

На правах рукописи

ГРИНЧЕНКО Наталья Николаевна

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО  
КОДИРОВАНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.13.13 – «Телекоммуникационные системы  
и компьютерные сети»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2007

Работа выполнена

в Рязанском государственном радиотехническом университете

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

**Костров Борис Васильевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

**Шибанов Александр Петрович**

кандидат технических наук, доцент

**Полушин Петр Алексеевич**

Ведущая организация: **ФГУП ОКБ «Спектр»**

Защита диссертации состоится **«25» декабря 2007 г. в 12 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан **«23» ноября 2007 г.**

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.211.02

к.т.н., доцент

**И.А. Телков**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** При проектировании современных систем телекоммуникаций одной из важнейших является задача обеспечения высокой достоверности передачи данных. К наиболее эффективным методам решения данной задачи следует отнести применение корректирующих кодов, в разработке которых теория помехоустойчивого кодирования в последние десятилетия достигла значительных успехов. Применение помехоустойчивого кодирования в цифровых системах передачи данных позволяет получить энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), каждый децибел которого по оценкам западных специалистов более 20 лет назад оценивался в миллионы долларов, поскольку его можно использовать для уменьшения требуемой мощности передатчика, повышения скорости передачи данных, уменьшения размеров очень дорогих антенн, повышения дальности связи, экономии полосы частот и улучшения многих других важных свойств систем передачи данных. Именно поэтому проблеме увеличения ЭВК во всем мире уделяется огромное внимание, а достоинства простых и эффективных алгоритмов декодирования невозможно переоценить.

О важности развития алгоритмов кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов говорят ежегодно появляющиеся тысячи публикаций, посвященных данной тематике. Основу современной теории кодирования составляют работы В.А. Котельникова и К. Шеннона. В дальнейшем эти работы развивались многими российскими и зарубежными исследователями, такими как В.В. Зяблов, К.Ш. Зигангиров, В.В. Золотарев, А. Витерби, Дж. Месси, Р. Галлагер, Д. Форни, Л.М. Финк, В.Л. Банкет, А.Э. Нейфах, Дж. Возенкрафт, Е. Берлекэмп, Э.Л. Блох и др.

В настоящее время в теории кодирования известно всего несколько методов кодирования/декодирования, обеспечивающих работу вблизи пропускной способности канала. Среди них можно выделить активно развивающиеся за рубежом турбо и турбоподобные коды. Однако данные методы все еще обладают достаточно большой вычислительной сложностью, что затрудняет их практическое применение в высокоскоростных телекоммуникационных системах, скорость передачи данных по которым составляет сотни и тысячи Мбит/с. В связи с этим возникает задача поиска более простых и, соответственно, более надежных и дешевых при практической реализации методов кодирования/декодирования. Эта задача, учитывая постоянный рост скоростей обмена информацией, с каждым годом становится все актуальнее.

Проведенное исследование существующих методов кодирования и декодирования показало, что на сегодняшний день одними из лучших по соотношению эффективности и сложности практической реализации являются многопороговые декодеры (МПД), используемые для декодирования самоортогональных кодов. Данные декодеры обладают строго доказанным свойством сходимости к решению оптимального декодера при сохранении линейной от длины кода сложности исполнения. Сейчас результаты исследований МПД

отражены более чем в сотне научных работ. В данных работах показано, что преимущество МПД перед всеми другими схемами декодирования по числу операций составляет два и более порядка. Кроме того, для МПД существует возможность полного распараллеливания операций при его аппаратной реализации. Это позволяет считать, что МПД могут быть признаны основным методом декодирования для многих современных высокоскоростных систем передачи данных с предельно возможными уровнями энергетического выигрыша и быстродействием, достигающим сотни и тысячи Мбит/с.

Вместе с тем возможности этого простого и эффективного метода еще не использованы на 100%, поскольку в соответствии с теорией кодирования для МПД возможно еще дополнительное увеличение ЭВК примерно на 2 дБ. Поэтому задача развития многопороговых методов декодирования с целью повышения их эффективности при максимально возможном сохранении простоты практической реализации является актуальной.

Кроме того, на данный момент детально исследованы характеристики МПД только в условиях работы в гауссовских каналах при использовании двоичной фазовой модуляции. Однако в настоящее время, в связи с жесткими ограничениями на занимаемую сигналом полосу частот, начинают активно применяться многопозиционные системы модуляции, такие как многопозиционная фазовая и квадратурная амплитудная модуляции. Исследование эффективности применения МПД совместно с многопозиционными сигналами может позволить улучшить характеристики систем передачи данных и в таких системах.

Также следует отметить, что для МПД свойственно наличие так называемой области насыщения вероятности ошибки, характеризуемой тем, что в ней скорость уменьшения вероятности ошибки декодирования с ростом отношения сигнал/шум замедляется. Данная область появляется из-за того, что в МПД обычно применяются коды с небольшим кодовым расстоянием. Наличие области насыщения вероятности ошибки усложняет получение очень малых вероятностей ошибки декодирования, что часто требуется в различных системах телекоммуникаций, например, в системах широковещательного цифрового телевидения DVB. Одним из возможных способов устранения области насыщения вероятности ошибки является применение МПД совместно с самыми простыми методами коррекции ошибок во внешнем каскаде, которые позволят при незначительном повышении сложности кодирования и декодирования существенно уменьшить вероятность ошибки в области эффективной работы МПД. Таким образом, организация помехоустойчивого кодирования в системах телекоммуникаций является одним из важнейших средств обеспечения высокой достоверности передачи данных. Под организацией помехоустойчивого кодирования будем понимать разработку, исследование и применение таких алгоритмов кодирования/декодирования, которые, обладая простотой реализации, позволяют с высокой достоверностью и скоростью осуществлять информационный обмен в телекоммуникационных системах.

**Целью диссертационной работы** является разработка алгоритмов помехоустойчивого кодирования на основе МПД, обеспечивающих высокую достоверность при большом уровне шума в высокоскоростных каналах передачи данных телекоммуникационных систем и характеризующихся предельно малой сложностью практической реализации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- провести исследование существующих алгоритмов кодирования/декодирования с целью выбора направления дальнейших исследований;
- разработать и исследовать алгоритмы кодирования/декодирования, основанные на МПД, обладающие повышенной корректирующей способностью и характеризующиеся предельно малой сложностью практической реализации;
- исследовать характеристики многопороговых декодеров в типичных каналах передачи данных, разработать методику выбора их параметров для получения максимальной эффективности;
- используя разработанную методику выбрать наилучшие параметры многопороговых декодеров для ряда типичных моделей каналов передачи данных;
- разработать программные средства для исследования эффективности современных алгоритмов кодирования/декодирования.

**Научная новизна.** Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что в ней впервые предложена методика применения МПД, в которой канал с многопозиционными сигналами рассматривается как канал с неравномерной энергетикой. В работе впервые предложено организовать каскадирование МПД с кодеком Хэмминга и кодеком Витерби.

**Практическая ценность работы.** Разработанная методика улучшения эффективности МПД в каналах с многопозиционными системами сигналов позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала более чем на 0,5 дБ. Предложенные каскадные схемы кодирования/декодирования позволяют на два-четыре порядка уменьшить вероятность ошибки декодирования по сравнению с базовыми некаскадными схемами. Разработанные схемы кодирования/декодирования обладают низкой сложностью реализации. Разработанные программные средства позволяют проводить всестороннее исследование эффективности современных алгоритмов кодирования/декодирования в ряде типичных каналах передачи данных.

**На защиту выносятся:**

- результаты сравнительных исследований существующих алгоритмов кодирования/декодирования с точки зрения соотношения эффективности и сложности практической реализации;
- методика улучшения эффективности МПД за счет оптимизации расположения информационных и проверочных битов в символах сигнального множества;

– алгоритм каскадирования самоортогонального кода, декодируемого с помощью МПД, с расширенными кодами Хэмминга, декодируемыми с помощью декодера Чейза;

– алгоритм помехоустойчивого кодирования/декодирования на основе каскадирования сверточного кода, декодируемого с помощью декодера Витерби, и двоичного самортогонального кода, декодируемого с помощью МПД;

– организация помехоустойчивого кодирования/декодирования на основе каскадирования сверточного кода, декодируемого с помощью декодера Витерби, и недвоичного самортогонального кода, декодируемого с помощью МПД;

– аналитические оценки эффективности предложенных алгоритмов.

**Внедрение результатов.** Результаты работы использованы ООО «ИРОСС» (Исследование, разработка и оптимизация систем связи) при принятии обоснованных решений по выбору методов коррекции ошибок для проектируемой системы передачи данных. Результаты исследования помехоустойчивых кодов и разработанные программные средства внедрены в учебном процессе кафедры электронных вычислительных машин Рязанского государственного радиотехнического университета и используются студентами направлений 230100 «Информатика и вычислительная техника» в курсе «Сети ЭВМ и телекоммуникации» и специальности 090102 «Компьютерная безопасность» в курсах «Теория информации» и «Системы и сети передачи данных».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» (Одесса, 2005 г.), 14-й Международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2005 г.), Всероссийском научно-практическом семинаре «Сети и системы связи» (Рязань, 2006 г.), 8-й Международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2006 г.), 11-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань, 2006 г.), 61-й Научной сессии, посвященной Дню радио (Москва, 2006 г.), 5-й Международной научно-технической конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2007 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ: 4 статьи, 7 тезисов докладов на Международных и Всероссийских конференциях, 1 свидетельство РОСПАТЕНТ о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Содержит 158 страниц, 1 таблицу, 80 рисунков. Список литературы состоит из 90 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** «Исследование современных методов помехоустойчивого кодирования. Выбор направлений исследований» рассмотрены помехоустойчивые коды и методы их декодирования, представлены их основные характеристики, выявлены наиболее эффективные современные алгоритмы коррекции ошибок, оценена сложность их практической реализации, выбраны направления дальнейших исследований.

В настоящее время в теории кодирования известно много кодов и методов их декодирования, различающихся длиной, корректирующей способностью, сложностью практической реализации и рядом других параметров. В процессе исследования существующих помехоустойчивых кодов было показано, что классические коды и алгоритмы их декодирования (коды Хэмминга, коды БЧХ, сверточные коды, декодируемые с помощью алгоритма Витерби) обладают невысокой корректирующей способностью или большой сложностью практической реализации. Из-за этого такие коды не подходят для исправления ошибок в современных высокоскоростных телекоммуникационных системах.

Среди современных помехоустойчивых кодов можно выделить активно развивающиеся за рубежом турбо и турбоподобные коды, среди которых особого внимания заслуживают низкоплотностные коды. Декодеры таких кодов позволяют практически вплотную приблизиться к пропускной способности канала, однако их сложность при аппаратной реализации, особенно в мелкосерийном производстве, все еще достаточно высока, что затрудняет их практическое применение в высокоскоростных телекоммуникационных системах.

Наилучшими по соотношению эффективности работы и сложности практической реализации являются многопороговые декодеры (МПД), используемые для декодирования самоортогональных кодов. Данные декодеры позволяют практически оптимально декодировать даже очень длинные коды с линейной от длины кода сложностью реализации. Реализованные на ПЛИС, многопороговые декодеры смогут обеспечивать декодирование со скоростью до нескольких сотен Мбит/с, что уже сейчас позволяет решать проблему эффективного кодирования в высокоскоростных каналах передачи данных с большим уровнем шума.

В тоже время возможности многопороговых декодеров не использованы на 100%. В соответствии с теорией кодирования возможно еще дополнительное увеличение энергетического выигрыша для МПД примерно на 2 дБ. Вместе с тем, для МПД свойственно наличие области насыщения вероятности ошибки, что является неприемлемым для некоторых приложений. Помимо этого существует необходимость исследования характеристик МПД совместно с многопозиционными системами сигналов, используемыми в каналах передачи данных для экономии полосы частот и повышения скорости передачи данных. Устранение указанных недостатков позволит существенно расширить область применения МПД. Перечисленные позиции развития МПД определяют направления дальнейших исследований.

**Во второй главе** «Алгоритмы многопорогового декодирования. Разработка методики улучшения эффективности многопороговых декодеров» исследуются алгоритмы многопорогового декодирования, выбраны наилучшие для МПД самоортогональные коды, исследована эффективность МПД в каналах с аддитивным белым гауссовским шумом и различными типами модуляции, предложена методика повышения эффективности МПД в каналах с многопозиционной модуляцией.

МПД применяются для декодирования двоичных линейных систематических блочных самоортогональных кодов (СОК). Пример схемы МПД блочного СОК, заданного образующим полиномом  $g(x) = 1 + x + x^4 + x^6$ , изображен на рисунке 1. Данный декодер, состоящий только из быстродействующих элементов, в процессе работы выполняет несколько итераций декодирования, на каждой из которых осуществляется декодирование всех информационных битов. При этом решения МПД строго приближаются к решению оптимального декодера, поскольку при каждом изменении декодируемых символов суммарный вес синдрома и разностного вектора только уменьшается.

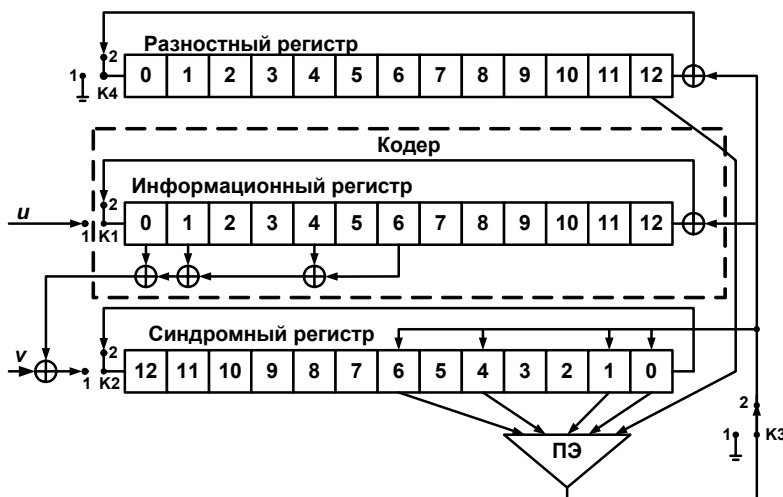


Рисунок 1 – Пример схемы МПД для блочного СОК

Основное влияние на эффективность МПД оказывает правильность выбора используемых в нем кодов, которые должны быть устойчивыми к размножению ошибок декодирования. Основным показателем подверженности кода размножению ошибок является вероятность второй ошибки декодирования, оцениваемая как:

$$P_{1/1}(\xi_m = 1 / \xi_0 = 1) = P_{1,1}(\xi_0 = 1, \xi_m = 1) / P_1(\xi_0 = 1),$$

где  $P_1(\xi_0 = 1) = \sum_{i=(d+1)/2}^d C_d^i p^i (1-p)^{d-i}$  – вероятность первой ошибки декодирования;

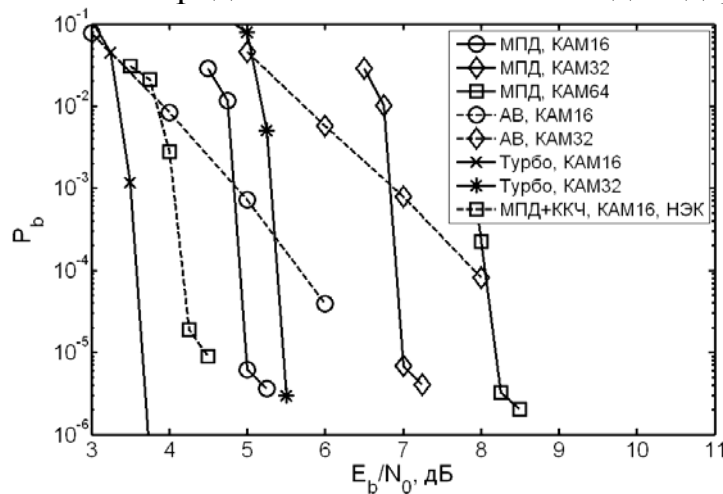
$P_{1,1}(\xi_0 = 1, \xi_m = 1)$  – вероятность двух ошибок декодирования, оцениваемая через двумерные производящие функции вероятностей (ПФВ) для пар информационных символов  $i_0$  и  $i_m$ .

Вероятность второй ошибки декодирования была рассчитана для ряда самоортогональных кодов. Результаты данного расчета показали, что наилуч-

шей устойчивостью к размножению ошибок обладают коды с кратными кодовыми скоростями вида  $R=mk/mn$ .

Для выбранных наилучших СОК были получены представленные в тексте диссертации экспериментальные характеристики МПД в канале с АБГШ и двоичной ФМ при использовании как жестких, так и мягких решений демодулятора. Из представленных в работе графиков следует, что применение МПД для декодирования правильно выбранных кодов действительно позволяет получить близкие к оптимальным характеристики в достаточно широком диапазоне кодовых скоростей и уровней шума канала.

Также во второй главе рассмотрены вопросы использования многопороговых методов декодирования в каналах с многопозиционными системами модуляции, таких как квадратурная амплитудная (КАМ $N$ ) и многопозиционная фазовая (ФМ $N$ ) модуляция. Применение многопозиционной модуляции является одним из способов уменьшения занимаемой полосы частот, являющейся чрезвычайно ценным ресурсом. Из представленных в диссертации результатов компьютерного моделирования (пример результатов для КАМ16 показан на рисунке 2) следует, что в таких условиях МПД является на 1..3 дБ более эффективным, чем классический декодер Витерби, и уступает декодеру турбо кода около 1..1,5 дБ. При этом сложность практической реализации МПД оказывается на два и более порядков меньше сложности декодера турбо кода.



**Рисунок 2 – Эффективность МПД в каналах с КАМ $N$ , мягкий модем**

Для дополнительного улучшения эффективности МПД предлагается методика повышения его эффективности в каналах с многопозиционной модуляцией, основанная на идее рассмотрения такого канала в качестве канала с неравномерной энергетикой. Методика заключается в следующем:

1. Все позиции битов сигнального пространства необходимо разбить на две группы: позиции битов с большей и меньшей надежностью.

2. В процессе передачи закодированных с помощью СОК битов информационные биты следует располагать в более надежных позициях, а проверочные – в менее надежных. Это позволит приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала, но при этом область насыщения вероятности ошибки будет выше.

3. Для уменьшения вероятности ошибки в области эффективной работы МПД следует совместно с МПД применить любой простой внешний код. Это может быть код с контролем четности, рассмотренный в данном параграфе, или код Хэмминга.

Пример результатов моделирования МПД при применении предложенной методики канала с АБГШ показан на рисунке 2 кривой «МПД+ККЧ, КАМ16, НЭК». Из данных результатов следует, что расположение информационных битов в более надежных позициях символа позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,7 дБ. В результате МПД уступает сложному декодеру турбо кодов всего лишь 0,4 дБ. Это допускает применение МПД в высокоскоростных системах передачи данных, в которых наряду с высокими требованиями к энергетике канала накладываются жесткие ограничения на расширение полосы частот.

**В третьей главе** «Разработка каскадных схем кодирования на основе многопороговых декодеров» предложены три каскадные схемы коррекции ошибок, составляющим элементом которых является МПД. Получены аналитические и экспериментальные оценки эффективности предложенных схем.

В процессе разработки систем передачи данных приходится решать задачи уменьшения вероятности ошибки декодирования при том же отношении сигнал/шум или обеспечения такой же вероятности ошибки декодирования при меньшем отношении сигнал/шум.

Решение данных задач связано с рядом выявленных сложностей:

– для уменьшения вероятности ошибки необходимо использовать коды с большим кодовым расстоянием, но при этом область эффективной работы МПД смещается в область меньших шумов;

– для приближения области эффективной работы МПД к пропускной способности канала можно использовать коды с меньшим кодовым расстоянием, но при этом увеличивается вероятность ошибки декодирования.

Решение описанных задач возможно при использовании предлагаемых в третьей главе каскадных схем коррекции ошибок, позволяющих уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД и приблизить эту область к пропускной способности канала.

Первая предлагаемая каскадная схема заключается в каскадировании самортогонального кода, декодируемого с помощью МПД, с расширенным кодом Хэмминга, декодируемым с помощью декодера Чейза. Данный выбор обоснован тем, что ошибки МПД в области его эффективной работы в основном одиночные. Данные ошибки должны легко исправляться с помощью простейшего внешнего кода, что позволит существенно уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД.

Для предварительной оценки эффективности предложенной каскадной схемы кодирования получена нижняя оценка вероятности ошибки декодирования при работе в двоичном симметричном канале.

В области своей эффективной работы вероятность ошибки МПД приближается к вероятности ошибки оптимального декодера для используемых в МПД кодов, которая определяется следующим образом:

$$P_{\text{МПД}} \approx P_{\text{ОД}} = \sum_{i=(d+1)/2}^d C_d^i p_0^i (1-p_0)^{d-i}.$$

Здесь  $p_0$  – вероятность ошибки в двоичном симметричном канале, связанная с отношением сигнал/шум  $E_b/N_0$  на бит выражением  $p_0 = Q(\sqrt{2R \cdot E_b / N_0})$ .

Здесь  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ , а  $R$  – кодовая скорость каскадного кода.

Поток ошибок с такой вероятностью поступает на декодер кода Хэмминга, который всегда способен исправить одну и иногда 2 ошибки. Причем, для области эффективной работы МПД обоснованно можно считать, что его ошибки оказываются практически независимыми.

При работе декодера Чейза для расширенного кода Хэмминга к ошибкам будут приводить следующие основные события:

1. В блоке кода Хэмминга присутствуют три ошибки. Вероятность такого события можно оценить как  $P_1 = C_n^3 P_{\text{МПД}}^3 (1 - P_{\text{МПД}})^{n-3}$ .

В результате возникновения такого события в блоке кода Хэмминга из  $n$  битов появятся 4 ошибки, что приведет к вероятности ошибки  $P_b^{(1)} = \frac{4P_1}{n}$ .

2. В блоке кода Хэмминга присутствуют две ошибки и среди правильных битов есть такие два, суммарная надежность которых меньше надежности двух ошибочных битов. Вероятность такого события можно оценить как

$$P_2 = C_n^2 P_{\text{МПД}}^2 (1 - P_{\text{МПД}})^{n-2} \sum_{i_1=T}^J \sum_{i_2=T}^J [C_J^{i_1} C_J^{i_2} p_0^{i_1+i_2} (1-p_0)^{2J-i_1-i_2} P_x(i_1+i_2)].$$

Здесь  $J=d-1$  – число проверок относительно информационного бита;  $T=(d+1)/2$ ;  $P_x(k)$  – вероятность того, что в проверочных битах для двух правильных информационных битов ошибок больше, чем  $2d-k$ .

Для определения вероятности  $P_x(k)$  используется выражение

$$P_x(k) = C_{n-2}^2 \sum_{i_3=0}^{T-1} \sum_{i_4=0}^{T-1} f(i_3, i_4, k),$$

где функция  $f$  определяется следующим образом:

$$f(i_3, i_4, k) = \begin{cases} 0, & \text{если } i_3 + i_4 \leq 2d - k \\ C_J^{i_3} C_J^{i_4} p_0^{i_3+i_4} (1-p_0)^{2d-i_3-i_4}, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В результате возникновения такого события в блоке кода Хэмминга из  $n$  битов также появятся 4 ошибки, что приведет к вероятности ошибки  $P_b^{(2)} = \frac{4P_2}{n}$ .

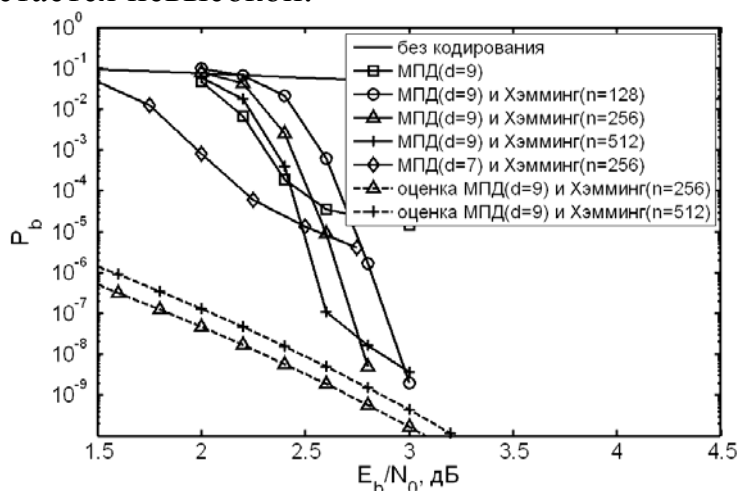
Остальными событиями в силу малой величины вероятности ошибки  $P_{\text{МПД}}$  можно пренебречь.

В результате нижняя оценка вероятности ошибки всей каскадной схемы определяется в соответствии с выражением  $P_b^{(L)} = P_b^{(1)} + P_b^{(2)}$ .

Получение оценки вероятности ошибки для случая работы в канале с АБГШ будет отличаться только способом оценки вероятности ошибки многопорогового декодера, которая в данном случае определяется как

$$P_{\text{МПД}} = Q(\sqrt{2R \cdot d \cdot E_b / N_0}).$$

Оценки вероятности ошибки каскадного кода, состоящего из СОК с  $R=1/2$  и расширенного кода Хэмминга длиной 256 и 512, полученные в соответствии с предложенными выражениями для канала с АБГШ представлены на рисунке 3. При этом использовался СОК с  $d=7$  и 9. Из оценок следует, что применение данной схемы позволит уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД на два и больше порядков. Результаты компьютерного моделирования каскадного кода, представленные на рисунке 3, показали, что с его помощью можно как уменьшать вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД на два и более порядков, так и приближать область эффективной работы к пропускной способности канала на 0,2 – 0,3 дБ. При этом сложность декодера каскадного кода остается невысокой.



**Рисунок 3 – Нижние оценки вероятности ошибки каскадной схемы, состоящей из СОК с  $R=1/2$  и кода Хэмминга, и экспериментальные характеристики в канале с АБГШ**

В основе второй предложенной каскадной схемы коррекции ошибок лежит каскадирование самоортогонального кода, декодируемого с помощью МПД, со сверточным кодом, декодируемым с помощью декодера Витерби. В отличие от предыдущей каскадной схемы, здесь МПД находится во внешнем каскаде. Данный выбор обоснован тем, что декодер Витерби является оптимальным и позволяет несколько уменьшать вероятность ошибки даже при очень высоком уровне шума в канале передачи данных. После этого МПД сможет еще существенно уменьшить вероятность ошибки декодирования.

Для предварительной оценки эффективности работы данной схемы необходимо сначала оценить эффективность декодера Витерби, выполняющего оптимальное декодирование используемых с ним сверточных кодов. Для сверточных кодов, декодируемых с помощью алгоритма Витерби, известна аддитивная граница вероятности битовой ошибки

$$P_{AB} = P_b < \frac{1}{k_0} \sum_{j=d_{free}}^{\infty} w_j P_j,$$

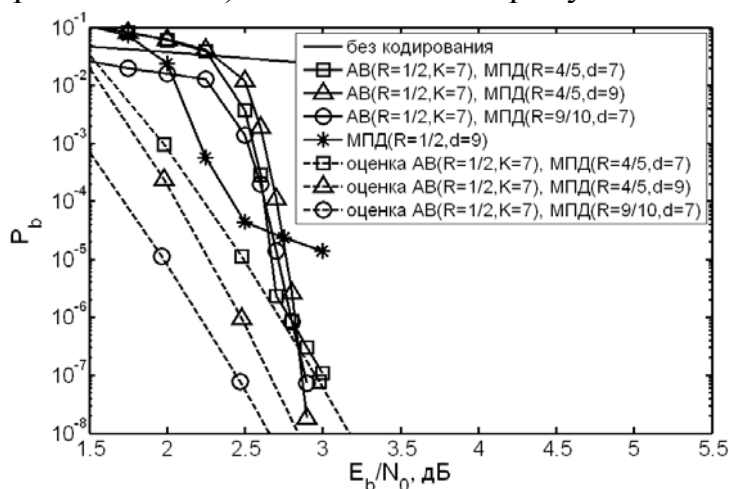
где  $w_j$  – полный информационный вес всех путей веса  $j$ ;  $P_j$  – вероятность выбрать неправильный путь, отличающийся от правильного в  $j$  позициях. Вероятность  $P_j$  может быть рассчитана как для двоичного симметричного канала, так и для канала с АБГШ при использовании двоичной фазовой модуляции и бесконечного числа уровней квантования демодулятора.

После определения вероятности ошибки декодера Витерби ее можно использовать в выражении для оценивания вероятности ошибки МПД

$$P_{МПД} \approx \sum_{i=\frac{d+1}{2}}^d C_d^i P_{AB}^i (1 - P_{AB})^{d-i}.$$

Оценки вероятности ошибки каскадного кода, состоящего из короткого сверточного кода с  $R=1/2$ ,  $K=7$  и СОК с  $R=4/5$  и  $9/10$  при различных значениях кодового расстояния  $d$ , полученные в соответствии с представленными выражениями для канала с АБГШ приведены на рисунке 4. При этом использовался СОК с  $d=7$  и  $9$ . Как и следовало ожидать, наклон кривых, отражающих вероятности ошибки декодирования предложенных каскадных схем, существенно больше наклона кривых, соответствующих характеристикам оптимального декодера обычных СОК. Из этого следует, что применение предложенной схемы может позволить уменьшить вероятность ошибки декодирования, начиная с отношения сигнал/шум 2.5 – 3 дБ, на несколько порядков.

Экспериментальные характеристики каскадных схем (рисунок 4), полученные с помощью компьютерного моделирования, подтверждают данные выводы. Отметим, что предложенные каскадные схемы, состоящие из короткого сверточного кода и СОК, позволяют на четыре и более порядков уменьшить вероятность ошибки декодирования по сравнению с обычным МПД. При этом область, в которой достигается уменьшение вероятности ошибки незначительно (примерно на 0.3 дБ) сдвигается в сторону меньших шумов.



**Рисунок 4 – Нижние оценки вероятности ошибки каскадной схемы, состоящей из короткого сверточного кода и СОК, и экспериментальные характеристики в канале с АБГШ**

Для дополнительного улучшения эффективности данной каскадной схемы вместо двоичного МПД в ней можно применять недвоичные многопороговые декодеры. Переход к недвоичным кодам объясняется тем, что ошибки декодера Витерби в основном группируются в пакеты, которые при переходе к недвоичным кодам будут искажать лишь небольшое число недвоичных символов.

Для декодера Витерби обоснованно можно предположить, что средняя длина пакета ошибок примерно равна  $2K$ , где  $K$  – конструктивная длина сверточного кода. В пределах такого пакета число ошибок равно примерно  $d/2$ , где  $d$  – кодовое расстояние сверточного кода. При возникновении пакета ошибок длиной  $2K$  будет искажено  $\lfloor 2K/M \rfloor + 1$  недвоичных символов, где  $M$  – число битов в  $q$ -ичном символе (для  $q=256$   $M=8$ ), а операция  $\lfloor x \rfloor$  определяет наибольшее целое, меньшее, чем  $x$ .

В результате можно записать выражение для оценки вероятности ошибочного символа на входе недвоичного МПД:

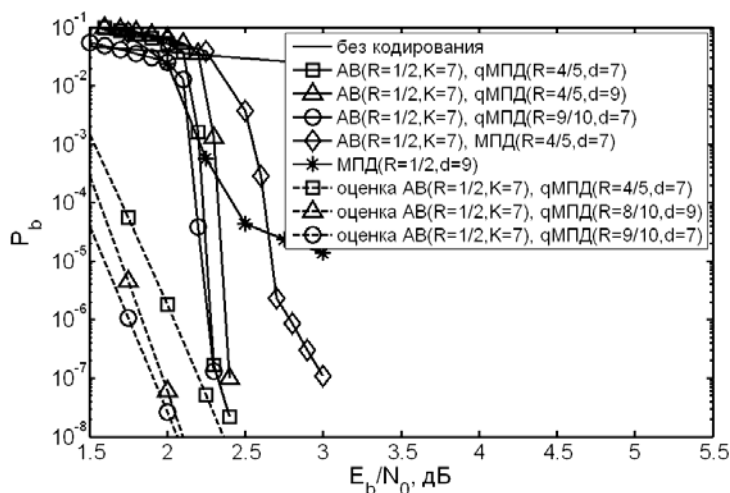
$$P_{sAB} = P_{AB} \cdot M \cdot S_p / E_p.$$

Здесь  $P_{AB}$  – вероятность битовой ошибки на выходе декодера Витерби;  $M$  – число битов в  $q$ -ичном символе;  $S_p$  – среднее число символов, искажаемых пакетом ошибок;  $E_p$  – среднее число ошибочных битов в пакете ошибок.

После определения вероятности символьной ошибки  $P_{sAB}$  на входе недвоичного МПД с помощью известной методики, оценивается вероятность символьной ошибки  $P_{sМПД}$  на выходе недвоичного МПД. После этого, предполагая, что в ошибочном символе искажена примерно половина битов, можно получить вероятность битовой ошибки на выходе декодера предложенной каскадной схемы:

$$P_b \approx P_{sМПД} / 2.$$

Оценки вероятности ошибки каскадного кода, состоящего из короткого сверточного кода с  $R=1/2$ ,  $K=7$  и недвоичного СОК с  $R=4/5$ ,  $8/10$  и  $9/10$  при различных значениях кодового расстояния  $d$ , полученные в соответствии с предложенными выражениями для канала с АБГШ при использовании двоичной фазовой модуляции представлены на рисунке 5. При этом использовался недвоичный СОК с  $d=7$  и  $9$  при значении  $q=256$ . Из сравнения данных графиков с ранее представленными видно, что использование недвоичного МПД вместо двоичного может позволить получить дополнительный ЭВК порядка  $0,5$  дБ и даже больше. Из анализа экспериментальных характеристик данной каскадной схемы, также представленных на рисунке 5, следует, что за счет применения вместо двоичных СОК недвоичных удалось получить дополнительный ЭВК около  $0,5$  дБ при вероятности ошибки декодирования  $P_b=10^{-6}$ . Также заметим, что теперь уменьшение вероятности ошибки по сравнению с обычным МПД достигается во всей области эффективной работы последнего и даже несколько раньше.



**Рисунок 5 – Нижние оценки вероятности ошибки каскадной схемы, состоящей из сверточного кода и недвоичного СОК, и экспериментальные характеристики в канале с АБГШ**

Дополнительно следует отметить, что характеристики каскадного кода, состоящего из сверточного кода и недвоичного СОК, оказываются примерно на 0,2 дБ лучше характеристик широко используемого каскадного кода, состоящего из кода Рида-Соломона и сверточного кода, декодируемого с помощью декодера Витерби. Заметим, что увеличение ЭВК на 0,1 дБ уже считается серьезным достижением. Еще одним очень важным преимуществом данной каскадной схемы является простота ее реализации. Схема гораздо проще, чем схема кодирования/декодирования каскадного кода Рида-Соломона и Витерби.

Особенностью предложенных каскадных схем на базе сверточных кодов и МПД является то, что они могут найти применение в уже существующих системах передачи данных, в которых в настоящее время используется кодек Витерби, путем простого добавления в нее кодера МПД в качестве внешнего кодера. Это позволит улучшить энергетическую эффективность систем передачи данных примерно на 1,5 – 2 дБ без их существенного изменения.

**В четвертой главе** «Программные средства моделирования многопороговых декодеров и других алгоритмов коррекции ошибок» рассматриваются вопросы построения программного обеспечения, необходимого для определения эффективности многопороговых декодеров и других методов коррекции ошибок в канале с АБГШ при использовании различных видов модуляции.

Разработанные программные средства будут полезны специалистам, занимающимся разработками цифровых сетей передачи данных. Программные средства позволят им оценить возможность применения в разрабатываемых ими системах различных декодеров корректирующих кодов. Это создает возможность правильного проектирования всех узлов создаваемых новых коммуникационных систем с учетом требуемых уровней энергетической эффектив-

ности, сложности, скорости и надежности реализации, задержки принятия решения и других критериев выбора систем повышения достоверности.

Данные программные средства состоят из интерфейсного модуля, модуля имитации канала передачи данных, модуля имитации работы устройств кодирования и декодирования, модуля управления параметрами эксперимента, модуля отображения результатов эксперимента и модуля построения графиков.

Модуль имитации канала передачи данных позволяет выбирать требуемую модель канала передачи данных, выполнять настройку ее параметров и использовать выбранную модель канала при моделировании. Данный модуль поддерживает модель канала передачи данных с аддитивным белым гауссовским шумом и двоичной фазовой модуляцией, модель канала передачи данных с аддитивным белым гауссовским шумом и многопозиционной фазовой модуляцией и модель канала передачи данных с аддитивным белым гауссовским шумом и квадратурной амплитудной модуляцией.

Модуль имитации работы устройств кодирования/декодирования позволяет выбирать требуемые алгоритмы для кодирования и декодирования данных, выполнять настройку параметров этих алгоритмов и использовать выбранные алгоритмы при моделировании. Данный модуль поддерживает модель кодека кода Хэмминга, модель кодека Витерби, модель кодека турбо кода и модели кодеков, основанных на МПД.

Модуль управления параметрами эксперимента позволяет настраивать параметры эксперимента и управлять ходом эксперимента. С помощью данного модуля обеспечивается требуемая точность результатов моделирования.

Модуль отображения результатов эксперимента позволяет в удобной форме выводить результаты эксперимента для дальнейшего анализа.

Модуль построения графиков позволяет строить графики зависимости вероятности ошибки декодирования от отношения сигнал/шум в канале передачи данных.

В четвертой главе также рассмотрены вопросы обеспечения точности и достоверности результатов моделирования. Показано, что для оценивания вероятности ошибки в канале передачи данных с относительной погрешностью 10% при надежности 0,95 требуется проводить моделирование до получения порядка 400 ошибок. При оценивании вероятности ошибки декодирования из-за группирования ошибок на выходе декодера необходимо проводить моделирование до получения в несколько раз большего числа ошибок. При получении всех представленных в диссертации результатов моделирование прекращалось только при получении 1000 битовых ошибок на выходе декодера или 100 ошибочно декодированных блоков.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Проведено исследование существующих алгоритмов кодирования/декодирования. Показано, что одними из наилучших с точки зрения соотношения эффективности и сложности практической реализации являются мно-

гопороговые декодеры самоортогональных кодов. Выбраны направления дальнейших исследований.

2. Разработаны программные средства, позволяющие получать блоковые самоортогональные коды, в минимальной степени подверженные размножению ошибок.

3. Рассмотрены вопросы применения многопороговых методов декодирования в каналах с многопозиционными системами модуляции, таких как квадратурная амплитудная и многопозиционная фазовая модуляция. Показано, что в данных условиях при использовании как жестких, так и мягких решений демодулятора, МПД является на 1..3 дБ более эффективным, чем классический декодер Витерби, и уступает декодеру турбо кода около 1..1,5 дБ.

4. Предложена методика улучшения эффективности МПД в каналах с многопозиционными системами модуляции за счет оптимизации расположения информационных и проверочных битов в символах сигнального множества. Показано, что применение методики позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала более чем на 0,5 дБ.

5. Предложены и детально исследованы три каскадные схемы кодирования/декодирования, в которых в качестве составляющего элемента используются многопороговые декодеры. Получены аналитические оценки эффективности данных каскадных схем. Показано, что использование предложенных каскадных схем кодирования/декодирования позволяет как уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД на 2 – 4 десятичных порядка, так и приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ при сохранении невысокой сложности практической реализации.

6. Разработаны и зарегистрированы в РОСПАТЕНТ программные средства моделирования многопороговых декодеров и других алгоритмов коррекции ошибок. Программные средства необходимы для специалистов, занимающихся разработками цифровых систем передачи данных. Программные средства позволят им оценить возможность применения в разрабатываемых ими системах различных декодеров корректирующих кодов. Это создает возможность правильного проектирования всех узлов создаваемых новых коммуникационных систем с учетом требуемых уровней энергетической эффективности, сложности, скорости и надежности реализации, задержки принятия решения и других критериев выбора систем повышения достоверности.

**В приложении** приводятся копии свидетельств об официальной регистрации разработанных программных средств, копии актов о внедрении результатов диссертации и руководство пользователя по разработанным программным средствам.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ОСНОВНЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Развитие многопороговых алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов // мат. науч.-практ. конф. «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития». Одесса: Черноморье, 2005. Том 7. С. 13–14.
2. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Перспективные методы коррекции ошибок для высокоскоростных спутниковых систем связи // Мат. 14-й Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005.
3. Гринченко Н.Н., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Применение многопорогового декодера в каналах со стираниями // Труды НТОРЭС им. А.С.Попова, 2006 г. С. 338–340.
4. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Имитатор цифрового спутникового канала связи // мат. Всероссийского научно-практического семинара «Сети и системы связи». Рязань: РВВКУС, 2006. С. 168–170.
5. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Вопросы применения многопороговых декодеров в каналах связи со стираниями // Межвуз. сб. науч. тр. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Рязань, РГРТА, 2006. С. 47–50.
6. Гринченко Н.Н. Разработка каскадных схем кодирования на основе многопороговых декодеров // мат. Всероссийской научно-технической конференции НИТ-2006. Рязань: 2006. С. 73–74.
7. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование для высокоскоростных спутниковых каналов связи // Цифровая обработка сигналов, 2006. №4. С. 29–33.
8. Гринченко Н.Н., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Многопороговое декодирование в каналах с многопозиционной модуляцией // Вестник РГРТУ. 2006 г. Вып. 19, С. 179–182.
9. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование для цифровых систем связи // Известия ТРТУ, №15(70), Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. С. 5–10.
10. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Разработка каскадных схем кодирования на основе многопороговых декодеров // 8-я межд. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов». М.: 2006. Том 1. С. 60–63.
11. Гринченко Н.Н., Костров Б.В. Оценка эффективности каскадной схемы кодирования на основе кодека Хэмминга и многопорогового декодера // Мат. 5-й Международной конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» – Рязань, РГРТУ. 2007. С. 184–187.
12. Гринченко Н.Н., Овечкин П.В. Свидетельство РОСПАТЕНТ №2005611304 о регистрации программы для ЭВМ «Имитационная модель многопорогового декодера помехоустойчивых кодов» (MultiDec) от 17.12.06.

Гринченко Наталья Николаевна

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО  
КОДИРОВАНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.11.2007 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ЗАО «Колорит»,  
г. Рязань, Первомайский проспект, д. 37/1.