

На правах рукописи



РАБИН Алексей Владимирович

**ОРТОГОНАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ И МНОГОПОЗИЦИОННАЯ
МОДУЛЯЦИЯ В ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫХ
СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена на кафедре аэрокосмических компьютерных и программных систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор

Бестугин Александр Роальдович

Официальные оппоненты: Яковлев Виктор Алексеевич,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры защищенных систем связи
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-
Бруевича»

Комашинский Владимир Ильич,

доктор технических наук, доцент,
советник генерального директора закрытого
акционерного общества «Институт телекоммуникаций»

Кулешов Игорь Александрович,

доктор технических наук, доцент,
первый заместитель генерального директора публичного
акционерного общества «Информационные
телекоммуникационные технологии» по научной работе

Ведущая организация

Акционерное общество «Российский институт мощного
радиостроения», 199178, г. Санкт-Петербург, 11-я Линия
В.О., 66

Защита состоится «01» марта 2022 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 24.2.384.01 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А, ауд. 53-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Автореферат разослан «15» декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 24.2.384.01,
кандидат технических наук, доцент



А.А. Овчинников

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Радиосвязь является неотъемлемым элементом современной автоматизированной сети связи. Это обуславливает требования к простоте ее организации, высокой мобильности, простой восстанавливаемости и низкой стоимости каналов.

Анализ современных телекоммуникационных систем показывает, что они функционируют, в том числе, в условиях сложной сигнальной и помеховой обстановки. При этом, по оценкам специалистов, комплексное воздействие на выделенные ресурсы линий радиосвязи приводит к значительному снижению их помехозащищенности.

Проблема обеспечения требуемой помехозащищенности радиолиний телекоммуникационных систем, как одной из важнейших их характеристик, является достаточно актуальной. Современные решения базируются на применении сигналов с большой базой, основанных либо на программной псевдослучайной перестройке рабочей частоты, либо на прямом расширении спектра сигнала псевдослучайными последовательностями, технически реализуемыми, например, фазоманипулированными широкополосными сигналами.

Значительное число исследований, связанных с применением методов теории помехоустойчивого кодирования, посвящено анализу систем связи со сравнительно малым значением спектральной эффективности и/или малом отношении сигнал/шум. **Вместе с тем для широкого класса приложений представляют особый интерес сценарии функционирования телекоммуникационных систем, позволяющих при больших отношениях сигнал/шум обеспечить как повышенную спектральную эффективность, так и высокую помехозащищенность.** Эта проблематика, однако, исследована недостаточно, в связи с чем существующие методы ориентированы, как правило, в большей степени на обеспечение энергетического выигрыша при введении помехоустойчивого кодирования и в существенно меньшей степени учитывают обменные соотношения между помехоустойчивостью, отношением сигнал/шум, спектральной эффективностью и сложностью реализации.

С учетом вышеизложенного целесообразно кратко охарактеризовать **степень разработанности темы исследования.** В частности, значительный вклад в развитие данной тематики внесли следующие российские и зарубежные ученые и исследователи.

Теоретические основы и вопросы практического применения цифровой связи представлены в работах Б. Склера, Дж. Прокиса, В.И. Коржика, Л.М. Финка, И.С. Андропова, Д.Д. Кловского, Н.Н. Клюева, Д.Л. Бураченко, Б.Д. Кудряшова, З.М. Каневского.

Помехозащищенности и эффективности систем радиосвязи посвящены труды В.Ф. Комаровича, В.В. Игнатова, А.Г. Зюко, В.А. Липатникова, А.Ф. Крячко, С.Б. Макарова, С.В. Дворникова, А.В. Пшеничникова, М.А. Семисошенко, С.И. Макаренко, Е.В. Чучина, А.Р. Бестугина, С.Н. Агиевича, В.И. Комашинского, И.А. Кулешова.

Методы модуляции и расширения спектра рассмотрены в работах В.И. Борисова, В.М. Зинчука, А.Е. Лимарева, В.М. Вишневого, Ю.Б. Окунева, В.И. Слюсара, Л.Е. Варакина, К. Феера, Г. Унгербоека, А.Н. Трофимова.

Вопросы помехоустойчивого кодирования в системах цифровой связи отражены в трудах К. Шеннона, Е.Т. Мирончикова, В.Д. Колесника, Г.Ш. Полтырева, К.Ш. Зигангирова, В.А. Зиновьева, В.В. Зяблова, Ф.А. Таубина, Н.А. Шехуновой, Е.А. Крука, А.М. Тюрликова, С.В. Беззатеева, Дж. Возенкрафта, И. Джекобса, Д. Кларка, Д. Кейна, Э. Берлекэмпа, А.Д. Витерби, Д.К. Омурсы, Р. Блейхута, Д. Форни, Ф. Мак-Вильямса, Н. Слоэна.

Кроме того, имеется множество технических публикаций, включая спецификации и руководящие документы по разработке радиоэлектронных комплексов и средств многоуровневой защиты телекоммуникационных систем.

В результате проведенного анализа применяемых технических решений можно сделать вывод о том, что существует **противоречие между требованиями к помехозащищенности современных телекоммуникационных систем**, обусловленными, как правило, возможностями систем радиоподавления, и **недостаточно разработанными методами повышения помехозащищенности при передаче с высокой спектральной эффективностью, включающими использование высокоскоростных модуляционных кодов**.

При применении блочного или сверточного кодирования помехозащищенность радиолиний телекоммуникационных систем при сохранении отношения сигнал/шум может быть повышена, как известно, благодаря расширению полосы частот и усложнению приемо-передающей аппаратуры. Стандартный метод к обеспечению помехоустойчивой передачи с высокой спектральной эффективностью базируется на использовании решетчатой кодированной модуляции, предложенной в 1982 г. Г. Унгербоеком. При этом правила построения сигнально-кодовых конструкций (СКК) Унгербоека, хотя и снижают объем переборной задачи синтеза, не обеспечивают в полной мере гарантированное построение СКК с наилучшими частотно-энергетическими характеристиками. В то же время, основной целью работ в области синтеза систем сигналов и СКК является поиск таких способов их формирования и обработки, которые при заданных ограничениях на сложность устройств формирования и приема, а также временные задержки позволяли бы приблизиться к границе пропускной способности.

Один из таких подходов разработан в 2008 г. А.В. Рабиным в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Использование ортогонального кодирования для повышения помехоустойчивости систем передачи информации». В ней предложено в цифровых системах связи наряду с помехоустойчивым кодированием использовать дополнительное ортогональное кодирование, рассмотрено построение ортогональных кодов на основе многочленов первой степени, показано, что совместное использование обоих видов кодирования и относительной фазовой модуляции (ОФМ) при минимальном изменении скорости кодирования дает энергетический выигрыш по сравнению с применением только помехоустойчивых кодов, а также сформулированы задачи на дальнейшее исследование, в частности, изучение построения кодов на основе многочленов степени больше единицы, применения ортогональных кодов с другими видами модуляции, разработка метода синхронизации сигналов в сочетании с ортогональным кодированием. В данном диссертационном исследовании решены все эти задачи и проведено сравнение с кодами Унгербоека и последующими результатами, полученными в этом направлении.

Определим ортогональное кодирование как процесс взаимно-однозначного отображения множества информационных последовательностей во множество ортогональных кодовых последовательностей.

В проведенных ранее исследованиях положительный технический результат был получен при использовании ортогональных и квазиортогональных преобразований в дискретных каналах с памятью, при построении сигнально-кодовых конструкций и применении сверточных кодов, в распределенных системах реального времени и встроенных системах, а также при решении задач кодового разделения каналов и обработки изображений.

В соответствии с вышеизложенным, возникает важная научно-техническая проблема использования ортогонального кодирования для разработки помехозащищенных телекоммуникационных систем, обеспечивающих при высоком отношении сигнал/шум передачу с близкой к предельно возможной спектральной эффективностью. Ее всестороннему решению и посвящена тема данной диссертационной работы, что определяет ее актуальность.

Исследование и разработка методов повышения помехозащищенности при минимальном изменении скорости кодирования посредством разработки математических методов являются основным направлением решения научно-технической проблемы.

Таким образом, **объектом исследования** являются телекоммуникационные системы с набором технологий повышения помехозащищенности каналов передачи информации, а **предмет исследования** составляют модели и методы обеспечения помехозащищенности каналов передачи информации телекоммуникационных систем.

Целью диссертации является повышение помехозащищенности каналов передачи информации телекоммуникационных систем.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие научные задачи:

1. Разработка метода синтеза декодирующих и кодирующих матриц для формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования.

2. Получение класса ортогональных кодов на основе синтезированных кодирующих матриц, обеспечивающих повышение помехозащищенности каналов передачи информации телекоммуникационных систем.

3. Разработка комплекса моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование.

4. Разработка научно-технических предложений по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем.

Теоретическая значимость диссертационной работы обусловлена разработкой новой методологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем посредством применения ортогональных кодов, формируемых сопряженными парами квадратных матриц.

Методология и методы исследования, применявшиеся в диссертационной работе для решения поставленных задач:

- развивают и объединяют методы теории вероятностей, теории информации, теории систем передачи информации, теории помехоустойчивого кодирования и теории моделирования систем передачи, применяя их к современным системам связи;

- отличаются от известных как своим комплексным подходом, так и учетом основных особенностей текущего этапа развития систем связи.

В результате:

- разработан метод синтеза декодирующих и кодирующих матриц для формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования, позволяющий обеспечить вероятность ошибки благодаря выбору параметров матриц;

- предложены новые модели и методы обеспечения помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что в ней разработан метод ортогонального кодирования, обеспечивающий существенный энергетический выигрыш практически без внесения избыточности и без значительного увеличения сложности аппаратуры. Результаты диссертации могут быть использованы для практической реализации в телекоммуникационных системах ортогонального кодирования, эффективность применения которого подтверждена количественными оценками и простыми процедурами кодирования и декодирования.

Тематика работы соответствует областям исследования пп. 2, 8, 10, 11, 14 паспорта специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод синтеза декодирующих и кодирующих матриц на основе многочленов степени больше единицы для формирования кодовых последовательностей,

обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования, отличающийся свойством регулярности от случайного поиска отдельных пар матриц с применением комбинаторных методов.

2. Класс ортогональных кодов, построенных, в отличие от существующих, на основе синтезированных кодирующих матриц и обеспечивающих повышение помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем.

3. Комплекс моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование.

4. Научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем при высоком отношении сигнал/шум для достижения требуемой спектральной эффективности.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

1. Научная новизна разработанного метода синтеза декодирующих и кодирующих матриц состоит в том, что он рассматривает многочлены степени больше единицы, а с помощью синтезированных кодирующих матриц формируются кодовые последовательности, обеспечивающие реализацию ортогонального кодирования; при этом сам метод отличается свойством регулярности от случайного поиска отдельных пар матриц с применением комбинаторных методов и позволяет обеспечить вероятность ошибки благодаря выбору параметров матриц.

2. Научная новизна разработанного класса ортогональных кодов состоит в том, что они, в отличие от существующих, построены на основе синтезированных кодирующих матриц и обеспечивают повышение помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем, при большем количестве исправляемых ошибок по сравнению с существующими аналогичными решениями, что, в свою очередь, позволяет учесть обменные соотношения между помехоустойчивостью, спектральной эффективностью и сложностью реализации для широкого класса сценариев функционирования рассматриваемых телекоммуникационных систем.

3. Научная новизна разработанного комплекса моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем состоит в том, что он позволяет осуществлять комплексное исследование на основе комбинации основных видов цифровой модуляции: амплитудной, квадратурной амплитудной, относительной фазовой и частотной – и разработанного ортогонального кодирования, обеспечивающего в совокупности с помехоустойчивым кодированием эффективное использование энергии передаваемых сигналов.

4. Научная новизна разработанных научно-технических предложений по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем состоит в том, что в результате проведенного диссертационного исследования разработана методология повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем посредством применения ортогональных кодов, обеспечивающих при высоком отношении сигнал/шум большие, по сравнению с известными, значения спектральной эффективности.

Степень достоверности результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, соответствием результатов имитационного моделирования теоретическим предложениям и практической реализацией на предприятиях радиотехнической отрасли.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих симпозиумах, конференциях и семинарах: V Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» и Выставке инновационных проектов, современных систем и комплексов в радиоэлектронной отрасли (г. Красноярск, АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь», 2018 г.), XXXI Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (г. Санкт-Петербург, ВКА имени А.Ф. Можайского, 2019 г.), Международной конференции «Информационные технологии в бизнесе и

производстве» (The International Conference «Information Technologies in Business and Industry», г. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, 2019 г.), XXII международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (XXII International Conference on Wave Electronics and Infocommunication Systems, WECONF-2019, г. Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», 2019 г.), II и III Международных конференциях «Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации» («International Conference on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering», MIST: Aerospace-2019, 2020, г. Красноярск, Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных учреждений, 2019 г. и 2020 г.), Международной конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» («International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies», ICMSIT-2020, г. Красноярск, Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных учреждений, 2020 г.), II Международной конференции «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» («Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering», APITECH-II-2020, г. Красноярск, Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных учреждений, 2020 г.).

Публикации: Основные результаты диссертации изложены в 73 опубликованных работах, в том числе в 2 монографиях, 12 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 10 работах, опубликованных в трудах, индексируемых реферативной базой «Scopus», 12 докладах в сборниках докладов конференций, 14 отчетах о выполнении 5 НИОКР. По теме исследования получено 23 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Внедрение и реализация результатов исследования: основные исследования и результаты диссертационной работы использованы акционерном обществе «Концерн «Гранит-Электрон» (г. Санкт-Петербург), акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Пирамида» (г. Санкт-Петербург), федеральном государственном автономном научном учреждении «Научно-исследовательский институт «Специализированные вычислительные устройства защиты и автоматика» (г. Ростов-на-Дону) и внедрены в учебный процесс кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Структура диссертационной работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 211 наименований. Текст диссертации изложен на 322 страницах, содержит 83 рисунка и 34 таблицы.

Все основные результаты диссертационной **работы получены автором самостоятельно**. Экспериментальные исследования проведены при его участии и под непосредственным научным руководством.

I. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, проводимого в диссертационной работе, определены объект, предмет, цель и сформулированы решаемые в работе задачи, приведена характеристика разработанности темы исследования, перечислены новые научные результаты, полученные при выполнении работы, показаны теоретическая и практическая значимость, а также научная новизна диссертации, представлена апробация работы, описаны внедрение и реализация результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу существующих методов и моделей обеспечения помехозащищенности радиолиний телекоммуникационных систем, обоснованию научных задач и структурно-логической схемы исследований.

Одной из актуальных проблем, связанных с обеспечением требуемой эффективности функционирования радиолиний в сложных нестационарных условиях сигнальной и помеховой обстановки, является выполнение требований по их помехозащищенности.

Различные аспекты данной проблематики рассмотрены в работах В.И. Борисова, Дж. Прокиса, Б. Склира, К. Феера. Вместе с тем анализ предложенных в них решений показывает, что они носят частный характер, так как получены в условиях стационарного негативного воздействия на ресурсы радиолиний. Можно утверждать, что в настоящее время отсутствует продуктивный методический аппарат, позволяющий обеспечить требуемый уровень помехозащищенности радиолиний при высокой спектральной эффективности.

На рисунке 1 приведена обобщенная модель радиолинии телекоммуникационной системы. Внешнее воздействие на систему управления представлено функцией $V_R(t)$. Эта функция зависит от времени и может быть нечетко формализована, однако она характеризует полную функцию управления. Область значений функции $V_R(t)$ входит в область определения функции $V_R(t)$. Решения на управление осуществляются системой реализации. Данная система уточняет функцию управления $V_R(t)$ с учетом среды воздействия. Воздействие системы реализации решений определяется функцией $V_R(t)$.

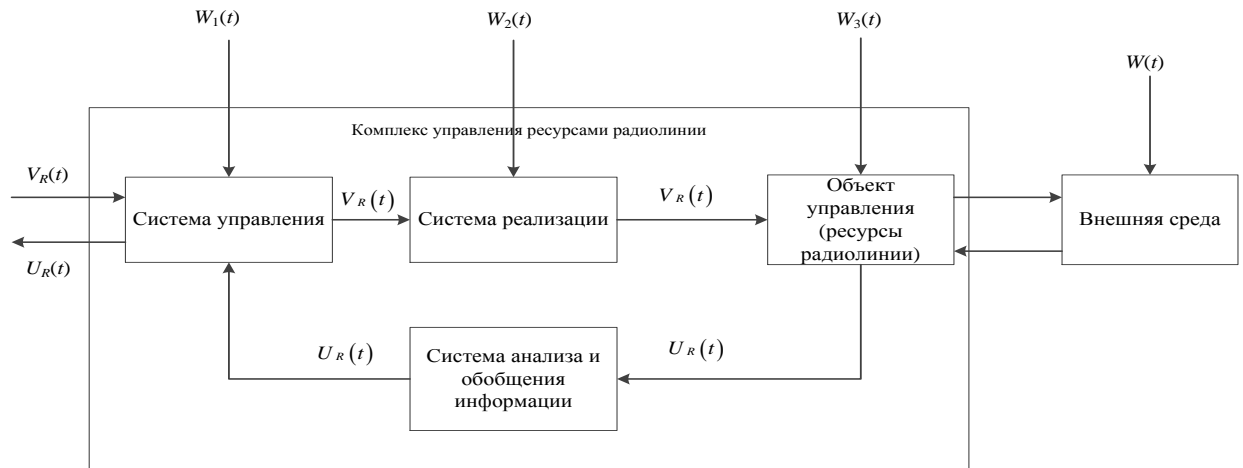


Рисунок 1 – Обобщенная модель радиолинии

Поскольку функции $V_R(t)$, $V_R(t)$, $V_R(t)$ описывают воздействия системы управления, то по своей природе они коррелированы. Их независимость свидетельствует либо о разрыве контура управления, либо об отсутствии управляющего воздействия.

Функции $U_R(t)$, $U_R(t)$, $U_R(t)$ замыкают контур управления и представляют собой отображение состояния объекта управления. Они реализуются системой анализа и обобщения информации.

В качестве объекта управления в модели на рисунке 1 выступают частотный, временной и энергетический ресурсы радиолинии, которые непосредственно определяют эффективность ее функционирования. Функции $W_1(t)$, $W_2(t)$, $W_3(t)$ характеризуют воздействие внешней среды на элементы модели.

Модель на рисунке 1 реализует замкнутое управление радиолинией телекоммуникационных систем. Очевидно, что при практической реализации необходимо формализовать функции воздействия, случайные к детерминированному воздействию среды, а также функции отображения (реакции системы). Строго математическая реализация данных функций в общем случае может быть не определена, поэтому для решения данной задачи могут быть использованы методы теории управления, которые позволяют преобразовать эти функции в вектор цели, вектор состояния и вектор ошибки.

Обобщенная модель радиолинии, функционирующая с учетом воздействия (рисунок 2), получена на основе разработанной модели в результате преобразований с использованием методов теории систем и дуальности целей системы противодействия. Данная модель радиолинии учитывает воздействие системы радиоподавления, имеющего противоположные системе управления радиолинии цели. В связи с этим функции $V_S(t)$ и $U_S(t)$, характеризующие процессы управления и отображения информации об объекте управления при воздействии системы радиоподавления, имеют противоположные друг другу целевые установки. Заметим, что функции $V_S(t)$ и $U_S(t)$ также являются противоположными. Целью системы противодействия является снижение эффективности функционирования радиолинии. Выигрыш одной системы управления является проигрышем другой и наоборот.

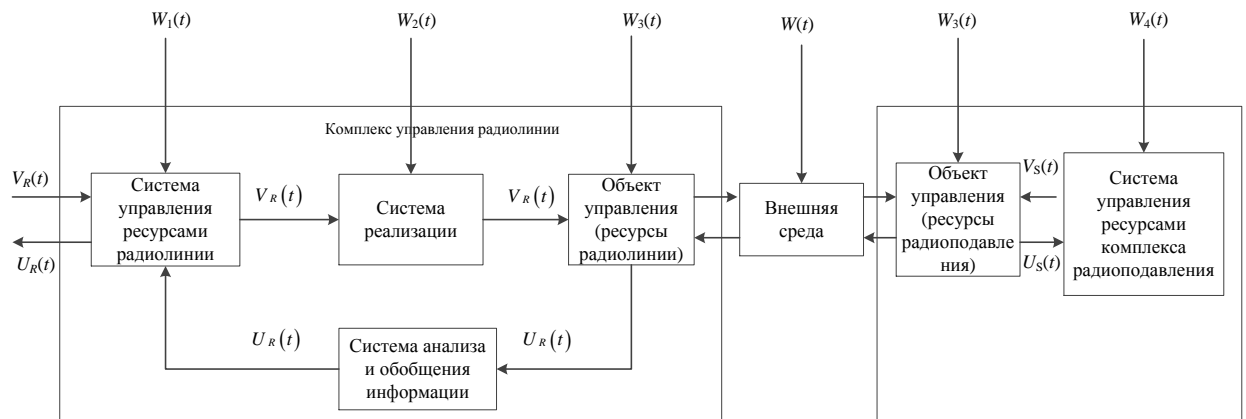


Рисунок 2 – Обобщенная модель радиолинии в конфликтной ситуации

В первой главе представлены вероятностно-энергетические характеристики радиолиний телекоммуникационных систем при управлении ее ресурсами и выполнены оценка параметров рабочих частот для модели радиолинии в конфликтной ситуации и оценка чувствительности и устойчивости функциональной модели радиолинии в конфликтной ситуации. Также в главе проведен анализ существующих методов помехозащиты радиолиний: при простейшем потоке воздействия на ее ресурсы, в условиях неопределенности стратегии воздействия системы противодействия, а также в условиях неизменной стратегии воздействия на ее ресурсы. В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что в настоящее время отсутствует продуктивный методический аппарат, позволяющий обеспечить требуемый уровень помехозащищенности радиолиний в условиях динамической конфликтной среды.

Во второй главе диссертационной работы приведено описание предлагаемого в ней ортогонального кодирования как аналога сверточного кодирования над полем рациональных чисел и исследованы его характеристики. Разработаны метод синтеза декодирующих и кодирующих матриц на основе многочленов степени больше единицы для формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования, и класс ортогональных кодов, обеспечивающих повышение помехозащищенности каналов передачи информации телекоммуникационных систем, рассмотрены основные понятия, характеризующие операции кодирования и декодирования с помощью ортогональных кодов, и приведен общий вид линейных схем устройств, осуществляющих реализацию операции ортогонального кодирования.

В главе представлены результаты исследования основных существующих методов повышения помехозащищенности и кратко рассмотрены достижения в этой области за счет помехоустойчивого кодирования.

Недостатком известных методов повышения помехоустойчивости является то, что канал связи, как правило, заранее фиксирован. Таким образом, переходные вероятности выходных сигналов при заданных входных сигналах не менялись. Следовательно,

кратность модуляции, применявшейся при передаче сообщений, также, как правило, не изменялась. Значит, характеристики канала не зависели от используемого способа помехоустойчивого кодирования.

В диссертации предлагается в цифровых системах передачи сообщений наряду с помехоустойчивым кодированием использовать дополнительное ортогональное кодирование. Совместное использование обоих видов кодирования обеспечивает значительный энергетический выигрыш по сравнению с использованием только помехоустойчивых или только ортогональных кодов. При этом применение ортогонального кодирования как дополнительного уровня обработки неизбежно приводит к увеличению числа позиций модуляции в системе передачи. Тем самым, по сути, изменяются параметры канала, и за счет этого получается энергетический выигрыш.

Входной (информационной) последовательностью сверточного кодера со скоростью $r = k/n$ (скорость $r = 1$ называется максимально возможной скоростью кодирования) будет кортеж сигналов $u = \dots u_{-1}, u_0, u_1, u_2, \dots$, где элементами сигналов $u_i = u_i^{(1)}, u_i^{(2)}, \dots, u_i^{(k)}$ являются целые числа. Под выходной (кодовой) последовательностью сверточного кодера будем понимать $v = \dots v_{-1}, v_0, v_1, v_2, \dots$, где $v_i = v_i^{(1)}, v_i^{(2)}, \dots, v_i^{(n)}$ – действительные числа.

В диссертационном исследовании ортогональное кодирование как частный случай сверточного кодирования задается матрицами, элементами которых являются многочлены от формальной переменной задержки D с целыми коэффициентами. Кодовые слова получаются умножением входного информационного вектора на кодирующую матрицу. Обозначим ее как $G(D)$. На приемной стороне системы связи осуществляется декодирование, которое сводится к умножению на декодирующую матрицу. Обозначим ее как $H(D)$.

Требуется, чтобы эти матрицы удовлетворяли условию

$$G(D) \cdot H(D) = \rho \cdot D^i \cdot I, \quad (1)$$

где I – единичная матрица. Такой вид правой части равенства (1) важен для реализации ортогонального кодирования. Множитель $\rho \cdot D^i$ определяет корректирующие свойства ортогонального кода и показывает, что амплитуда входного сигнала увеличивается в ρ раз, а задержка в получении символов на приемной стороне составляет i тактов. D^0 соответствует текущему моменту времени, D соответствует задержке на один такт, D^2 соответствует задержке на два такта и так далее.

Поиск таких пар кодирующей и декодирующей матриц **раньше велся с использованием комбинаторных методов**, что позволило найти всего несколько примеров ортогональных кодов, которые использовались для оценки увеличения помехозащищенности телекоммуникационных систем. Поэтому появилась **задача найти регулярный метод построения пар матриц для синтеза ортогональных кодов**. Кроме того, **прежде в работах Е.Т. Мирончикова, А.А. Корниенко, М.В. Гофмана, А.В. Рабина считалось, что разработка ортогонального кодирования на основе полиномиальных матриц с элементами степени больше единицы приводит к существенному увеличению количества выполняемых операций и, как следствие, сложности технической реализации. Результаты, полученные в данном диссертационном исследовании, опровергают указанную гипотезу.**

Метод применения ортогонального кодирования основан на том, что сигналы передающей стороны могут быть выбраны произвольно. В работе рассмотрены различные виды сигналов и из них выбраны такие, которые обеспечивают максимальный энергетический выигрыш. Удовлетворяющими данному требованию являются противоположные сигналы $\{+1, -1\}$.

Предложим следующий метод синтеза кодирующей и декодирующей матриц. Вначале выберем декодирующую матрицу $H(D)$, которая используется для определения кодирующей матрицы $G(D)$ и числа ρ , входящих в равенство (1). Коэффициенты в элементах-многочленах матрицы $H(D)$ равны 0 и ± 1 . В этом случае значения ошибок,

имеющихся на выходе демодулятора, при декодировании не увеличиваются по абсолютной величине. Затем находим матрицу $H^{-1}(D)$. Кодированная матрица $G(D)$ получается умножением матрицы $H^{-1}(D)$ на наименьшее общее кратное знаменателей элементов матрицы $H^{-1}(D)$.

В данной работе предлагается декодирующая матрица $H(D)$ специальной структуры. Синтез матрицы $H(D)$ порядка ξ выполняется следующим образом:

Шаг 1. Присвоим первым $z = 2\xi$ элементам главной диагонали значения $1+D^i$, $z \leq \xi$. Четное число z назовем глубиной матрицы;

Шаг 2. Остальным элементам на главной диагонали присвоим значения 1;

Шаг 3. Вне главной диагонали элементы принимают следующие значения: элементы нечетных строк справа и нечетных столбцов вниз от главной диагонали равны $1-D^i$; элементы четных строк справа и четных столбцов вниз от главной диагонали равны $1+D^i$.

Например, декодирующая матрица порядка 4 глубины 2 на основе многочленов второй степени выглядит следующим образом:

$$H(D) = \begin{pmatrix} 1+D^2 & 1-D^2 & 1-D^2 & 1-D^2 \\ 1-D^2 & 1+D^2 & 1+D^2 & 1+D^2 \\ 1-D^2 & 1+D^2 & 1 & 1-D^2 \\ 1-D^2 & 1+D^2 & 1-D^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Найдем обратную ей матрицу $H^{-1}(D)$:

$$H^{-1}(D) = \begin{pmatrix} \frac{1+D^2}{4D^2} & \frac{-1+D^2}{4D^2} & 0 & 0 \\ \frac{-1+D^2}{4D^2} & \frac{-5+3D^2}{12D^2} & \frac{1}{3D^2} & \frac{1}{3D^2} \\ 0 & \frac{1}{3D^2} & \frac{1}{3D^2} & \frac{-2}{3D^2} \\ 0 & \frac{1}{3D^2} & \frac{-2}{3D^2} & \frac{1}{3D^2} \end{pmatrix}.$$

Умножим каждый элемент матрицы $H^{-1}(D)$ на $12D^2$. Получим кодирующую матрицу $G(D)$

$$G(D) = \begin{pmatrix} 3+3D^2 & -3+3D^2 & 0 & 0 \\ -3+3D^2 & -5+3D^2 & 4 & 4 \\ 0 & 4 & 4 & -8 \\ 0 & 4 & -8 & 4 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

При умножении кодирующей матрицы $G(D)$ на декодирующую матрицу $H(D)$ получим

$$G(D) \cdot H(D) = \begin{pmatrix} 12D^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12D^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12D^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12D^2 \end{pmatrix}.$$

В таблице 1 приведены основные параметры некоторых матриц, построенных описанным способом.

Таблица 1 – Основные параметры кодирующих и декодирующих матриц

$H[\xi, z]$	$G(D) \cdot H(D)$	$H[\xi, z]$	$G(D) \cdot H(D)$	$H[\xi, z]$	$G(D) \cdot H(D)$
2, 2	$4D^i$	7, 2	$164D^i$	12, 6	$396D^i$
3, 2	$4D^i$	7, 4	$28D^i$	12, 8	$68D^i$
4, 2	$12D^i$	7, 6	$4D^i$	12, 10	$12D^i$
4, 4	$4D^i$	8, 2	$396D^i$	12, 12	$4D^i$
5, 2	$28D^i$	8, 4	$68D^i$	16, 2	$456972D^i$
5, 4	$4D^i$	8, 6	$12D^i$	16, 4	$78404D^i$
6, 2	$68D^i$	8, 8	$4D^i$	16, 8	$2308D^i$
6, 4	$12D^i$	12, 2	$13452D^i$	16, 12	$68D^i$
6, 6	$4D^i$	12, 4	$2308D^i$	16, 16	$4D^i$

В данной таблице в первом, третьем и пятом столбцах первый элемент – порядок матрицы $H(D)$, второй элемент – глубина матрицы $H(D)$. Во втором, четвертом и шестом столбцах приведены элементы, которые стоят на главной диагонали в матрице, полученной в результате умножения $G(D)$ на $H(D)$.

Доказанная во второй главе работы теорема об эквивалентности полиномиальных кодирующей и декодирующей матриц и канонических матриц диагонального вида подтверждает корректность метода синтеза декодирующих и кодирующих матриц, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования.

С учетом вышеизложенного, **научная новизна разработанного метода синтеза декодирующих и кодирующих матриц** состоит в том, что он рассматривает многочлены степени больше единицы, а с помощью синтезированных кодирующих матриц формируются кодовые последовательности, обеспечивающие реализацию ортогонального кодирования; при этом сам метод отличается свойством регулярности от случайного поиска отдельных пар матриц с применением комбинаторных методов и позволяет обеспечить вероятность ошибки благодаря выбору параметров матриц.

Практическая значимость предложенного метода состоит в том, что он позволяет сформировать кодовые последовательности и построить класс ортогональных кодов для повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем.

На основе синтезированных кодирующих матриц построен класс ортогональных кодов, обеспечивающих повышение помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем. В таблице 2 приведены основные характеристики ортогональных кодов на основе синтезированных матриц. Как правило, для реализации ортогонального кодирования приходится использовать виды модуляции с большим числом позиций, определяемым как удвоенная максимальная сумма абсолютных значений одного столбца кодирующей матрицы $G(D)$ плюс 1. По сравнению с таблицей 1 в таблице 2 не рассматриваются коды с большим числом позиций модуляции (превышающим 2^6) и, следовательно, не предполагающим техническую реализацию.

Таблица 2 – Основные характеристики ортогональных кодов на основе синтезированных матриц

$H[\xi, z]$	$G(D) \times H(D)$	Число позиций модуляции	Макс. число ошибок на $(i+1)\xi$ бит	$H[\xi, z]$	$G(D) \times H(D)$	Число позиций модуляции	Макс. число ошибок на $(i+1)\xi$ бит
2, 2	$4D^i$	9	1	6, 6	$4D^i$	25	1
3, 2	$4D^i$	21	1	7, 6	$4D^i$	25	1
4, 2	$12D^i$	45	5	8, 8	$4D^i$	25	1
4, 4	$4D^i$	21	1	12, 12	$4D^i$	25	1
5, 4	$4D^i$	25	1	16, 16	$4D^i$	25	1

В второй главе показано, что кодирующая матрица $G(D)$ получается умножением матрицы $H^{-1}(D)$ на наименьшее общее кратное знаменателей элементов матрицы $H^{-1}(D)$.

Исходя из значений коэффициентов элементов синтезируемых матриц $H(D)$, $0, \pm 1$, значения коэффициентов элементов матриц $G(D)$ будут такими, что их сумма по строкам или столбцам всегда четна. Выбор противоположных сигналов $\{+1, -1\}$ обусловлен задачей обеспечения максимального энергетического выигрыша. Таким образом, при передаче по цифровым каналам связи противоположных сигналов и умножении входного информационного вектора на кодирующую матрицу $G(D)$ получим кодовый вектор, все элементы которого четны. Следовательно, будут использованы только четные позиции модуляции и позиция модуляции с номером 0. Данная особенность позволяет расширить множество технически реализуемых ортогональных кодов и повысить число исправляемых ошибок.

Основные характеристики технически реализуемых ортогональных кодов представлены в таблице 3.

При применении ортогональных кодов операции кодирования и декодирования характеризуются небольшой вычислительной сложностью. Сведения о количестве операций сложения и умножения при осуществлении операций кодирования и декодирования также приведены в таблице 3. Причем для декодирующих матриц $H(D)$ количество операций умножения может быть определено как $N_{умн} = 2\xi^2 - \xi + z$, количество операций сложения – как $N_{сл} = N_{умн} - 2\xi = 2\xi^2 - 3\xi + z$, где ξ – порядок матрицы, z – глубина матрицы.

Таблица 3 – Основные характеристики технически реализуемых ортогональных кодов

$H[\xi, z]$	$G(D) \cdot H(D)$	Число позиций модуляции		Макс. число ошибок на $(i+1)\xi$ бит	Число операций			
					$G(D)$		$H(D)$	
		Номин.	Использ.		Слож.	Умн.	Слож.	Умн.
2, 2	$4D^i$	9	5	1	6	8	4	8
3, 2	$4D^i$	21	11	1	8	11	11	17
4, 2	$12D^i$	45	23	5	12	16	22	30
4, 4	$4D^i$	21	11	1	10	14	24	32
5, 2	$28D^i$	109	55	13	18	23	37	47
5, 4	$4D^i$	25	13	1	14	19	39	49
6, 4	$12D^i$	61	31	5	17	23	58	70
6, 6	$4D^i$	25	13	1	15	21	60	72
7, 6	$4D^i$	25	13	1	18	25	85	97
8, 6	$12D^i$	73	37	5	22	30	110	126
8, 8	$4D^i$	25	13	1	20	28	112	128
12, 10	$12D^i$	73	37	5	32	44	262	286
12, 12	$4D^i$	25	13	1	30	42	264	288
16, 16	$4D^i$	25	13	1	41	57	480	512

Во второй главе также представлена решетчатая диаграмма ортогонального кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени. По данной диаграмме определено свободное расстояние кода как минимальное расстояние между различными путями, начинающимися и заканчивающимися в нулевом состоянии:

$$d_{св} = \min_{v \neq v'} \{d_H(v, v')\}, \quad (4)$$

где d_H – расстояние Хэмминга между кодовыми словами v и v' .

В работе показано, что свободное расстояние ортогонального кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени равно 24, поскольку вес самого

короткого пути с переходами из состояния 000000 в состояние 000000 равен 24. Исходя из метода построения ортогональных кодов, значение свободного расстояния не изменится при использовании полиномиальных матриц с элементами другой степени.

Максимально возможный энергетический выигрыш систем с кодированием относительно систем без кодирования при $E/N_0 \rightarrow \infty$ может быть найден как

$$G_\infty = 10 \lg(d_{cb} r), \quad (5)$$

где r – скорость кодирования.

Для кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени $G_\infty \approx 13,8$ дБ при $r \approx 1$. **Результаты имитационного моделирования, приведенные в главах 3 и 4, подтвердили истинность данного теоретического предположения.**

В третьей главе работы решена задача и разработана процедура согласования кодовых символов и многопозиционной модуляции.

Рассмотрим данную процедуру на примере использования ортогонального кодирования с ОФМ. Данный вид модуляции широко используется в системах связи в тех случаях, когда невозможно с необходимой точностью восстановить опорный сигнал по фазе или частоте, в частности, при обмене короткими сообщениями между подвижными объектами при неизвестной доплеровской частоте. Процедура согласования достаточно проста и сводится к вычислению угла фазового приращения, равного величине $2\pi/q$, где q – удвоенная максимальная сумма абсолютных значений одного столбца кодирующей матрицы $G(D)$ плюс 1.

Рассмотрим канал с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Пусть пространство принимаемых сигналов двумерно, и демодулятором принят некий сигнал. В общем случае условная плотность вероятности выходного сигнала $u=(x,y)$ при передаче сигнала с фазой φ имеет вид

$$\frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{(x-\sqrt{E} \cos \varphi)^2}{N_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{(y-\sqrt{E} \sin \varphi)^2}{N_0}}. \quad (6)$$

В силу симметричного расположения сигнальных точек на окружности будем считать, что принят сигнал с номером $i=0$. Тогда условная плотность вероятностей выходного сигнала имеет вид

$$\frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{(x-\sqrt{E})^2}{N_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{y^2}{N_0}}. \quad (7)$$

В таком случае вероятность попадания принятого сигнала в i -ую решающую область для $i \in \left[0, \frac{q-1}{4}\right)$, где q нечетно, или для $i \in \left[0, \frac{q}{4}\right)$, где q четно, можно оценить как

$$P(i) = \int_0^\infty \int_{x \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{(2i-1)\pi}{q}\right)}^{x \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{(2i+1)\pi}{q}\right)} \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{y^2}{N_0}} dy \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{(x-\sqrt{E})^2}{N_0}} dx. \quad (8)$$

Вероятность попадания принятого сигнала в i -ую решающую область для $i \in \left[\frac{q-1}{4}, \frac{q-1}{2}\right]$,

где q нечетно, или для $i \in \left[\frac{q}{4}, \frac{q}{2}\right]$, где q четно, можно оценить как

$$P(i) = \int_{-\infty}^0 \int_{x \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{(2i+1)\pi}{q}\right)}^{x \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{(2i-1)\pi}{q}\right)} \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{y^2}{N_0}} dy \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{(x-\sqrt{E})^2}{N_0}} dx. \quad (9)$$

Вероятность попадания принятого сигнала в i -ую решающую область для $i = \frac{q-1}{4}$, где q нечетно, или для $i = \frac{q}{4}$, где q четно, можно оценить как

$$P(i) = \int_0^{\infty} \int_{x \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{(2i-1)\pi}{q}\right)}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{y^2}{N_0}} dy \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{(x-\sqrt{E})^2}{N_0}} dx +$$

$$+ \int_{-\infty}^0 \int_{x \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{(2i+1)\pi}{q}\right)}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{y^2}{N_0}} dy \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{(x-\sqrt{E})^2}{N_0}} dx, \quad (10)$$

что, в свою очередь, позволяет оценить вероятность ошибки как $1 - P(i)$.

На рисунке 3 представлен пример, иллюстрирующий применение формулы (10) для попадания принятого сигнала в решающую область с номером $i=2$ при $q=16$.

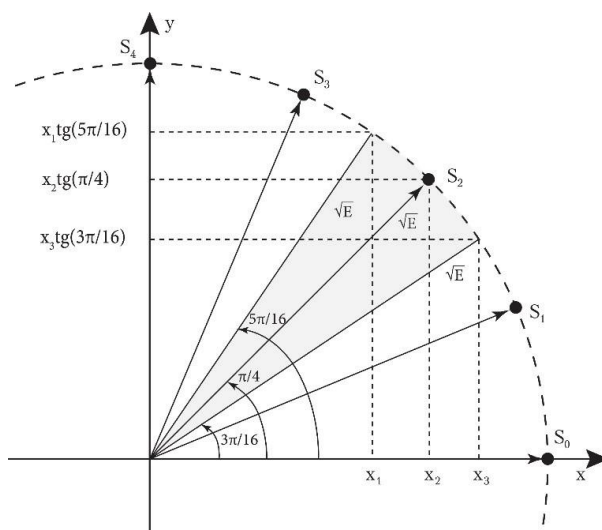


Рисунок 3 – Попадание принятого сигнала в решающую область с номером $i=2$ при $q=16$

Система передачи работает следующим образом. Операция кодирования представляет собой перемножение информационной последовательности противоположных сигналов $\{+1, -1\}$ неограниченной длины и полубесконечной кодирующей матрицы. В качестве примера рассмотрим декодирующую матрицу $H(D)$ порядка 4 глубины 2 на основе многочленов второй степени (2) и соответствующую ей кодирующую матрицу $G(D)$ (3).

Матрица $G(D)$ порождает сверточный код. Ее можно представить в виде

$$G(D) = \left(\begin{array}{cccc|cccc|cccc|cccc|cccc|c}
0 & 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 1 & 3 & 0 \\
3 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-3 & -5 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 4 & 4 & -8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 4 & -8 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\hline
0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -3 & -5 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & -8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -8 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\hline
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & -5 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & -8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -8 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\hline
\cdot & \cdot
\end{array} \right).$$

В свою очередь, кодирующая матрица может быть представлена как

$$H(D) = \left(\begin{array}{cccc|cccc|cccc|c}
0 & 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 & 3 & 0 \\
1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
-1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
-1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
-1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
\hline
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
\hline
1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & \cdot \\
1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & \cdot \\
1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & \cdot \\
1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & \cdot \\
\hline
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot \\
\hline
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdot \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdot \\
\hline
\cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot
\end{array} \right).$$

Отметим, что и кодирующая матрица $G(D)$, и декодирующая матрица $H(D)$ могут продолжаться вправо и вниз сколь угодно долго.

В результате выполнения операции кодирования получим полубесконечное кодовое слово, каждый символ которого принимает значение из множества $\{-22, -21, \dots, 0, \dots, 21, 22\}$, где 22 – максимальная сумма абсолютных значений одного столбца кодирующей матрицы $G(D)$. Эта последовательность поступает на модулятор, в котором реализуется ОФМ с 45 позициями. На приемной стороне оценивается величина сдвига фаз между соседними символами принятого сообщения. На выходе демодулятора получаем также последовательность чисел из того же множества

$\{-22, -21, \dots, 0, \dots, 21, 22\}$. Далее декодер вычисляет скалярное произведение полученной последовательности и декодирующей матрицы. В результате получим оценки передаваемых символов, которые при отсутствии шума должны иметь значения ± 12 . Решения о передаваемых символах принимаем на основании сравнения с нулевым порогом.

Рассмотрим пример конечного сообщения. Пусть оно содержит двенадцать символов и имеет вид

$$(1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1).$$

Тогда кодовое слово, подаваемое на модулятор, представляется следующим вектором: получим кодовое слово

$$(6, 2, 8, -16, 0, 8, 8, -16, 6, 2, -16, 8, -6, -6, 0, 0, 0, 0, 0, 0).$$

Из вида кодирующей матрицы следует, что возможные значения фаз на выходе модулятора есть $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 22$, умноженные на $\frac{2\pi}{45}$. В нашем примере в модуляторе

будут получены фазы со следующими номерами:

$$(6, 8, 16, 0, 0, 8, 16, 0, 6, 8, -8, 0, -6, -12, -12, -12, -12, -12, -12, -12).$$

Таким образом, в модуляторе формируется следующая последовательность фаз:

$$\left(\frac{12\pi}{45}, \frac{16\pi}{45}, \frac{32\pi}{45}, 0, 0, \frac{16\pi}{45}, \frac{32\pi}{45}, 0, \frac{12\pi}{45}, \frac{16\pi}{45}, -\frac{16\pi}{45}, 0, -\frac{12\pi}{45}, -\frac{24\pi}{45}, -\frac{24\pi}{45}, -\frac{24\pi}{45}, -\frac{24\pi}{45}, -\frac{24\pi}{45}, -\frac{24\pi}{45}, -\frac{24\pi}{45} \right).$$

Последовательность сигналов с такими фазами передается по каналу. На приемной стороне оцениваются разности фаз принятых колебаний, и по их значениям определяется принятый вектор, компоненты которого при отсутствии шума в канале также принимают значения из множества $\{-22, -21, \dots, 0, \dots, 21, 22\}$:

$$(6, 2, 8, -16, 0, 8, 8, -16, 6, 2, -16, 8, -6, -6, 0, 0, 0, 0, 0, 0).$$

Далее, умножая на декодирующую матрицу, получим оценки передаваемых символов, которые принимают значения ± 12 :

$$(12, -12, 12, -12, -12, -12, 12, -12, 12, -12, -12, 12).$$

Решения о передаваемых символах принимаем на основании сравнения с нулевым порогом. Заметим, что все кодовые символы на выходе декодера должны делиться на 12:

$$(1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1).$$

Для данного примера указанное свойство можно использовать для исправления ошибок кратности до 5 на 12 бит передаваемой информации. В данной системе при суммарном изменении кодового вектора не более чем на 5 единиц можно установить истинный кодовый вектор, элементы которого будут кратны 12 и к которому кодовый вектор с ошибкой будет ближе по евклидову расстоянию. При кратности ошибки, равной 6, не удастся однозначно определить истинный кодовый вектор. При кратности ошибки больше 6 данный способ исправления ошибки приведет к получению неверного кодового вектора. Управление кодированием осуществляется посредством выбора ортогонального кода (таблица 3) в соответствии с его корректирующими способностями и требованиями к телекоммуникационной системе по количеству обнаруживаемых и исправляемых ошибок.

Кодирующее устройство (рисунок 4) для рассматриваемого примера строится на основе кодирующей матрицы (3).

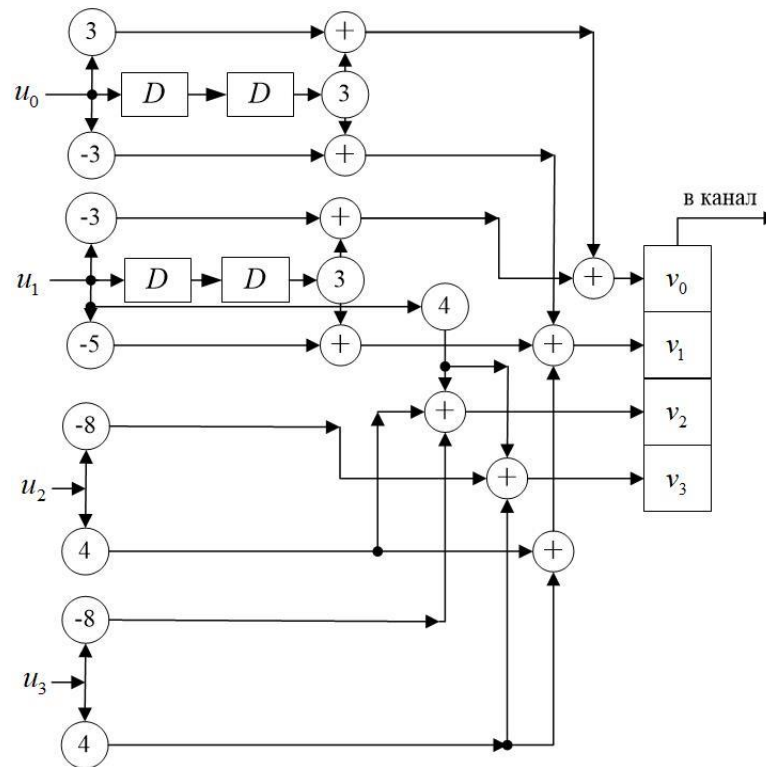


Рисунок 4 – Кодирование устройство ортогонального кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени

На главной диагонали произведения матриц $G(D)$ и $H(D)$ стоит $12D^2$, то есть показатель степени переменной задержки D равен 2. Это соответствует задержке на два такта, а для матриц $G(D)$ и $H(D)$ порядка 4 задержке на 8 символов.

На рисунке 5 показано декодирующее устройство, построенное на основе декодирующей матрицы (2).

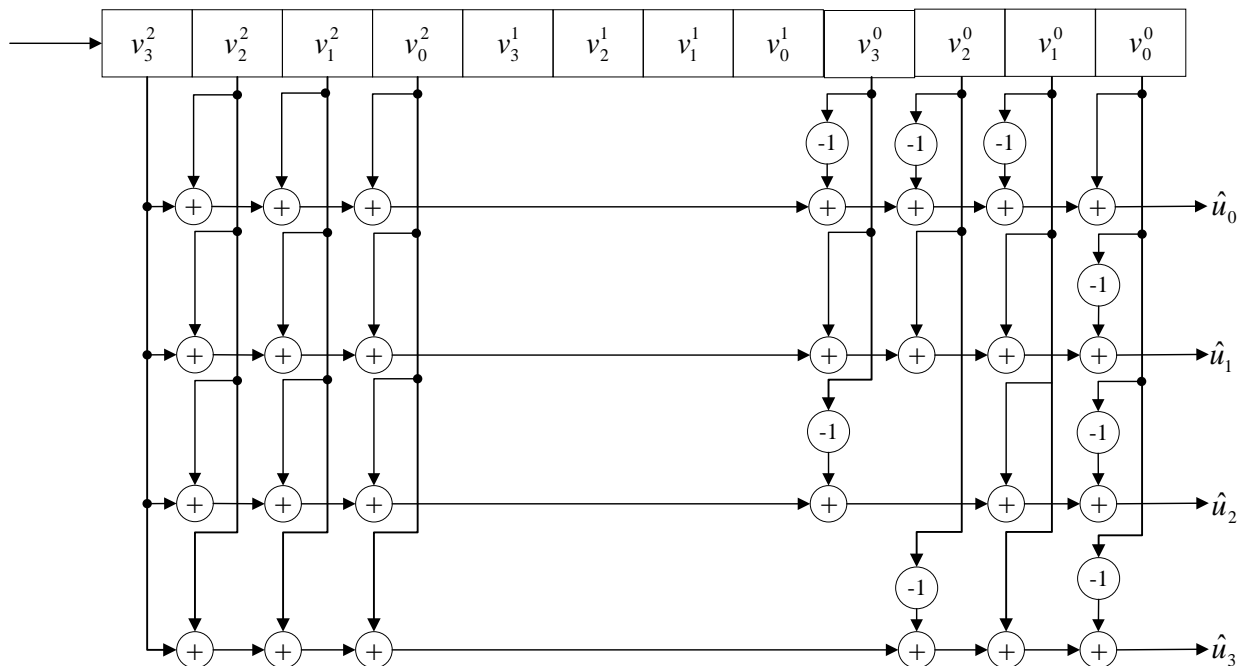


Рисунок 5 – Декодирующее устройство ортогонального кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени

Можно убедиться, что при подаче на вход декодера первой строки кодирующей матрицы $G(D)$ получим на первом выходе через два такта 12, три других выхода будут нулевыми. Аналогично, при подаче второй строки через два такта получим на втором

выходе 12, три других выхода будут нулевыми и так далее. Таким образом, декодер выполняет функции исправления ошибок.

Отметим, что в данной работе рассматриваются только ортогональные коды, которые практически не содержат избыточности. В рассмотренном примере для кодов на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени число избыточных символов равно восьми (порядку матрицы, умноженному на показатель степени многочленов). Если, например, рассмотреть 800 информационных символов, то избыточность останется по-прежнему равной восьми символам. Предлагаемые ортогональные коды для формирования кодового слова используют двоичные входные сигналы. Картина существенно не изменится, если эти двоичные символы образуют кодовое слово какого-либо кода с исправлением ошибок.

Параметры кодирующих и декодирующих матриц обеспечивают дополнительный выигрыш в отношении сигнал/шум. Этот выигрыш получен за счет более эффективного использования энергии передаваемых сигналов. Для передачи одного символа аккумулируется энергия нескольких символов. В примере для кодов на основе матриц порядка 4 глубины 2 каждый информационный символ передается 8 символами, что увеличивает энергию принятого сигнала.

С точки зрения теории информации выигрыш объясняется тем, что при использовании противоположных сигналов $\{+1, -1\}$ и, для рассмотренного примера, относительной фазовой модуляции с 45 позициями четыре передаваемые за один такт бита информации кодируется $\log_2(45) = 5,492$ битами. Таким образом, имеет место избыточность в $5,492 - 4 = 1,492$ бита. Для обозначения данного превышения количества информации, используемой при передаче сообщения посредством кодово-модуляционной схемы ортогонального кодирования, над количеством информации на символ передаваемого сообщения в диссертационной работе применяется термин «кодово-модуляционной избыточность».

С учетом вышеизложенного, **научная новизна разработанного класса ортогональных кодов** состоит в том, что они, в отличие от существующих, построены на основе синтезированных кодирующих матриц и обеспечивают повышение помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем, при большем количестве исправляемых ошибок по сравнению с существующими аналогичными решениями, что, в свою очередь, позволяет учесть обменные соотношения между помехоустойчивостью, спектральной эффективностью и сложностью реализации для широкого класса сценариев функционирования рассматриваемых телекоммуникационных систем.

Практическая значимость полученного класса ортогональных кодов состоит в том, что они обеспечивают существенный энергетический выигрыш практически без внесения избыточности и без существенного увеличения сложности аппаратуры. В соответствии с разработанным классом кодов, был предложен способ построения устройств ортогонального кодирования/декодирования и модуляции/демодуляции, отличающихся использованием в помехозащищенных каналах передачи информации телекоммуникационных систем.

В диссертационной работе создан **комплекс моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование.**

Модели системы связи с применением ортогонального кодирования без помехоустойчивого рассмотрены в **третьей главе**, а модели, анализирующие совместное применение ортогональных и помехоустойчивых кодов, представлены в **четвертой главе** диссертационной работы.

Ранее считалось, что ортогональные коды на основе многочленов степени больше единицы обеспечивают больший выигрыш в отношении сигнал/шум, чем коды на основе многочленов первой степени. Результаты, полученные в данной работе, опровергают эту гипотезу: коды на основе многочленов $1 \pm D^i$ обеспечивают

такой же энергетический выигрыш, как и коды на основе многочленов $1 \pm D$, причем обладают большей задержкой на $i-1$ такт; коды на основе многочленов, состоящих из более двух членов, теоретически способные обеспечить больший энергетический выигрыш, не позволяют однозначно восстановить истинный кодовый вектор.

По указанной причине в исследовании помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем, целесообразно использовать ортогональные коды на основе многочленов первой степени.

Структурная схема системы связи для моделей с применением только ортогонального кодирования представлена на рисунке 6.

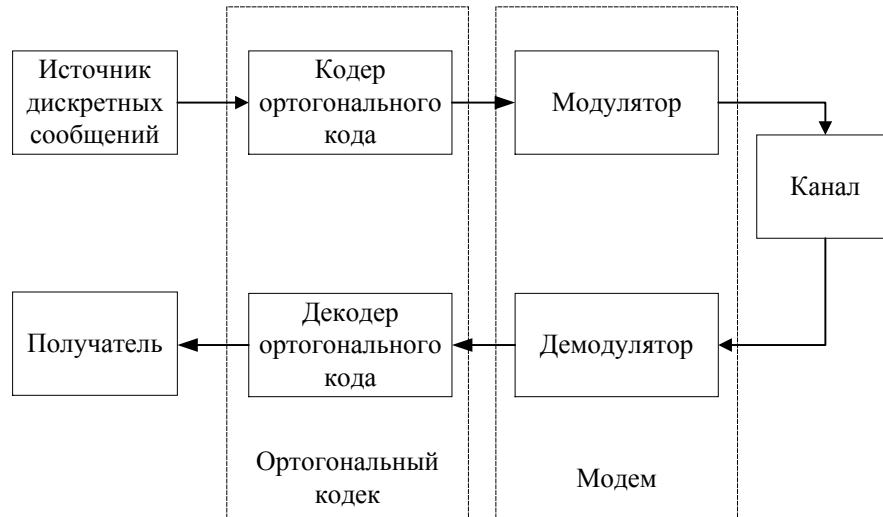


Рисунок 6 – Структурная схема системы связи с применением ортогонального кодирования

Оценка энергетического выигрыша от применения ортогонального кодирования получена аналитическим путем для канала с АБГШ и ортогонального кодирования на основе матриц порядка 4 и многочленов первой степени. Данный результат подтвержден с помощью построения имитационной модели телекоммуникационной системы с ортогональным кодированием по каналам с АБГШ.

В таблице 4 представлены полученные в результате имитационного моделирования значения энергетического выигрыша за счет использования ортогонального кодирования в каналах с АБГШ, случайной фазой и многолучевых каналах с замираниями для всех рассмотренных видов модуляции.

Таблица 4 – Значения энергетического выигрыша за счет использования ортогонального кодирования в каналах с АБГШ, случайной фазой и многолучевых каналах с замираниями

Модель канала	Вид модуляции	Вероятность ошибки на бит	
		10^{-4}	10^{-6}
АБГШ	ОФМ	3,1 дБ	4,5 дБ
	АМ	2,6 дБ	4,2 дБ
	КАМ	2,6 дБ	4,0 дБ
	ЧМ	2,8 дБ	4,4 дБ
АБГШ, случайная фаза	ЧМ	2,0 дБ	3,3 дБ
АБГШ, неселективные по частоте медленные замирания	ОФМ	22,7 дБ	–
АБГШ, рэлеевские замирания	ЧМ	22,5 дБ	–
АБГШ, райсовские замирания	ЧМ	15,6 дБ	–

В четвертой главе работы рассмотрено совместное применение ортогональных и помехоустойчивых кодов и приведены оценки величины энергетического выигрыша в

канале с АБГШ при сочетании ортогонального кодирования с помехоустойчивым кодированием, полученные путем имитационного моделирования.

Структурная схема системы связи для таких моделей представлена на рисунке 7.

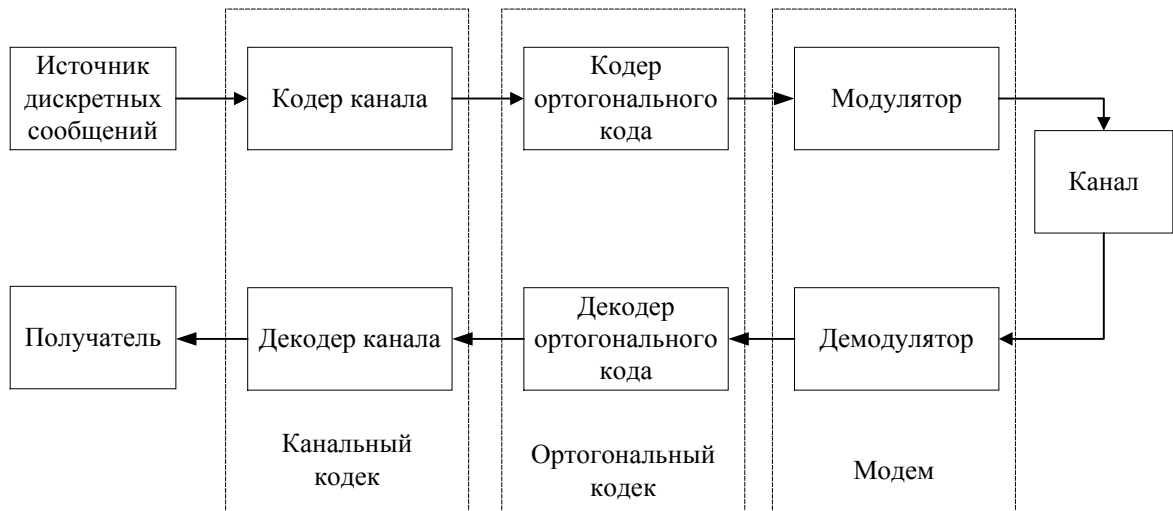


Рисунок 7 – Структурная схема системы связи с применением ортогонального и помехоустойчивого кодирования

Определено, что совместное использование корректирующих и ортогональных кодов дает энергетический выигрыш по сравнению с использованием только корректирующих кодов или только ортогонального кодирования.

В таблице 5 приведены значения максимального энергетического выигрыша при вероятности ошибки на бит 10^{-6} за счет совместного использования ортогональных, блочных и сверточных помехоустойчивых кодов в канале с АБГШ.

Таблица 5 – Значения максимального энергетического выигрыша за счет совместного использования ортогонального и помехоустойчивого кодирования в канале с АБГШ

Помехо-устойчивый код	Вид модуляции	Энергетический выигрыш, дБ		
		по сравнению с использованием ортогонального кодирования и модуляции	по сравнению с использованием помехоустойчивого кодирования и модуляции	по сравнению с использованием модуляции без кодирования
Блочный, БЧХ (63,57)	ОФМ	1,65	3,03	5,80
	АМ	1,65	3,03	5,50
	КАМ	1,65	3,03	5,30
	ЧМ	1,65	3,03	5,70
Блочный, БЧХ (63,30)	ОФМ	2,25	2,60	6,40
	АМ	2,25	2,60	6,10
	КАМ	2,25	2,60	5,90
	ЧМ	2,25	2,60	6,30
Сверточный, (2,1,7)	ОФМ	2,88	1,55	7,03
	АМ	2,88	1,55	6,73
	КАМ	2,88	1,55	6,53
	ЧМ	2,88	1,55	6,93
Сверточный, (3,1,7)	ОФМ	3,33	1,54	7,48
	АМ	3,33	1,54	7,18
	КАМ	3,33	1,54	6,98
	ЧМ	3,33	1,54	7,38

Научная новизна разработанного комплекса моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем состоит в том, что он позволяет осуществлять комплексное исследование на основе комбинации основных видов цифровой модуляции: амплитудной, квадратурной амплитудной, относительной фазовой и частотной – и разработанного ортогонального кодирования, обеспечивающего в совокупности с помехоустойчивым кодированием эффективное использование энергии передаваемых сигналов.

Предложенный способ ортогонального кодирования является разновидностью приема в целом сигналов M -кратной модуляции с оптимальным выбором манипуляционного кода. Оптимизация достигается путем усреднения вероятности ошибки по всем разрядам M -ичного кода.

Практическая значимость комплекса моделей определяется тем, что он позволяет оценить в каналах с аддитивным гауссовским шумом, случайной фазой и многолучевых каналах с замираниями уменьшение результирующей вероятности ошибки за счет использования ортогонального кодирования. Вероятность ошибки на бит является контрольным решением данных моделей.

В пятой главе работы сформулированы научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем при высоком отношении сигнал/шум для достижения требуемой спектральной эффективности.

Научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем при высоком отношении сигнал/шум для достижения требуемой спектральной эффективности были разработаны в результате применения созданной в диссертационной работе технологии в процессе выполнения пяти научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ: трех в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (№ 14.575.21.0021 от 17.06.2014, № 14.578.21.0022 от 05.06.2014, № 14.578.21.0214 от 03.10.2016), одной в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования в сфере научной деятельности в 2014-2016 гг. (№ 2.2716.2014/К от 17.07.2014) и гранта № 18-07-01298 Российского фонда фундаментальных исследований в 2018-2020 гг.

Анализ применимости разработанных в диссертационном исследовании технических решений для повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем в данных проектах показал необходимость решения следующих задач:

- обеспечения синхронизации сигналов в сочетании с ортогональными кодами;
- разработки метода изменения параметров адаптации радиосредств при ухудшении качества канала связи для уменьшения времени простоя канала радиосвязи и повышения помехозащищенности в системах радиосвязи УКВ-диапазона.

Условия и порядок установления синхронизации сигналов в сочетании с ортогональными представлены в пятой главе работы. Для пар кодирующей и декодирующей матриц, на основе которых построены ортогональные коды, определено максимально допустимое значение, на которое может измениться любой из отсчетов при цифровой обработке сигналов под действием шума.

В общем виде обозначим это значение как e , тогда оценка абсолютного значения разности между двумя соседними отсчетами может измениться максимум на $2e$, когда к одному из отсчетов величина e прибавляется, а из другого вычитается. Например, для кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов первой степени установлено, что для любых двух соседних элементов вектора отсчетов будет верно, что их разность по абсолютной величине не превышает значения $|\Delta| \leq 0,197 + 2e$. Это неравенство будет гарантированно выполняться для любой пары соседних отсчетов, если величина каждого компонента шума, действующего на взятые отсчеты, не будет превышать заданное число

e. Если амплитуда сигналов отлична от единицы, то оценка будет, соответственно, $|\Delta| \leq A \cdot 0,197 + 2e$, где A – амплитуда сигнала. В частности, для данного кода и ОФМ получена повторяющаяся во времени пара сигналов со значениями фаз с разностью в 16 секторов (в 4 и 20 секторах). Для обеспечения синхронизации на все 4 входа кодера следует подавать синхросигнал $(+1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, -1)$. В таком случае в передаче будет периодически повторяющаяся пара сигналов, для которых разница в значениях фаз равна 16 секторов. Для такой пары можно сосчитать Δ . Оно равно 1,835, поэтому оценка для максимального значения компонентов шума будет $|e| < 0,41 \cdot A$.

Для каждой конфигурации ортогонального кода выполнено имитационное моделирование и рассмотрены различия между отсчетами сигнала при отсутствии помех, случаи сбоя синхронизации на несколько отсчетов и небольшого искажения сигналов шумом, а также сильного искажения сигналов. Результаты моделирования для кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов первой степени представлены на рисунках 8-11.

При установке синхронизации устанавливаются номер отсчета, соответствующий началу «неправильного сигнала», и, следовательно, количество отсчетов, на которые произошло смещение во времени относительно «правильного» момента приема. Такой подход позволяет определить количество отсчетов, которые нужно пропустить, чтобы начать прием сигналов.

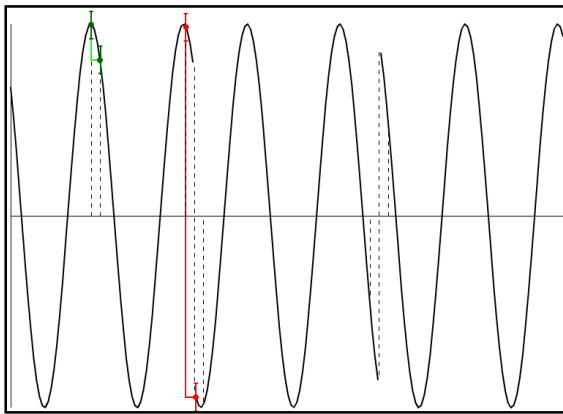


Рисунок 8 – Значения разниц между отсчетами при установке синхронизации для кода на основе матриц порядка 4

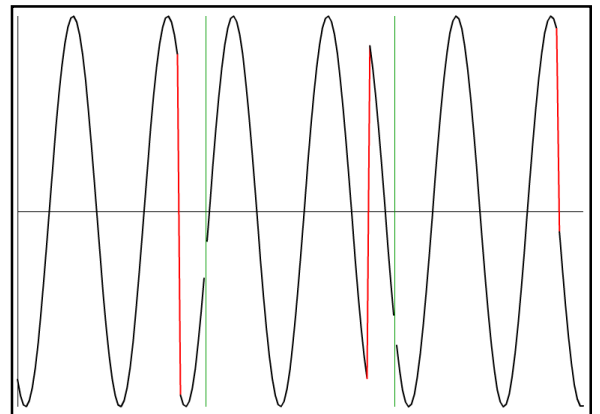


Рисунок 9 – Пример сбоя синхронизации на несколько отсчетов для кода на основе матриц порядка 4

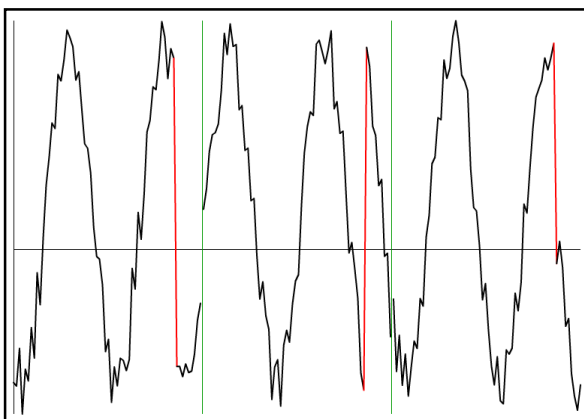


Рисунок 10 – Незначительное искажение сигналов шумом для кода на основе матриц порядка 4

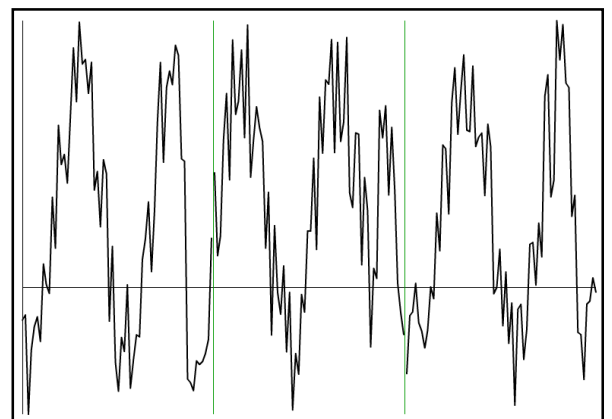


Рисунок 11 – Сильное искажение сигналов шумом для кода на основе матриц порядка 4

Для каждого ортогонального кода на основе синтезированных матриц (таблица 3) найден сигнал, обеспечивающий синхронизацию при передаче и обработке сигналов.

Проведенное моделирование подтвердило практическую применимость предложенного технического решения.

Рассмотрим характеристики помехозащищенности системы связи, использующей разработанные в исследовании ортогональные коды, и системы связи с применением ортогональных кодов на основе матриц Адамара, в сочетании с ОФМ. В данной системе при кодировании используются матрицы Адамара Hd_n порядка $n=2^k$, $k=0,1,\dots$. Они синтезируются по рекуррентной формуле $Hd_n = \begin{pmatrix} Hd_{n/2} & Hd_{n/2} \\ Hd_{n/2} & Hd_{n/2} \end{pmatrix}$ из матрицы

$Hd_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$. В процессе кодирования каждые k бит информации (из символов «0» и

«1»), рассматриваемые как k -разрядное число v , преобразуются в v -тую строку матрицы Hd_n . Кодирование с помощью матриц Адамара дает возможность использовать прием в целом, при котором декодирование, реализуемое путем перемножения принятого вектора на матрицу Адамара, может быть осуществлено с помощью алгоритма быстрого преобразования Уолша-Адамара.

На рисунке 12 показано, что использование предложенных ортогональных кодов позволяет обеспечить энергетический выигрыш в 1,7 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} .

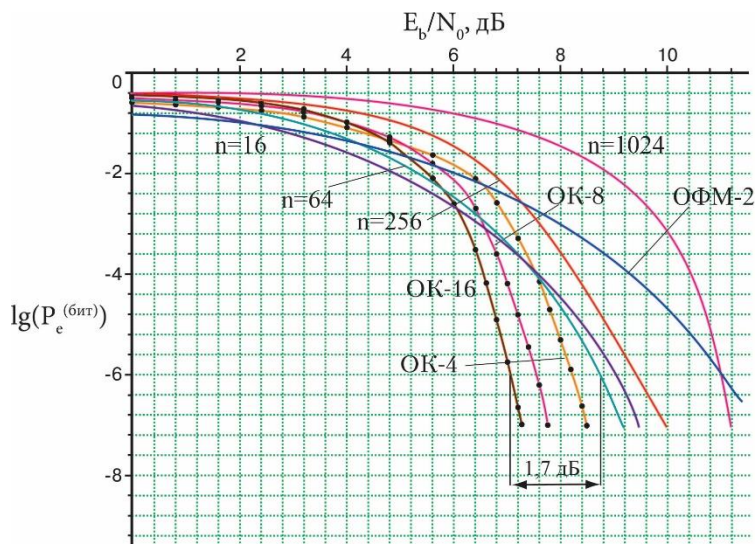


Рисунок 12 – Вероятности ошибки на бит в канале с АБГШ и двоичной ОФМ для схем с ортогональным кодированием на основе матриц порядка 4, 8, 16 и ортогональных кодов на основе матриц Адамара порядка 16, 64, 256, 1024

В 1982 г. Г. Унгербокк провел анализ СКК на базе ОФМ и сверточного кода со скоростью $r = k/(k+1)$. По способу согласования модуляции и кодирования СКК Унгербокка относятся к конструкциям, полученным на основе разбиения ансамбля сигналов на вложенные подансамбли. При этом одна ветвь дерева разбиения кодируется символом «0», другая – «1». Считывание кодовой комбинации, соответствующей сигнальной точке на амплитудно-фазовой плоскости, осуществляется по построенному дереву снизу вверх. СКК Унгербокка имеют более высокие частотно-энергетические характеристики по сравнению с ранее использовавшимися СКК при сопоставимой сложности реализации, что определило их активное внедрение в телекоммуникационных системах.

При построении многомерных СКК возникает проблема выбора манипуляционного кода, поскольку известные методы его построения (например, правила построения кодов Грея и разбиения ансамбля на вложенные подансамбли Унгербокка) не всегда позволяют согласовать евклидовы и хемминговы расстояния. Именно с этим связаны многие проблемы построения многомерных СКК.

Рисунок 12 демонстрирует результаты имитационного моделирования применения в канале с АБГШ и двоичной ОФМ ортогональных кодов на основе матриц порядка 4, 8, 16 и кодов Унгербоэка для многочленов степеней 2, 3, 4 (кривые «У-2», «У-3», «У-4»). Показано, что использование ортогональных кодов позволяет обеспечить энергетический выигрыш минимум в 1,9 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} .

В 2014 г. Г. Гювенсен, Я. Таник и А. Йылмаз предложили усовершенствовать подход Г. Унгербоэка и рассмотреть обход по дереву с уменьшенным числом состояний, а также применить механизм обратной связи, что обеспечило более эффективное использование энергии передаваемых сигналов (рисунок 13). Тем не менее, ортогональные коды по сравнению с кодами Унгербоэка для многочленов степеней 1 и 3 с уменьшенным числом состояний (без обратной связи – кривые «УМС-1», «УМС-3», с обратной связью – кривая «УМОС-1») при вероятности ошибки на бит 10^{-6} предоставляют энергетический выигрыш минимум в 1,6 дБ (рисунок 14).

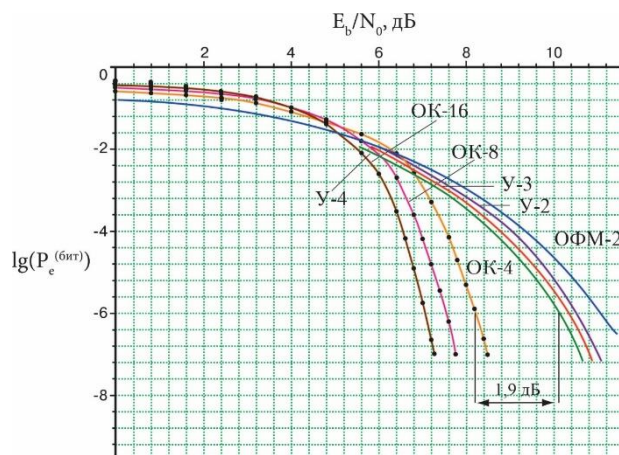


Рисунок 13 – Вероятности ошибки на бит в канале с АБГШ и двоичной ОФМ для схем с ортогональным кодированием на основе матриц порядка 4, 8, 16 и кодов Унгербоэка для многочленов степеней 2, 3, 4

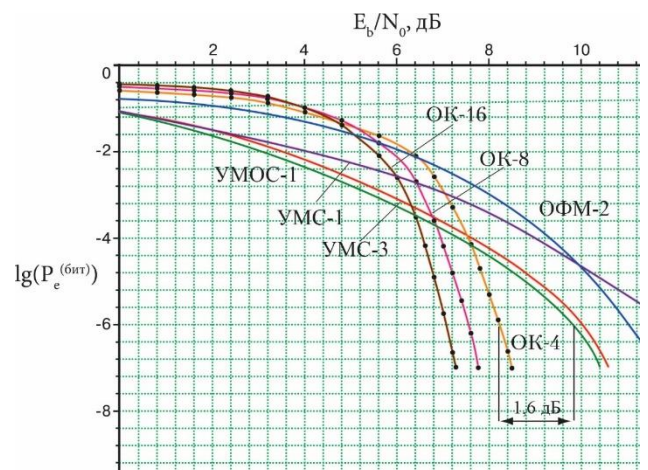


Рисунок 14 – Вероятности ошибки на бит в канале с АБГШ и двоичной ОФМ для схем с ортогональным кодированием на основе матриц порядка 4, 8, 16 и кодов Унгербоэка для многочленов степеней 1, 3 с уменьшенным числом состояний

Коды с низкой плотностью проверки на четность (LDPC-коды) были впервые предложены Р. Галлагером в 1962 году. Его идея заключалась в том, что декодирующая матрица формировалась с помощью перестановки строк и столбцов при исключении при этом повторяющихся циклов в матрице. Реализация такого подхода был достаточно сложна и не находила применения долгое время.

Только в 1990-х годах М. Дэви и Д. Маккей предложили новый способ, предполагающий уменьшенную сложность реализации.

LDPC-коды – это линейные блочные коды, где количество ненулевых компонентов гораздо меньше, чем количество нулевых компонентов. Эффективность таких кодов зависит от многих параметров, например, от длины кода и скорости кодирования. Величина скорости будет показывать степень избыточности кода: чем больше скорость, тем эффективнее алгоритм кодирования.

На рисунке 15 отображены полученные в результате имитационного моделирования зависимости вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум для двух LDPC-кодов, имеющих скорости кодирования $r = 5/6$ и $r = 7/8$, а также для системы с ортогональным кодированием ОК-4, ОК-8, ОК-16.

При вероятности ошибки на бит 10^{-6} LDPC-код со скоростью $5/6$ обеспечивает энергетический выигрыш по отношению ко всем ортогональным кодам, в частности, в 0,88 дБ к коду ОК-16. При этом код ОК-16 обеспечивает энергетический выигрыш в 0,4 дБ по отношению к LDPC-коду со скоростью $7/8$, поскольку его скорость кодирования ближе

к единице, чем $5/6$. Данный результат подтверждает практическую значимость разработанных в работе ортогональных кодов как кодов, практически не вносящих избыточность и тем самым не требующих увеличения сложности приемо-передающей аппаратуры.

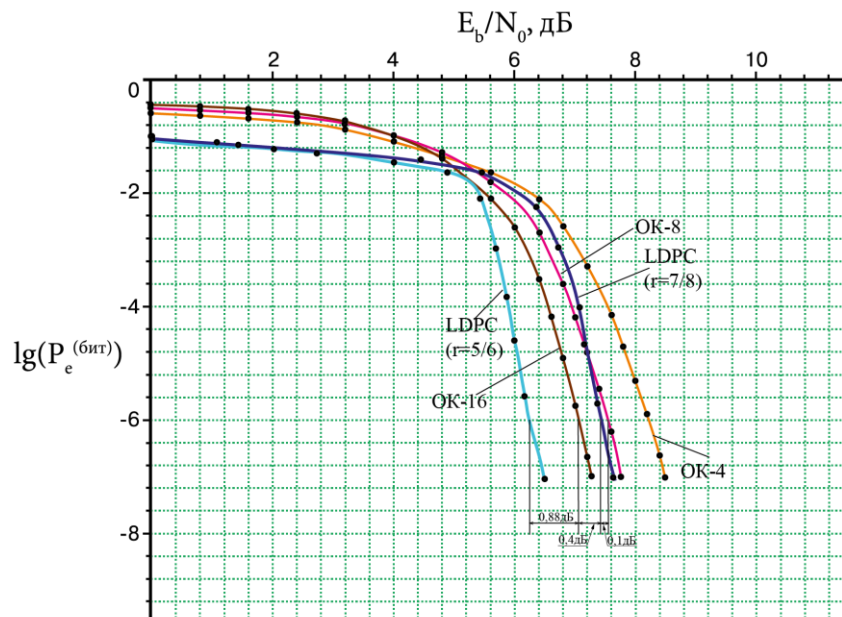


Рисунок 15 – Вероятности ошибки на бит в канале с АБГШ и двоичной ОФМ для схем с ортогональным кодированием на основе матриц порядка 4, 8, 16 и LDPC-кодов со скоростью кодирования $5/6$ и $7/8$

С учетом вышеизложенного **научная новизна разработанных научно-технических предложений** по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем состоит в том, что в результате проведенного диссертационного исследования разработана методология повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем посредством применения ортогональных кодов, обеспечивающих при высоком отношении сигнал/шум большие, по сравнению с известными, значения спектральной эффективности.

Практическая значимость сформулированных предложений подтверждается тем, что результаты исследования могут быть использованы в телекоммуникационных системах для практической реализации ортогонального кодирования, эффективность применения которого подтверждена количественными оценками и простыми процедурами кодирования и декодирования.

Ортогональное кодирование позволяет обеспечить требуемое качество передачи при меньших энергетических затратах. Энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум, получаемый за счет более эффективного использования энергии передаваемых сигналов, достигается без увеличения сложности и, следовательно, стоимости устройств приема и передачи.

Техническая реализация ортогонального кодирования характеризуется невысокой сложностью. На каждом шаге процесс декодирования сводится к вычислению нескольких скалярных произведений отрезков принятого сообщения и строк декодирующей матрицы и сравнению с фиксированным (в данном случае, нулевым) порогом.

На рисунке 16 показаны не только зависимость скорости кодирования от отношения сигнал/шум для различных систем спутниковой связи, но и зависимость скорости кодирования от отношения сигнал/шум для систем с ортогональным кодированием.

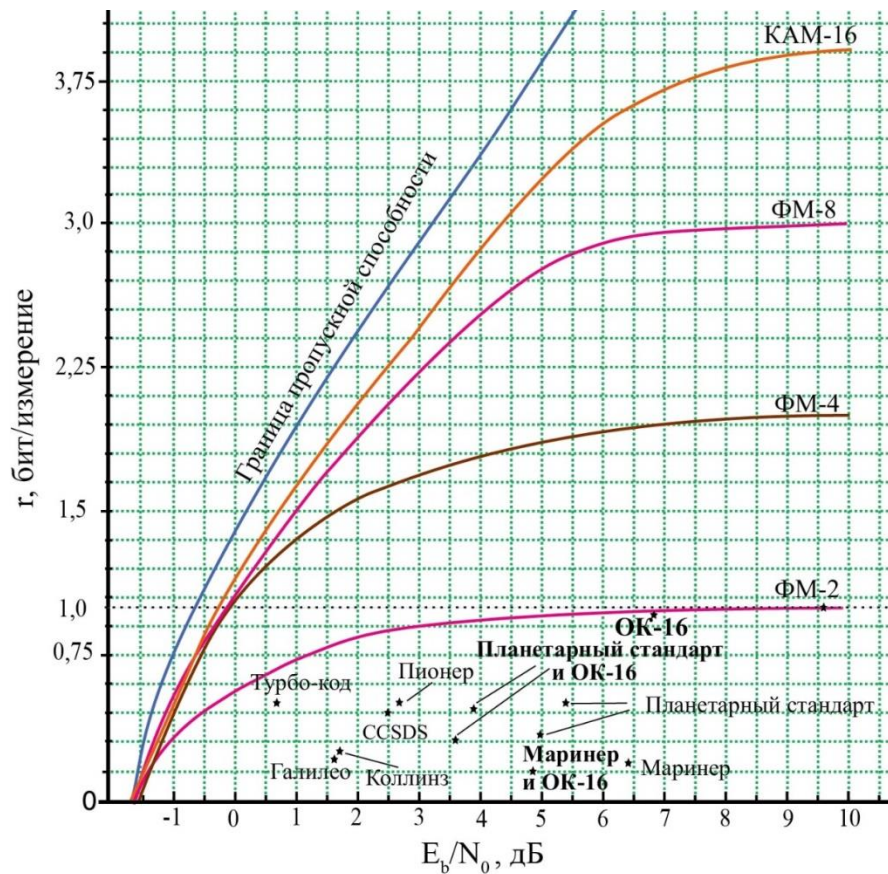


Рисунок 16 – Зависимость скорости кодирования от отношения сигнал/шум для различных систем спутниковой связи и систем с ортогональным кодированием (вероятность ошибки на бит 10^{-5})

Для обеспечения вероятности ошибки на бит 10^{-5} в системах с ОФМ, АМ, КАМ и ортогональным кодированием на основе матриц порядка 16 требуется отношение сигнал/шум $E_b/N_0 = 6,82$ дБ. На рисунке 16 соответствующая точка обозначена как «ОК-16». При использовании кода планетарного стандарта (2,1,7) совместно с ортогональным кодом на основе матриц порядка 16 в системах с ОФМ вероятность ошибки на бит 10^{-5} обеспечивается при отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 3,98$ дБ. Тем самым достигнут энергетический выигрыш в 1,51 дБ по сравнению с применением только кода (2,1,7) практически при сохранении скорости кодирования. При использовании кода планетарного стандарта (3,1,7) совместно с ортогональным кодом на основе матриц порядка 16 в системах с ОФМ вероятность ошибки на бит 10^{-5} обеспечивается при отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 3,52$ дБ. Таким образом, получен энергетический выигрыш в 1,48 дБ по сравнению с применением только кода (3,1,7) практически при сохранении скорости кодирования. На рисунке 16 соответствующие точки обозначены как «Планетарный стандарт и ОК-16». При применении использовавшегося на станции «Маринер-7» блочного кода Рида-Малера со скоростью $r = 6/32$ и минимальным расстоянием Хэмминга между кодовыми словами $d_{\min} = 16$ совместно с ортогональным кодом на основе матриц порядка 16 вероятность ошибки на бит 10^{-5} обеспечивается при отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 4,98$ дБ. Видим, что в этом случае имеется энергетический выигрыш в 1,42 дБ по сравнению с использованием только кода Рида-Малера. На рисунке 16 соответствующая точка обозначена как «Маринер и ОК-16».

В работе рассмотрены ортогональные коды, которые практически не содержат избыточности. Также наличествуют коды со значительной избыточностью. Предполагается, что эти коды обеспечивают больший выигрыш в отношении сигнал/шум, но в данном исследовании они не анализируются.

В заключении диссертационной работы представлена обобщенная итоговая оценка проведенного исследования и приведены его основные результаты и их соотношение с целью и задачами, теоретической и практической значимостью, а также положениями, выносимыми на защиту, поставленными и сформулированными во введении.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие **результаты**, имеющие **научную новизну и практическое значение**:

1. Разработан метод синтеза декодирующих и кодирующих матриц на основе многочленов степени больше единицы для формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования, отличающийся свойством регулярности от случайного поиска отдельных пар матриц с применением комбинаторных методов и позволяющий обеспечить вероятность ошибки благодаря выбору параметров матриц. Доказана корректность метода синтеза. Доказана теорема об эквивалентности полиномиальной кодирующей и декодирующей матриц и канонических матриц диагонального вида.

2. Получен класс ортогональных кодов, построенных, в отличие от существующих, на основе синтезированных кодирующих матриц, обеспечивающих повышение помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем при большем количестве исправляемых ошибок по сравнению с существующими аналогичными решениями. Полученные коды практически не вносят избыточность и не увеличивают сложность приема-передающей аппаратуры. Построена решетчатая диаграмма ортогонального кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени. Для этого кода определено свободное расстояние, равное 24, и, следовательно, максимально возможный энергетический выигрыш, равный 13,8 дБ. Результаты имитационного моделирования подтвердили истинность данного теоретического предположения.

3. Разработан комплекс моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование.

3.1. Модели каналов с применением ортогонального кодирования позволили оценить уменьшение результирующей вероятности ошибки за счет использования ортогонального кодирования. Максимальный энергетический выигрыш составил: в канале с АБГШ – 4,50 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} , в канале с АБГШ и случайной фазой – 3,31 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} , в канале с АБГШ и неселективными по частоте и медленными замираниями – 22,74 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-4} , в канале с АБГШ и рэлеевскими замираниями – 22,50 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-4} , в канале с АБГШ и райсовскими замираниями – 15,60 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-4} .

3.2. Модели каналов с совместным применением ортогонального и помехоустойчивого кодирования (блокового и сверточного) позволили оценить в каналах с АБГШ уменьшение результирующей вероятности ошибки по сравнению с использованием только ортогональных или только помехоустойчивых кодов – от 1,54 до 3,33 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} .

4. Сформулированы научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем при высоком отношении сигнал/шум для достижения требуемой спектральной эффективности.

Ортогональные коды также обеспечивают энергетический выигрыш по сравнению со следующими техническими решениями, применяющими кодированную модуляцию, ортогональные и квазиортогональные сигналы:

– на основе матриц Адамара в канале с АБГШ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} – в 1,7 дБ;

- с кодами Унгербоека в канале с АБГШ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} – в 1,9 дБ;
- с кодами Унгербоека с уменьшенным числом состояний в канале с АБГШ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} – в 1,6 дБ;
- по сравнению с LDPC-кодом со скоростью кодирования 7/8 – в 0,4 дБ.

Таким образом, решены все задачи, поставленные для достижения сформулированной в работе цели. В результате исследования **разработано ортогональное кодирование как метод повышения помехозащищенности каналов передачи информации телекоммуникационных систем при минимальном изменении скорости кодирования**. Следовательно, цель работы достигнута. Предложенный способ кодирования и построения устройств приема и передачи может найти применение в телекоммуникационных системах.

В результате проведенных в диссертационной работе исследований решена важная научно-техническая проблема использования ортогонального кодирования для разработки помехозащищенных телекоммуникационных систем, обеспечивающих при высоком отношении сигнал/шум передачу с близкой к предельно возможной спектральной эффективности.

IV. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Монографии

1. Рабин, А.В. Помехозащищенность радиотехнических систем на основе применения ортогонального кодирования : монография / А.В. Рабин. – Москва: Наука. – 2020. – 151 с. – ISBN 978-5-02-040796-1.
2. Рабин, А.В. Помехоустойчивость систем цифровой связи с ортогональным кодированием и многопозиционной модуляцией : монография / А.В. Рабин – Санкт-Петербург: ГУАП. – 2019. – 157 с. – ISBN 978-5-8088-1431-8.

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

3. Рабин, А.В. Помехозащищенность в каналах со случайной фазой и замираниями при использовании ортогонального кодирования и частотной модуляции / А.В. Рабин. – DOI 10.18127/j20700814-202005-02 // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – Т. 18. – № 5. – С. 13-19.
4. Рабин, А.В. Помехозащищенность в каналах с аддитивным шумом при использовании ортогонального кодирования и частотной модуляции / А.В. Рабин. – DOI 10.18127/j20700814-202005-01. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – Т. 18, № 5, С. 5-12.
5. Рабин, А.В. Совместное применение ортогонального кодирования и квадратурной амплитудной модуляции / А.В. Рабин. – DOI: 10.18127/j20700784-202009-05 // Успехи современной радиоэлектроники. – 2020. – Т. 74. – № 9. – С. 44-52.
6. Рабин, А.В. Применение ортогонального кодирования совместно с дискретной амплитудной модуляцией / А.В. Рабин. – DOI 10.18127/j00338486-202008(16)-04 // Радиотехника. – 2020. – Т. 84. – № 8(16). – С. 28-36.
7. Рабин, А.В. Метод повышения надежности помехозащищенности при приеме информации в системах радиосвязи СВЧ- и КВЧ-диапазонов / В.А. Липатников, П.И. Кузин, А.В. Рабин. DOI 10.18127/j00338486-202008(16)-01 // Радиотехника. – 2020. – Т. 84. – № 8(16). – С. 5-12.
8. Рабин, А.В. Ортогональное кодирование как способ повышения помехоустойчивости при передаче сигналов по многолучевым каналам с замираниями / А.В. Рабин // Датчики и системы. – 2019. – № 4(235). – С. 7-12.
9. Рабин, А.В. Согласование символов ортогональных кодов с относительной фазовой модуляцией / А.В. Рабин // Датчики и системы. – 2018. – № 12(231). – С. 37-43.
10. Рабин, А.В. Синхронизация сигналов в системах связи с ортогональным кодированием и относительной фазовой модуляцией / А.В. Рабин. DOI 10.18127/j15604128-201807-10 // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – № 7. – Т. 3. – С. 57-62.
11. Рабин, А.В. Реализация кодирующих и декодирующих устройств в телекоммуникационных системах с ортогональным кодированием / А.В. Рабин. DOI 10.18127/j20700784-201812-24 // Успехи современной радиоэлектроники. – 2018. – № 12. – С. 116-120.
12. Рабин, А.В. Исследование характеристик помехоустойчивости при использовании ортогонального кодирования / А.В. Рабин, М.А. Добросельский, В.А. Липатников // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 10/2018, – Серия «Общетеchnическая» (ОТ). – выпуск 6. – С. 80-85.

13. Рабин, А.В. Разработка класса системных и обратных системных матриц, обеспечивающих повышение помехоустойчивости спектрально-эффективных модуляционных схем на основе ортогонального кодирования / А.В. Рабин, С.В. Мичурин, В.А. Липатников // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 10/2018. – Серия «Общетехническая» (ОТ). – выпуск 6. – С. 75-79.
14. Рабин, А.В., Мирончиков Е.Т. Ортогональное кодирование и его использование с фазоразностной модуляцией / А.В. Рабин, Е.Т. Мирончиков // Программные продукты и системы. – 2007. – № 3 (сент). – С. 77-80.

**Публикации в рецензируемых журналах и изданиях,
индексируемых реферативной базой «Scopus»**

15. Rabin, A.V. Interference immunity in channels with random phase and fading when using orthogonal coding and frequency modulation / A.V. Rabin. – DOI :10.1088/1757-899X/1047/1/012154 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Volume 1047. – Номер статьи 012154.
16. Rabin, A.V. Combining of orthogonal coding and quadrature amplitude modulation / A.V. Rabin. – DOI 10.1088/1742-6596/1679/5/052022 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1679. – Номер статьи 052022.
17. Rabin, A.V. Application of orthogonal coding in conjunction with discrete amplitude modulation / A.V. Rabin. – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022078 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1679. – Номер статьи 022078.
18. Rabin, A.V. The method of increasing the reliability of noise immunity when receiving information in radio communication systems of the SHF and EHF ranges / V.A. Lipatnikov, P.I. Kuzin, A.V. Rabin. – DOI 10.1088/1742-6596/1679/5/052100 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1679. – Номер статьи 052100.
19. Rabin, A.V. Signal protection methods in channels with Nakagami fading / A.V. Rabin, V.A. Lipatnikov, P.I. Kuzin. – DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052078 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1515. – Номер статьи 052078.
20. Rabin, A.V. Design of encoding and decoding devices in infocommunication systems with orthogonal coding / A.V. Rabin. – DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052077 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1515. – Номер статьи 052077.
21. Rabin, A.V. Matching orthogonal code symbols and modulation methods / A.V. Rabin. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012216 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Volume 734. – Issue 1. – Номер статьи 012216.
22. Rabin, A.V. Orthogonal code symbols' synchronization in communication systems / A.V. Rabin. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012026 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Volume 734. – Issue 1. – Номер статьи 012026.
23. Rabin, A.V. Orthogonal coding for noise immunity's increase with the fixed code rate / A.V. Rabin. – DOI 10.1088/1742-6596/1333/2/022013 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Volume 1333. – Issue 2. – Номер статьи 022013.
24. Rabin, A.V. Encoding and Decoding Schemes in Communication Systems using Orthogonal Coding for Noise Immunity's Increase / A.V. Rabin. – DOI 10.1109/WECONF.2019.8840610 // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF. – 2019. – Saint-Petersburg: IEEE Xplore. – Номер статьи 8840610.

Свидетельства о государственной регистрации

25. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611498 Российская Федерация. Синтез кодирующих и декодирующих матриц на основе многочленов третьей степени для формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования : № 2021610747 : дата поступления 29.01.2021 : дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.01.2021 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
26. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611497 Российская Федерация. Синтез кодирующих и декодирующих матриц на основе многочленов второй степени для формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования : № 2021610746 : дата поступления 29.01.2021 : дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.01.2021 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
27. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667846 Российская Федерация. Модель функционирования схем устройств модуляции и демодуляции, входящих в состав помехозащищенной системы связи с ортогональным кодированием : № 2020667419 : дата поступления 29.12.2020: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.12.2020 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.

28. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667845 Российская Федерация. Модель функционирования схем устройств кодирования и декодирования, входящих в состав помехозащищенной системы связи с ортогональным кодированием : № 2020667418 : дата поступления 29.12.2020: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.12.2020 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
29. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667840 Российская Федерация. Имитационная модель системы передачи информации в каналах со случайной фазой и замираниями при использовании ортогонального кодирования и частотной модуляции: № 2020667414 : дата поступления 29.12.2020: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.12.2020 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
30. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667839 Российская Федерация. Имитационная модель системы передачи информации в каналах с аддитивным шумом при использовании ортогонального кодирования и частотной модуляции: № 2020667413 : дата поступления 29.12.2020: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.12.2020 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
31. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667838 Российская Федерация. Имитационная модель системы передачи данных с ортогональным кодированием и квадратурной амплитудной модуляцией: № 2020667412 : дата поступления 29.12.2020: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.12.2020 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
32. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667837 Российская Федерация. Имитационная модель системы передачи данных с ортогональным кодированием и дискретной амплитудной модуляцией: № 2020667411 : дата поступления 29.12.2020: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.12.2020 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
33. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616889 Российская Федерация. Программный комплекс моделирования системы передачи данных, использующей помехоустойчивые корректирующие и ортогональные коды: № 2020615885 : дата поступления 09.06.2020: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25.06.2020 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
34. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616830 Российская Федерация. Программное обеспечение повышения помехозащищенности систем цифровой связи с ортогональным кодированием и многопозиционной модуляцией: № 2020615840 : дата поступления 09.06.2020: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23.06.2020 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
35. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661978 Российская Федерация. Программа оценки энергетического выигрыша от применения ортогонального кодирования совместно с временно-импульсной модуляцией: № 2019660833 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
36. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661932 Российская Федерация. Программная реализация процедуры согласования символов ортогонального кода с частотной модуляцией: № 2019660690 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
37. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661929 Российская Федерация. Программа оценки энергетического выигрыша от применения ортогонального кодирования совместно с квадратурной амплитудной модуляцией: № 2019660627 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
38. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661928 Российская Федерация. Программная реализация процедуры согласования символов ортогонального кода с дискретной амплитудной модуляцией: № 2019660626 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
39. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661927 Российская Федерация. Программная реализация процедуры согласования символов ортогонального кода с квадратурной амплитудной модуляцией: № 2019660625 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
40. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661888 Российская Федерация. Программная реализация процедуры согласования символов ортогонального

- кода с временно-импульсной модуляцией: № 2019660602 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
41. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661887 Российская Федерация. Программа оценки энергетического выигрыша от применения ортогонального кодирования совместно с относительной фазовой модуляцией: № 2019660601 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
42. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661886 Российская Федерация. Программа оценки энергетического выигрыша от применения ортогонального кодирования совместно с частотной модуляцией: № 2019660603 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
43. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661885 Российская Федерация. Программа оценки энергетического выигрыша от применения ортогонального кодирования совместно с дискретной амплитудной модуляцией: № 2019660606 : дата поступления 29.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
44. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661473 Российская Федерация. Программный комплекс моделирования системы передачи данных, использующей совместно корректирующие и ортогональные коды: № 2019650355 : дата поступления 20.08.2019: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 02.09.2019 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
45. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660771 Российская Федерация. Программная реализация процедуры согласования символов ортогонального кода с относительной фазовой модуляцией: № 2018618181 : дата поступления 02.08.2018: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.08.2018 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
46. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660770 Российская Федерация. Программная реализация алгоритма синтеза класса системных и обратных системных матриц, обеспечивающих выполнение ортогонального кодирования: № 2018618185 : дата поступления 02.08.2018: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.08.2018 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.
47. Рабин, А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018610819 Российская Федерация. Имитационная модель системы передачи данных по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом с использованием ортогонального кодирования: № 2017662032 : дата поступления 22.11.2017: дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17.01.2018 / А.В. Рабин ; правообладатель ГУАП – 1 с.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве

Личным вкладом автора во все работы, выполненные в соавторстве, являются постановка задач исследований, разработка теоретических моделей и формулировка предложенных методов, планирование имитационных исследований и экспериментов, обработка данных и интерпретация полученных результатов, обобщение результатов в виде обоснованных выводов и рекомендаций, изложение содержания исследований в форме научных публикаций и апробация результатов.

В частности, в публикациях

– [7; 18; 19]: автором предложен метод повышения помехозащищенности при приеме информации в системах радиосвязи СВЧ- и КВЧ-диапазонов;

– [12; 13; 14]: автором разработаны класс декодирующих и кодирующих матриц, обеспечивающих построение ортогональных кодов и повышение помехозащищенности каналов передачи информации телекоммуникационных систем, и модели помехозащищенных каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование.

Печатается в авторской редакции

Печать офсетная	Формат 60×84 1/16	Бумага офсетная
	Тираж 100 экз.	Заказ №

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская улица, д.67, лит. А