

## **ЭЛЕКТРОННЫЙ ВАРИАНТ ОТЧЕТА ЗА 2005 ГОД ПО ПРОЕКТУ РФФИ 05-07-90024-в**

### **1.1. Номер проекта**

05-07-90024-в

### **1.2. Руководитель проекта**

Золотарев Валерий Владимирович

### **1.3. Название проекта**

Разработка методов повышения достоверности передачи данных в телекоммуникационных системах

### **1.7. Краткая аннотация на русском языке**

За отчетный период выполнения проекта было проведено исследование эффективности применения многопорогового алгоритма декодирования в канале с аддитивным белым гауссовским шумом. Исследование показало, что с помощью многопороговых декодеров можно получить значения энергетического выигрыша до 8 дБ со сложностью реализации, в десятки раз меньшей сложности сопоставимых по эффективности методов коррекции ошибок.

Также проанализирован эффект размножения ошибок в линейных кодах. Показано, что для уменьшения размножения ошибок необходим выбор кодов, характеризующихся малой степенью пересечения множеств ошибок, входящих в проверки относительно разных информационных символов. Предложена и реализована в программных средствах методика построения кодов, в наименьшей степени подверженных размножению ошибок. С помощью данных программных средств получен ряд самоортогональных кодов, в минимальной степени подверженных размножению ошибок. Использование полученных кодов позволило примерно на 0,2 дБ приблизить область эффективной работы многопороговых декодеров к пропускной способности канала.

Разработана методика использования многопорогового декодера в каскадных схемах кодирования. Предложена каскадная схема кодирования, состоящая из самоортогонального кода, декодируемого с помощью многопорогового декодера, и короткого сверточного кода, декодируемого с помощью алгоритма Витерби. Проведено исследование эффективности работы данной схемы. Показано, что данная схема кодирования оказывается лучше каскадного кода, состоящего из кода Рида Соломона и сверточного кода как по эффективности, так и по быстродействию. Предложен способ декодирования самоортогонального кода, в основе работы которого лежит декодирование принятого блока несколькими многопороговыми декодерами. Применение данного способа позволило приблизить область эффективной работы многопорогового декодера к пропускной способности канала примерно на 0,2 дБ.

Использование предложенных за первый год работы над проектом методов повышения эффективности многопороговых декодеров позволило приблизить рабочую область многопороговых декодеров к пропускной способности канала примерно на 1,5 дБ.

Разработан и зарегистрирован в РОСПАТЕНТ имитатор цифрового канала передачи данных, позволяющий проводить всестороннее исследование эффективности применения лучших методов коррекции ошибок. Имитатор позволяет проводить исследование таких современных методов коррекции ошибок, как алгоритм декодирования Витерби, алгоритмы декодирования турбо кодов, кодов произведения-накопления, многопороговых декодеров и др. Исследование данных методов коррекции ошибок можно проводить как в канале с обычной двоичной фазовой модуляцией, так и в каналах с многопозиционными системами модуляции (многопозиционная фазовая модуляция и квадратурно-амплитудная модуляция).

С помощью имитатора цифрового канала передачи данных проведен сравнительный анализ эффективности работы многопорогового алгоритма декодирования и предложенных схем на его основе с лучшими современными методами коррекции ошибок. Результаты сравнительного анализа показали преимущество использования многопороговых декодеров в высокоскоростных каналах связи, где предъявляются высокие требования, как по эффективности, так и по быстродействию.

Началась разработка демонстрационно-испытательного стенда с имитатором цифровых спутниковых, космических и других типов каналов для исследования характеристик аппаратных декодеров многопорогового типа.

## **2.6. Краткая аннотация на английском языке**

For the accounting period research of the multithreshold decoder application on an additive white Gaussian channel has been carried out. Research has shown that with the help of the multithreshold decoders it is possible to get a coding gain about 8 dB with implementation complexity in tens times less than efficiency comparable methods of error-correction.

Also the error propagation effect in linear codes is analyzed. It is shown, that for reduction of the error propagation it is necessary to choose codes having small count of equal errors included in checks concerning different information symbols. The technique for construction of such codes is offered and realized in software. With the help of the given software several self-orthogonal codes with small error propagation is constructed. The using of these codes allows to close the region of effective work of multithreshold decoder to channel capacity about 0,2 dB.

The technique of the multithreshold decoder using in concatenated codes is developed. Concatenated code consisting of self-orthogonal code decoding with the multithreshold decoder, and short convolutional code decoding with the Viterby decoder is offered. Research of an overall performance of the given code is carried out. It is shown, that the given concatenated code appears better the concatenated code consisting of Reed-Solomon code and convolutional code both on efficiency, and on speed. The way of self-orthogonal code decoding is offered. This method based on decoding of received from channel block with several multithreshold decoders. Application of the given way has allowed to approach area of effective work for the multithreshold decoder to channel capacity approximately on 0,2 dB.

The using of suggested methods for improving of multithreshold decoder allows to close the region of effective work of multithreshold decoder to channel capacity about 1,5 dB.

The simulator of digital communication system is developed and registered in ROSPATENT. It allows to spend comprehensive investigation of the best error-correction methods. The simulator allows to carry out research of such modern error-correction methods as the Viterby decoder, turbo codes, product-accumulate codes, the multithreshold decoders, etc. Research of the given methods can be spent as on the channel with binary phase modulation and on channels with multi-level modulation ( $M$ -ary phase modulation and quadrature-amplitude modulation).

With the help of the simulator of the digital communication system the comparative analysis of an overall performance of the multithreshold decoder and the offered concatenated codes based on it with the best modern error-correction methods is carried out.

The results of the analysis show advantage of using multithreshold decoders in high-speed communication channels.

It began developing of demonstrate-test stand with simulator of digital channel which can be used for investigation of hardware multithreshold decoders.

#### **3.4. Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта**

Разработка методов декодирования помехоустойчивых кодов, обеспечивающих высокую достоверность передачи данных при высоком уровне шума в канале и характеризующих предельно малой сложностью практической реализации. Разработка методики выбора структуры и поиск кодов, в наименьшей степени подверженных эффекту размножения ошибок, проявляющегося при их итеративном декодировании. Реализация разработанных алгоритмов на современной элементной базе и их внедрение в технику связи. Разработка программных средств моделирования цифровых каналов передачи данных с современными методами повышения достоверности, позволяющие проводить всестороннее исследование существующих методов коррекции ошибок в различных условиях применения.

#### **3.5. Степень выполнения поставленных в проекте задач**

Все поставленные на первый год работы над проектом задачи выполнены в полном объеме. В дальнейшем необходимо реализовать разработанные методы коррекции ошибок на современной элементной базе (на микропроцессоре и на ПЛИС) и внедрить в технику связи. Одновременно необходимо продолжать разработку методов коррекции ошибок, способных еще более увеличить эффективность применения кодирования.

#### **3.6. Полученные за отчетный период важнейшие результаты**

Основными достижениями в теории и в технике кодирования всегда считаются результаты, относящиеся к более эффективному декодированию при возможно меньших вычислительных затратах. Важно, что при этом всегда наиболее ценным считается не уменьшение вероятности ошибки декодирования при сохранении всех прочих параметров кодовых систем, а именно способность сохранить какой-то уровень выходной вероятности ошибки на бит, например,  $10^{-5}$ , но при переходе в сторону более низких

отношений сигнал/шум. Именно в этом случае к.п.д. использования весьма дорогих каналов спутниковой и космической связи действительно существенно возрастает и все новые достижения в этой области связаны именно с уменьшением рабочих значений отношений сигнал/шум.

В связи с этим исследования первого года работы по гранту №05-07-90024-в были сосредоточены на том, чтобы одновременно уменьшить объем вычислений при декодировании и существенно продвинуть рабочую область многопорогового декодера (МПД) в сторону более высоких шумов канала. Как показали зарубежные исследователи, а также совместные публикации участников работ по этому гранту и руководства НИИРадио, в частности, в ведущем журнале Минсвязи «Электросвязь», №2, 2005 г., именно снижение энергии сигнала всего на 1 дБ позволяет снизить финансовые расходы на проект той или иной сети связи на много миллионов долларов за счет увеличения дальности связи или повышения допустимой скорости передачи, снижения размеров дорогих антенн и других достоинств, возникающих в системах, способных работать при меньших уровнях сигнала.

Поэтому достигнутые результаты по снижению рабочей области для МПД с отношения сигнал/шум порядка 3 дБ перед началом работ по проекту до отношения сигнал/шум 1,5 дБ после всего лишь года интенсивной работы на этом ключевом направлении чрезвычайно важны. Характеристики МПД и до этого были весьма высоки. Поэтому достигнутый прогресс по энергетике для МПД в уже очень трудной для дальнейшего улучшения области очень высоких шумов доказывает правильность выбранных направлений совершенствования алгоритмов МПД, что и позволяет развить запланированную ранее на второй год работ аппаратную реализацию МПД в 2-х вариантах:

а) высокоскоростного МПД на зарубежных сериях ПЛИС Xilinx или Altera;

б) микропроцессорную реализацию алгоритма МПД.

Как показали результаты внедрения методов МПД в цифровые телевизионные системы, даже программные версии МПД успешно справляются с быстрыми цифровыми потоками, возникающими в телевидении. Поэтому весьма недорогие по стоимости проведения работы по созданию микропроцессорного МПД явятся важным для техники связи этапом создания самых современных устройств обработки сигнала. Как показывает сравнение планируемых на второй год работ по гранту улучшенных характеристик МПД на ПЛИС со стоимостью работ по МПД в НИИРадио по аналогичной тематике, затраты по созданию работоспособного МПД на ПЛИС будут примерно в 4 раза меньшими за счет упрощения схемы МПД и более рационально выбранной элементной базы. При этом будет повышена примерно в 2 раза скорость декодирования и примерно на 1 дБ увеличен уровень энергетического выигрыша кодирования. Кроме того, разработанный вариант МПД будет подготовлен для внедрения в аппаратуру связи с самыми минимальными доработками, необходимыми для включения декодера в схему конкретного модема.

В течение второго года работ по гранту будут также продолжены работы по дальнейшему совершенствованию МПД и обеспечению его работоспособности при отношении сигнал/шум в области 1,0 дБ. Это будет важнейшее и с общенаучной, и с прикладной точки зрения достижение отечественной науки, поскольку при этом будут обеспечены, видимо, примерно десятикратное снижение сложности МПД декодирования по сравнению с турбо кодами по формальным критериям сложности и еще большая разница в быстродействии аппаратных версий МПД. Работы второго года должны закрепить успех отечественной науки в теории и техники помехоустойчивого кодирования и продемонстрировать эти достижения на специальном демонстрационно-испытательном стенде, который при соответствующем совсем небольшом финансировании будет показывать всем потенциальным заказчикам возможности МПД алгоритмов и других методов коррекции ошибок.

Подчеркнем, что все указанные достижения в области разработок МПД алгоритмов обеспечены его успешными исследованиями в течение более 30 лет, а финансирование заключительных работ по его развитию и внедрению в системы связи многократно сокращают время до момента его успешного включения в новейшие системы связи при минимальных затратах.

Кратко сформулируем основные результаты, полученные за отчетный период работы.

1. Разработан и зарегистрирован в РОСПАТЕНТ «Имитатор цифрового канала передачи данных», позволяющий проводить всестороннее исследование эффективности применения лучших методов коррекции ошибок.

«Имитатор цифрового канала передачи данных» (в дальнейшем «Имитатор») является уникальным компьютерным исследовательским и технологическим стендом – системой имитации цифровой передачи данных по спутниковым и иным каналам связи, в которую включены современные наиболее эффективные системы повышения достоверности, используемые в реальных сетях связи или только еще опубликованные в специализированных научных изданиях по телекоммуникациям.

«Имитатор» и многочисленные системы помехоустойчивого кодирования, включенные в состав его программного обеспечения, необходимы для специалистов, занимающихся разработками цифровых сетей передачи данных. Имитатор позволяет им оценить возможность применения в разрабатываемых ими системах различных декодеров корректирующих кодов. Это создает для них 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. Современные системы кодирования стали настолько сложными и просто очень трудными для понимания техническими специалистами, занимающимися смежными вопросами, что принятие правильных решений об этих важнейших компонентах сетей связи стало чрезвычайной проблемой.

Применение имитатора в процесс проектирования систем связи полностью снимает эту проблему.

Подчеркнем, что очень многие возможности исследования и анализа методов кодирования, которые обеспечивает применение «Имитатора», являются абсолютно уникальными. Это относится к особенностям моделирования алгоритма Витерби с длиной кодирующего регистра до  $K \sim 20$ , к возможности анализировать прямо на экране характеристики турбо кодов и рассматривать применимость многопороговых и некоторых других наиболее мощных алгоритмов коррекции ошибок при задержках принятия решений до миллиона и более битов. Применение имитатора обеспечит возможность заглянуть примерно на 10 лет вперед в будущее техники кодирования, проанализировать потенциальные возможности еще только проектируемых систем и алгоритмов, которые опубликованы в самых последних журналах по кодированию. Среди большого числа методов, включенных в программное обеспечение имитатора, можно выбрать и быстро опробовать в моделируемом канале обычные мажоритарные декодеры, имитаторы декодеров кодов Хэмминга, стандартные и специальные версии алгоритма Витерби, разнообразные варианты систем кодирования с применением каскадирования последовательного и параллельного типа, в том числе большое число различных версий декодеров турбо кодов с настраиваемыми параметрами как образующих их кодов, так и применяемых перемежителей. Много внимания разработчиками уделено также созданию и реализации различных декодеров для низкоплотностных кодов.

Важнейшее место в программном обеспечении имитатора занимают МПД. Все основные наиболее эффективные версии МПД также включены в качестве возможных вариантов методов повышения достоверности передачи данных в состав программного обеспечения имитатора и демонстрируют очень высокие реальные характеристики этого уникального алгоритма, который полностью разработан российскими специалистами.

2. Проведен анализ эффекта размножения ошибок в самоортогональных кодах, предложена методика построения кодов, характеризующихся минимальным размножением ошибок. Разработаны программные средства, позволяющие получать коды, в наименьшей степени подверженные эффекту размножения ошибок.

В процессе работы МПД может прекратить изменение информационных символов, еще не достигнув решения оптимального декодера. Одной из основных причин этого является значительная подверженность пороговых декодеров, являющихся составной частью МПД, эффекту размножения ошибок (РО). В результате вторая и последующие итерации декодирования вынуждены работать, в основном, с потоками пакетов ошибок от декодеров предыдущих итераций, что существенно уменьшает эффективность всего декодера. Следовательно, основным способом приближения решения МПД к решению оптимального декодера является уменьшение эффекта РО. Для уменьшения РО необходим тщательный выбор кодов, характеризующихся малой степенью

пересечения множеств ошибок, входящих в проверки относительно разных информационных символов.

Кодами, допускающими многопороговое декодирование, являются самоортогональные коды (СОК), которые характеризуются тем, что система всех проверок, контролирующих информационный символ, уже сама является ортогональной относительно данного символа.

Обычно СОК задаются с помощью образующих полиномов  $g(x)$ , разностные треугольники (набор разностей между всеми степенями с ненулевыми коэффициентами) которых не содержат одинаковых элементов.

Для построения таких СОК была разработана программа, которая перебирает коды с заданными параметрами и выбирает из них наиболее устойчивый к размножению ошибок.

Результаты исследования кодов, полученных с помощью разработанного программного обеспечения, показывают, что при декодировании с помощью МПД кодов с хорошей устойчивостью к РО можно получить близкое к оптимальному решение при примерно на 0,2 дБ большем шуме в канале.

3. Разработана каскадная схема кодирования, внешним кодом в которой является самоортогональный код (декодируется с помощью МПД), а внутренним – короткий сверточный код (декодируется с помощью алгоритма Витерби).

В данной схеме при кодировании сначала используется кодер блокового самоортогонального кода, на который подается блок из  $M$  бит, затем закодированная последовательность из  $K$  бит поступает на кодер сверточного кода, информация с которого размером  $N$  бит и выдается в канал связи. В результате получается каскадный код с общей кодовой скоростью  $R=M/N$ . Декодирование производится в обратном порядке, то есть принятая из канала последовательность сначала декодируется декодером Витерби. Затем жесткие решения с выхода декодера Витерби декодируются МПД. Заметим, что во внешнем каскаде данной схемы можно использовать как обычный двоичный, так и недвоичный МПД.

Результаты моделирования данной схемы показывают, что наилучшие результаты по эффективности показывает каскадный кодек, состоящий из недвоичного МПД с кодеком Витерби. Этот каскадный кодек выигрывает 0,2 дБ даже у такого широко применяемого каскадного кода, как код Рида-Соломона с Витерби. Заметим, что увеличение энергетического выигрыша даже на 0,1 дБ уже считается серьезным достижением. Еще одним важнейшим преимуществом данной каскадной схемы является простота ее реализации. Схема гораздо проще, чем схема кодирования/декодирования каскадного кода Рида-Соломона и Витерби.

4. Предложен метод декодирования самоортогональных кодов, в основе работы которого лежит декодирование принятого из канала блока несколькими многопороговыми декодерами.

В процессе работы данного декодера на его вход поступают последовательности информационных и проверочных бит, принятых из канала связи. Поступившую из канала последовательность декодируем с помощью  $n$

(нечетное небольшое число) многопороговых декодеров, каждый из которых имеет различные настройки (количество итераций декодирования, весовые коэффициенты, пороги декодирования). На выходе декодеров получаем  $n$  декодированных сообщений. Затем для принятия решения относительно каждого информационного бита среди соответствующих битов всех  $n$  декодированных блоков производится голосование по большинству. Полученный блок (сформированная на основе  $n$  декодированных блоков информационная часть и принятая из канала проверочная часть) еще раз декодируется многопороговым декодером со своими настройками. Результат последнего декодирования и будет результатом предлагаемого метода декодирования.

Результаты компьютерного моделирования предложенного алгоритма показали, что его применение позволяет приблизить область почти оптимального декодирования используемых кодов к пропускной способности канала примерно на 0,2 дБ по сравнению с обычным многопороговым декодером.

5. Проведен сравнительный анализ эффективности работы многопорогового алгоритма декодирования и предложенных схем на его основе с лучшими современными методами коррекции ошибок.

Результаты сравнительного анализа представлены в п. 3.8 отчета.

### **3.7. Степень новизны полученных результатов**

Исследования по многопороговым декодерам (МПД) относятся к чисто отечественным разработкам. По этому алгоритму получено около 10 авторских свидетельств СССР, а также несколько патентов на изобретения и полезные модели в России. Первое из авторских свидетельств по МПД имеет приоритет от 1972 года. Аналогичные результаты за рубежом появились только через 20 лет для турбо кодов. Кроме того, хотя оба эти основных конкурирующих направления в теории кодирования относятся к очень выгодным в технологическом плане итеративным алгоритмам, в многопороговых алгоритмах изначально были более точно сформулированы и выбраны целевые функции вычислений для алгоритмов. Именно благодаря этому, как показали исследования по сопоставлению МПД и турбо кодов, для некоторых типичных наборов кодовых параметров число операций на бит для МПД фактически на 2 десятичных порядка меньше, чем для турбо кодов с близкой эффективностью. Эта ситуация для любой узкой области проблемных вычислений при современном уровне достаточно плотных результатов: разница в сложности вычислений порядка 100 раз – чрезвычайно редкая ситуация. Именно поэтому ситуация с отечественными разработками алгоритмов МПД требует внимания и максимально широкого и быстрого внедрения в технику связи. Есть 30-летний опыт внедрения методов МПД в ведущем институте Минсвязи – НИИРадио, где созданы уже декодеры 5-го поколения, а также в других организациях.

Именно поэтому в рамках гранта РФФИ руководитель проекта и его исполнители, число которых в 2006 году планируется увеличить, выбрали самое важное сейчас направление: максимальное ускорение исследований работы МПД в области еще более высоких шумов канала, чем это было еще два

года назад. Вторым важнейшим компонентом работ по гранту является разработка макетов устройств кодера и декодера МПД, которые смогли бы продемонстрировать гораздо более высокие характеристики МПД по производительности и энергетической эффективности, чем у турбо методов. Это создаст условия для успешных переговоров с потенциальными заказчиками на декодеры МПД из отрасли связи.

### 3.8. Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

На сегодняшний день теории кодирования известно несколько кодов и методов их декодирования, различающихся корректирующей способностью, сложностью реализации и многими другими параметрами. Рассмотрим эффективность лучших современных методов коррекции ошибок и эффективность многопороговых декодеров и каскадных схем на их основе.

**Характеристики декодеров.** На рис. 1 представлены зависимости вероятности ошибки на бит  $P_b$  на выходе декодера от уровня шума  $E_b/N_0$  для различных методов коррекции ошибок. Данные зависимости получены для случая работы в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) при использовании двоичной фазовой модуляцией (ФМ2) и квантовании выходного сигнала демодулятора на 16 уровней. Данная модель канала достаточно точно описывает реальные спутниковые и многие другие типы каналов.

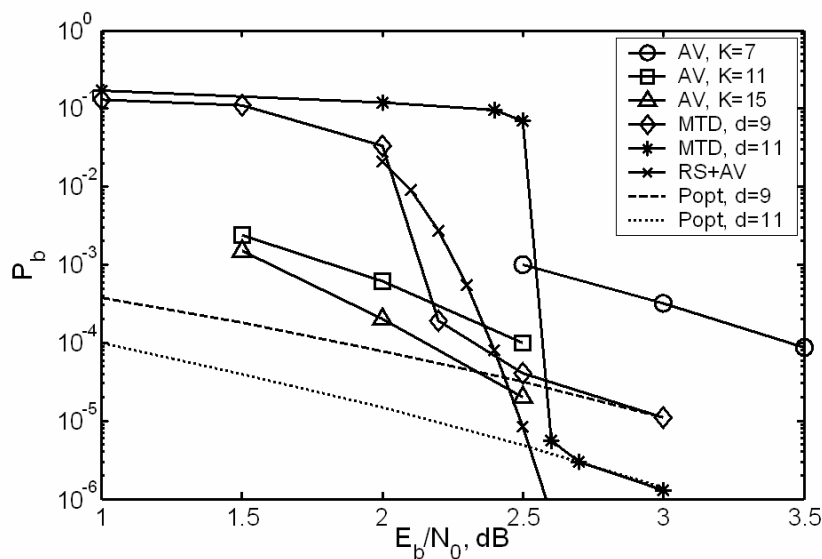


Рис. 1. Характеристики МПД и АВ в канале с АБГШ

На рисунке кривые «АВ» отражают эффективность широко используемого алгоритма Витерби (АВ) для кодовой скорости  $R=1/2$  и длины кодирующего регистра  $K=7, 11$  и  $15$ . Данный метод является оптимальным, однако его сложность растет экспоненциально с ростом  $K$ , и поэтому на практике декодеры с  $K>9$  не используются. В результате возникает необходимость поиска более простых с точки зрения практической реализации декодеров, обеспечивающих в то же время близкое к оптимальному декодирование. Под оптимальным декодером (ОД) понимается переборный метод декодирования, когда для поиска кодового слова, находящегося от

принятого из канала слова на минимальном расстоянии, осуществляют полный перебор всех возможных кодовых слов.

**Многопороговые алгоритмы.** Значительно лучшими характеристиками обладают многопороговые декодеры (МПД), являющиеся модификацией обычного порогового декодера (ПД) Мессе. МПД в процессе контроля принятых кодовых последовательностей многократно исправляют информационные символы пришедшего из канала сообщения. Эти декодеры обладают важнейшим строго доказанным свойством – сходимостью к решению ОД при линейной зависимости сложности реализации от длины кода.

Кривая «МТД,  $d=9$ » на рис. 1 соответствует работе МПД сверточного самоортогонального кода (СОК) с  $R=1/2$ , минимальным кодовым расстоянием  $d=9$ , длиной кодового ограничения  $n_A=4168$  бит и  $I=15$  итерациях декодирования. Возможности МПД для кода с  $R=1/2$ ,  $d=11$  и  $I=20$  представлены на рис. 1 кривой «МТД,  $d=11$ ». Пунктиром на рисунке показаны вероятности ошибочного декодирования кода с  $d=9$  и  $d=11$  с помощью ОД. Как следует из графиков, МПД для достаточно длинных кодов оказывается лучше даже заведомо нереализуемого оптимального АВ с  $K=15$  и более. Основные соотношения между характеристиками АВ и МПД имеют место и при других кодовых скоростях.

Приведенные выше данные показывают, что доступные для реализации оптимальные АВ уступают МПД в широком диапазоне кодовых скоростей и уровней шума в канале. При этом МПД выполняет только простейшие операции сложения и сравнения небольших целых чисел, что обуславливает его крайнюю простоту при всех вариантах программной или аппаратной реализации.

**Каскадные коды.** Важным этапом в развитии теории кодирования является появление каскадных кодов, в основе построения которых лежит идея совместного использования нескольких составляющих кодов. Данный подход позволил существенно повысить эффективность применения кодирования по сравнению с базовыми некаскадными методами.

Наиболее широкое распространение в реальных системах связи нашла каскадная схема, в которой внешним кодом является код Рида-Соломона (РС), а внутренним – сверточный код, обычно декодируемый с помощью оптимального АВ. Часто в данной схеме между внешним и внутренним кодером/декодером включаются устройства перемежения и деперемежения, осуществляющие псевдослучайную перестановку символов внешнего кода и восстановление исходного порядка символов соответственно. Данные устройства предназначены для разбиения пакетов ошибок, появляющихся при декодировании принятого из канала сообщения с помощью декодера внутреннего кода, что позволяет существенно улучшить эффективность всей каскадной конструкции.

Результаты моделирования каскадного кода, состоящего из кода РС длиной  $n=255$ ,  $d=33$  и сверточного кода с  $K=7$ ,  $R=1/2$  в канале с АБГШ и ФМ2 при использовании «мягкого» модема представлены на рис. 1 кривой «RS+AV».

Заметим, что данная схема сопоставима с МПД по эффективности даже при меньшей общей кодовой скорости.

**Турбо коды.** Дальнейшим развитием каскадных кодов стали турбо коды, образующиеся путем каскадирования двух или более составляющих кодов. Первые турбо коды, предложенные в 1993 году Бери и соавторами, состояли из двух параллельно соединенных через перемежитель сверточных кодов. В общем случае турбо коды могут получаться как при параллельном, так и последовательном соединении кодов, разделенных перемежителем.

Рассмотрим результаты моделирования турбо кода в канале с АБГШ и ФМ2 при использовании «мягкого» модема. На рис. 2 представлены характеристики турбо кода с кодовой скоростью  $R=1/2$ , конструктивной длиной составляющих рекурсивных систематических сверточных кодов  $K=4$ , образующими полиномами составляющих кодеров  $g_0=13$  и  $g_1=15$  в восьмеричной системе счисления, Max-Log-MAP алгоритмом декодирования составляющих кодов, 8 итерациями декодирования и псевдослучайным перемежителем длиной  $L$  от 190 до 12282 бит (длина кода  $n$  в данном случае равна удвоенной длине перемежителя). Для сравнения на данном рисунке также представлены характеристики сверточного кода с  $K=11$ , декодируемого с помощью АВ. Данный код был выбран потому, что  $K=11$  является наименьшей конструктивной длиной, при которой сложность декодирования сверточного кода становится больше сложности декодирования рассматриваемого турбо кода. Как видно из рисунка, турбо код с длиной блока всего 190 бит по эффективности соответствует сверточному коду с  $K=11$ , а с ростом длины перемежителя характеристики турбо кода значительно улучшаются при сохранении той же сложности декодирования.

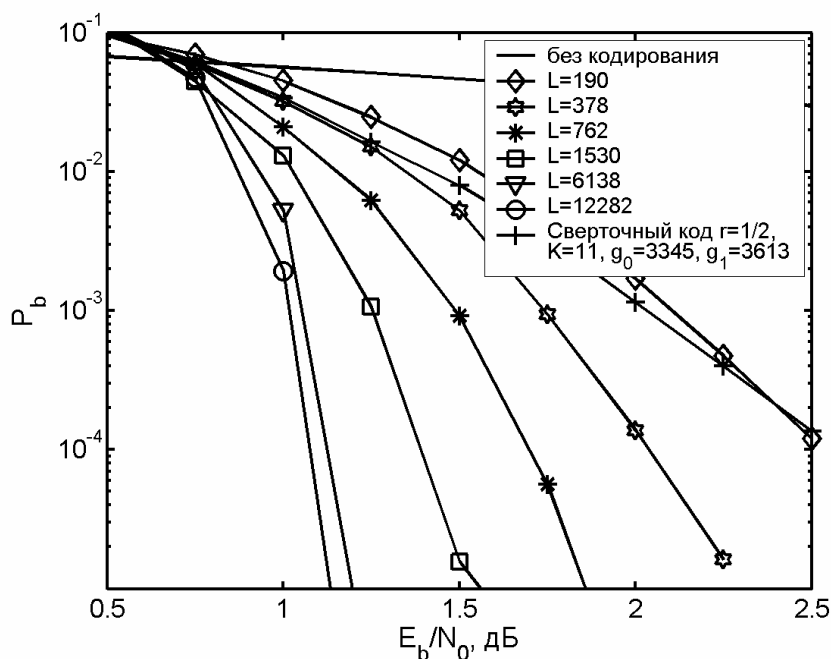


Рис. 2. Характеристики турбо кода в канале с АБГШ для разных длин перемежителей

**Низкоплотностные коды (LDPC).** Прекрасные характеристики, получаемые при итеративном декодировании турбо кодов, стимулировали активные исследования по применению данного метода к декодированию других кодов. В результате оказалось возможным получить еще лучшие характеристики при декодировании низкоплотностных (Low Density Parity Check – LDPC) кодов, предложенных Галлагером еще в 1962 г. Для декодирования LDPC кодов обычно используется разновидность итеративного декодирования, называемая алгоритмом распространения надежности (Belief Propagation – BP), работающего с графом кода.

На рис. 3 представлены характеристики регулярных (кривая LDPC) и нерегулярных (кривые iLDPC) LDPC кодов различной длины с кодовой скоростью 1/2. Как следует из данного рисунка, эффективность нерегулярных LDPC кодов оказывается лучше эффективности регулярных кодов. Это объясняется тем, что в нерегулярных кодах из-за различного числа единиц в строках и столбцах информационные символы защищены по-разному. В результате при декодировании проявляется так называемый «волновой эффект», когда более защищенные биты декодируются быстрее и затем как бы помогают при декодировании менее защищенных бит.

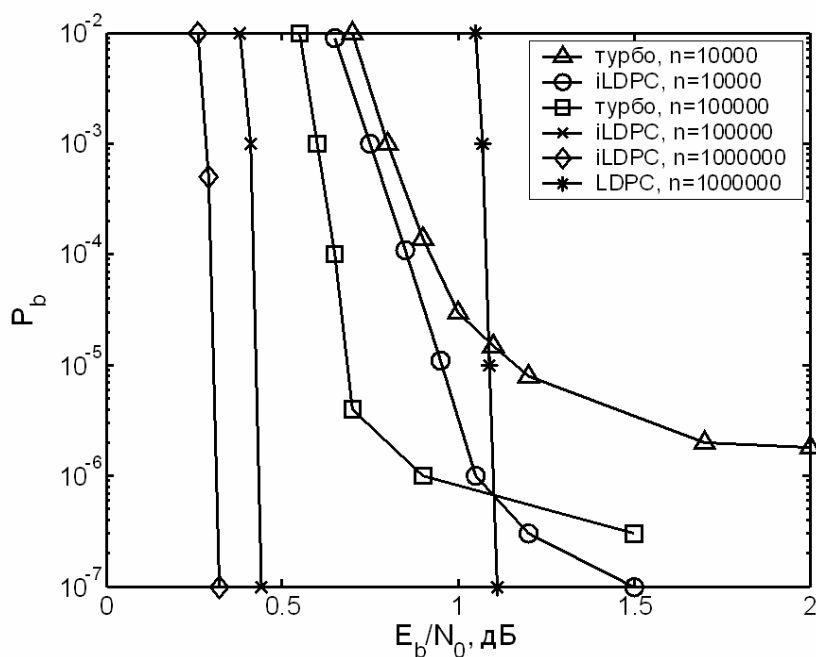


Рис. 3. Эффективность LDPC кодов и турбо кодов различной длины

Из сравнения характеристик турбо кодов с характеристиками LDPC кодов следует, что последние оказываются более эффективными, что особенно заметно при больших длинах кодов и при малых вероятностях ошибки декодирования. При этом сложность практической реализации LDPC кодов существенно ниже сложности реализации турбо кодов.

**Турбо коды произведения (TPC).** Турбо коды произведения (Turbo Product Codes – TPC) представляют собой многомерный набор кодовых слов составляющих линейных блоковых кодов, таких как коды с контролем четности, коды Хэмминга, коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ). Среди

множества ТРС кодов наибольший интерес представляют коды, построенные на основе кодов Хэмминга и кодов с проверкой на четность. Последние коды часто называются ТРС/СПС (Turbo Product Codes / Single Parity Check) кодами.

На рис. 4 представлены характеристики ТРС, построенного на основе кодов БЧХ и расширенных кодов Хэмминга. Общая кодовая скорость ТРС кодов равна  $21^2/32^2=0.43$ ,  $26^2/32^2=0.66$ ,  $51^2/64^2=0.635$ ,  $57^2/64^2=0.79$ . Отметим, что данные коды показывают неплохие характеристики при высоких кодовых скоростях, и у них практически отсутствует область насыщения вероятности ошибки.

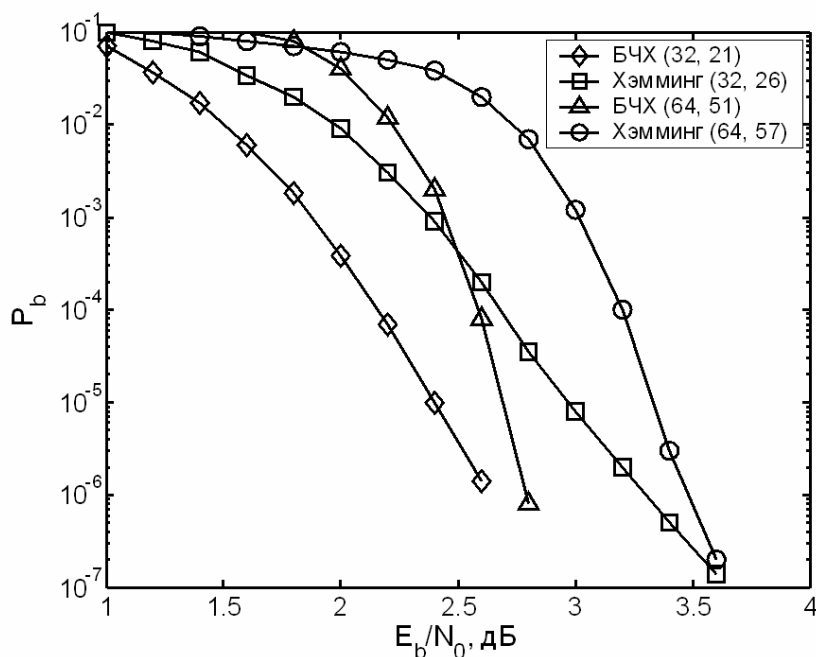


Рис. 4. Характеристики ТРС, состоящих из кодов БЧХ и из кодов Хэмминга

**Коды повторения-накопления (RA).** Коды повторения-накопления (Repeat-Accumulate – RA) сочетают в себе достоинства турбо кодов (линейная сложность кодирования) и низкоплотностных кодов (линейная сложность декодирования). Данные коды являются разновидностью кодов с последовательным каскадированием. Кодер состоит из повторителя, перемежителя и аккумулятора. В роли последнего обычно выступает рекурсивный сверточный кодер с кодовой скоростью 1. Рис. 5 отражает характеристики обычных RA кодов для длин блоков 4096 и 16384 и числа повторений информационных символов  $q=3$  и 4.

Развитием RA кодов являются нерегулярные RA (Irregular Repeat Accumulate – IRA) коды. Введение нерегулярности в структуру RA кодов позволяет так же, как в случае LDPC кодов, существенно улучшить их эффективность. На рис. 6 отражены характеристики IRA кодов с кодовой скоростью 1/2 для различных длин кода. Видно, что эффективность IRA кодов оказывается лучше эффективности регулярных RA кодов. Для сравнения на данном рисунке также приведены характеристики турбо кодов с сопоставимыми параметрами.

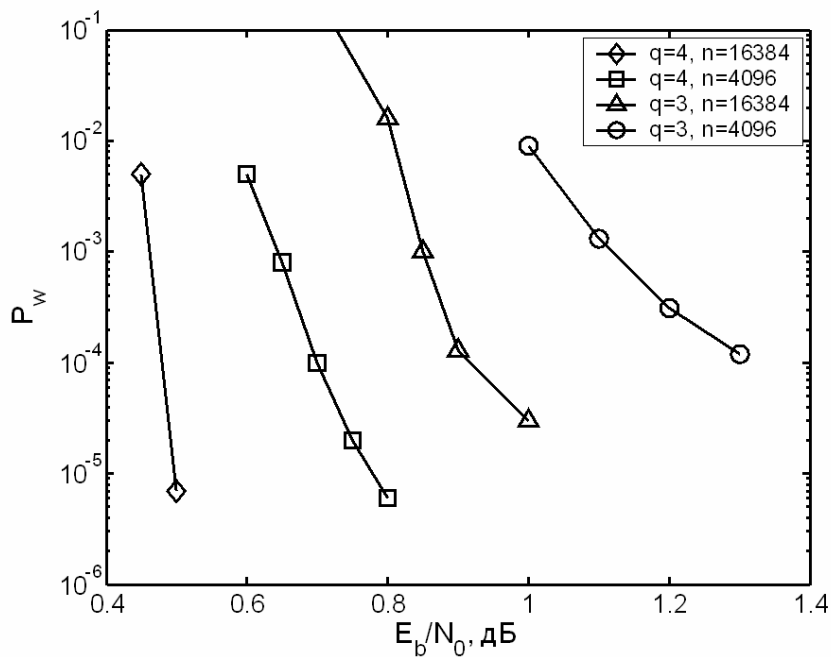


Рис. 5. Эффективность RA кодов для длин блока 4096, 16384 и  $q = 3$  ( $R=1/3$ ) и 4 ( $R=1/4$ )

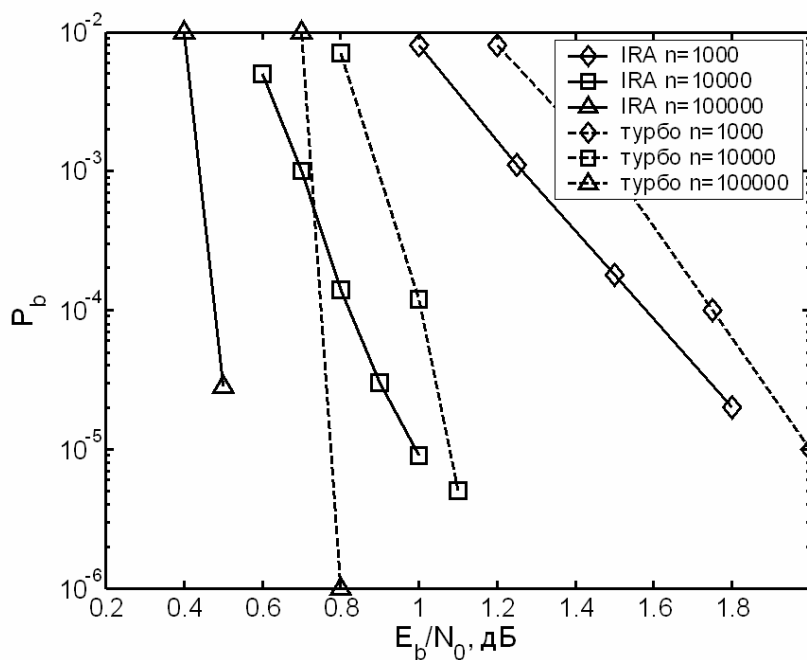


Рис. 6. Эффективность IRA кодов с  $R=1/2$  для длин блока  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$

**Коды произведения-накопления (РА).** Еще одним классом кодов с последовательным каскадированием являются коды произведения-накопления (Product Accumulate – РА). В данных кодах осуществляется каскадирование внешнего ТРС/СПС кодов и рекурсивного сверточного кода с кодовой скоростью 1, в качестве которого обычно выступает аккумулятор. РА коды, также как и RA коды, характеризуются линейной сложностью кодирования и декодирования.

Для декодирования РА кодов используется ВР алгоритм, работающий с графом РА кода. Эффективность РА кодов с  $R=1/2$  в гауссовском канале представлена на рис. 7.

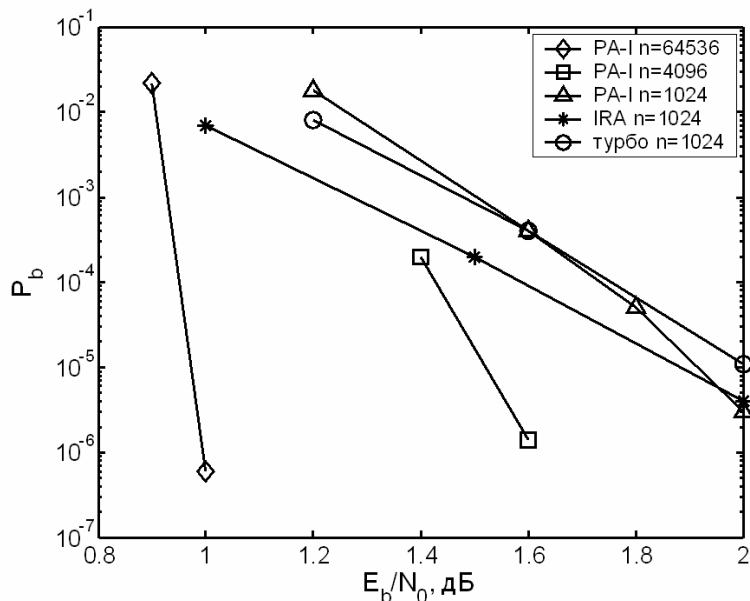


Рис. 7. Эффективность РА кодов с  $R=1/2$

**Каскадные коды, декодируемые с использованием многопорогового декодера.** Высокие характеристики МПД способствуют его широкому применению в составе различных кодовых конструкций, поскольку эффективность последних непосредственно связана с эффективностью их составных элементов.

Среди возможных подходов к улучшению характеристик МПД следует выделить такие схемы кодирования, как параллельные коды, коды с неравномерной энергетикой и коды с выделенными ветвями. Хотя отдельное использование каждого из данных подходов приводит лишь к незначительному (0,3...0,7 дБ) повышению эффективности по сравнению с обычным МПД, совместное применение этих схем позволяет добиться превосходных результатов.

Особое место среди кодовых схем на базе МПД занимает каскадирование с кодами контроля по четности (ККЧ) использование которых также позволяет повысить эффективность применения кодирования. Особенность данной схемы заключается в том, что такое каскадирование практически не требует дополнительных затрат на оборудование (в схему кодирования требуется добавить лишь один сумматор по модулю 2), тогда как использование в каскадном коде, например, кодов Рида-Соломона несравненно труднее.

На рис. 8 представлены верхние оценки вероятностей ошибки для СОК с  $d=7, 9, 11$  (данные СОК декодируются с помощью МПД) и каскадной схемы на его основе (длина ККЧ  $n_1=25$ ). На этом же рисунке показаны результаты моделирования каскадного кода на базе СОК с  $R=1/2$ ,  $d=7$  и  $d=9$ . Заметим, что использование простейшего ККЧ совместно с СОК позволяет получить

дополнительный энергетический выигрыш около 1...1,5 дБ при вероятности ошибки на выходе декодера  $P_b=10^{-5}$ .

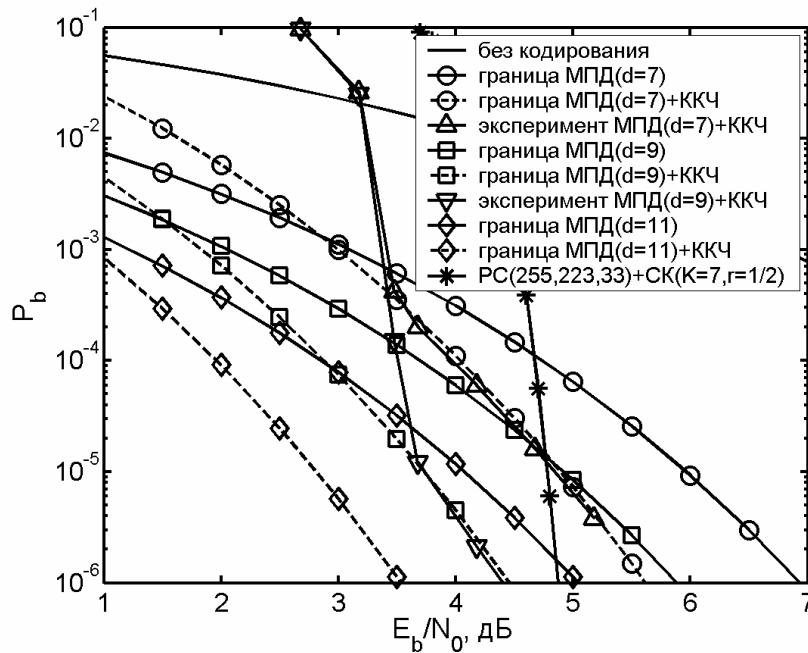


Рис. 8. Эффективность каскадного кода на базе МПД в ДСК

Эффективность работы каскадной схемы, состоящей из тех же СОК, что и на рис. 9 и ККЧ с  $n_1=50$ , для канала с АБГШ отражена на рис. 10. Как видно из рисунков, и в данном случае каскадный код оказывается значительно лучше некаскадного. Следует отметить, что при получении представленных графиков ККЧ использовался на нескольких итерациях декодирования, тем самым как бы «помогая» МПД при декодировании внутреннего СОК. Также отметим, что каскадный код, состоящий из кода Рида-Соломона (255, 223, 33) и сверточного кода с кодовой скоростью 1/2 и длиной кодового ограничения  $K=7$ , декодируемый с помощью оптимального алгоритма Витерби, даже при меньшей общей кодовой скорости ( $R \approx 0,437$ ) сильно уступает каскадной схеме на базе МПД при  $P_b > 10^{-6}$ . К сожалению, рассмотренный способ каскадирования позволяет улучшить характеристики МПД только в области его эффективной работы.

Приведенные результаты относились к двоичным кодам и системам с двоичной фазовой модуляцией. Но на основе важнейшего свойства сходимости решения МПД к оптимальному при всех изменениях декодируемых символов реализованы недвоичные МПД, обеспечивающие характеристики, близкие или несколько более высокие, чем у кодов Рида-Соломона. Аналогично, высокие характеристики МПД, обеспечиваемые ими в каналах со стираниями и в системах с многопозиционной модуляцией делают их универсальным средством простого достижения высокого уровня помехозащищенности сообщений в системах широкого спектра применения. При этом сохраняется такая же сложность реализации, как и в простейшем пороговом декодере.

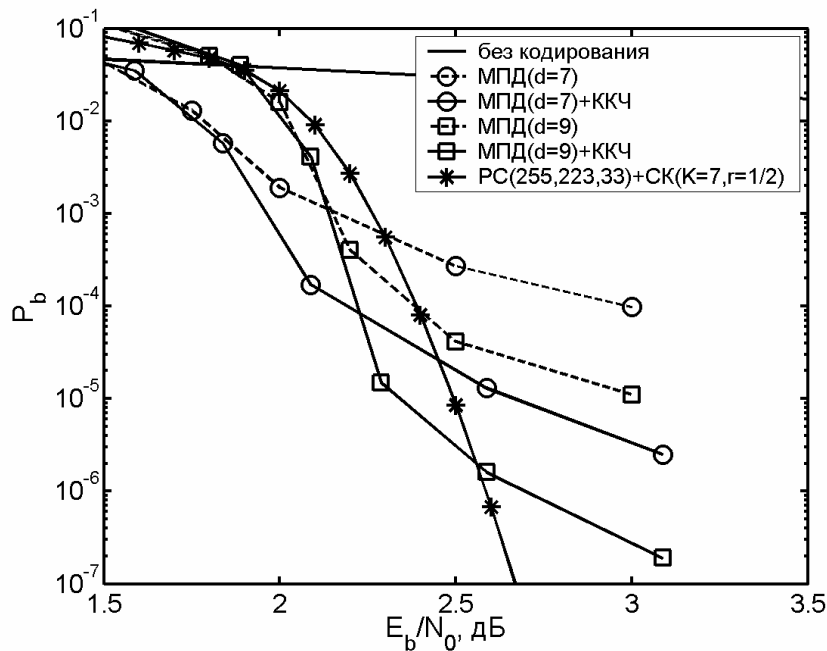


Рис. 9. Результаты моделирования каскадного кода на базе МПД в канале с АБГШ

**Применение многопорогового декодера в схемах с параллельным кодированием.** Для приближения границы эффективной работы МПД к пропускной способности канала возможно его применение в ранее упомянутых схемах параллельного кодирования. В основе построения данных схем лежит выделение в СОК  $C_0$  с кодовым расстоянием  $d_0$  и кодовой скоростью  $r_0$  некоторого составляющего кода  $C_1$  с кодовой скоростью  $r_1 > r_0$ , тоже являющегося СОК. Кодовое расстояние  $d_1$  выделенного кода выбирается значительно меньшим  $d_0$ , и, следовательно, область его эффективной работы будет ближе к границе Шеннона. При декодировании параллельного кода сначала выполняются несколько итераций декодирования составляющего кода  $C_1$ , позволяющие примерно на порядок снизить вероятность ошибки в принятой из канала информационной последовательности, после чего в процесс декодирования включается оставшаяся часть кода  $C_0$ . Отличительной особенностью данной схемы кодирования является то, что здесь внешний код работает с кодовой скоростью  $r_0$ , в то время как в обычных каскадных кодах кодовая скорость внешнего кода близка к единице. Данное свойство обеспечивает существенное преимущество МПД перед другими каскадными конструкциями.

Для примера на рис. 10 представлены результаты моделирования схем с параллельным кодированием в канале с АБГШ для СОК с  $r_0=6/12$ ,  $d_0=13$  и  $r_0=5/10$ ,  $d_0=15$ . В параллельном коде с  $d_0=13$  в данном случае был выделен внешний код с  $r_1=6/11$ ,  $d_1=7$ , а в коде с  $d_0=15$  был выделен код с  $r_1=5/9$ ,  $d_1=9$ . Кривые «составляющий» на рисунках отражают вероятность ошибки на выходе выделенных кодов параллельной схемы. Пунктирными линиями без маркеров на данных рисунках показаны вероятности ошибки оптимального декодирования кодов с  $d=7, 9, 11, 13$  и  $15$ . Для сравнения на рисунке также

показаны характеристики декодируемых с помощью МПД обычных СОК с аналогичными  $d$  и  $r$ .

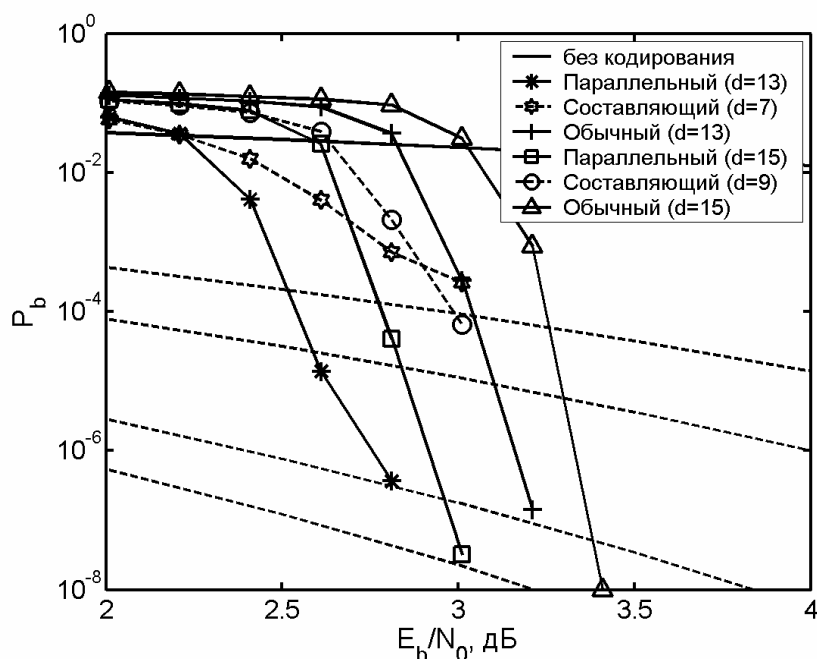


Рис. 10. Результаты моделирования параллельного кода на базе МПД в канале с АБГШ

Как следует из анализа представленных графиков, применение параллельного кодирования позволяет приблизить границу эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ.

Сложность МПД при параллельном кодировании (в смысле количества выполняемых операций) оказывается даже меньше сложности обычного МПД, поскольку в данном случае на первых итерациях декодирования некоторые элементы синдромного регистра просто не участвуют в процессе вычисления суммы на пороговом элементе.

Наилучшие результаты, полученные при работе по проекту, представлены на рис. 11.

На данном рисунке кривой «АВ ( $K=7$ )» показаны характеристики практически реализуемого оптимального алгоритма Витерби для кодов с конструктивной длиной  $K=7$ . С помощью данного метода можно получить энергетический выигрыш кодирования порядка 5,5 дБ, однако это значение очень далеко от предельно достижимого в данных условиях выигрыша, составляющего 9,4 дБ. Здесь же кривой «ПЛИС МПД» представлены характеристики уже реализованного на ПЛИС МПД сверточного кода с кодовым расстоянием  $d=9$ , производительность которой составляет от 160 до 480 Мбит/с и может быть еще более увеличена.

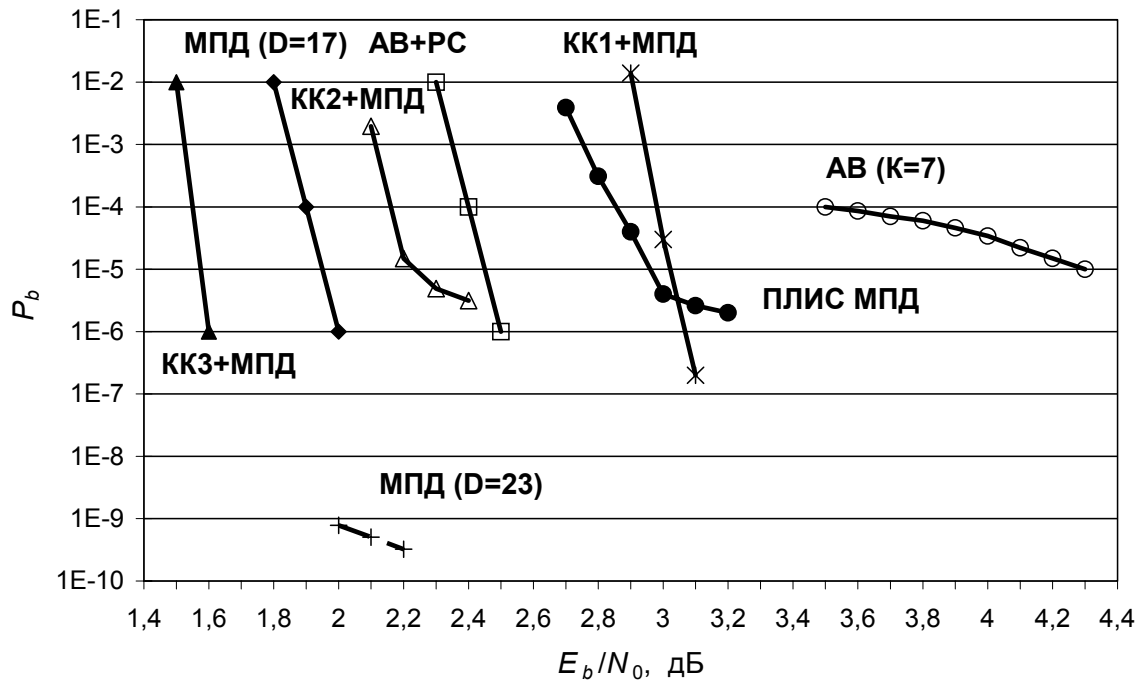


Рис. 11. Характеристики методов коррекции ошибок в канале с АБГШ

Кривыми «КК1+МПД», «КК2+МПД» и «КК3+МПД» на рис. 11 представлены возможности каскадных схем на основе МПД, использующих в качестве внешнего кода коды контроля на четность. Для первого кода задержка декодирования составляет порядка 10000 битов, для второго близка к 40000 битов, а для третьего превосходит 100000 битов. Во всех вариантах реализации каскадных схем производительность декодеров превышает 150 Мбит/с и может быть значительно увеличена. Заметим, что реализованное в МПД каскадирование с кодами контроля по четности оказывается несравненно проще, чем в каскадной схеме АВ с кодами Рида-Соломона (кривая «АВ+РС»). При этом каскадная схема «КК2+МПД» оказывается эффективнее как по ЭВК, так и по кодовой скорости.

Характеристики параллельных схем кодирования на основе МПД представлены на рисунке кривыми «МПД (D=17)» и «МПД (D=23)». Здесь МПД использовался для декодирования параллельных самоортогональных кодов с общим кодовым расстоянием  $d=17$  и  $d=23$ . При декодировании данных кодов выполнялось до 40 итераций декодирования. Как следует из графиков, применение кодов с параллельным каскадированием позволяет получить чрезвычайно малые значения вероятности ошибки при очень высоком уровне шума в канале связи. Важно, что при этом сложность схемы декодирования параллельного кода оказывается даже меньше сложности обычного многопорогового декодера, позволяя создавать высокоскоростные и эффективные схемы коррекции ошибок.

Приведенные результаты относились к двоичным кодам и системам с двоичной фазовой модуляцией. Но на основе важнейшего свойства сходимости решения МПД к оптимальному при всех изменениях декодируемых символов реализованы недвоичные МПД, обеспечивающие характеристики, близкие или

несколько более высокие, чем у кодов Рида–Соломона. Аналогично, высокие характеристики МПД, обеспечиваемые ими в каналах со стираниями и в системах с многопозиционной модуляцией делают их универсальным средством простого достижения высокого уровня помехозащищенности сообщений в системах широкого спектра применения. При этом сохраняется такая же сложность реализации, как и в простейшем пороговом декодере.

**Заключение.** Огромное преимущество МПД перед другими алгоритмами декодирования по числу операций как в двоичных, так и в недвоичных каналах позволяет считать, что к настоящему времени все принципиальные задачи предпринятых теоретических и прикладных исследований МПД успешно решены.

Разработанные программные и аппаратные версии МПД подтверждают все основные выводы об эффективности и производительности МПД. Программные версии соответствуют вычислительным затратам порядка 50 – 200 операций на бит данных, которые учитываются в приведенных выше оценках сложности алгоритма для достаточно больших шумов канала. Они реализованы в специализированных телевизионных системах.

При аппаратной реализации на ПЛИС даже на малых кристаллах ёмкостью до 200К МПД имеет производительность более 80 Мбит/с и энергетический выигрыш порядка 7,5 дБ. Такое соотношение характеристик эффективности и производительности для других некаскадных, базовых алгоритмов декодирования принципиально недостижимо.

Таким образом, в результате 30-летних исследований разработан широкий класс многопороговых алгоритмов, которые могут быть полезны для многих современных высокоскоростных систем связи с предельно возможными уровнями энергетического выигрыша и очень высоким быстродействием.

Исследования свидетельствуют, что нерационально использующие вычислительные ресурсы алгоритмы значительно проигрывают гораздо более простым алгоритмам МПД, которые решают проблему декодирования более эффективно и экономно. Несомненно, что проблемы сложности реализации кодирования сохранятся в обозримом будущем, а в связи с ростом скоростей обмена информацией требования более простой реализации декодеров будут все более актуальными.

Более предпочтительными при всех вариантах реализации окажутся те алгоритмы, которые выполняют только очень простые, однородные и быстрые операции. Наиболее полно этим требованием удовлетворяют МПД. А соответствие его возможностей характеристикам самых сложных алгоритмов делает многопороговые алгоритмы еще более привлекательными.

### **3.9. Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта**

Разработки и исследования проводились на основе теории вероятностей, математической статистики, системного анализа, математического и имитационного моделирования, технологий модульного и объектно-ориентированного программирования.

## Список публикаций за 2005 год со ссылками на РФФИ

1. Колупаев А.В., Кондрахин А.В., Овечкин Г.В. Система имитации цифровой передачи данных по спутниковым и иным каналам связи // Межвуз. сб. науч. тр. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Рязань, РГРТА, 2005. С. 109–111.

2. Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Эффективность каскадных схем кодирования на базе многопорогового декодера // Межвуз. сб. науч. тр. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Рязань, РГРТА, 2005. С. 119–123.

3. 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.

4. 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. С. 48–49.

5. Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Многопороговые декодеры: новые достижения // Мат. 14-й Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 57–58.

6. Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Построение самоортогональных кодов устойчивых к эффекту размножения ошибок // Мат. 14-й Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 70–71.

7. Дмитриева Т.А., Золотарев В.В. Разработка алгоритма декодирования на основе многопорогового декодера // Мат. 14-й Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 50–52.

8. Овечкин П.В., Цыплаков Д.А. Разработка методов декодирования помехоустойчивых кодов на базе многопороговых декодеров // материалы всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2005». Новочеркасск, 2005. Часть 1. С. 140–144.

9. Золотарев В.В. Алгоритмы многопорогового декодирования линейных кодов // Мобильные системы. М.: 2005. №12. С. 56–62.

## Список публикаций за 2005 год без ссылок на РФФИ

1. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Аппаратная реализация многопороговых декодеров // 7-я межд. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М.: 2005. Том 2. С.451-454.

2. Жуков С.Е., Золотарев В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В., Строков В.В. Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы // Электросвязь. М.: 2005. №2. С. 10–12.

3. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Перспективы применения многопороговых декодеров в высоко-скоростных системах передачи данных // Сети и системы связи: мат. Всеросс. Науч.-практ. Семинара. Рязань: РВВУС. 2005. С. 52–55.

4. Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Современные методы помехоустойчивого кодирования для высоко-скоростных спутниковых систем связи // мат. 10 Всеросс. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании НИТ-2005». Рязань: РГРТА. 2005. С. 2–3.

5. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Многопороговые декодеры для каналов с предельно высоким уровнем шума // Телекоммуникации. М.: 2005. №9. С. 29–34.