

*На правах рукописи*



ШЕВЛЯКОВ Дмитрий Александрович

**АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ  
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В МНОГОЛУЧЕВЫХ КАНАЛАХ  
НА ОСНОВЕ МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ**

05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Рязань 2015

Работа выполнена на кафедре вычислительной и прикладной математики  
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»  
(ФГБОУ ВПО «РГРТУ», РГРТУ).

Научный руководитель: Овечкин Геннадий Владимирович,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры вычислительной и прикладной  
математики ФГБОУ ВПО «Рязанский  
государственный радиотехнический  
университет», г. Рязань.

Официальные оппоненты: Полушин Петр Алексеевич,  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ  
ВПО «Владимирский государственный  
университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых», профессор  
кафедры радиотехники и радиосистем.

Башкиров Алексей Викторович,  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО  
«Воронежский государственный технический  
университет», доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный  
университет» (ЮЗГУ), г. Курск.

Защита состоится «11» декабря 2015 г. в 13 часов на заседании диссертаци-  
онного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радио-  
технический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО  
«Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «        » октября 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
д-р техн. наук, доцент



Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие техники и технологии с каждым годом накладывает все больше и больше ограничений в области цифровой передачи информации. Ограничения связаны с необходимостью обеспечения заданных требований помехоустойчивости при все возрастающих скоростях передачи данных. Особенно остро данный вопрос встает в многолучевых каналах из-за их сильной подверженности помехам различной природы. Ведущую роль в обеспечении заданных требований играет помехоустойчивое кодирование, которое необходимо применять в большинстве цифровых систем передачи информации, в том числе и беспроводных.

**Степень разработанности темы.** Основы помехоустойчивого кодирования информации были заложены в 1948 г. в работе К. Шеннона. В ней К. Шеннон показал, что если скорость передачи информации меньше пропускной способности канала, то можно подобрать такие помехоустойчивый код и способ его декодирования, при которых передаваемая информация может быть восстановлена со сколь угодно высокой точностью. Однако он доказал лишь существование таких кодов, но не указал способ их построения. После всеобщего признания этой работы в теории помехоустойчивого кодирования начинается бурный этап развития исследовательской мысли. Ученые и инженеры во всем мире начали заниматься поиском помехоустойчивых кодов и способов их кодирования и декодирования. В нашей стране среди специалистов в этой области известны работы таких ученых, как Б.А. Котельников, Л.Е. Назаров, В.Д. Колесник, Э.Л. Блох, С.И. Егоров, А.Н. Колмогоров, В.В. Зяблов, В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин и др. Среди зарубежных выдающихся специалистов можно выделить Дж. Месси, Дж. Возенкрафта, А. Витерби, Р. Галлагера, У. Питерсона, Т. Кассами, Р. Блейхута, Э. Арикана и др.

На сегодняшний день в теории кодирования существует несколько методов кодирования/декодирования, которые могут обеспечить близкую к пропускной способности канала работу. Среди которых можно выделить турбо и турбоподобные коды, низкоплотностные коды (LDPC), а также полярные коды. Однако последние результаты показывают, что вычислительная сложность, влияющая в первую очередь на скорость передачи информации, упомянутых методов все еще высока. Тем временем в большинстве современных систем передачи данных требуется обеспечение высокой скорости передачи, которая возможна в случае использования максимально простых и одновременно очень эффективных методов кодирования/декодирования.

Наиболее полно указанным требованиям отвечает многопороговый декодер (МПД) самоортогональных кодов (СОК). Алгоритмы МПД являются итеративными процедурами, обладающими свойством строгого роста правдоподобия своих решений в течение всего процесса декодирования. Анализ материалов по данной тематике позволяют считать, что МПД в различных условиях обеспечивает предельно возможный уровень энергетического выигрыша и обладает очень высоким быстродействием.

Однако в соответствии с теорией кодирования для МПД возможно дополнительное увеличение энергетического выигрыша кодирования (ЭВК) более чем на 1 дБ даже в гауссовском канале. В более сложных многолучевых моделях беспроводных каналов увеличение ЭВК будет много больше. Именно поэтому задача разработки модификаций многопорогового алгоритма декодирования в различных каналах передачи данных, особенно в многолучевых каналах с замираниями, при максимально возможном сохранении простоты реализации является актуальной.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертации заключается в разработке и исследовании алгоритмов, позволяющих увеличить энергетический выигрыш кодирования многопороговых декодеров самоортогональных кодов при работе в многолучевых каналах при сохранении невысокой сложности реализации декодера.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать наиболее распространенные методы кодирования/декодирования помехоустойчивых кодов, в том числе многопороговые декодеры самоортогональных кодов;
- построить новые самоортогональные коды, допускающие более эффективное декодирование при уровне шума в канале, близком к его пропускной способности, и выполнить оптимизацию параметров декодера для них;
- разработать алгоритмы применения многопороговых декодеров в многолучевых каналах с замираниями при совместном использовании известных технологий повышения достоверности, а также разработать алгоритмы повышения эффективности декодирования в таких условиях;
- разработать программные средства моделирования работы многопорогового декодера в составе системы передачи информации с использованием разработанных алгоритмов коррекции ошибок.

**Научная новизна.** В рамках диссертационной работы были получены следующие новые научные результаты:

- построены новые самоортогональные коды, допускающие более эффективное декодирование при большом шуме в канале передачи данных по сравнению с уже известными;
- обоснованы каскадная схема коррекции ошибок в стирающих каналах и алгоритм ее декодирования, в которой совместно с самоортогональными кодами используются коды с контролем четности, получены нижние оценки вероятности невозстановления стирания данной схемы;
- разработан алгоритм оптимизации параметров многопороговых декодеров, в котором весовые коэффициенты и пороги могут принимать вещественные значения;
- выполнено исследование эффективности многопороговых декодеров в многолучевых каналах передачи данных;

- для релейского и райсовского каналов получены нижние оценки вероятности ошибки при многопороговом декодировании;

- предложено для повышения достоверности передачи в многолучевых каналах использовать многопороговый декодер, работающий со стираниями и искажениями.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость заключается в разработке и исследовании новых алгоритмов коррекции ошибок, основанных на многопороговом декодере, разработке алгоритмов их применения для повышения достоверности передачи данных в многолучевых каналах. Разработанные алгоритмы позволяют уменьшить вероятность стирания на 2...3 десятичных порядка по сравнению с исходным многопороговым декодером при сопоставимой сложности реализации. В каналах с замираниями многопороговые декодеры при одинаковой корректирующей способности с декодерами низкоплотностных кодов обладают в несколько раз меньшей сложностью реализации. Полученные алгоритмы можно использовать для улучшения технических характеристик систем передачи данных. Разработанные программы позволяют выполнять имитационное моделирование систем передачи данных с разработанными алгоритмами коррекции ошибок при варьировании многочисленных настраиваемых параметров, способствуя выбору наилучших параметров декодера для конкретных условий его использования.

**Методология и методы исследования.** В диссертационной работе используются теория вероятностей, математической статистики, методы системного анализа, математического и имитационного моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

- каскадная схема кодирования, состоящая из внешнего кода с контролем четности и внутреннего самоортогонального кода, позволяет уменьшить вероятность стирания на 2...3 десятичных порядка в каналах со стираниями по сравнению с многопороговым декодером при увеличении сложности декодера менее чем на 1 %;

- многопороговый декодер, работающий со стираниями и искажениями, позволяет в многолучевых каналах увеличить энергетический выигрыш кодирования на 4 дБ и более по сравнению с двоичным многопороговым декодером;

- алгоритм оптимизации параметров многопорогового декодера позволяющий увеличить энергетический выигрыш кодирования на 0,25 дБ в гауссовском канале;

- применение многопороговых декодеров в беспроводных каналах с замираниями совместно с технологиями мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов, передачи с использованием нескольких передающих и нескольких принимающих антенн, пространственно-временного кодирования позволяет обеспечить достоверность, сопоставимую с декодерами низкоплотностных кодов, при в 7 раз меньшей вычислительной сложности.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, тестированием разработанных программ моделирования, совпадением результатов диссертационной работы в частных случаях с ранее известными данными.

**Внедрение научных результатов диссертационной работы:**

- в учебный процесс ОБГУ СПО «Рязанский технологический колледж» в рамках дисциплины «Основы архитектуры, устройство и функционирование вычислительных систем» для специальности 230401 «Информационные системы»;

- в процесс эксплуатации системы передачи данных специального назначения в составе аппаратуры стендового технологического оборудования для контроля перспективной бортовой аппаратуры на ОАО завод «Красное знамя»;

- в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по направлениям 231000 «Программная инженерия» и 230700 «Прикладная информатика» в рамках дисциплин «Сети ЭВМ», «Вычислительные системы, сети и телекоммуникации», «Цифровая обработка сигналов».

**Апробация работы** проведена в форме научных докладов по основным результатам диссертационной работы и дискуссий, которые проходили на следующих научных конференциях: 15-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA–2013» (Москва, ИПУ РАН, 2013 г.); 6-я международная научно-техническая конференция «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (г. Рязань, РГРТУ, 2013 г.); XI Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, ИКИ РАН, 2013 г.); 16-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA–2014» (г. Москва, ИПУ РАН, 2014 г.); XI конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (г. Москва, ИКИ РАН, 2014 г.); 43-я научно-техническая конференция Рязанского государственного радиотехнического университета (г. Рязань, РГРТУ, 2014 г.); XII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, ИКИ РАН, 2014 г.); XIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (г. Рязань, РГРТУ, 2014 г.); 17-я международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA – 2015» (г. Москва, ИПУ РАН, 2015 г.); XII конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (г. Москва, ИКИ РАН, 2015 г.); XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи «SIBCON-2015» (г. Омск, ОмГТУ, 2015 г.).

**Личный вклад автора.** Все основные результаты диссертации получены автором лично.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 24 научных работы, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в список ВАК РФ, 1 работа в базе данных Scopus, 9 тезисов докладов на конференциях различного, в том числе международного, уровня, 10 статей в межвузовских сборниках. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем диссертационной работы с приложениями составляет 139 страниц, в том числе 132 страницы основного текста. Работа содержит 54 рисунка, 5 таблиц, список использованной литературы состоит из 80 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрена основная проблема теории помехоустойчивого кодирования и обоснована актуальность темы диссертации, определены цель диссертационной работы, решаемые задачи и методы исследований. Сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, а также положения, выносимые на защиту. Представлены состав и краткое описание работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

**Первая глава** посвящена постановке задачи, ее математической формализации, описанию предметной области и анализу известных методов помехоустойчивого кодирования/декодирования.

В данной главе сформулирована первоочередная задача методов помехоустойчивого кодирования, заключающаяся в обеспечении требуемой достоверности передаваемых данных при минимально вносимой избыточности. При разработке таких методов также требуется обеспечить невысокую сложность реализации. Это обусловлено тем, что скорости передачи данных постоянно возрастают и устройства, реализующие сложные методы коррекции ошибок, не могут обеспечивать достаточную скорость обработки поступающей информации.

Также приведена обобщенная структурная схема модели цифровой системы передачи информации с кратким описанием основных ее частей и представлено краткое описание некоторых типов радиоканалов, их характеристик и математических моделей. Далее проведен сравнительный анализ известных классов помехоустойчивых кодов и алгоритмов их декодирования. Выявлены достоинства, недостатки и области применения рассмотренных методов коррекции ошибок. В качестве объекта дальнейшего исследования выбран метод многопорогового декодирования СОК. Показано, что МПД по обеспечиваемому уровню энергетического выигрыша незначительно уступает методам декодирования турбо и низкоплотностных кодов, сопоставим по эффективности с известными результа-

тами для полярных кодов, оказываясь существенно проще для практической реализации. Это делает МПД одним из наиболее перспективных методов коррекции ошибок, который может быть использован в высокоскоростных цифровых системах передачи данных.

**Во второй главе** подробно рассматриваются принципы работы и характеристики МПД. Исследована зависимость эффективности МПД для кодов с различными параметрами от уровня шума в двоичном симметричном и гауссовском каналах, а также в каналах со стираниями. Для последних каналов предлагается каскадная схема коррекции ошибок, в которой во внутреннем каскаде используется СОК, а во внешнем – код с контролем четности (ККЧ). Для данной схемы получены аналитические оценки эффективности и результаты моделирования. Предложен алгоритм оптимизации параметров декодера.

МПД способен декодировать блочные и сверточные СОК с линейной от длины кода сложностью реализации. Блочные СОК обычно задаются с помощью образующих полиномов  $g(x)$ . Общая длина  $n$  блочного СОК с кодовой скоростью  $R = 1/2$  состоит из  $2k$  битов, а информационная часть  $k$  как минимум из  $2m+1$  битов, где  $m$  – максимальная степень образующего полинома. Кодовое расстояние  $d$ , равно увеличенному на 1 количеству ненулевых компонент образующего полинома. Для кодов с кодовой скоростью  $1/2$  с целью уменьшения размножения ошибок (РО) описана методика перехода к кодовым скоростям вида  $R = mk/mn$ , где  $m$  – небольшое целое число. Такие коды называются кодами с переменными связями (КПС). Для такого кода МПД все равно остается простейшим устройством, легко реализуемым как программно, так и аппаратно.

В работе выполнено исследование эффективности МПД для кодов с различной кодовой скоростью, кодовым расстоянием и длиной в двоичном симметричном канале и в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) при использовании двоичной фазовой модуляции. Результаты исследования подтвердили, что МПД способен обеспечить почти оптимальное декодирование правильно выбранных кодов при отношениях сигнал/шум, примерно на 2 и более дБ превышающих пропускную способность канала.

Для гауссовского канала в работе предложен трехэтапный алгоритм оптимизации параметров МПД. Данный алгоритм основан на методе покоординатного спуска. При оптимизации выполняется минимизация вероятности битовой ошибки  $P_b$  на выходе декодера путем варьирования параметров МПД:

$$P_b = F(\mathbf{t}, \mathbf{w}, g, SNR) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\mathbf{t}$ ,  $\mathbf{w}$  – векторы весовых коэффициентов и порогов для каждой из итераций декодирования;  $g$  – образующий полином;  $SNR$  – отношение сигнал/шум;  $F$  – функция определения вероятности ошибки на бит на выходе декодера.

При решении задачи оптимизации следует учитывать то, что целевую функцию  $F(\mathbf{t}, \mathbf{w}, g, SNR)$  при большом шуме можно оценить только при помощи компьютерного моделирования, что существенно усложняет процесс оптимизации.



Отметим, что в отличие от известных для МПД алгоритмов оптимизации предполагается, что весовые коэффициенты и пороги могут быть вещественными, что улучшает характеристики декодера. Результаты исследования предложенного алгоритма показали, что за счет его применения область эффективной работы МПД приблизилась примерно на 0,25 дБ к пропускной способности канала по сравнению с неоптимизированным вариантом.

Далее в главе выполнено исследование эффективности работы МПД в каналах со стираниями при различном кодовом расстоянии и длине используемых кодов. Для таких каналов получены новые более длинные и менее чувствительные к размножению ошибок сверточные СОК, обеспечивающие лучшую эффективность. Для данных кодов выполнена настройка параметров МПД. Пример характеристик МПД для нового кода с  $R = 4/8$ , длиной 200000 битов и  $d = 21$  показан на рисунке 1 кривой 3. На этом же рисунке кривыми 1 и 2 показаны характеристики МПД для ранее известных кодов, кривая 9 соответствует характеристикам декодера Витерби для сверточного кода с  $R = 1/2$ , а кривая 8 отражает характеристики турбо кода. Кривая 5 на этом же рисунке соответствует характеристикам МПД для построенного в работе кода длиной 2500000 битов с  $R = 32/40$  и  $d = 9$ . Отметим, что с помощью МПД для кода с  $R = 4/8$  удалось обеспечить близкое к оптимальному декодирование, начиная с вероятности стирания 0,48 при пропускной способности канала 0,5, а для кода с  $R = 32/40$  – начиная с вероятности стирания 0,19 при пропускной способности канала 0,2. Это позволяет сделать вывод о том, что МПД для построенных СОК обеспечивают эффективное декодирование при частоте стираний, практически совпадающей с пропускной способностью канала.

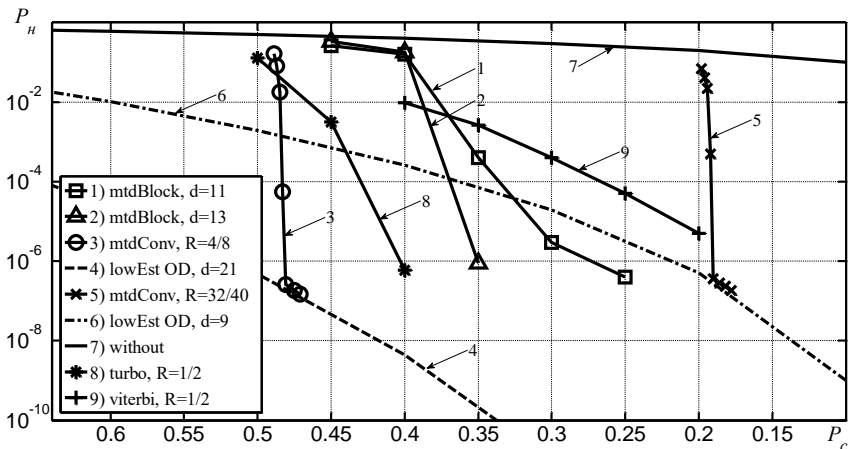


Рисунок 1 – Характеристики декодеров помехоустойчивых кодов в канале со стираниями

Для дополнительного уменьшения вероятности невосстановления стирания в работе предложена каскадная схема, в которой совместно с внутренним СОК с кодовой скоростью  $R_2$  используется внешний ККЧ с кодовой скоростью  $R_1$ . При этом  $R_1$  должна быть как можно ближе к 1 для того, чтобы доля полезной информации (без проверочных символов) оставалась на прежнем уровне. При декодировании данного кода сначала выполняется декодирование внутреннего кода с помощью МПД, после чего делается попытка исправления оставшихся стираний с помощью декодера ККЧ, который всегда может восстановить одно стирание в своем кодовом блоке.

Для предварительной оценки эффективности каскадной схемы получена нижняя оценка вероятности невосстановления стирания с помощью декодера данной схемы:

$$P_{cK} = \sum_{i=2}^n \frac{i}{n} C_n^i (P_c^d)^i (1 - (P_c^d))^{n-i}, \quad (2)$$

где  $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ ;  $P_c^d$  – нижняя оценка вероятности невосстановления символа в канале со стираниями при применении оптимального переборного декодера для используемых СОК.

На рисунке 2 пунктирными кривыми 3 и 4 представлены нижние оценки эффективности МПД и предложенной каскадной схемы соответственно при использовании СОК с кодовой скоростью  $1/2$ , кодовым расстоянием  $d = 11$  и ККЧ длиной 50 бит. Кривыми 1 и 2 показаны результаты компьютерного моделирования для этих же кодов (для данных кривых приведены 95-процентные доверительные интервалы). Из анализа представленных графиков следует, что предло-

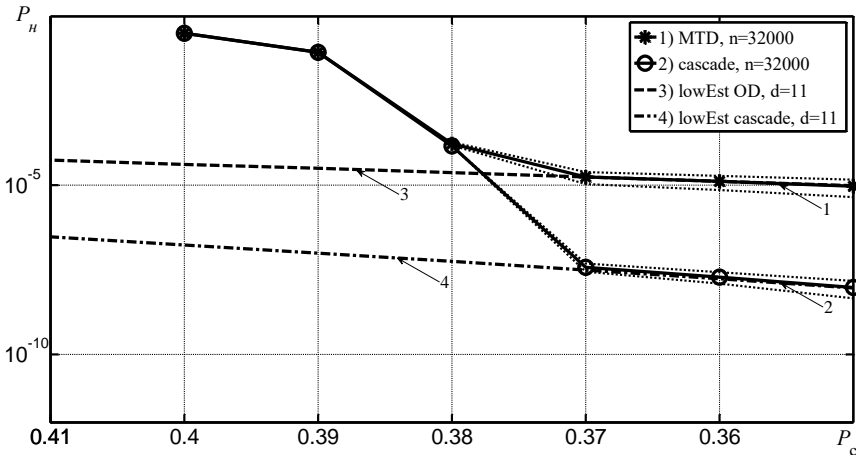


Рисунок 2 – Характеристики МПД и каскадной схемы в канале со стираниями

женная каскадная схема обеспечивает снижение вероятности невосстановления стирания после декодера на 2...3 порядка по сравнению с МПД при увеличении избыточности на 2 %, а полученные нижние оценки оказываются достаточно точными для оценивания потенциальных возможностей каскадной схемы.

**Третья глава** посвящена использованию МПД в беспроводных каналах. Приведены исследования МПД в каналах с райсовскими и релейскими замираниями, а также в многолучевых каналах с межсимвольной интерференцией. Приводятся результаты компьютерного моделирования в стандартизированных многолучевых каналах, рекомендованных организациями ITU-R и 3GPP, которые наглядно показывают ценность применения МПД в таких каналах. Предложены алгоритмы использования МПД самоортогональных кодов совместно с технологиями мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), передачи с несколькими передающими и несколькими приемными антеннами (MIMO), пространственно-временного кодирования (STC) для борьбы с межсимвольной интерференцией и замираниями. Приведено сравнение характеристик МПД с используемыми в различных стандартах передачи данных методами помехоустойчивого кодирования/декодирования.

Простейшими моделями каналов передачи информации с замираниями являются модели каналов с релейскими и райсовскими замираниями, которые получаются при наличии множества путей распространения сигнала. При этом в релейском канале отсутствует прямая видимость между передатчиком и приемником, а в райсовском канале присутствует.

Для таких каналов оказалось возможным получить нижние оценки эффективности МПД, работающего с жесткими решениями демодулятора. В частности, для релейского канала нижняя оценка представлена выражением

$$P_b = \sum_{i=(d+1)/2}^d C_d^i \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_s / N_0}{1 + E_s / N_0}} \right)^i \left( 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_s / N_0}{1 + E_s / N_0}} \right) \right)^{d-i}, \quad (3)$$

а для райсовского выражением

$$P_b = \sum_{i=(d+1)/2}^d C_d^i Q \left[ \sqrt{\frac{2kE_s / N_0}{k + E_s / N_0}} \right]^i \left( 1 - Q \left[ \sqrt{\frac{2kE_s / N_0}{k + E_s / N_0}} \right] \right)^{d-i}. \quad (4)$$

Здесь  $d$  – кодовое расстояние СОК;  $E_s/N_0$  – символическое отношение сигнал/шум,  $k$  – коэффициент Райса;  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – интеграл ошибок.

Также в этих формулах предполагается, что  $d$  является нечетным. Следует отметить, что для более сложных случаев аналитические оценки, обладающие доста-

точной точностью, получить не удастся и для оценки эффективности МПД приходится использовать компьютерное моделирование.

Результаты моделирования в релейском и райсовском каналах показали, что полученные оценки эффективности МПД в области его почти оптимальной работы являются достаточно точными и могут быть использованы для предварительной оценки потенциальных возможностей МПД. Для таких условий было показано, что МПД в каналах с релейскими замираниями способен обеспечить сопоставимую вероятность ошибки декодирования  $10^{-4}$  при на 10 дБ меньшем уровне шума по сравнению с гауссовским каналом. Для канала с райсовскими замираниями проигрыш в энергетике составляет от 2 до 6 дБ для коэффициента Райса от 5 до 1 соответственно. В процессе исследования было показано, что лучшие результаты МПД способен обеспечить, если информационные и проверочные биты из регистров кодера в канал выдаются "по столбцам", а не "по строкам". При этом выигрыш в некоторых случаях может составить до 3 и более дБ.

Получены результаты исследования эффективности МПД в многолучевых каналах, описываемых моделями рекомендаций M.1225 сектора радиосвязи Международного союза электросвязи (ITU-R) и Spatial Channel Model (SCM) консорциума 3GPP. В таких моделях для борьбы с межсимвольной интерференцией и замираниями совместно с МПД использовались OFDM, MIMO и STC. Результаты моделирования для МПД при использовании различных типов модуляции (в том числе и многопозиционной) и демодуляции сравнивались с результатами, обеспечиваемыми лучшими известными методами коррекции ошибок, такими как декодеры турбо и низкоплотностных кодов, рекомендованных стандартами беспроводной передачи информации. Показано, что МПД наряду с обеспечением высокой эффективности в гауссовских каналах, оказываются способными исправлять ошибки и в значительно более сложных условиях, обеспечивая энергетiku, сопоставимую с энергетикой декодеров турбо и низкоплотностных кодов.

Для примера на рисунке 3 показаны характеристики МПД и декодеров LDPC кодов в модели SCM типа Urban Micro. При моделировании использовался МПД с 25 итерациями декодирования для построенного СОК с кодовой скоростью  $R = 8/16$ , кодовым расстоянием 17 и длиной 32768 битов. Совместно с МПД применялось OFDM мультиплексирование с 512 несущими. Защитный интервал составлял 1/8 от длины OFDM символа. Для сравнения на рисунке 3 представлены характеристики LDPC кода стандарта DVB-S2 с кодовой скоростью 0,44 и длиной 16200 битов. Кривыми 1 и 8 на данном рисунке представлены зависимости вероятности ошибки декодирования СОК и LDPC кода от отношения сигнал/шум на бит при использовании модуляции типа QPSK. При этом использовался демодулятор, формирующий только жесткие решения относительно декодированных битов. При переходе к 2 передающим и 2 приемным антеннам энер-

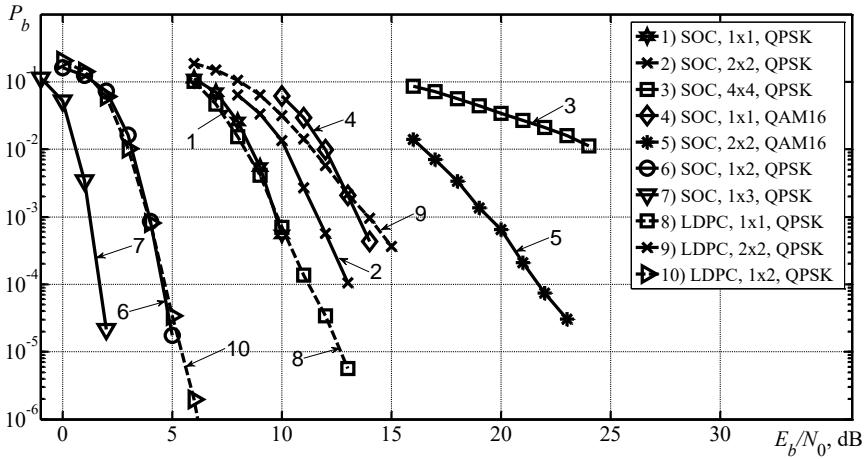


Рисунок 3 – Результаты моделирования в SCM канале типа Urban Micro при использовании технологии MIMO

энергетическая эффективность системы несколько уменьшается (кривые 2 и 9), но битовая скорость передачи увеличивается в два раза без расширения используемой полосы частот. Заметим, что для МПД такое же увеличение скорости обеспечивается при переходе к модуляции QAM16 вместо QPSK, но эффективность такой системы (кривая 4) оказывается почти на 2 дБ хуже MIMO варианта. Также заметим, что эффект от применения технологии MIMO для СОК оказался больше, чем для LDPC кодов. В случае если используется одна передающая антенна и модуляция типа QPSK, то за счет применения нескольких приемных антенн можно существенно улучшить достоверность передачи данных. Пример характеристик подобных систем для двух и трех приемных антенн показан на рисунке 3 кривыми 6 и 7. Выигрыш по сравнению с одной приемной антенной при целевой вероятности ошибки декодирования на бит  $10^{-5}$  составил 4 и 7 дБ соответственно. Из анализа рисунка также следует, что при попытках дальнейшего увеличения скорости передачи данных за счет MIMO характеристики МПД сильно ухудшаются (кривые 3 и 5). Поэтому подобные варианты увеличения скорости передачи на практике использовать нецелесообразно, либо нужно использовать дополнительные способы улучшения характеристик, например использование STC, выполняющего отображение передаваемых символов сигнального созвездия на передающие антенны. При использовании STC возможны варианты увеличения скорости передачи (например, когда одна антенна передает один символ – Spatial Multiplexing) или улучшения энергетической эффективности передачи (сигнал, передаваемый антенной, является функцией от нескольких передаваемых символов). Это определяется матрицей пространственно-временного кода.

В работе выполнено исследование эффективности применения МПД совместно с матрицами, определенными в стандарте IEEE 802.16e (WiMAX). При этом было выполнено исследование влияния алгоритма демодуляции STC на эффективность работы декодера. В качестве таких алгоритмов рассматривались алгоритмы демодуляции по минимуму среднего квадрата ошибки (MMSE), демодуляции по максимуму правдоподобия (ML) и приближенная оптимальная (approximate ML). Эти алгоритмы отличаются точностью и сложностью реализации. Анализ полученных результатов моделирования показал, что применение более сложной и точной демодуляции (ML и approximate ML) обеспечивает, почти на 2 дБ, больший ЭВК по сравнению с MMSE демодуляцией. Т.е. качество мягких решений в данных условиях оказывает существенное влияние на эффективность схемы коррекции ошибок. При этом корректирующая способность МПД в области его эффективной работы для ML и approximate ML алгоритмов демодуляции существенно не отличается.

Для повышения эффективности исправления ошибок в каналах с замираниями в работе предложено использовать вместо двоичных МПД, исправляющих ошибки, МПД, исправляющие ошибки и восстанавливающие стирания. При этом на вход декодера поступает последовательность, состоящая из жестких решений относительно принятых из канала битов ( $\pm 1$ ), а также символов, обозначенных специальным символом стирания (0). Решение о стирании передаваемого символа принимается в случае, если мягкое решение для бита, полученное в демодуляторе, оказывается меньше некоторого порога  $g$ .

На рисунке 4 представлены зависимости вероятности битовой ошибки  $P_b$  после МПД от отношения сигнал/шум  $E_b/N_0$  в канале стандарта ITU-R типа

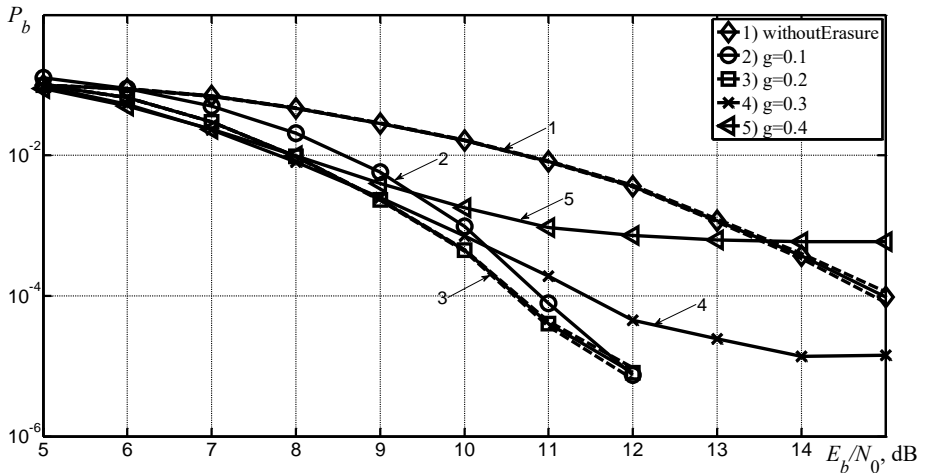


Рисунок 4 – Характеристики различных версий МПД с длиной СОК  $n=32000$  битов в канале ITU-R типа Outdoor Channel A

Outdoor Channel A при модуляции типа QPSK для кода с кодовой скоростью  $8/16$ , кодовым расстоянием 17 и длиной 32000 битов. Кривая 1 соответствует обычному МПД, а кривые 2, 3 и 4 соответствуют МПД, работающему со стираниями и искажениями при различных порогах получения стираний  $g$ . Отметим, что при  $g = 0,2$  за счет МПД, исправляющего ошибки и восстанавливающего стирания, удалось получить на 4 дБ больший ЭВК по сравнению с МПД, только исправляющим ошибки. Следовательно, использование стираний в многолучевых каналах с замираниями позволяет существенно улучшить достоверность передачи данных.

**В четвертой главе** рассматриваются структура и подробное описание разработанного программного обеспечения, позволяющего определить частоту появления ошибок (или стираний) после декодирования для ряда рассматриваемых моделей канала при заданной вероятности ошибки в канале (или отношении сигнал/шум).

**В заключении** приводятся основные выводы и результаты выполненной работы.

**В приложениях** представлены список сокращений, копии свидетельств о регистрации программы для ЭВМ и актов внедрения результатов диссертационной работы, а также характеристики некоторых каналов, используемых в работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполненного в диссертации комплекса исследований получено решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности исправления ошибок в каналах с шумами, основанное на применении разработанных алгоритмов декодирования самоортогональных кодов.

При этом получены следующие научные результаты.

1. Получены новые результаты исследования эффективности МПД в гауссовском канале при использовании жестких и мягких решений демодулятора.

2. Для гауссовского канала передачи данных предложен алгоритм оптимизации параметров МПД, который позволяет приблизить область почти оптимальной работы МПД к пропускной способности канала на 0,25 дБ.

3. Получены новые самоортогональные коды для канала со стираниями, при использовании которых МПД обеспечивают вероятность невосстановления стирания после декодера меньше  $10^{-5}$  при частоте стираний, практически совпадающей с пропускной способностью канала.

4. Обоснована новая каскадная схема коррекции ошибок для каналов со стираниями, состоящая из внутреннего самоортогонального кода и внешнего кода с контролем четности, позволяющая уменьшить вероятность невосстановления стирания в области эффективной работы МПД на 2...3 порядка. Для данной схемы получены нижние оценки вероятности невосстановления стираний.

5. Получены новые результаты исследования эффективности МПД в ряде типичных моделей многолучевых радиоканалов с замираниями. Для данных каналов приведены рекомендации по наилучшему согласованию кодера и канала. Для релейского и райсовского каналов получены нижние оценки вероятности ошибки декодирования. Показано, что применение МПД в таких каналах совместно с известными технологиями борьбы с межсимвольной интерференцией и замираниями обеспечивает сопоставимую с лучшими известными методами достоверность при в несколько раз меньшей сложности реализации.

6. Для повышения эффективности исправления ошибок в каналах с замираниями в работе предложено использовать вместо двоичных МПД, исправляющих ошибки, МПД, исправляющие ошибки и восстанавливающие стирания. Это позволило получить на 4 дБ больший ЭВК по сравнению с МПД, только исправляющими ошибки.

7. Разработаны программы моделирования систем передачи данных, в которых для повышения достоверности используются как известные, так и предложенные коды, и алгоритмы декодирования.

## **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах**

*Из перечня ВАК:*

1. Белицкий А.М. Повышение достоверности приема-передачи команд управления с использованием многопороговых декодеров самоортогональных кодов / А.М. Белицкий, Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №6; URL: [www.science-education.ru/113-11555](http://www.science-education.ru/113-11555) (дата обращения 20.06.2015).

2. Овечкин Г.В. Эффективность многопороговых методов коррекции ошибок в каналах связи с замираниями / Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Успехи современной радиоэлектроники: Радиотехника. – Москва, 2014. – №6. – С. 37-43.

3. Золотарев В.В. Улучшение эффективности многопороговых декодеров в каналах связи со стираниями / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8 (часть 3). – С. 486-490.

4. Шевляков Д. А. Разработка алгоритма оптимизации параметров многопорогового декодера самоортогональных кодов методом покоординатного спуска / Д. А. Шевляков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 3. – С. 75–85.

*В базе данных Scopus:*

5. Zolotarev V. V., Ovechkin G. V., Shevlyakov D. A. The Performance of Multi-threshold Decoder over Fading Channels / V. V. Zolotarev, G. V. Ovechkin, D. A. Shevlyakov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015). Омск, 2015.



**Статьи в научных журналах и материалы конференций**

6. Золотарёв В.В. Анализ эффективности нового алгоритма работы порогового элемента многопорогового декодера / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Материалы 15-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, 2013. – Том. 1, – С.44-47.
7. Золотарёв В.В. Многопороговое декодирование для беспроводных сетей передачи данных / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Материалы 16-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, 2014. – Том. 1. – С.33-36.
8. Золотарев В.В. Применение методов многопорогового декодирования в системах дистанционного зондирования земли / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // XI конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сборник трудов / под ред. А.М. Садовского. – М.: ИКИ РАН, 2014. – С.55-58.
9. Золотарев В.В. Исследование эффективности многопороговых декодеров при совместном использовании с пространственно-временным кодированием / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Материалы 17-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, 2015. – Том. 1. – С.83-86.
10. Золотарев В.В. Эффективность применения многопороговых декодеров в стирающих каналах связи / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2015. – С.54-57.
11. Овечкин Г.В. Анализ влияния длины самоортогонального кода на эффективность многопорогового декодера / Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Задачи системного анализа, управления и обработки информации: межвуз. сб. науч. тр. – вып. 5 / под общ. ред. Е. В. Никульчева. – М.: Изд. МТИ, 2015. – С.117-120.
12. Овечкин Г.В. Построение и исследование многопорогового декодирования в системе Matlab / Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С.135-138.
13. Овечкин Г.В. Разработка алгоритма многопорогового декодирования в системе Matlab / Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Информационные технологии в учебном процессе и научных исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 66-67.
14. Овечкин Г.В. Использование расширенного порогового элемента в схеме многопорогового декодера для борьбы с некоторыми конфигурациями ошибок / Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков // Программные информационные системы: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.26-32.
15. Овечкин Г.В. Эффективность применения многопороговых декодеров с пространственно-временным кодированием / Г.В. Овечкин, Д.А. Шевляков //

Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.115-121.

16. Овечкин Г.В. Исследование эффективности многопорогового декодера в каналах связи с замираниями / Г.В. Овечкин, А.Н. Пылькин, Д.А. Шевляков // Материалы 6-й Международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». – Рязань, 2013. – С.214-215.

17. Шевляков Д.А. Современные методы коррекции ошибок для цифровых систем передачи данных / Д.А. Шевляков // Молодёжь, образование, наука: Материалы VIII Российской ежегодной научно-практической конференции магистрантов, аспирантов и молодых ученых. - Уфа: Академия ВЭГУ, 2013. – С.154-158.

18. Шевляков Д.А. Исследование эффективности многопорогового декодера в многолучевом канале связи с OFDM схемой модуляции / Д.А. Шевляков // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.106-110.

19. Шевляков Д.А. Исследование эффективности многопорогового декодера в беспроводных каналах связи / Д.А. Шевляков // Cloud of Science. – 2014. – Т. 1. № 1.; URL: <http://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CloudOfScience01010106.pdf> (дата обращения 20.06.2015).

20. Шевляков Д.А. Алгоритм оптимизации параметров многопорогового декодера / Д.А. Шевляков XIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании»: Тезисы докладов. – Рязань: РГРТУ, 2014. – С.119-120.

ШЕВЛЯКОВ Дмитрий Александрович

**АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ  
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В МНОГОЛУЧЕВЫХ КАНАЛАХ  
НА ОСНОВЕ МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ**

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2015. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.