — пилот-сигналы. Они служат для оценки качества канала передачи и синхронизации приемопередающего оборудования. Значения параметров в этих ячейках, тщательно выбираются в целях оптимизации характеристик системы, особенно синхронизации и надежности приёма сигнала. Применение в составе OFDM-сигнала большого набора поднесущих частот определяет такие его свойства, как высокая потенциальная помехоустойчивость, эффективность использования частотного спектра, простота реализации технических решений методами цифровой обработки. Влияние многолучевого распространения сигнала учитывается при обработке путем введения защитного интервала, длительности которого больше, чем предполагаемое запаздывание копий сигнала. На протяжении защитного интервала сигнал продолжается, повторяясь во времени, поэтому операцию введения защитного интервала часто называют образованием циклического префикса. Этот интервал позволяет исключить

искажения сигнала, вызванные многолучевым распространением в канале связи, т. е. устранить влияние запаздывающих копий предыдущего символа на обработку текущего информационного символа. Чтобы надлежащим образом осуществить демодуляцию сигнала, приемные устройства должны произвести его выборку во время полезного периода символа. Помехоустойчивое кодирование введено в систему для устранения влияния частотных селективных замираний в радиоканале, в результате чего отношение сигнал/шум на разных несущих различается.

1.2 Применение OFDM модуляторов и демодуляторов

Природа таких замираний связана с интерференцией сигналов прямого и отраженного лучей на одной и той же несущей частоте. При нарушении временной и частотной синхронизаций снижается качество изображения и звука, воспроизводимого телевизионной системой. В связи с этим необходимо проанализировать и скорректировать принятый сигнал. Для демодуляции OFDM-сигнала с минимальным числом ошибок приемные устройства должны выделить полезные части OFDM-символов без защитных интервалов, а также настроиться на несущую частоту спектра, поэтому необходима синхронизация в работе передатчика и приемника. И для этой цели используются пилот-сигналы, именуемые иногда «пилотами». Одной из первостепенных задач OFDM-системы является повышение эффективности использования OFDM-сигнала в системах радиосвязи и радиовещания Электроника 7 на основе разработки и исследования алгоритмов оценки и восстановления параметров. Многие вопросы исследуются разработчиками для повышения рабочих характеристик алгоритмов и их аппаратной реализации. Самые сложные и неоднозначные с научной точки зрения алгоритмы в OFDM-системах связаны с синхронизацией. При алгоритмическом подходе к решению задачи синхронизации приемопередающих систем используют защитный интервал и пилот-сигналы. Основные практические алгоритмы синхронизации цифровых телевизионных систем построены интуитивно, недостаточно исследованы условия их применения, не учтено влияние канала передачи. Многие теоретические алгоритмы не имеют прикладного значения, так как их реализация требует знания неизвестных статистических характеристик. Комплекс нерешенных проблем составляет задачу для исследования и построения высокоточной системы синхронизации. Во многих работах по изучению OFDM сигналов в телекоммуникационных системах приведено решение основной и наиболее актуальной научно-технической проблемы цифрового вещания — разработки рациональной структуры схемы синхронизации, имеющей прикладное значение и универсальной по условиям применения. Одним из наиболее эффективных способов передачи информации в каналах с многолучевым распространением сигналов (например, коротковолновом (КВ) канале) является использование

OFDM-систем. Применение в системах передачи цифровой информации сигналов OFDM позволяет решить проблему межсимвольной интерференции (МСИ) за счет разделения высокоскоростного потока данных на несколько десятков (сотен, тысяч) низкоскоростных потоков и введения циклического префикса. Величина частотного интервала между поднесущими Δf выбирается минимальной и равной частоте 1/T. Наличие многих несущих с минимальным частотным разносом приводит к тому, что форма спектра результирующего сигнала становится близкой к прямоугольной. Таким образом, эффективно используется выделенная полоса частот канала и сохраняется высокая скорость передачи полезной информации. OFDM рассматривается как модуляция que, а не как que, поскольку он передает один битовый поток по одному каналу связи, используя одну последовательность так называемых символов OFDM.

OFDM может быть расширен до многопользовательского способа доступа к каналу в схемах множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (OFDMA) и множественного доступа с кодовым разделением каналов с множеством несущих (MC-CDMA), что позволяет нескольким пользователям совместно использовать одну и ту же физическую среду посредством предоставления различных поднесущих или расширения кодов различным пользователям.

В телекоммуникациях ортогональное частотное разделение (OFDM) является типом цифровой передачи и способом кодирования цифровых данных на множественных частотах несущих. OFDM развился в популярную схему широкополосной цифровой связи, используемую в таких приложениях, как цифровое телевидение и аудио трансляция, доступ в интернет DSL, беспроводные сети, сети линий электропередачи и мобильная связь 4G/5G.

1.3 Разработка OFDM

OFDM - схема с частотным разделением (FDM), которая была введена Робертом Чангом из Bell Labs в 1966 году. В OFDM множество близко расположенных ортогональных сигналов под несущих с перекрывающимися спецификациями передаются для переноса данных параллельно. Демодуляция основана на быстрых алгоритмах преобразования Фурье. OFDM был улучшен Штайном и Эбертом в 1971 году с введением защитного межсетевого интерфейса, обеспечивая лучшую ортогональность в каналах передачи, на которые влияет распространение. Каждая под несущая (сигнал) модулируется с помощью обычной схемы модуляции (такой как амплиментная модуляция или фазовая манипуляция) с низкой скоростью передачи символов. Это поддерживает общие скорости передачи данных, аналогичные обычным схемам модуляции с одной несущей в той же полосе пропускания.

Основным преимуществом OFDM перед схемами с одной несущей является его способность перекрываться с тяжелыми условиями канала

(например, настройка высоких частот в длинном coppere, узкополосная помеха и частотно-выборочное замирание из-за lath) без сложных выравнивающих фильтров. Выравнивание канала усиливается, поскольку ОМДЧ может рассматриваться как использование множества медленно модулированных узкополосных сигналов, а не одного быстро модулированного широкополосного сигнала. Низкая скорость передачи символов делает возможным

использование защитного взаимодействия между символами, что позволяет межсимвольные взаимодействия (ISI) и использовать эхо-сигналы и расширение времени (в аналоговом телевидении, видимом как gho и размытие, соответственно) для достижения усиления разнесения, то есть улучшения отношения сигнал/шум. Этот механизм также облегчает создание одночастотных сетей (SFN), в которых несколько смежных передающих устройств одновременно посылают один и тот же сигнал на одной и той же частоте, так как сигналы от множества дистанционных передающих устройств могут быть повторно объединены активно, помехи традиционной системы с одной несущей.

1.4 Пример применения

Ниже приводится краткое описание существующих стандартов и продуктов, основанных на OFDM. Дополнительные сведения см. в разделе Использование в конце статьи.

Версия Wired, в основном известная как Discrete Multi-tone Transmission (DEA)

- Широкополосный доступ ADSL и VDSL через POTS copper
- DVB-C2, усовершенствованная версия стандарта цифрового кабельного телевидения DVB-C
- Связь по линии электропередачи (ПЛК)
- ITU-T G., стандарт, обеспечивающий высокоскоростную локальную сеть существующих домашних сетей (линий электропередач, телефонных линий и коаксиальных кабелей)
- Модемы телефонных линий MP
- Домашняя сеть Multimedia over Coax Alliance (MoCA)
- DOCSIS 3.1 Широкополосная доставка

Беспроводная связь

- Беспроводная радиостанция LAN взаимодействует с IEEE 802.11a, g, n, ac, ah и HIPERLAN/2
- Цифровые радиосистемы DAB/EUREKA 147, DAB +, Digital Radio Mondiale, HD Radio, T-DBB и ISDB-TSB
- Террестриальные системы цифрового телевидения DVB-T и ISDB-T
- Наземные мобильные телевизионные системы DVB-H, T-DMB, ISDB-T и MediaFLO прямой линии связи

- Реализация беспроводной персональной сети (PAN) сверхширокополосной (UWB) IEEE 802.15.3a, предложенная WiMedia Alliance
- Технология множественного доступа OFDMA на основе OFDM также используется в нескольких сотовых сетях 4G и до 4G, стандартах мобильной широкополосной связи и следующем поколении:
- Режим мобильности беспроводного MAN/широкополосного беспроводного доступа (BWA) стандарта IEEE 802.16e (или Mobile-WiMAX)
- Стандарт мобильного широкополосного беспроводного доступа (MBWA) IEEE 802.20
- Нисходящая линия стандарта мобильной широкополосной связи четвертого поколения 3GPP Long Term Ev (LTE). Радиоинтерфейс был назван *High Speed OFDM Packet Access* (HSOPA), теперь - Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-U);
- TIEEE 802.11ax

1.5 Ключевые функции

Преимущества и недостатки, перечисленные ниже, дополнительно рассматриваются в разделе "Характеристики и принципы работы" ниже.
Резюме преимуществ:

- Высокая спектральная эффективность по сравнению с другими схемами двойной модуляции sideband, спектрами распределения и т.д.;
- Может легко адаптироваться к тяжелым условиям канала без сложного выравнивания во временной области;
- Robust против узкополосных межканальных помех;
- Робуст против межсимвольных помех (ISI) и замирания, вызванного распространением;
- Эффективная реализация с использованием быстрого преобразования Фурье;
- Низкая чувствительность к ошибкам синхронизации по времени;
- Настроенные подканальные фильтры не требуются (в отличие от традиционных FDM);
- Способствует созданию одночастотных сетей (SFN) (например, трансмиттерное макроразнесение);

Краткая информация о недостатках:

- Чувствительный к сдвигу Doppler;
- Чувствительны к проблемам синхронизации частот;
- Высокое отношение пиковой мощности к средней мощности (PAPR), требующее линейной трансмиттерной циркуляции, которая страдает от низкой энергоэффективности;

- Потеря эффективности, вызванная циклическим взаимодействием prefix/guard.

1.6 Характеристики и принципы работы

Ортогональность

Концептуально OFDM представляет собой специализированный метод FDM с частотным разделением каналов (FDM), с дополнительным ограничением того, что все сигналы поднесущих в канале связи ортогональны друг другу.

В OFDM частоты поднесущих выбираются таким образом, чтобы поднесущие были ортогональны друг другу, что означает, что поперечные помехи между подканалами и защитные полосы между несущими не требуются. Это великолепно конструкции как трансмиттера, так и |; в отличие от обычного FDM, отдельный фильтр для каждого подканала не требуется.

Ортогональность требует, чтобы расстояние между поднесущими было Her, где TU секунд - полезная длительность символа (размер окна на стороне носителя), а *k*- положительное целое число, обычно равное Это предусматривает, что каждая частота несущего канала подстилает *k* более полных циклов за период символа, чем предыдущая несущая.

Ортогональность также обеспечивает высокую спектральную эффективность с полной скоростью передачи символов, близкой к скорости передачи Ny st для эквивалентных и сигнала (то есть близкой к половине скорости передачи Ny st для двухстороннего полосного физического сигнала полосы пропускания). Можно использовать практически всю доступную полосу частот. OFDM, как правило, имеет почти "белый" спектр, придавая ему мягкие свойства электромагнетических помех по отношению к другим пользователям совместного канала. Простой пример: Полезная длительность символа TU = 1 мс потребует для ортогональности разнесения поднесущей (или целого числа, кратного этому). N = 1,000 поднесущих приведет к общей ширине полосы пропускания N∆f = 1 МГц. Для этого времени символа требуемая ширина полосы пропускания в теории согласно Ny st равна (половине достигнутой ширины полосы пропускания, требуемой нашей схемой), где R - скорость передачи битов и где N = 1,000 les на символ по FFT. Если применяется защитная полоса пропускания, требование ширины полосы пропускания Ny st было бы еще ниже. БПФ приводит к N = 1,000 л на символ. Если бы не было применено защитное взаимодействие, это привело бы к комплексному сигналу базовой полосы с частотой дискретизации 1 МГц, что потребовало бы и ширины полосы пропускания 0,5 МГц согласно Ny st. Однако сигнал RF полосы пропускания генерируется путем мультипликации и сигнала с волнообразной структурой, несущей (то есть двойной модуляцией амплиитности sideband), что приводит к ширине полосы пропускания 1 МГц. Схема модуляции односторонней полосы частот (SSB) или вестигиального sieband (VSB) достигала бы почти вдвое

большей ширины полосы для одной и той же скорости передачи символов (то есть вдвое большей спектральной эффективности для одной и той же длины буквенного кода символа). Однако он более чувствителен к пересечению.

OFDM требует очень точной синхронизации частоты между и трансмиттером; при отклонении частоты поднесущие больше не будут ортогональными, вызывая*интерференцию между несущими* (ICI) (т.е. перекрестные помехи между поднесущими). Частотные смещения, как правило, вызваны несоответствием передающих и осциллаторов или сдвигом Doppler из-за движения. В то время, как только сдвиг Doppler может быть компенсирован ver, ситуация ухудшается в сочетании с ath, так как отражения будут появляться при различных частотных смещениях, которые гораздо труднее исправить. Этот эффект обычно ухудшается по мере увеличения скорости и является важным фактором, ограничивающим использование OFDM в высокоскоростных транспортных средствах. Для того чтобы изменить ICI в таких сценариях, можно сформировать каждую поднесущую для того, чтобы минимизировать взаимную помеху, приводящую к перекрытию не ортогональных поднесущих. Например, низкокомпитентная схема, называемая WCP-OFDM (*A Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division*), состоит из использования коротких фильтров на выходе передатчика для того, чтобы выполнить потенциально не ректангулярное формирование импульсов и почти идеальное восстановление с использованием одинарной выборки на выравнивание поднесущих. Другие методы подавления ICI обычно резко увеличивают композицию.

1.7 Реализация с использованием алгоритма БПФ

Ортогональность позволяет эффективно реализовывать модулятор и демодулятор, используя algorithm БПФ на стороне и in БПФ на стороне отправителя. Хотя принципы и некоторые из преимуществ известны с 1960-х годов, OFDM популярен сегодня для широкополосной связи посредством недорогих компонентов цифровой обработки сигналов, которые могут эффективно вычислять FFT.

Время для вычисления преобразования в БПФ или БПФ должно занимать меньше времени для каждого символа, что, например, для DVB-T означает, что вычисление должно быть выполнено в или меньше.

Для -point FFT это может быть приближено к:

- MIPS = миллион инструкций в секунду

Вычислительная потребность примерно линейно масштабируется с размером FFT, поэтому FFT с двойным размером требует удвоенного количества времени и наоборот. В качестве сравнения CPU Intel Pentium III при частоте 1,266 ГГц может рассчитать FFT при использовании FFTW. Intel Pentium M при частоте 6 ГГц делает это в Intel Core Нпри частоте 3.0.

1.8 Защитное взаимодействие для межсимвольного взаимодействия

Один из ключевых принципов ОМДМ заключается в том, что, поскольку схемы модуляции с низкой скоростью передачи символов (то есть, где символы относительно длинны по сравнению с характеристиками времени канала) меньше страдают от межсимвольной помехи, вызванной распространением потока, предпочтительно передавать ряд потоков с низкой скоростью параллельно вместо одного потока с высокой скоростью. Поскольку длительность каждого символа велика, то между символами OFDM может быть вставлено защитное взаимодействие, таким образом, межсимвольное взаимодействие.

Защитный интерфейс также требует фильтра формирования импульсов и уменьшает чувствительность к проблемам синхронизации по времени.

Простой пример: Если отгрузить миллион символов в секунду, используя традиционную модуляцию с одной несущей по беспроводному каналу, то длительность каждого символа будет составлять одну микросекунду или меньше. Это накладывает серьезные затруднения на синхронизацию и требует удаления помех. Если один и тот же миллион символов в секунду распределены по тысяче подканалов, длительность каждого символа может быть больше в тысячу раз (то есть одну секунду) для ортогональности с приблизительно одинаковой полосой пропускания. Предположим, что между каждым символом установлена защитная внутренняя граница длиной 1/8 длины символа. Межсимвольная интерференция может быть, если время расширения (время между приемом первого и последнего эхо-сигнала) является более коротким, чем защитная интерференция (то есть 125 микросекунд). Это соответствует максимальной разнице в 37,5 между длинами дорожек. Cyclic prefix, который передается во время защитного интервала, состоит из конца символа OFDM, копируемого в защитный интервал, и защитный интервал передается с последующим символом OFDM.

В некоторых стандартах, таких как Ultrawideband, в интересах передаваемой мощности, cyclic prefix является и ничего не отправляется во время защитного взаимодействия. Затем устройство должно будет смешивать функцию cyclic prefix, копируя конечную часть символа OFDM и добавляя ее в начальную часть.

1.9 Расширение OFDM с множественным доступом

OFDM в своей первичной форме рассматривается как цифровая модуляция que, а не как способ многопользовательского доступа к каналу, поскольку он используется для передачи одного битового потока по одному каналу связи с использованием одной последовательности символов OFDM. Однако OFDM

может комбинироваться с множественным доступом с использованием разделения пользователей по времени, частоте или кодированию.

При множественном доступе с ортогональным частотным разделением каналов (OFDMA) множественный доступ с частотным разделением каналов достигается путем классификации различных подканалов OFDM различным пользователям. OFDMA поддерживает дифференцированное качество обслуживания, распределяя различное количество поднесущих по разным пользователям таким же образом, как в CDMA, и, таким образом, сложные схемы планирования пакетов или управления доступом к среде могут быть. OFDMA используется в:

- режим мобильности стандарта IEEE 802.16 Wireless MAN, обычно называемый WiMAX;
- стандарт IEEE 802.20 mobile Wireless MAN, обычно называемый MBWA;
- downlink стандарта мобильной широкополосной связи четвертого поколения 3GPP Long Term Ev (LTE). Радиоинтерфейс был назван High Speed OFDM Packet Access (HSOPA), теперь - Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-U);
- 3GPP 5G NR (New Radio) стандарта сети мобильной связи пятого поколения downlink и uplink. 5G NR является преемником LTE;
- теперь дефектный проект ультрамобильного широкополосного доступа (UMB) Qualcomm/3GPP2, предназначенный как преемник CDMA2000, но замененный LTE.

OFDMA также является возможным способом доступа для *беспроводных региональных сетей* IEEE 802.22 (WRAN). Проект направлен на разработки первого кодового радиостандарта, работающего в УКВ-низком УВЧ-спектре (TV spect);

Последняя поправка к стандарту 802.11, а именно 802.11ax, включает OFDMA для высокой эффективности и одновременной связи.

В многостанционном множественном доступе с кодовым разделением каналов (МС-МДКР), известном также как ОМДМ-МДКР, ОМДР объединяется с расширенным спектром МДКР для кодового разделения пользователей. Межканальные помехи могут быть изменены, что означает, что планирование частоты с ручным фиксированным выделением каналов (FCA) упорядочено, или схемы комплексного динамического распределения каналов (DCA).

Космическое разнообразие

В глобальной широковещательной передаче, основанной на OFDM, могут извлечь выгоду из приема сигналов от нескольких пространственно диспергированных трансмиттеров одновременно, так как трансмиттеры будут только активно взаимодействовать друг с другом на ограниченном количестве субнесущих, тогда как в целом они будут фактически усиливать охват на широкой площади. Это очень выгодно во многих странах, так как позволяет работать национальным одночастотным сетям (SFN), где многие передатчики посылают один и тот же сигнал одновременно по одной и той же частоте канала.

SFN используют доступный спектр более эффективно, чем традиционные многочастотные широковещательные сети (MFN), где содержание программы на различных частотах несущей. SFN также приводят к усилению разнесения в, расположенных посередине между передающими устройствами. Зона покрытия увеличивается, и вероятность отключения уменьшается по сравнению с MFN из-за увеличения уровня принимаемого сигнала, усредненного по всем поднесущим.

Хотя защитный интерфейс содержит только избыточные данные, что означает, что он уменьшает пропускную способность, некоторые системы на основе OFDM, такие как некоторые системы широковещательной передачи, использовать длинный защитный интерфейс для того, чтобы позволить передающим устройствам располагаться дальше друг от друга в SFN, а более длинные защитные интерфейсы позволяют большие размеры ячеек SFN. Правило большого пальца для максимального расстояния между передающими устройствами в SFN равно расстоянию, на котором проходит сигнал во время защитного интервала, например, защитный интервал в 200 микросекунд позволит передающим устройствам быть разнесенными на 60 км друг от друга.

Одночастотная *сеть* является формой трансмиттерного макроразнесения. Эта концепция может быть дополнительно использована в *динамических одночастотных сетях* (DACN), где группирование SFN изменяется с временного интервала на временной интервал.

OFDM может быть объединен с другими формами пространственного разнесения, например, каналами antenna arrais и MIMO. Это делается в стандартах IEEE 802.11 Wireless LAN.

Сигнал OFDM демонстрирует высокое отношение пиковой мощности к средней мощности (PAPR), поскольку независимые фазы поднесущих означают, что они часто объединяются активно. Обработка этого высокого PAPR требует:

- Цифроаналоговый преобразователь высокого разрешения (ЦАП) в трансмиттере;
- Аналого-цифровой преобразователь высокого разрешения (АЦП) в;
- Линейная сигнальная цепь;

Любая нелинейность в сигнальной цепи вызовет интермодуляционное искажение, которое;

- Поднимает шумовой пол;
- Может вызвать взаимные помехи между несущими;
- Генерирует внеполосное паразитное излучение.

Требование к линейности является требованием, особенно для выходной RF-схемы передатчика, где амплификаторы часто проектируются как нелинейные, чтобы минимизировать энергопотребление. В практических системах OFDM небольшое количество пиковых позволяет ограничить PAPR в разумном компромиссе с вышеуказанными последствиями. Однако выходной фильтр трансмиттера, который требуется для уменьшения внеполосных отроков до допустимых уровней, имеет эффект восстановления пиковых уровней, которые были, так что не является эффективным способом снижения PAPR.

Хотя спектральная эффективность ОФДМ является эффективной как для наземной, так и для космической связи, высокие требования к ЭПВОР до сих пор ограничивали применение ОФДМ к наземным системам.

Коэффициент креста CF (в дБ) для системы OFDM с *n* некоррелированными поднесущими равен

где CFc - коэффициент креста (в дБ) для каждого поднесущего (CFc - 3,01 дБ для синусоидальных пластин, используемых для модуляции BPSK и QPSK).

Например, сигнал DVB-T в режиме 2K состоит из 1705 поднесущих, которые модулированы с помощью QPSK, что дает коэффициент роста 35,32 дБ.

Например, были разработаны многие методы снижения PAPR (или фактора роста), основанные на интертайве.

Динамический диапазон, необходимый для FM ver, является, в то время как DAB требует только около как сравнение, каждый дополнительный бит на выборку увеличивает динамический диапазон на

Сравнение эффективности одного носителя и нескольких носителей

Производительность любой системы связи может быть измерена с точки зрения ее энергоэффективности и пропускной способности. Эффективность мощности описывает способность системы связи сохранять частоту битовых ошибок (BER) передаваемого сигнала на низких уровнях мощности. Эффективность полосы пропускания отражает, насколько эффективно используется выделенная полоса пропускания, и определяется как пропускная скорость передачи данных на единицу длины полосы пропускания в данной полосе пропускания.

Обеспечивается экономия ширины полосы пропускания за счет использования модуляции с множеством несущих с ортогональным частотным разделением. Таким образом, ширина полосы пропускания для системы с несколькими несущими меньше по сравнению с системой с одним несущим устройством, и поэтому эффективность ширины полосы пропускания системы с несколькими несущими устройствами больше, чем у системы с одним несущим устройством.

Есть только 1 дБм увеличение мощности ver, но мы получаем 76,7% улучшение эффективности полосы пропускания с использованием передачи с несколькими несущими.

1.10 Применение технологии OFDM

OFDM используется в:

- Цифровое радио Mondiale (DRM);
- Цифровое аудио вещание (DAB);
- Цифровое телевидение DVB-T/T2 (terrestrial), DVB-H (handha), DBB-T/H, DVB-C2 (cable);

- Беспроводные LAN IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac и IEEE 802.11ad;
- WiMAX;
- Ли-Фи;
- ADSL (G.d /ITU G.992.1);
- Мобильные сети LTE и LTE Advanced 4G;
- Безкордовые телефоны DECT;
- Современная узкая и широкополосная связь ЛЭП.

Беспроводные локальные сети (LAN) и сети (MAN)

OFDM широко используется в беспроводных приложениях LAN и MAN, включая IEEE 802.11a/g/n и WiMAX.

IEEE 802.11a/g/n, работающий в диапазонах 4 и 5 ГГц, скорости передачи данных по воздуху для каждого потока варьируются от 6 до 54 Мбит/с. Если оба устройства могут использовать "режим HT" (с добавлением 802.11n), то максимальная скорость передачи данных 20 МГц на поток увеличивается до 72,2 Мбит/с, с опцией скорости передачи данных от 150 МГдо 150 МГ. Используются четыре различные схемы модуляции: BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM, наряду с набором скоростей ошибок (1/2 - 5/6). Множество вариантов позволяет системе адаптировать оптимальную скорость передачи данных для текущих условий сигнала.

Беспроводные персональные сети (PAN)

OFDM также в настоящее время используется в стандарте WiMedia/Ecma-368 для высокоскоростных беспроводных персональных сетей в спектре ultrawideband 3.1 - 10.6 ГГц (см. MultiBand-OFDM).

Эфирное цифровое радио и телевидение

Большая часть Европы и Азии приняла OFDM для наземного вещания цифрового телевидения (DVB-T, DVB-H и T-DMB) и радио (EUREKA 147 DAB, Digital Radio Mondiale, HD Radio и T-DBB).

DVB-T

Согласно директиве Европейской комиссии, все телевизионные услуги, передаваемые зрителям в Европейском сообществе, должны использовать систему передачи, которая была стандартизирована признанным европейским органом стандартизации, и такой стандарт был разработан и кодифицирован DVB Project, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding и modulation для цифровых терастриальных вызовов Dvm. DVB-T в настоящее время широко используется в Европе и els для террестрального цифрового ТВ.

Ключевые особенности стандартов DVB-T/DVB-T2

Название стандарта	DVB-T	DVB-T2
Год ратификации	1997	2007
Диапазон частот (МГц)	174–230 470–862	–
Ширина полосы канала, *B* (МГц)	6, 7, 8	1.7, 5, 6, 7, 8, 10
Размер БПФ (*k*=1024)	2k, 8k	1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k
Количество задействованных поднесущих, *N*	Режим 2K: 1,705 Режим 8K: 6,817	853–27,841 (от 1K до 32K)
Схема модуляции поднесущих	QPSK, 16QAM или 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Длина символа, T_U (нс)	Режим 2K: 224 Режим 8K: 896	112–3,584 (от 1K до 32K для канал 8МГц)
Защитный интервал, T_G	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128, 1/4

Активация Windows

Название стандарта	DVB-T	DVB-T2
Частотный разнос между поднесущими,	Режим 2K: 4,464 Режим 8K: 1,116	279–8,929 (от 32K до 1K)
Скорость передачи данных (Мбит/с)	4.98–31.67 (типично 24.13)	Типично 35.4
Спектральная эффективность , *R/B* ((бит/с)/Гц)	0.62–4.0 (типично 3.0)	0.87–6.65
Внутренний корректирующий код	Свёрточный код 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	Низкоплотностный код 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Внешний корректирующий код	Код Рида-Соломона	Код Боуза-Чоудхури-Хоквингема

Рисунок 1.1 - Ключевые особенности стандартов DVB-T/DVB-T2

COFDM и VSB

Вопрос об относительных технических достоинствах COFDM и 8VSB для наземного цифрового телевидения был предметом некоторого контроля, особенно между европейскими и североамериканскими деятелями и регуляторами. Соединенные Штаты отклонили несколько предложений о принятии системы DVB-T на основе COFDM для своих услуг цифрового телевидения и вместо этого выбрали операцию 8VSB (vestigial sideband modulation).

Одно из основных преимуществ, обеспечиваемых COFDM, заключается в том, что радиопередачи Рени относительно несущественны, чтобы искажение и затухание сигнала из-за атмосферных условий или прохождения самолета. Сторонники COFDM утверждают, что он изменяет размер намного лучше, чем 8VSB. Ранний 8VSB DTV (цифровое телевидение) часто имел трудности с

получением сигнала. Также COFDM допускает одночастотные сети, что невозможно с 8VSB.

Тем не менее, новые 8VSB намного лучше справляются с ath, поэтому разница в производительности может уменьшиться с улучшениями в дизайне выравнивателя.

Цифровое радио

COFDM также используется для других стандартов радио, для цифрового аудио вещания (DAB), стандарта для цифрового аудио вещания на частотах ОВЧ, для цифрового радио Mondiale (DRM), стандарта для цифрового вещания на коротковолновых и средних частотах (ниже 30 МГц) и для DRM + более недавно введенного стандарта для цифрового аудио вещания на частоте 17HF.

В США снова используется альтернативный стандарт, проприетарная система, разработанная компанией iBiquity под названием HD Radio. Тем не менее, он использует COFDM как низменную технологию вещания для добавления цифрового аудио в AM (средние волны) и FM вещание.

Как Digital Radio Mondiale, так и HD Radio классифицируются как внутриполосные внутриканальные системы, в отличие от Eureka 147 (DAB: Digital Audio Broadcasting), которая использует отдельные диапазоны частот ОВЧ или УВЧ.

BST-OFDM используется в ISDB

Система широкополосного ортогонального частотного разделения передачи (BST-OFDM), предложенная для Японии (в ISDB-T, ISDB-TSB и системах широковещания ISDB-C), улучшает работу COFDM, используя тот факт, что некоторые несущие OFDM могут быть модулированы в пределах других. Некоторые формы COFDM уже предлагают такой вид иерархической модуляции, хотя BST-OFDM призван сделать его более гибким. Следовательно, телевизионный канал 6 МГц может быть "сегментированным", причем различные сегменты модулируются по-разному и используются для различных услуг.

Возможно, например, посылать аудиосервис в сегменте, который включает в себя сегмент, состоящий из нескольких несущих, сервис данных в другом сегменте и телевизионный сервис в еще одном сегменте все в пределах того же телевизионного канала 6 МГц. Кроме того, они могут быть модулированы с различными параметрами, так что, например, аудио- и информационные услуги могут быть оптимизированы для мобильного приема, в то время как телевизионная служба оптимизирована для стационарного приема в среде с высоким передачи.

Ультраширокополосный

Технология ультраширокополосной (UWB) беспроводной персональной сети также может использовать OFDM, например, в многополосной OFDM (MB-OFDM). Эта специализация UWB поддерживается WiMedia Alliance (ранее как Multiband OFDM Alliance [MBOA], так и WiMedia Alliance, но теперь они слились), и является одним из конкурирующих радиоинтерфейсов UWB.

Развитие технологий мобильных устройств, беспроводных локальных сетей (WLAN) и стремительный рост Интернет вызывают всё возрастающую потребность в увеличении ёмкости мобильных сетей. Возникает потребность во всё большей интеграции сотовых сетей с сетями передачи данных, например, GPRS в GSM сетях, а также сети 3G и 4G. Однако существующие технологии не могут удовлетворить новых потребностей по ёмкости сети, скорости передачи и стоимости услуг. OFDM — ортогональное частотное мультиплексирование — это схема модуляции, которая позволяет быстро и эффективно передавать данные даже в каналах с многолучевым распространением сигнала. Передача ведется одновременно на большом количестве несущих частот. Эти несущие имеют небольшое разнесение по частоте и их спектры образуют групповой спектр OFDM сигнала. Использование технологий ортогонального частотного (OFDM) и пространственного (MIMO) разнесения в современных беспроводных системах связи широкополосного доступа позволяет достичь увеличения информационной эффективности в условиях многолучевого распространения сигнала и, как следствие, повысить помехоустойчивость рассматриваемых систем. При этом значительное влияние на эффективность помехоустойчивого приема в условиях частотной и временной избирательности каналов оказывает точность фазовой синхронизации и оценивания канальных характеристик. Существующие подходы к моделированию сигнала и оцениванию его параметров имеют либо высокую вычислительную сложность, либо недостаточную точность для использования в MIMO-OFDM системах, характеризующимися высокой чувствительностью к ошибкам синхронизации и оценивания. Математическая модель MIMO-OFDM сигнала, учитывающая частотную и временную избирательность канала связи и условие неполной синхронизации, установленной в приемнике, позволяет повысить точность оценивания коэффициентов передачи канала и смещения частоты, несущей на приемной стороне. В результате сравнительного анализа представленных алгоритмов в многолучевых каналах были сделаны выводы о точности получаемых оценок смещения несущей частоты и о возможностях практического применения подобных методов в системах с OFDM.

1.11 Общие принципы построения модемов, реализованных по технологии OFDM

Метод OFDM, является сочетанием модуляции и мультиплексирования. ФМультиплексирование – способ передачи нескольких потоков (каналов) данных по одному каналу. В OFDM задача мультиплексирования применяется для отдельных сигналов, которые являются подмножеством одного основного 64 сигнала. Т.е. сам сигнал сначала разбивается на отдельные каналы, они модулируются данными, а затем повторно мультиплексируется для создания OFDM несущей. Способ OFDM использует ортогональные несущие. Частоты

этих несущих являются кратными некоторой основной частоте f0 и расположены в полосе частот, отведенной для передачи данных. На практике частоты несущих соответствуют уравнению Un(t) =U0cos [2π(f0+ n/TS)t] где f0– начало интервала, в котором производится частотное уплотнение; n – номер несущей частоты, находящийся в диапазоне от 0 до (N-1), где N – порядковый номер поднесущей.; TS– длительность интервала передачи одного символа. Анализ данного выражения подтверждает, что несущие действительно являются ортогональными, т.е. их среднее (по времени) произведение равно нулю, $\frac{1}{T}\int_0^T \sin(\frac{2\pi k\Delta Vt}{Fs})\sin\left(\frac{2\pi n\Delta Vt}{Fs}\right)dt = 0, n \neq k.$ Их независимость означает возможность разделения частотных каналов на приеме при частичном перекрытии их боковых полос. Упрощенная схема, иллюстрирующая процессы модуляциФи и демодуляции OFDM, представлена на рисунке 1.2 Блок S/P выполняет преобразование входного одномерного массива битовых символов длинной L*M*K в двумерный массив битовых символов размером L×(M*K), где L – число OFDM символов, которые можно сформировать из данного блока, M – основание модуляции, K – число поднесущих, лежащих внутри полосы частот радиоканала. При этом K определяется как отношение рабочей полосы частот к расстоянию между поднесущими, округленное в меньшую сторону до целого.

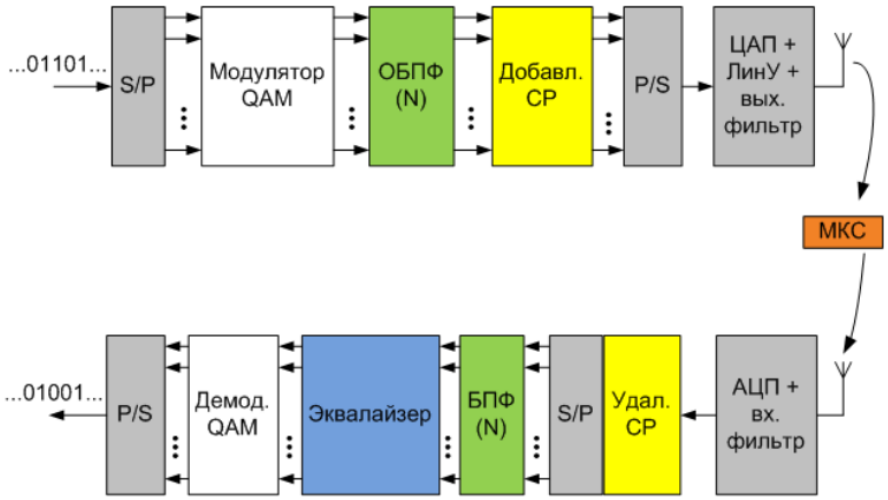

Рисунок 1.2 - Упрощенная схема OFDM модема.

Блок QAM (квадратурно - амплитудная модуляция) модулятора выполняет преобразование M входных битов в комплексное число, соответствующее координатам точки созвездия. В случае, если число точек созвездия меньше 16, то вместо QAM модулятора применяется PSK (фазовая модуляция) модулятор. В ходе выполнения данной работы особое внимание было уделено DPSK и DQAM-модуляции в связи с ее простотой и высокой помехоустойчивостью. При использовании этого метода обычно сравнивают фазы и амплитуды соседних по времени элементов. Но этот вариант модуляции при низких скоростях манипуляции имеет помехоустойчивость существенно ниже потенциально

достижимой из-за большого набега фазы в течение длительности элемента по причине частотной нестабильности аппаратуры связи и из - за эффекта Доплера, обусловленного как перемещением слоев атмосферы, так и перемещением объектов, на которых расположены радиостанции. 66 Блок ОБПФ работает в два этапа. На первом этапе производится создание массива из N элементов, заполненного нулями, при этом для выполнения быстрого обратного преобразования Фурье N берется равным степени 2N=2R. Первый этап необходим для выделения памяти под все спектральные составляющие. На втором этапе выбирается M×K элементов с выхода QAMмодулятора, которыми заполняются элементы нулевого массива. Второй этап соответствует заполнению частотной области внутри рабочей полосы сигнала соответствующими спектральными компонентами. После этого происходит преобразование из частотной области во временную путем выполнения операции вычисления обратного преобразования Фурье. В [96-99] описаны наиболее часто применяемые способы выполнения преобразования Фурье. После этого блока размерность выходного массива становится равной L×N.

$$\mathrm{f(t)} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f(w)e^{itw}\,dw \qquad (1.1)$$

Для того чтобы устранить возникающие в канале эффекты временного рассеяния, приводящие к межсимвольной интерференции (МСИ), перед началом OFDM-символа необходимо вставить фрагмент длительностью, превышающей межмодовую задержку (защитный интервал). Этот фрагмент является точной копией последних отсчетов OFDM-символа. Количество отсчетов, используемых для образования защитного интервала, определяется частотой дискретизации и условиями передачи. На рисунке 1.3 показана структура сформированного OFDM-символа с защитным интервалом. После установления защитного интервала размерность полученной двухмерной матрицы будет L×(N+Ng), где Ng - число точек защитного интервала. После того как все OFDM-символы созданы, необходимо последовательно передать их на возбудитель. Функцию преобразования из множества независимых OFDM-символов в их непрерывную последовательность символов, следующих друг за другом по времени, выполняет блок P/S модулятора.

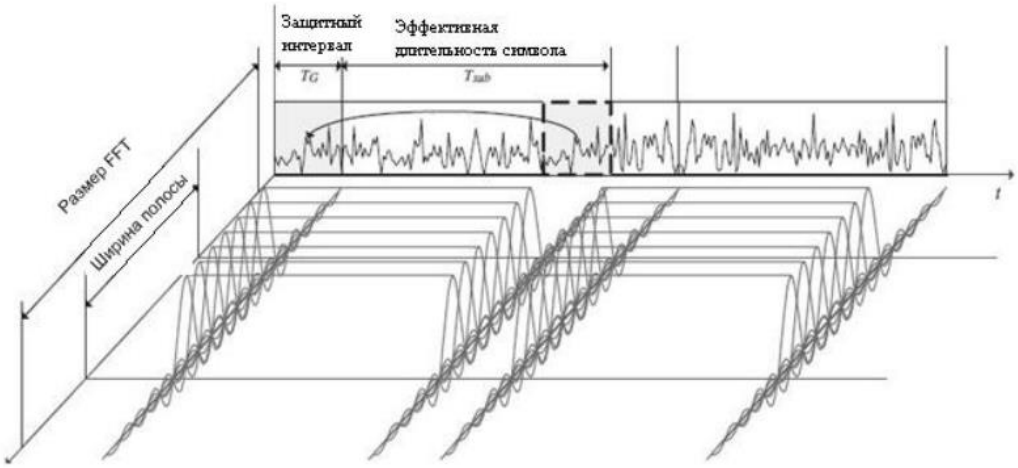

Рисунок 1.3 - Структура OFDM символа в частотно-временной области.

Далее сигнал фильтруется с целью устранения внеполосных излучений, которые возникают при переходе от одного OFDM-символа к другому. На блок QAM (DQAM или DPSK) -демодулятора поступают комплексные амплитуды поднесущих. В случае некогерентной демодуляции (DQAM или DPSK) от комплексных амплитуд спектральных составляющих переходят к комплексным векторам, содержащим в модуле отношение амплитуд соседних поднесущих, а в аргументе разность фаз между соседними поднесущими. Если кодеру требуются жесткие решения, каждой точке созвездия Aii=(0...2^N -1) ставится в соответствие ее битовое представление Bi. Решения выдаются следующим образом:

$$[L,k] = \min(\sqrt{Re(A_i - Re(S))^2 + (Im(A_i - Im(S))^2)} \quad (1.2)$$

$S=B_k$

Здесь min– функция нахождения минимума по всем значениям, которые может принимать i, L– минимальное расстояние от принятого значения S до 68 ближайшей точки созвездия, k– номер ближайшей точки созвездия Ak, от которой расстояние до S равно L. Для получения мягких решений необходимо провести ряд действий:

1. Оценить отношение сигнал помеха по СКО от ближайших точек созвездия: $\sigma = 20\lg(\frac{Z}{\sum_{k=1}^{N}\frac{M_k}{N}})\sqrt{2}$

где N- число поднесущих в OFDM-сигнале,

$$M_k = \min(\sqrt{(Re(A_i) - Re(S_k))^2 + (Im(A_i) - Im(S_k)} \quad (1.3)$$

Mk – расстояние до ближайшей от S_k точки созвездия.

Z- константа, меньшая 1, представляющая собой усредненное значение амплитуд всех точек созвездия. для PSK модуляции Z равна 1, для QAM

$$LLR_{Nm+k} = -2\sigma\ln\left(\frac{\sum_{B_i^k==1}^{2^{N-1}} e^{-\frac{1}{2\sigma}\sqrt{(Re(A_i)-Re(S_m))^2+(Im(A_i)-Im(S_m))^2}}}{\sum_{B_i^k==0}^{2^{N-1}} e^{-\frac{1}{2\sigma}\sqrt{(Re(A_i)-Re(S_m))^2+(Im(A_i)-Im(S_m))^2}}}\right. \quad (1.4)$$

здесь i– номер точки созвездия, k– номер бита в битовой последовательности, соответствующей i-ой точке созвездия, m– номер поднесущей, 2^N– число точек созвездия. Данный логарифм правдоподобия представляет собой логарифм отношения вероятностей того, что принятый бит является единицей к тому, что принимаемый бит является нулем. Чем ближе модуль значения LLR к нулю, тем меньше этой оценке стоит доверять и тем больше вероятность того, что этот символ принят ошибочно.

2 ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МОДЕМА, РЕАЛИЗОВАННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ OFDM, ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ДУПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Поскольку скорость потока цифровой речи с выхода вокодера остается достаточно высокой и, кроме того, она увеличивается в kсж раз, для передачи цифрового сигнала необходим высокоскоростной модем, в качестве которого может быть принят OFDM предлагаемый в главе 2 модем. Модем разработан по алгоритму модема УПС-4,8 КВ [129] с незначительными изменениями. Как и в УПС-4,8 КВ манипуляция сигнала осуществляется изменением разности фаз соседних поднесущих OFDM-сигнала (вид манипуляции OFDM-DPSK-F). Эффективное расстояние между поднесущими в этом методе манипуляции сигнала будет ограничиваться снизу величиной, пропорциональной частотному рассеянию, а сверху – величиной, пропорциональной интервалу частотной когерентности.

В таблице 2.1 приведены результаты сопоставления существующему в канале условию распространения сигнала соответствующей длительности OFDM-символа для каждого сочетания параметров канала (частотное рассеяние, межлучевая задержка) и для набора возможных расстояний между поднесущими, полученные методом имитационного моделирования. Как видно из этой таблицы, для случаев плохого и среднего канала оптимальное расстояние между поднесущими равно 12 Гц, для случая хорошего канала 4 Гц. При этом длительность OFDM-символа Ts должна выбираться из условия 107 $T_s\Delta f = 1$, т.к. это обеспечивает ортогональность сигналов, передаваемых на разных поднесущих.

Полоса сигнала B, формируемого параллельным модемом (в нашем случае это 3,1 кГц), разделена на N поднесущих с частотным разнесением Δf. Каждая поднесущая модулируется соответствующим сигнальным созвездием (DBPSK, DQPSK, DPSK-8, QAM-16 или QAM-32), при этом демодулятор формирует и подает на вход декодера мягкие решения. Выбранный метод манипуляции OFDM-DPSK-F обеспечивает возможность эффективной демодуляции сигнала при низких скоростях манипуляции, в то время как обычно используемый метод манипуляции разностями фаз одинаковых поднесущих соседних OFDM-сигналов при низких скоростях манипуляции имеет помехоустойчивость существенно ниже потенциально достижимой изза большого набега фазы в течение длительности элемента, по причине частотной нестабильности аппаратуры связи и из-за эффекта Доплера, обусловленного как перемещением слоев атмосферы, так и перемещением объектов, на которых расположены радиостанции.

В параллельных модемах влияние временного рассеяния канала, вызванное многолучевостью, компенсируется вставкой защитного интервала Tз. Межсимвольная интерференция не будет проявляться, если $T_з > \tau_m$, где τ_mмаксимальная разность хода между лучами в канале. Влияние частотного

рассеяния канала (доплеровское рассеяние), которое приводит к интерференции соседних поднесущих, не будет проявляться при выборе частотного разноса между поднесущими $\Delta f >> \nu d$, где νd-максимум доплеровского рассеяния.

Около 10% поднесущих, равномерно распределенных по полосе сигнала, являются пилот - сигналами, которые необходимы для осуществления частотной и временной синхронизации. При использовании QAM созвездий пилот-сигналы используются также для нахождения амплитудно-фазовых искажений поднесущих, для их последующей коррекции. При выбранном методе манипуляции OFDM-DPSK-F при 108 использовании QAM созвездий достаточно определять только амплитудные искажения, т.к. манипуляция сигнала по фазе обеспечивается изменением разности фаз соседних поднесущих.

Для уточнения требуемых характеристик модема зададимся конкретными параметрами системы связи. Определим максимальную протяженность радиолинии L = 3000 км, тогда время распространения сигнала tp составит tp =10 мс. Для обеспечения переключения радиостанции из режима передачи в режим приема положим защитный интервал tз =10 мс. Длительность синхровставки примем tсинх= 8 мс. Выберем длительность OFDM символа TOFDM равной длине кванта передаваемого сигнала TOFDM=Tкв = 100 мс, при этом частотный разнос поднесущих в модеме будет Δf = 10 Гц, что близко к оптимальному значению в соответствии с таблицей 1. В полосе 3,1 кГц уместится 308 поднесущих, с учетом отбрасывания крайних. Каждая 10-я поднесущая отводится под передачу пилот-сигнала, при этом 277 поднесущих отводится для передачи информации и 31 поднесущая – для передачи пилотсигналов.

Длительность цикла приемо-передачи найдем из выражения [126]

$$T= 2T_{кв} + 2t_р + 2t_з + 2t_{синх} = 256 \text{ мс} \qquad (2.1)$$

Значение kсж найдем из формулы (2.5.1) kсж = 2,56.

Для дополнительного сжатия цифровой информации в kсж раз нужно увеличить во столько же раз скорость цифрового потока после вокодера. Это обеспечивается формирователем посылки, см. рис. 1. Т.о., после вокодеров 600, 1200 и 2400 бит/с на вход модема цифровая информация будет поступать со скоростями соответственно 1536, 3072 и 6144 бит/с.

В состав модема входит также канальный кодер, который обеспечивает защиту передаваемой информации от ошибок путем избыточного кодирования. В качестве помехоустойчивого избыточного кода для реализации в модеме был выбран турбокод, являющийся одним из наиболее эффективных кодов [130]. В модеме были реализованы кодовые скорости 1/2, 2/3 и 3/4. Избыточное кодирование, применяемое в канальном кодере, снижает 109 значение информационной скорости, реализуемое модемом. В таблице 2.5.2 представлены значения информационной скорости, реализуемые модемом при разных видах модуляции и принятых значениях кодовой избыточности, для выбранных значений параметров TOFDM = 100 мс, Δf= 10 Гц, ΔF = 3,1 кГц доля пилот -

сигналов равна 10%. Представленная таблица позволяет выбирать тип созвездия и кодовую скорость для передачи цифрового потока от заданного вокодера и заданного коэффициента kсж.

На рис. 2.1 представлены характеристики помехоустойчивости в АБГШ - канале разработанного модема для созвездий DBPSK (кривая OFDM m=2) и DQPSK (кривая OFDM m=4) и требования по помехоустойчивости, регламентируемые для модемов УПС. ТЧР в стандарте [131] для этих же созвездий, соответственно (кривая УПС ТЧР m=2) и (кривая УПС ТЧР m=4). Таблица 2.1 Расчетные информационные скорости потока цифровой информации (бит/с) для различных СКК для TOFDM = 100 мс, Δf = 10 Гц, ΔF = 3,1 кГц, доля пилот - сигналов равна 10%

Таблица 2.1 - характеристики помехоустойчивости в АБГШ - канале

Тип модуляции	Кодовая скорость			
	1/1	3/4	2/3	1/2
DBPSK	2770	2078	1847	1385
DQPSK	5540	4155	3693	2770
DPSK-8	8310	6232	5540	4155
QAM-16	11080	8310	7387	5540
QAM-32	13850	10388	9234	6925

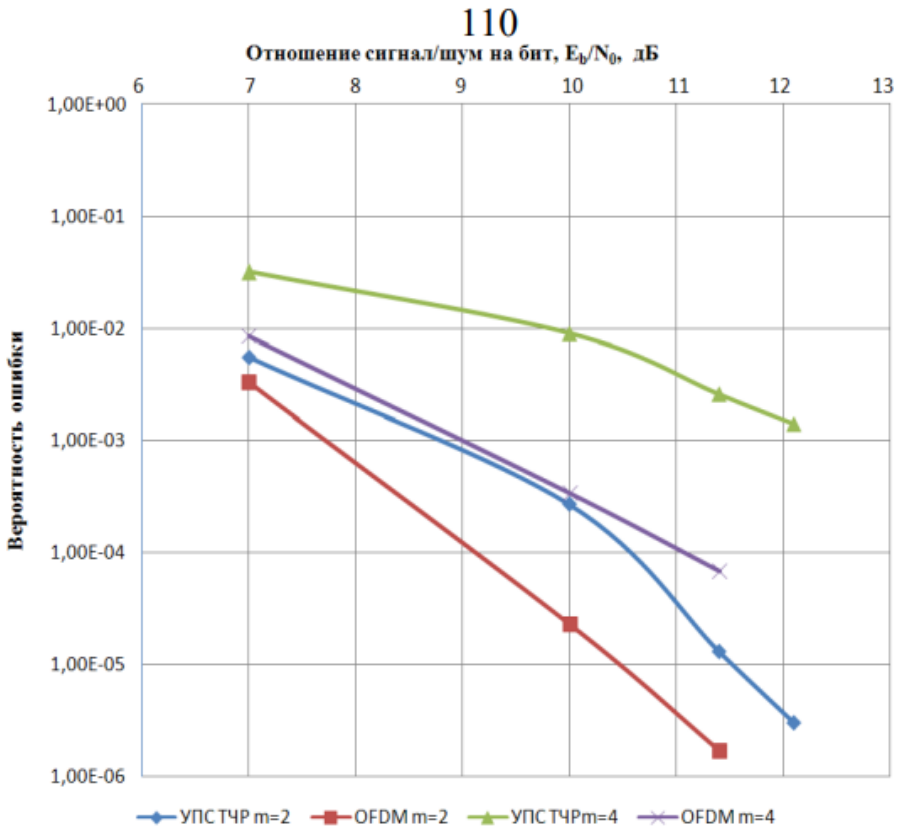

Рисунок 2.1 - Сравнение характеристик помехоустойчивости разработанного модема и требований к модему стандарта.

Из рис. 2.1 видно, что помехоустойчивость разработанного модема в канале с АБГШ превышает помехоустойчивость, регламентируемую стандартом. Так как по данным, приведенным на рисунке 2.2, невозможно провести сравнительный анализ и оценить работоспособность разработанного модема с современными зарубежными модемами в каналах, отличных от АБГШ, было принято решение сопоставить результаты моделирования предлагаемого модема с кривыми помехоустойчивости из работы [132] для различных условий распространения сигналов. Измерения для модемов проводились в полосе 3,1 кГц, длина перемежителя составляла 0.6 с, 0.48 с и 0.5 с для MILSTD-188-110C, MIL-STD-188-110B и для предлагаемого модема соответственно. В качестве скоростей передачи данных были выбраны скорости выходного потока речевого вокодера MELP, а именно 2400 и 1200 бит/с. Параметры сигнально-кодовой конструкции были следующими:

- для скорости передачи данных 2400 бит/с 1. В MIL-STD-188-110C используется модуляция QPSK с кодовой скоростью сверточного кода 9/16; 2. В MIL-STD-188-110B используется модуляция PSK-8 с кодовой скоростью сверточного кода 1/2; 3. В предлагаемом модеме используется модуляция DQPSK с кодовой скоростью турбо кода R=1/2; - для скорости передачи данных 1200 бит/с 1. В MIL-STD-188-110C используется модуляция BPSK с кодовой скоростью сверточного кода 1/3; 2. В MIL-STD-188-110B используется модуляция BPSK с кодовой скоростью сверточного кода 1/2; 3. В предлагаемом модеме используется модуляция DBPSK с кодовой скоростью турбо кода R=1/2. Результаты моделирования для случая плохого по ITU-R канала представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Результаты моделирования для случая плохого по ITU-R канала

Стандарт	Скорость (бит/с)	E_s/N_o(дБ) для $P=5*10^{-2}$	E_s/N_o (дБ)для $P=2*10^{-2}$
MIL-STD-188-110C	2400	6.9	7.2
Предлагаемый модем	2440	4.8	5.9
MIL-STD-188-110B	2400	10.4	10.7
MIL-STD-188-110C	1200	4.5	4.9
Предлагаемый модем	1210	2.7	3.1
MIL-STD-188-110B	1200	5.5	5.7

Таблица 2.3 - Результаты моделирования для случая канала с АБГШ

Стандарт	Скорость (бит/с)	E_S/N_0(дБ) для $P=5*10^{-2}$	E_S/N_0 (дБ)для $P=2*10^{-2}$
MIL-STD-188-110C	2400	2.7	2.9
Предлагаемый модем	2440	3.7	3.8
MIL-STD-188-110B	2400	6.2	6.5
MIL-STD-188-110C	1200	1.2	1.24
Предлагаемый модем	1210	0.9	1.4
MIL-STD-188-110B	1200	2.2	2.5

Как видно из таблиц 2.5.3 и 2.5.4, отношения сигнал/помеха в полосе стандартного телефонного канала для предлагаемого модема и модемов из стандартов MIL-STD-188-110C и MIL-STD-188-110B отличаются незначительно, а в случае плохого канала предлагаемый модем превосходит стандартные модемы для скорости 2400 бит/с на 1,3 дБ, для скорости 1200 бит/с на 1.8 дБ. Приведенный сравнительный анализ является доказательством соответствия разработанного модема современным стандартам передачи данных.

3 РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ OFDM МОДУЛЯТОРОВ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ

Испытания проводились в виде последовательности сеансов. Для каждого сеанса были заданы в виде временного расписания: время начала сеанса, класс излучения и частота настройки. Схема проверки модема в реальном радиоканале приведена на рисунке ниже

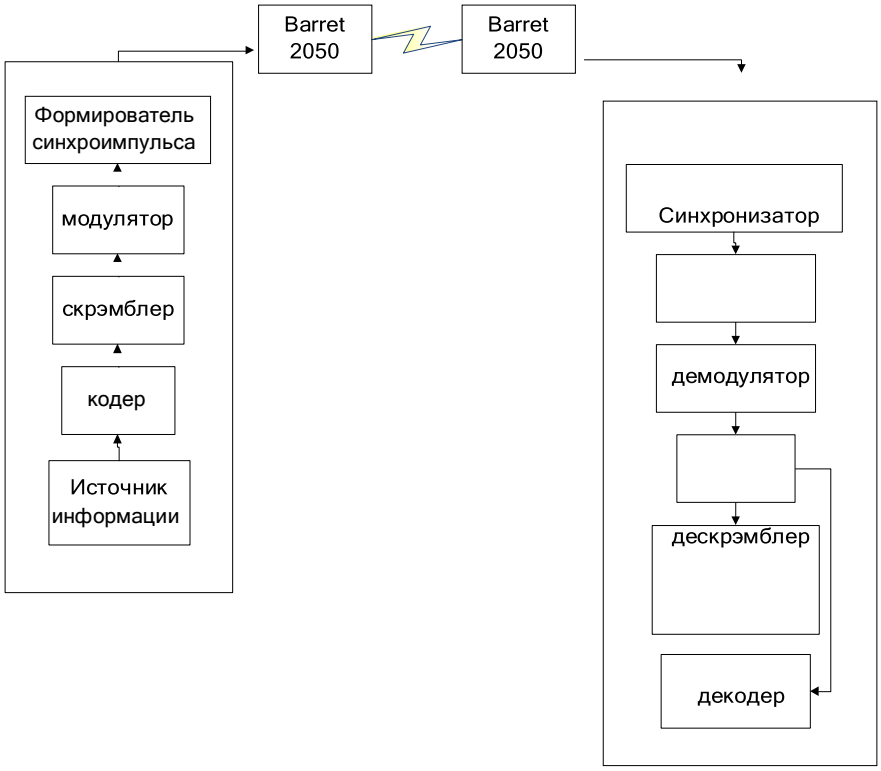

Рисунок 3.1 - Схема проверки работы модема с реальным радиоканалом

В соответствии с прогнозом на время испытаний были назначенычастоты:

15761 кГц, 15801 кГц, 15805 кГц, 15843 кГц, 16059 кГц, 16925 кГц, 17467кГц, 18782 кГц, 19396 кГц, 20535 кГц, 21270 кГц, 21746 кГц, 24395 кГц и 25680кГц.

Радиоданные были выделены для следующих условий:

- класс излучения J7W;
- максимальная ширина спектра сигнала 1800 Гц (определяется техническими характеристиками трансивера BARRETT 2050). Максимально возможная полоса передачи была равна 1800 Гц. В первую очередь это было обусловлено неравномерностью АЧХ передатчика, изображенной на рисунке 3.1.

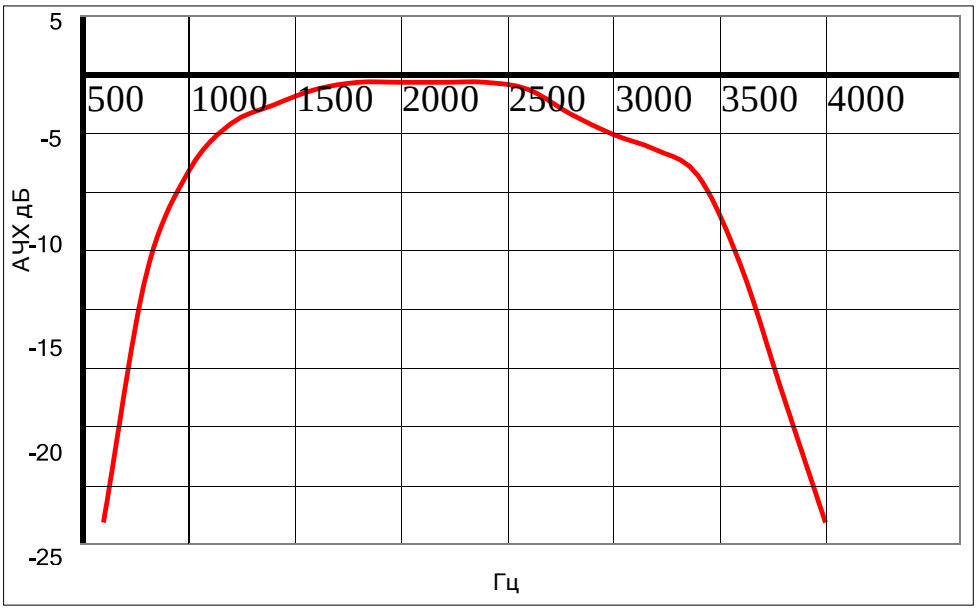

Рисунок 3.2 - АЧХ трансивера Barrett 2050.

Как видно из рисунка 3.2, возможная для использования полоса частот ограничена уровнем АЧХ, равным минус 3 дБ, и лежит в области 600-2400 Гц.

- Мощность передатчика во всех испытаниях была 125 Вт.
- Для получения зависимости КИД от мощности сигнала при оценке вероятности ошибки ширина спектра излучаемого сигнала уменьшалась с сохранением его мощности, а результирующая мощность оценивалась из расчета излучения сигнала в полосе однополосного канала связи, равной 3100Гц.

Для обеспечения измерения вероятности ошибок 10^{-2} передавалось как минимум 25 OFDM-символов с числом бит от 22 до 826 на один символ. В качестве информационной последовательности была выбрана периодически повторяющаяся априорно известная 13-элементная последовательность Баркера, (1111100110101), имеющая минимальный уровень боковых лепестков автокорреляционной функции 1/N.

Обработка результатов трассовых испытаний

1. Результаты измерения помехоустойчивости по 1 пункту методики изображены в графической форме для различного расстояния между поднесущими на рисунках 3.2-3.3 Как видно из рисунков 3.2-3.3, алгоритм частотной синхронизации работает в условиях различных частотных сдвигов, что следует из того, что вероятность ошибки не зависит от величины доплеровского сдвига при различных видах модуляции и полосах пропускания. Незначительное изменение средней вероятности ошибки при различных доплеровских сдвигах частоты на рисунках 3.2-3.3 вызвано недостаточным количествомизмерений, а также тем, что измерения при различных отстройках частоты проводились последовательно и за время измерения условия в канале

распространения успевали измениться. Из этих рисунков следует, что, используя данный модем, возможно организовать связь с реактивным самолетами, движущимися со скоростью 3 Маха на частотах связи до 10 МГц, а на более высоких частотах требуется компенсация 100 и более Гц. Данное ограничение на величину доплеровского сдвига, равного 50 Гц, является программным и может быть увеличено до 150 Гц, что скажется лишь на вычислительных затратах модема в процессе организации частотной синхронизации.

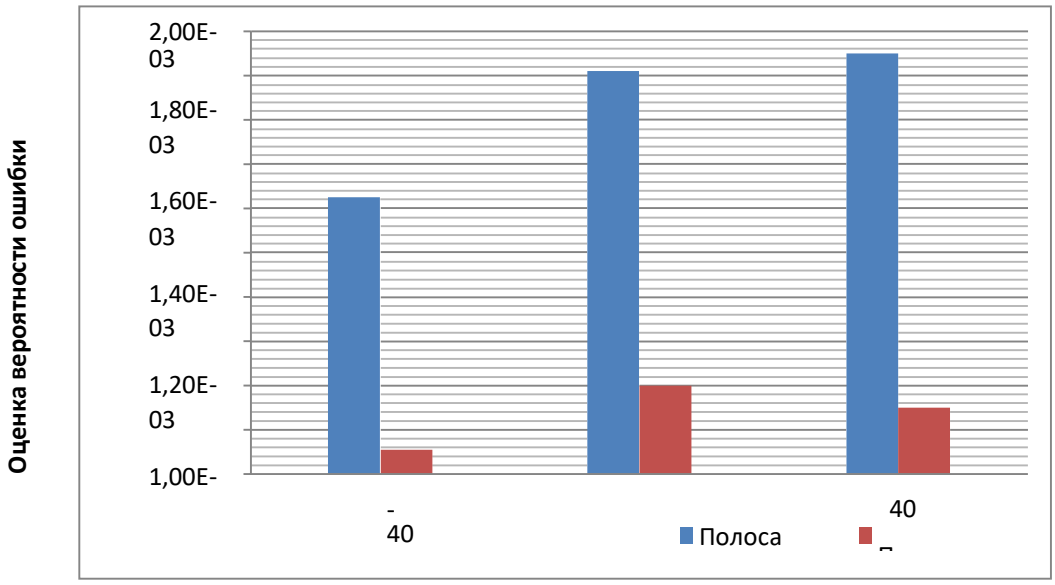

Рисунок 3.3 - Оценка средней вероятности ошибки при различных рабочих полосах частот в условиях доплеровского сдвига частоты, расстояния между поднесущими 4 Гц и модуляции OFDM-DPSK-8 (8 точек созвездия).

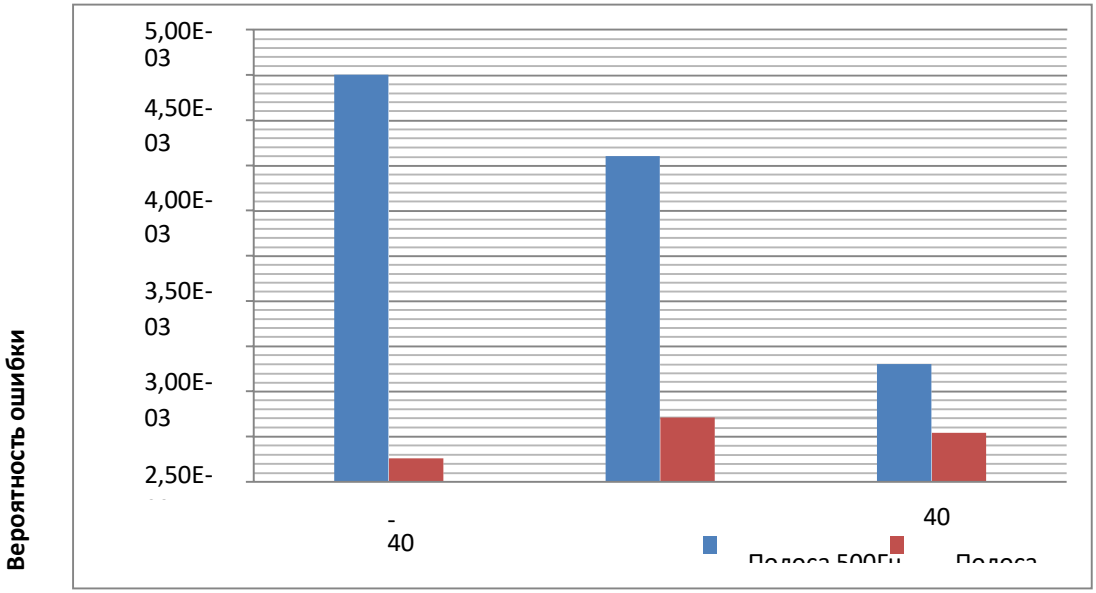

Рисунок 3.4. Оценка средней вероятности ошибки при различных рабочих полосах частот в условиях доплеровского сдвига частоты, расстояния между поднесущими 8 Гц и модуляции OFDM-DPSK-8 (8 точек созвездия).

Результаты измерения помехоустойчивости в зависимости от величины полосы пропускания по 2 пункту методики приведены в приложении, а также изображены в графической форме для различного расстояния между поднесущими на рисунке 3.5

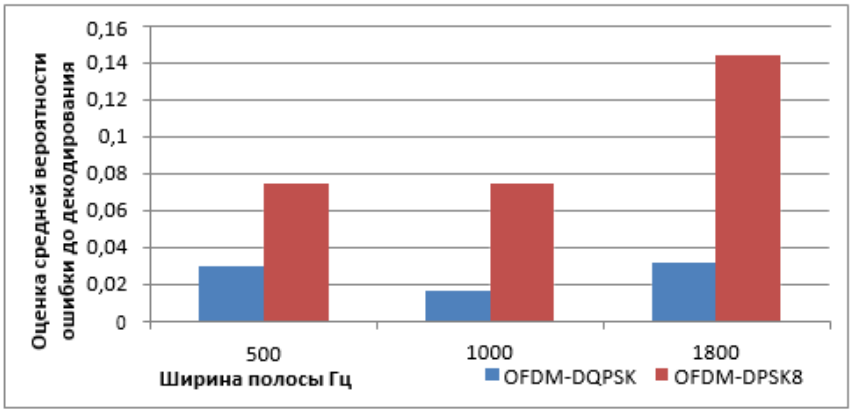

Рисунок 3.5 Зависимость оценки средней вероятности ошибки на выходе демодулятора от величины рабочей полосы для расстояния между поднесущими 8 Гц при одной и той же общей мощности излучаемого передатчиком сигнала.

Однако с увеличением полосы рабочих частот происходит увеличение длины кодового слова и возрастает исправляющая способность кода и, как видно из рисунков 3.5, 3.6, уменьшается вероятность ошибки на бит после декодирования.

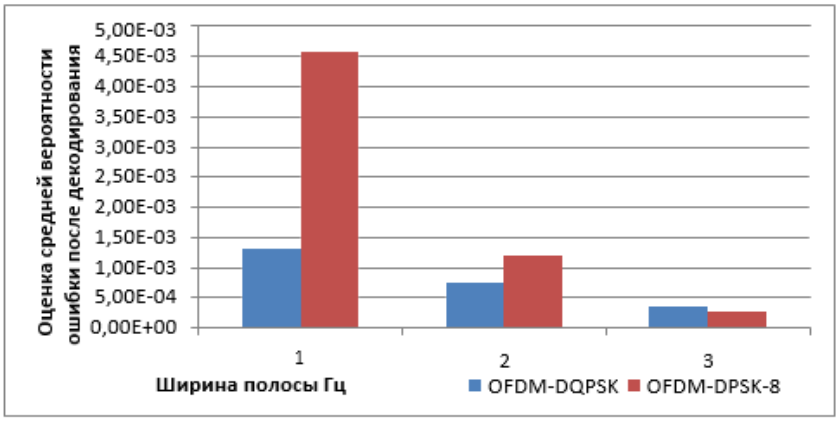

Рисунок 3.6 - Зависимость оценки средней вероятности ошибки на выходе демодулятора от величины рабочей полосы для расстояния между поднесущими 8 Гц при одной и той же общей мощности излучаемого передатчиком сигнала.

Согласно 3 пункту методики испытаний была определена оценка вероятности ошибок. По результатам измерений строились интегральные функции распределения КИД (процент принятых телеграмм с заданным качеством) в сеансе для заданной скорости передачи сообщения. Измерения проводились для модуляции DPSK-8 и полосы 1800 Гц. Энергия, приходящаяся на каждую поднесущую, в этих случаях отличается на 2 дБ при одинаковой мощности излучаемого сигнала. С увеличением полосы КИДбудет сохраняться при условии сохранения энергии, приходящейся на поднесущую. Таким образом, увеличив в 12,4 6,2 и 3,4 полосу пропускания и энергию передатчика, можно получить зависимость КИД от мощности излучаемого сигнала в полосе 6200 Гц при скорости передачи 9600 бит/с. На рисунке 3.2.9 приведен график зависимости КИД от мощности излучаемого сигнала, полученный по результатам трассовых измерений КИД для полос 1800 Гц.

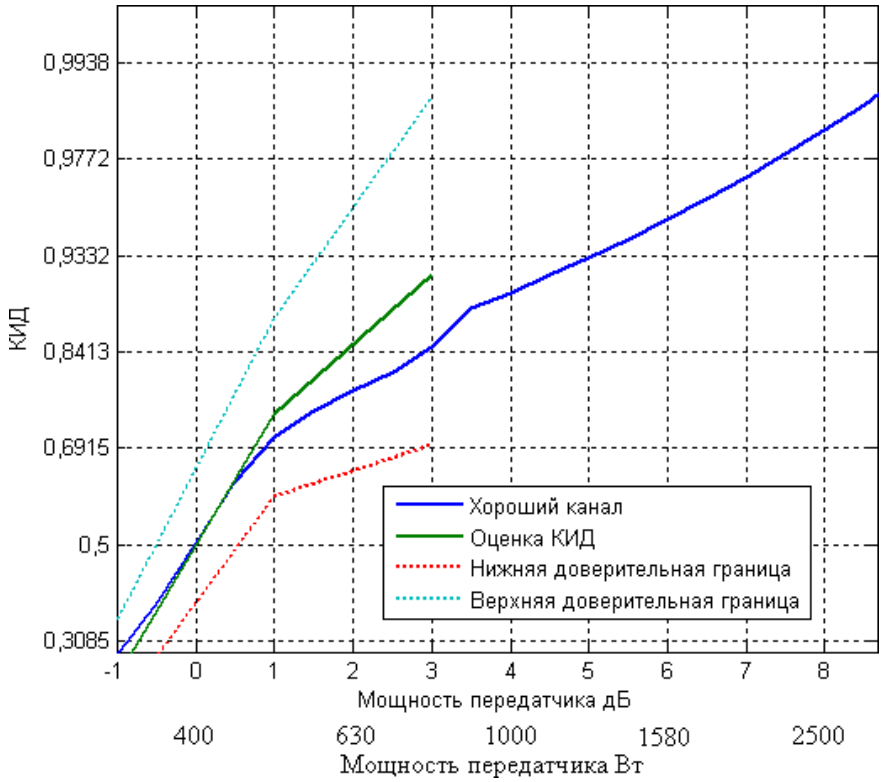

Рисунок 3.7 - Сравнение теоретической кривой КИД, полученной в хорошем канале с оценкой КИД, выявленной экспериментально для режима OFDM- DPSK-8, скорость кода R=2/3, рабочая полоса 6200 Гц.

Общий алгоритм данного метода представлен на рисунке 3.8

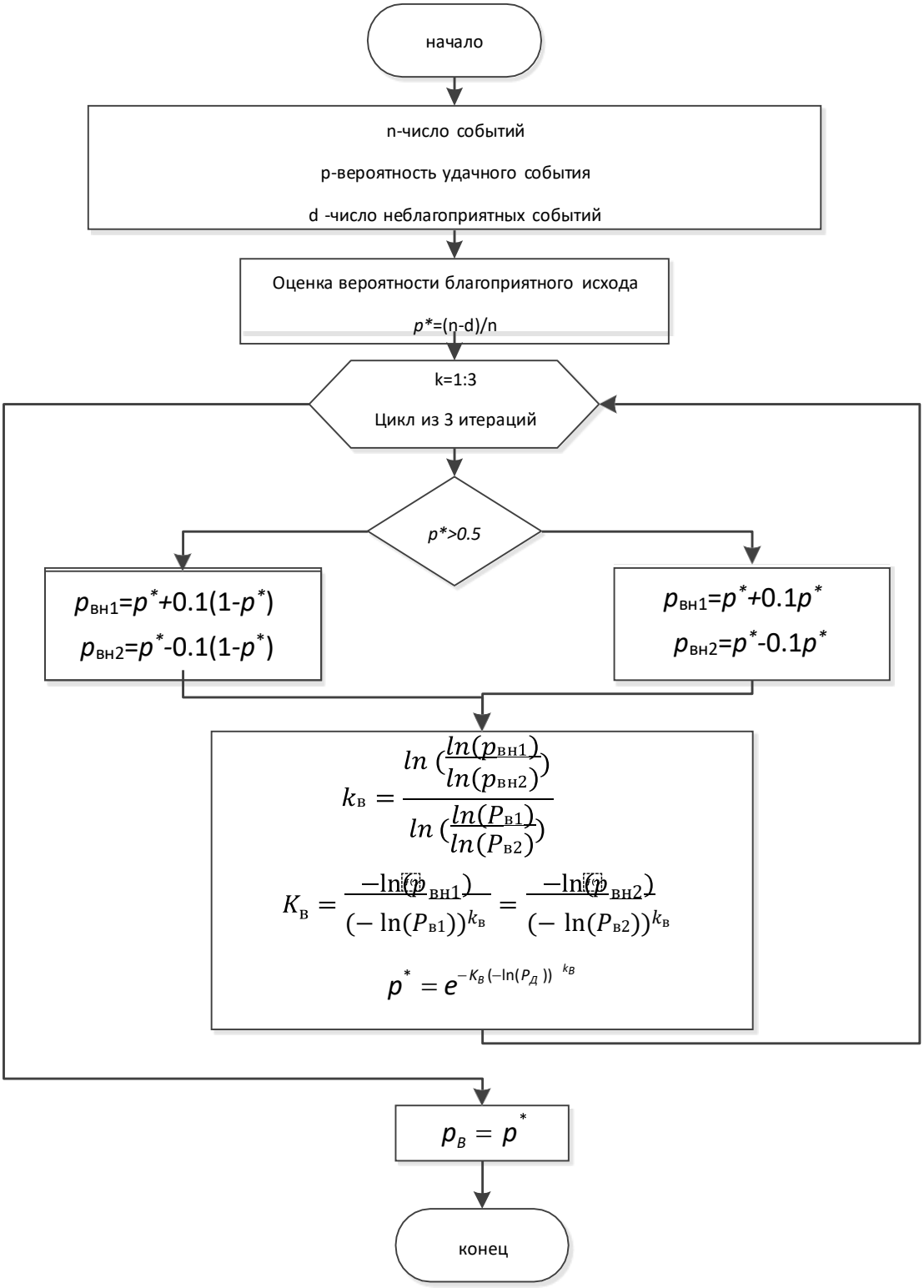

Рисунок 3.8 Итеративный алгоритм определения верхней границы доверительного интервала.

Аналогичным образом происходят вычисления и для нижнего доверительного интервала, с отличием лишь в том, что $P_{в1}$и $P_{в2}$ заменяются соответственно на $1 - P_{н1}$ и $1 - P_{н2}$.

На основе рисунка 3.9 можно сделать вывод об исключительно хорошем количественном совпадении графиков зависимости оценок КИД от мощности с кривыми, полученными на имитаторе КВ канала связи. Расхождение значений мощности передатчика не превышают 1 дБ.

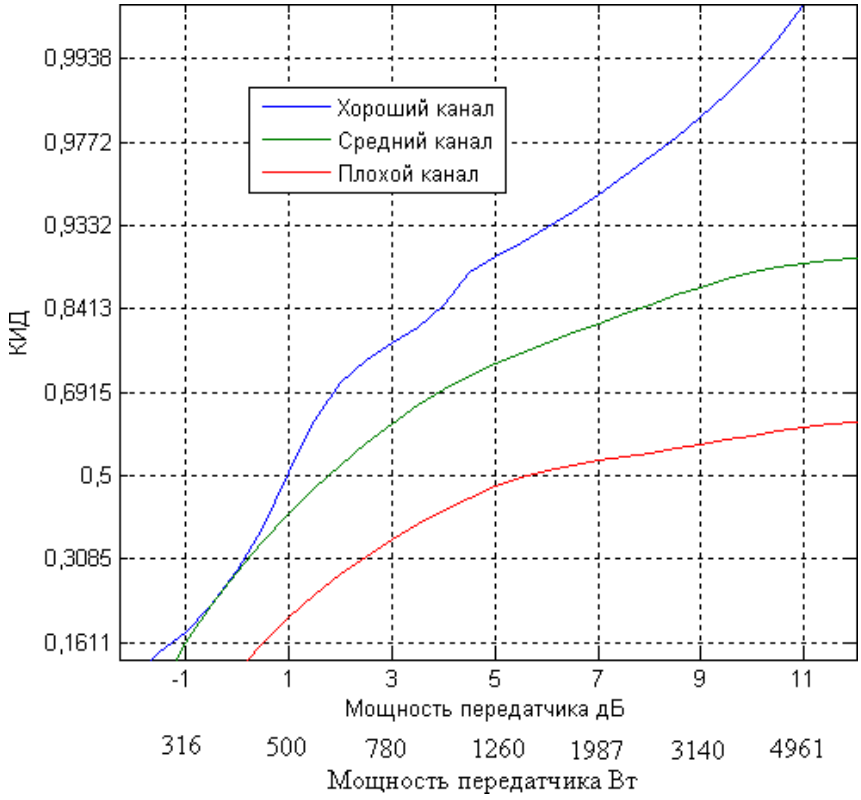

Рисунок 3.9 Сравнение КИД, полученного методом имитационного моделирования в различных каналах связи для режима OFDM- DPSK-8,скорость кода R=2/3, рабочая полоса 6200 Гц.

На основе результатов сравнительного анализа, приведенных на рисунке 3.9, можно сделать следующие выводы:

на уровне КИД, равном 0,5, потери в используемой мощности для среднего и плохого каналов относительно хорошего составят 0,8 дБ и 4,7 дБ соответственно;

- на уровне КИД, равном 0,7, потери в используемой мощности для среднего канала относительно хорошего составят 1,4 дБ;
- увеличением мощности в среднем и плохом каналах связи невозможно поднять предельно допустимое значение КИД выше 0,9 и 0,7 соответственно.
- В ходе трассовых испытаний была проверена принципиальная возможность организации связи с более сложными сигнальными созвездиями такими как QAM-64. В полосе 500 Гц значение КИД для такого созвездия равно

34 %. Таким образом, увеличив мощность излучаемого сигнала в 6,2 раза и сделав ее равной 775 Вт и увеличив полосу пропускания в 6,2 раза, становится возможным организация связи со скоростью 9300 бит/с в полосе 3100 Гц с сохранением КИД.

- Дальнейшего увеличения скорости передачи можно достичь путем применения более длинного интервала перемежения равного 9.6 с, а также использования более мощных передатчиков, что было подтверждено соответствующими имитационными экспериментами в условиях, заданных по ITU-R хорошего, плохого и среднего каналов связи. Оценка вероятности ошибки производилась при накоплении 500 ошибок, после чего производилось увеличение отношения сигнал/помеха на 1 дБ и испытания проводились снова. При достижении вероятности ошибки 10^{-3} испытанияпрекращались и строилась кривая помехоустойчивости. В испытаниях менялось расстояние между поднесущими, а также тип модуляции (DPSK-8, QAM-16, QAM-32, QAM-64) и скорость турбо кода 1/2, 2/3, 3/4. Результаты

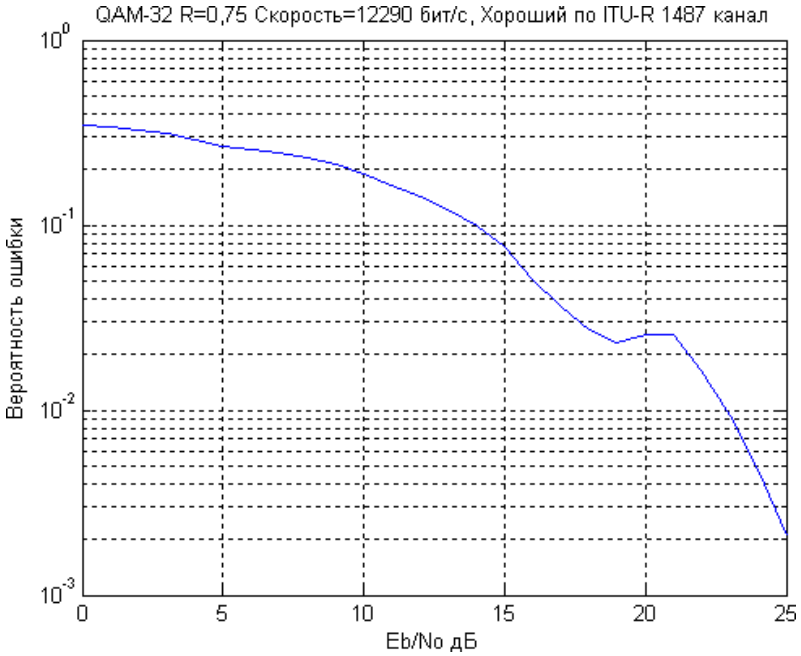

Рисунок 3.10 - Кривая помехоустойчивости для случая максимальнойскорости, достижимой в хорошем по ITU-R 1487 канале.

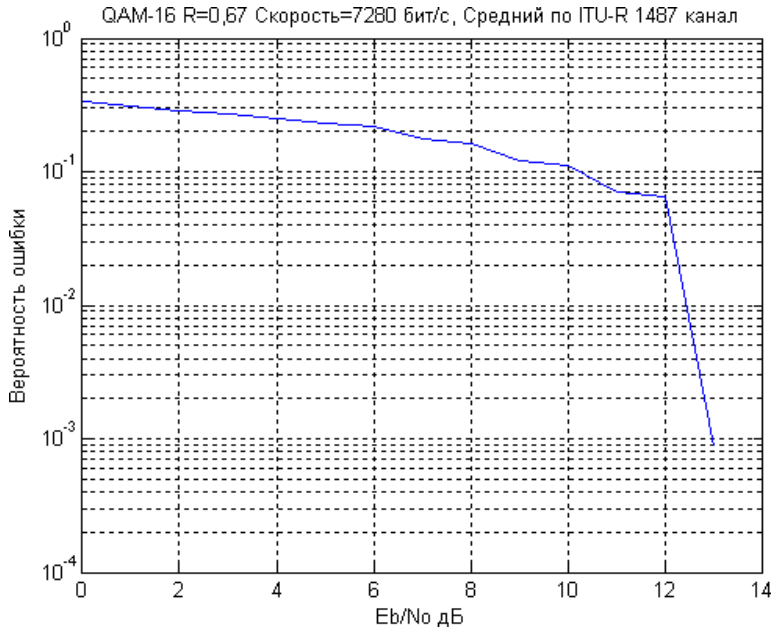

Рисунок 3.11 - Кривая помехоустойчивости для случая максимальной скорости, достижимой в среднем по ITU-R 1487 канале.

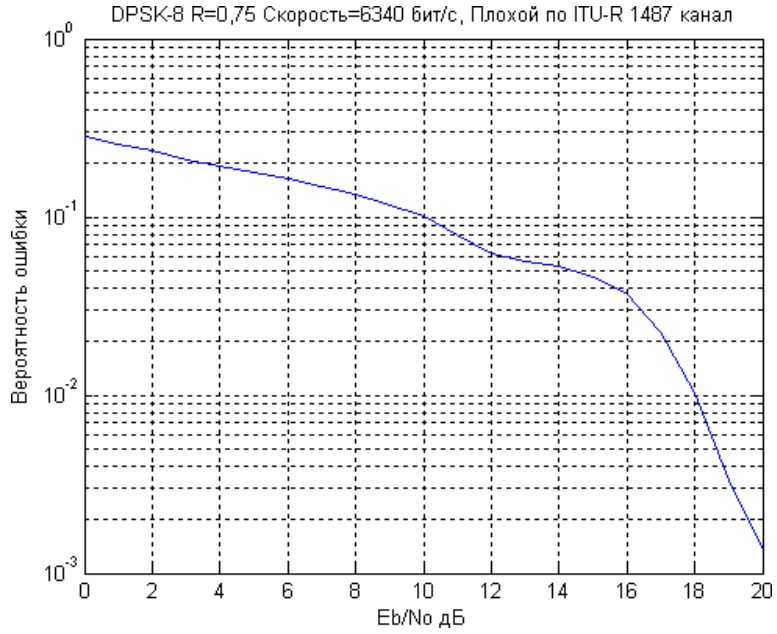

Рисунок 3.12 Кривая помехоустойчивости для случая максимальной скорости, достижимой в плохом по ITU-R 1487 канале.

- Из данных рисунков следует, что по сравнению с аналогичными существующими некогерентными модемами, обеспечивающими максимальную скорость передачи данных 4800 бит/с, в рассматриваемом модеме можно повысить скорость в условиях хорошего канала до 12290 бит/с, в среднем канале до 7280 бит/с, а в плохом канале до 6340 бит/с. Данный результат был достигнут за счет применения комплекса мер, состоящего из выбора подходящего расстояния между поднесущими увеличения длины перемежения до 9,6 с, что позволяет избегать подряд выпадающих ошибок, а также применения мягких решений с выхода демодулятора и турбо кода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам исследований, проведенных в диссертации, можно сделать следующие выводы:

- некогерентные модемы, разработанные в диссертации по технологии OFDM, являются перспективными для организации как высокоскоростных, так и высоконадежных радиолиний в связи с их универсальностью при использовании в разных режимах и простотой, вызванной отсутствием эквалайзера;
- методом имитационного моделирования было показано, что в однополосном телефонном КВ канале связи, имеющим полосу пропускания
- 1.1 кГц, с применением разработанного модема за счет увеличения мощностипередатчика возможно достичь предельно высоких скоростей передачи данных 12290 бит/с, 7280 бит/с, 6340 бит/с соответственно в хорошем среднем и плохом среднеширотных каналах связи, определенных рекомендацией Международного союза радиосвязи;
- некогерентные методы демодуляции OFDM-сигналов с относительной фазовой манипуляцией во временной области и в частотной области имеют одинаковую помехоустойчивость, однако отличаются оптимальнымрасстоянием между поднесущими вдоль оси частот;
- объединение методов частотной синхронизации на основе апостериорной информации, передаваемой пилот-сигналами, и по минимуму среднеквадратичного отклонения от ближайших точек созвездия, позволяет получить энергетический выигрыш от 1 до 5 дБ для различных созвездий, что было подтверждено как вычислительным экспериментом, так и при проведении натурных испытаний для значений частотного рассогласования от0 до ±40 Гц;
- в ходе проведенных исследований показано, что OFDM-модем сохраняет свою работоспособность при имитации эффекта Доплера в пределах ±40 Гц, что позволяет обеспечить связь с реактивными самолетами, имеющими
- скорость «один мах» во всем КВ диапазоне, а для самолетов, имеющих скорость «три маха», в диапазоне до 10 МГц. В принципе, при необходимости программно можно обеспечить компенсацию эффекта Доплера и при большей отстройке от номинальной частоты, например, необходимой для самолетов, имеющих скорость «три маха», 150 Гц;
- по сравнению с методом, использующим адаптацию по типу СКК, методс адаптацией по расстоянию между поднесущими в среднем канале связи обеспечивает выигрыш 0.5 ÷ 2 дБ для скоростей 2400, 4800 бит/с соответственно, в плохом канале связи >2 дБ для скорости 2400 бит/с. Для скорости 4800 бит/с в условиях плохого канала выигрыш составляет 60 % по уровню максимально возможных значений КИД;

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1) Дощанов Е.Х., Землянов И.С. Влияние переходной характеристики передающего устройства на помехоустойчивость OFDM модема «Радиолокация навигация связь". Воронеж, 2014. С. 737-746.

2) Бочечка Г.С. Методы оценки канала, основанные на встраиваемых пилот-сигналах, в системах OFDM // T-Comm. - Телекоммуникации и транспорт. 2009. № 3.

3) Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. 2015. 360 …

4) Prassad R. OFDM for Wireless Communication Systems. Saltzberg: Hardcover, 2004. 280 pp.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Елеулов Алибек Ажбаевич

5В071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникации

Тема: «Исследование OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации»

Внедрение технологии OFDM для высокоскоростной и низкоскоростной высоконадежной (скрытной) передачи дискретных сообщений по КВ радиоканалам при наличии предельно возможной расстройки по частоте между передающей и приемной сторонами радиолинии обусловленной эффектом Доплера, способного адаптироваться к условиям связи за счет изменения скорости передачи сообщений в широких пределах.

В расчетном разделе были рассчитаны следующие параметры:

Методы математического и спектрального анализа, статистической радиотехники, теории распространения радиоволн, теории передачи дискретных сообщений и цифровой обработки сигналов.

Общие требования к составлению, изложению, оформлению и содержанию текстовых и графических материалов работы выполнены в соответствии с ГОСТ.

Дипломная работа выполнена на оценку /А/«отлично», а дипломант, Елеулов Алибек Ажбаевич достойн степени бакалавра специаальности 5В071900-Радиотехника, электроника и телекоммуникации.

Рецензент
Кандитат технических наук,
старший преподаватель
КазНУ им.аль-Фараби Абдуллаев М.А.

«21» 05 2022 ж.

ПОДЛИННИК ЗАВЕРЯЮ

Отзыв руководителя

Дипломной работы

Елеулов Алибек Ажбаевич

5В071900- Радиотехника, электроника және телекоммуникация

Тема «Исследование OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации»

Внедрение технологии OFDM для высокоскоростной и низкоскоростной высоконадежной (скрытной) передачи дискретных сообщений по КВ радиоканалам при наличии предельно возможной расстройки по частоте между передающей и приемной сторонами радиолинии обусловленной эффектом Доплера, способного адаптироваться к условиям связи за счет изменения скорости передачи сообщений в широких пределах.

В расчетном разделе были рассчитаны следующие параметры:

Методы математического и спектрального анализа, статистической радиотехники, теории распространения радиоволн, теории передачи дискретных сообщений и цифровой обработки сигналов.

Общие требования к составлению, изложению, оформлению и содержанию текстовых и графических материалов работы выполнены в соответствии с ГОСТ

Дипломная работа выполнена на оценку /А/«отлично», а дипломант, Елеулов Алибек Ажбаевич достойн степени бакалавра специаальности 5В071900-Радиотехника, электроника и телекоммуникации.

Научный руководитель
Лектор каф.ЭТиКТ
_____ Н.А. Джунусов
«20» _____ 2022 ж.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Елеулов Алибек Ажбаевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 3.9

Коэффициент Подобия 2: 2.1

Микропробелы: 53

Знаки из здругих алфавитов: 43

Интервалы: 30

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☑ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2022-05-30

Дата

Сұңғат Марксұлы

проверяющий эксперт

Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Елеулов Алибек Ажбаевич

Тақырыбы: Исследование OFDM модуляторов и демодуляторов в сетях телекоммуникации

Жетекшісі: Нуридин Джунусов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 3.9

2-ұқсастық коэффициенті (5): 2.1

Дәйексөз (35): 0.2

Әріптерді ауыстыру: 43

Аралықтар: 30

Шағын кеңістіктер: 53

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☑ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2022-05-30

Күні *Кафедра меңгерушісі*