

ЭЛЕКТРОННЫЙ ВАРИАНТ ОТЧЕТА ЗА 2006 ГОД ПО ПРОЕКТУ РФФИ 05-07-90024-в (фрагменты)

Краткая аннотация на русском языке

За отчетный период выполнения проекта была разработана методика применения МПД в каналах с неравномерной энергетикой. Показано, что с помощью перераспределения энергии между информационными и проверочными битами кодового слова можно приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ при некотором проигрыше по вероятности ошибки декодирования. А использование простейшего кода с контролем четности совместно с данной методикой позволяет дополнительно уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы.

Разработана методика применения многопорогового декодера при использовании многопозиционных систем сигналов, таких как многопозиционная фазовая и квадратурно-амплитудная модуляции. Также предложена методика улучшения эффективности МПД в данных условиях за счет оптимизации расположения информационных и проверочных битов в символах сигнального множества. Показано, что применение данной методики позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала более чем на 0,5 дБ.

Выполнено исследование эффективности применения многопорогового алгоритма декодирования в каналах со стираниями и канале со стираниями и искажениями.

В рамках дипломного проекта в Рязанском государственном радиотехническом университете реализован экспериментальный образец многопорогового декодера на микроконтроллере ATmega48-20PI фирмы Atmel.

Разработаны и зарегистрированы в РОСПАТЕНТ программные средства для настройки параметров многопорогового декодера, позволяющие выполнять оптимизацию параметров многопорогового декодера для обеспечения наилучшей эффективности в заданных условиях.

Продолжается развитие имитатора цифрового канала передачи данных. В текущем году были реализованы и внедрены в имитатор турбо коды и низкоплотностные коды, рекомендованные в стандартах DVB-RCS и DVB-RCS2. Кроме того, реализованы многолучевые модели каналов передачи данных ITU-R channel A, ITU-R channel B. Данные модели в ближайшее время также будут встроены в имитатор.

Ведется разработка демонстрационно-испытательного стенда с имитатором цифровых спутниковых каналов для исследования характеристик приемо-передающего оборудования. Взаимодействие демонстрационно-испытательного стенда с приемо-передающим оборудованием осуществляется по стандартному протоколу TCP/IP.

Развивается специализированный веб-сайт ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru, на котором представлены основные итоги разработок МПД алгоритмов, в том числе и отчет для РФФИ по итогам первого года исследований по гранту РФФИ.

Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта

Аппаратная реализация многопорогового метода коррекции ошибок на микропроцессоре и ПЛИС. Разработка каскадных методов кодирования на основе многопороговых декодеров, позволяющих работать всего на 1-1,5 дБ по энергетике выше пропускной способности канала. Получение мягких решений на выходе многопорогового алгоритма декодирования. Развитие имитатора цифрового канала передачи данных за счет добавления новых методов коррекции ошибок (коды повторения-накопления и др.) и новых моделей каналов связи (канал с замираниями).

Степень выполнения поставленных в проекте задач

Среди поставленных на второй год работы над проектом задач в полном объеме выполнены следующие:

- аппаратная реализация многопорогового метода коррекции ошибок на микропроцессоре;

- развитие имитатора цифрового канала передачи данных за счет добавления новых методов коррекции ошибок и новых моделей каналов связи (канал с замираниями).

- для всех разработанных за 2 года алгоритмов типа МПД удалось обеспечить их важнейшее и очень трудно достижимое преимущество перед другими методами декодирования с сопоставимой сложностью: примерно на 2 десятичных порядка меньшее число операций декодирования на бит. Это редчайшая ситуация в истории развития систем обработки сигналов и достигнутое алгоритмами МПД преимущество, конечно, нужно соответствующим образом использовать.

Задача реализации МПД на ПЛИС в полном объеме в этом году не решена. Это связано с тем, что реализация МПД на ПЛИС достаточно дорогостоящая задача, на решение которой было выделено недостаточно средств. В связи с этим основные наши усилия в отчетном периоде были сосредоточены на повышении эффективности МПД в различных условиях применения (каналы со стираниями, каналы с замираниями, многопозиционные системы сигналов). Кроме того, были изучены и отмоделированы декодеры низкоплотностных кодов, использование принципов декодирования которых при декодировании самоортогональных кодов улучшит эффективность МПД и позволит формировать мягкие решения на выходе МПД. Это повысит эффективность применения МПД в составе каскадных схем кодирования.

Полученные за отчетный период важнейшие результаты

Изложим основные результаты, полученные за отчетный период работы.

1. Разработана методика применения МПД в каналах с неравномерной энергетикой.

Пусть для передачи закодированных данных используются два различных канала с неодинаковой энергетикой для информационных и проверочных символов. Пусть суммарная энергия каналов фиксирована и при этом ставится задача обеспечить работу системы связи при максимальной кодовой скорости.

Ясно, что в такой системе из двух каналов по каналу с большей энергией нужно передавать информационные символы кода, а с меньшей – проверочные. В этом случае можно ожидать, что МПД будет более работоспособным при меньшей средней энергетике системы связи или, что то же самое, при большей кодовой скорости по сравнению с обычным ДСК.

Следует отметить, что даже при оптимальном декодировании в каналах с неравномерной энергетикой (НЭК-каналах) характеристики используемых кодов будут значительно ухудшены из-за того, что ближайшие кодовые слова в СОК, находящиеся на расстоянии d , отличаются в $(d-1)$ проверочных символах. Но именно они как раз и передаются в таких каналах при более тяжелых отношениях сигнал/шум, а значит, и с большей вероятностью ошибки. Таким образом, в НЭК-каналах граница эффективности применения МПД сместится в область больших уровней шума в канале, но при этом значительно понизится достоверность его решений.

Пример применения МПД в таком НЭК-канале представлен на рис. 1. Кривая 2 изображает характеристики разработанного в 2004 г. МПД на ПЛИС Xilinx в обычном гауссовском канале (МПД), кривая 1 – нижнюю границу эффективности применяемого кода СОК с $d = 11$, кривая 4 – характеристики применения этой же ПЛИС в канале с неравномерной энергетикой. В обоих случаях МПД используется в обычном сверточном варианте работы ПЛИС. Предполагается, что энергия канала проверочных символов уменьшена примерно вдвое, благодаря чему энергетика канала информационных символов увеличилась примерно в 1,5 раза. Для сравнения на рис. 1 приведен график для стандартного декодера по алгоритму Витерби с конструктивной длиной кода $K = 7$ (кривая 3).

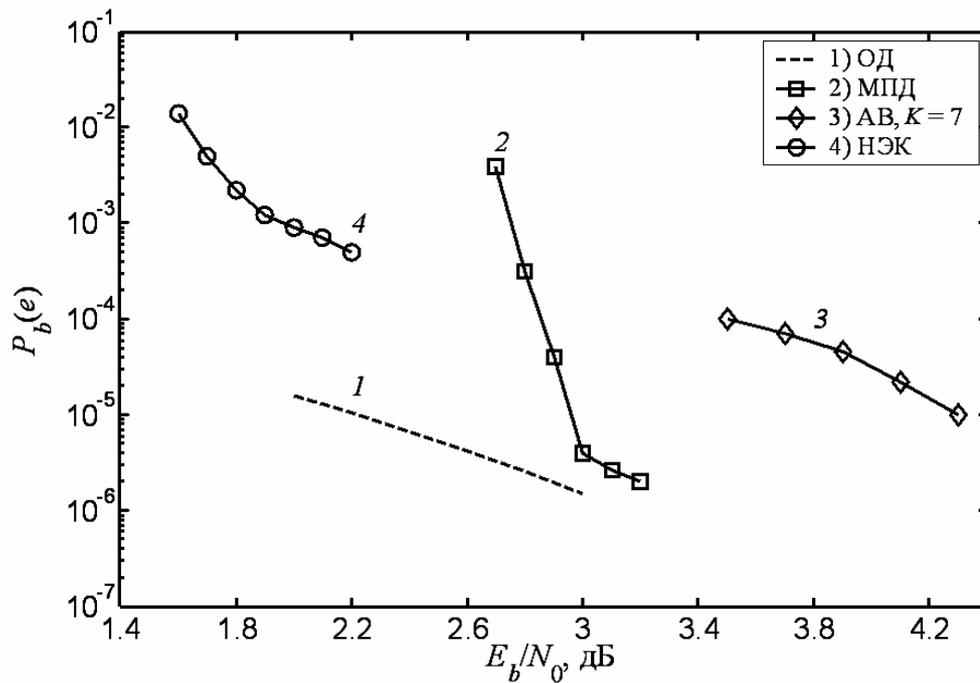


Рис. 1. Характеристики МПД на ПЛИС Xilinx в обычном гауссовском и в НЭК-каналах

Как следует из сопоставления работы обычного МПД и этого же декодера, работающего в гауссовском канале с неравномерной энергетикой, последний позволяет работать при уровне шума, примерно на 1 дБ более высоком, чем в обычном случае без изменения других параметров кодирования. Изменяется лишь число итераций в МПД с 9 до 25. Это всегда происходит, если декодер переходит к работе в области значительно более высокого уровня шума.

Очевидно также, что МПД в канале с неравномерной энергетикой обеспечивает более низкие уровни достоверности, чем в обычном канале. Вместе с тем, конечно, работа при низком уровне сигнала более чем желательна.

Анализ показал, что при E_b/N_0 порядка 2 дБ МПД в канале с неравномерной энергетикой уже работает с эффективностью, близкой к оптимальной для этой системы каналов, и ошибки МПД фактически распределены случайно и независимо. Иначе говоря, после МПД мы снова имеем канал, очень близкий к классическому каналу с АБГШ. А это значит, что второй внешний код с кодовой скоростью $R > 0,097$, образующий с МПД простую последовательную каскадную схему и вносящий потери в ЭВК не более 0,1 дБ, обеспечит доведение итоговой достоверности до уровня BER порядка $10^{-6} \dots 10^{-8}$ при совершенно незначительной сложности второго декодера.

Заметим, что формы организации и конкретные методы реализации НЭК-каналов очень разнообразны и сильно зависят от системы сигналов, с которой МПД декодер должен взаимодействовать.

Важно также подчеркнуть, что получение при уже очень большом уровне шума, при котором работоспособен МПД, дополнительного весьма значительного прироста энергетического выигрыша кодирования порядка 1 дБ достигается только за счет дополнительного очень простого взаимодействия с системой сигналов. Кроме того, именно гибкость МПД алгоритмов создает условия легкого и простого для взаимодействия с системой сигналов, тогда как для других алгоритмов декодирования такие исключительно простые решения пока неизвестны.

Изложенные выше результаты непосредственно иллюстрируют успешное заявленное в качестве главной цели проекта достижение простыми средствами значительное повышение эффективности работы алгоритмов МПД в условиях предельно возможного большого уровня шума космических и спутниковых каналов связи.

2. Разработана методика применения многопорогового декодера при использовании многопозиционных систем сигналов, таких как многопозиционная фазовая и квадратурно-амплитудная модуляции.

При использовании высокоэнергетичных сигналов и жестких требованиях к ширине полосы частот высокие значения эффективности кодирования возможны в случае совместного применения многопозиционных систем модуляции и кодирования. Принципы использования МПД для систем сигналов на плоскости типа КАМN и ФМN также разработаны уже достаточно давно. Это позволяет считать, что возможность применения МПД с этими типами сигналов в настоящее время также вполне очевидна. При переходе к многомерным сигналам все подходы к применению МПД совместно с такими сигнальными конструкциями остаются аналогичными двумерному случаю, что позволяет одновременно получить значительный энергетический выигрыш кодирования и существенно сэкономить полосу частот передаваемого сигнала.

Сначала представим результаты моделирования МПД и других методов коррекции ошибок в канале с многопозиционными системами сигналов. При моделировании использовалась модель канала, задаваемая выражением

$$r = s + w,$$

где $s \in S$ – передаваемый комплексный сигнал; S – множество возможных сигналов, определяемое выбранной системой модуляции; r – принятый комплексный сигнал; w – комплексный аддитивный белый гауссовский шум со спектральной плотностью мощности $N_0/2$ в каждой размерности.

Заметим, что все представленные в данном разделе результаты получены для случая использования жесткого модема, когда демодулятор не формирует оценок надежности своих решений для принятых битов.

Для получения таких решений использовался демодулятор по максимуму правдоподобия, выполняющий оценку переданного символа по формуле

$$s = \arg \min_{s \in S} \|s - r\|.$$

На рис. 2 кривыми 1–3 представлены экспериментальные графики зависимости вероятности ошибки на бит $P_b(e)$ на выходе многопорогового

декодера от отношения сигнал-шум E_b/N_0 в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и квадратурной амплитудной модуляцией при использовании 16, 32 и 64 символьных созвездий. При декодировании выполнялось от 10 до 20 итераций декодирования сверточного самоортогонального кода с кодовой скоростью $R = 1/2$, кодовым расстоянием $d = 11$ и длиной n порядка 10000. Заметим, что при этом использовался так называемый код с параллельным каскадированием.

На рис. 2 кривыми 4 и 5 также представлены характеристики декодера Витерби для кода с длиной регистра $K = 7$ при использовании КАМ16 и КАМ32 соответственно. Как видно, декодер Витерби в данных условиях при $P_b(e) = 10^{-4}$ проигрывает МПД примерно 2 и 3 дБ. Кривыми 6 и 7 на рис. 2 также показаны характеристики очень мощного турбо кода с кодовой скоростью $R = 1/2$, который образован путем параллельного каскадирования двух рекурсивных систематических сверточных кодов с конструктивной длиной $K = 4$. В данном турбо коде применялся перемежитель типа S-random длиной $L = 5000$ (общая длина турбо кода составляет $n = 10000$). При декодировании турбо кода выполнялось 8 итераций, на каждой из которых для декодирования составляющих кодов применялся Max-Log-MAP алгоритм. Из сравнения характеристик турбо кода и МПД видно, что эффективность последнего оказывается хуже примерно на 1 дБ, но МПД при этом почти на два порядка проще для практической реализации, чем данный турбо код.

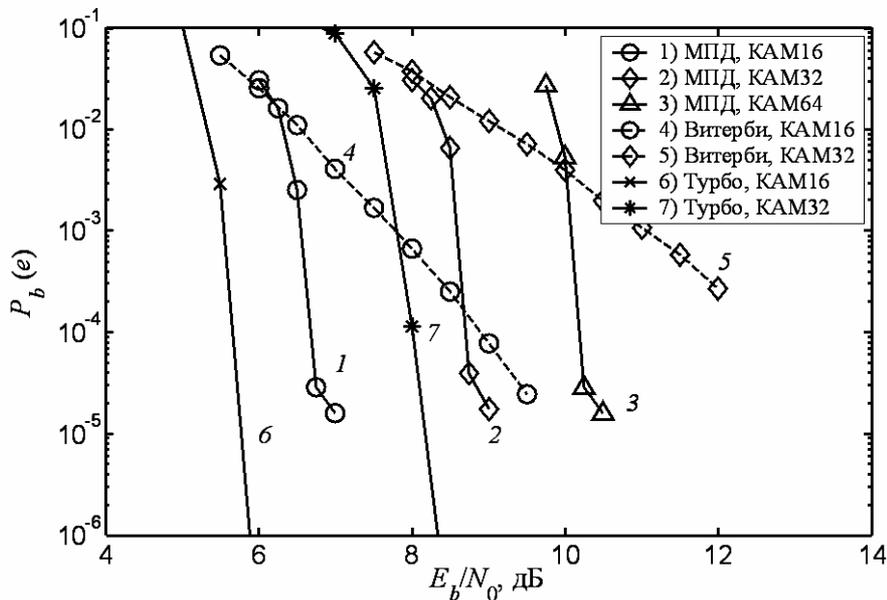


Рис. 2. Эффективность МПД в каналах с КАМ N , жесткий модем

На следующем рис. 3 представлены характеристики МПД для того же сверточного кода, что и на рис. 2, в канале с многопозиционной фазовой модуляцией (ФММ). При этом использовалась такая же модель канала с другим множеством сигнальных точек S .

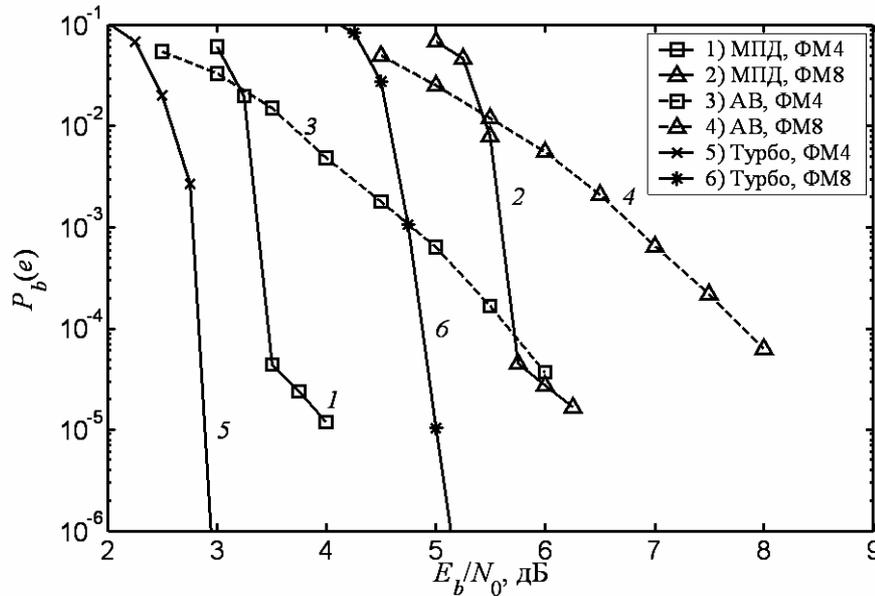


Рис. 3. Эффективность МПД в каналах с ФММ, жесткий модем

Видно, что соотношения между характеристиками многопорогового декодера, декодера Витерби и турбо кода сохраняются и при данном виде модуляции.

Далее представим результаты моделирования МПД и других методов коррекции ошибок в канале с многопозиционными системами сигналов и использовании мягких решений демодулятора.

При моделировании использовалась модель канала, описанная в предыдущем разделе. Мягкие решения относительно принятых битов формировались в соответствии со следующим выражением:

$$LLR(b_i) = \ln \frac{\sum_{s_j \in S: b_i=1} e^{-\frac{([\text{Re}(s_j) - \text{Re}(r)]^2 + [\text{Im}(s_j) - \text{Im}(r)]^2)}{2\sigma^2}}}{\sum_{s_j \in S: b_i=0} e^{-\frac{([\text{Re}(s_j) - \text{Re}(r)]^2 + [\text{Im}(s_j) - \text{Im}(r)]^2)}{2\sigma^2}}}.$$

Здесь r – принятый символ; $\text{Re}(s)$ – действительная часть s ; $\text{Im}(s)$ – мнимая часть s ; σ^2 – дисперсия гауссовского шума; $s_j \in S: b_i = a$ – все символы сигнального созвездия, для которых i -й бит равен a .

На рис. 4 и 5 соответствующими кривыми представлены характеристики тех же методов коррекции ошибок, что и на рис. 2 и 3, но при использовании мягких решений демодулятора. Из данных рисунков следует, что в этих условиях характеристики МПД оказываются примерно на 1 дБ лучше характеристик декодера Витерби при $P_b = 10^{-4}$. Кроме того, видно, что МПД проигрывает по эффективности турбо коду порядка 1,5 дБ.

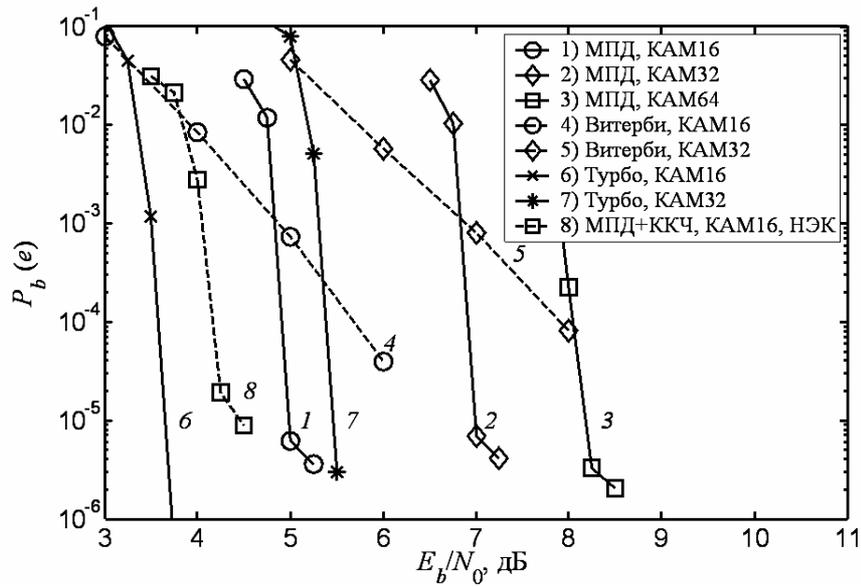


Рис. 4. Эффективность МПД в каналах с КАМ N , мягкий модем

Одним из возможных способов приближения области эффективной работы МПД к пропускной способности канала является его использования в ранее рассмотренных каналах с неравномерной энергетикой, когда при передаче информационные символы передаются сигналами с большей энергией, а проверочные – с меньшей. При этом общая средняя энергия, требуемая для передачи данных, остается постоянной. В публикациях по многопороговым методам декодирования показано, что в таких каналах граница эффективности применения МПД смещается в область бóльших уровней шума в канале, но при этом несколько понижается достоверность его решений.

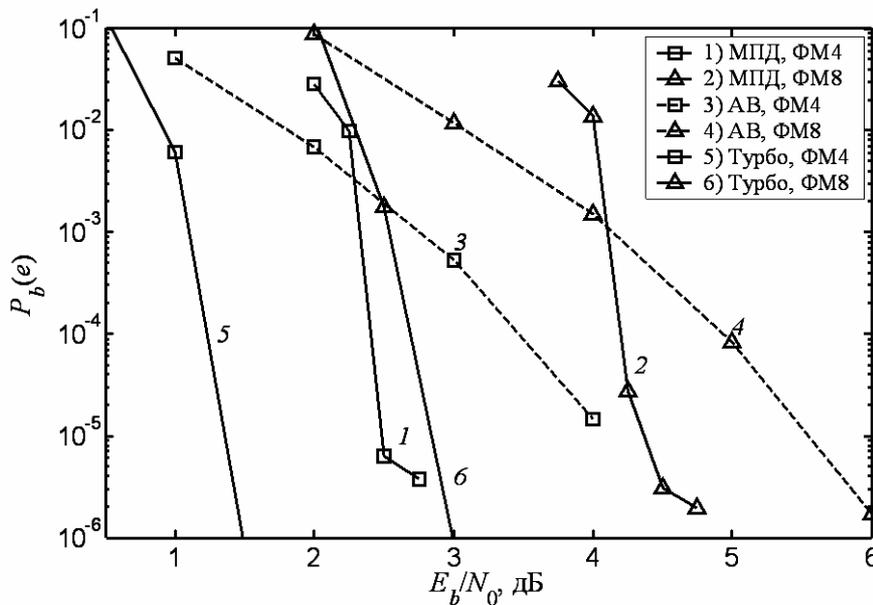


Рис. 5. Эффективность МПД в каналах с ФМ N , мягкий модем

Известно, что в каналах с многопозиционными системами сигналов отдельные биты сигнального созвездия защищены по-разному. Например, для системы КАМ16 первый и третий биты защищены больше, а второй и

четвертый – меньше. При этом оказывается, что вероятность ошибки в первом и третьем битах в два раза меньше вероятности ошибки во втором и четвертом битах. Похожая ситуация наблюдается и при использовании других многопозиционных систем сигналов. Таким образом, канал с многопозиционными системами сигналов можно рассматривать в качестве канала с неравномерной энергетикой. В результате для приближения области эффективной работы МПД к пропускной способности канала можно информационные символы сообщения располагать в более надежных битах созвездия, а проверочные – в менее надежных.

На рис. 6 кривой 1 еще раз показаны характеристики МПД самоортогонального кода с кодовой скоростью $R = 1/2$, кодовым расстоянием $d = 11$ и длиной n порядка 10000 в канале с АБГШ при использовании КАМ16 и демодулятора, формирующего жесткие решения. Кривая 2 соответствует случаю расположения информационных битов в более надежных позициях символа, а проверочных – в менее надежных. Заметим, что область эффективной работы МПД приблизилась к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ, но при этом область насыщения вероятности ошибки оказалась несколько выше. Вместе с тем для уменьшения вероятности ошибки в области эффективной работы возможно использование совместно с МПД простейшего кода с контролем четности (ККЧ). Применение ККЧ позволяет снизить вероятность ошибки декодирования на 1..2 порядка практически без увеличения сложности результирующей схемы. Характеристики каскадной схемы, состоящей из МПД и ККЧ длины 50, в случае расположения информационных битов в более надежных позициях символа для тех же условий показаны на рис. 6 кривой 3. Из рисунка видно, что применение предложенного подхода позволило приблизить эффективность МПД к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ. В результате преимущество гораздо более сложного ранее рассмотренного турбо кода (кривая 5) перед МПД при вероятности ошибки порядка 10^{-4} оказалось даже меньшим, чем 0,5 дБ.

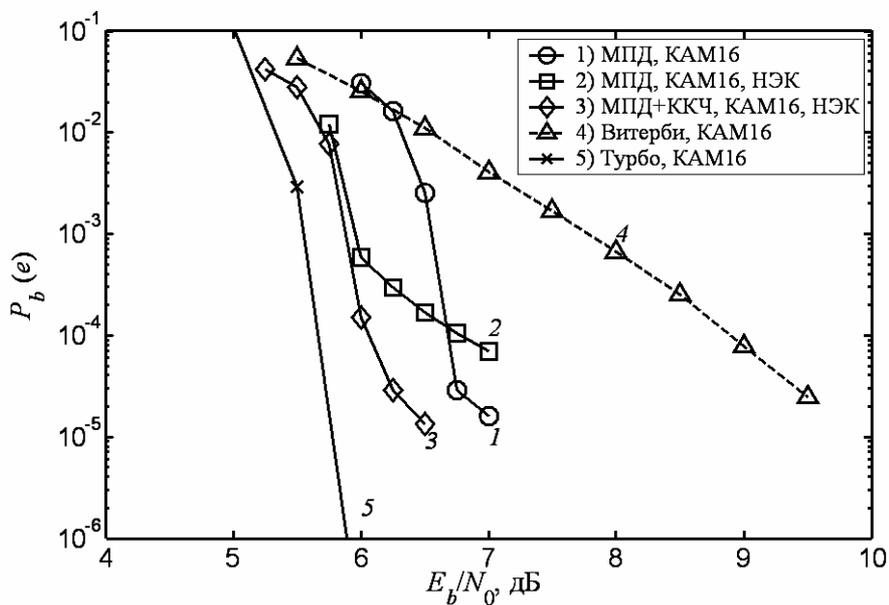


Рис. 6. Эффективность МПД в каналах с КАМ16, жесткий модем

Результаты моделирования рассмотренной каскадной схемы при расположении информационных битов в более надежных позициях символа для случая использования мягких решений демодулятора показаны на рис. 4 кривой 8. В данном случае улучшение характеристик МПД оказалось равным 0,7 дБ.

Заметим, что похожего результата можно добиться и при использовании других многопозиционных систем сигналов.

3. Выполнено исследование эффективности применения многопорогового алгоритма декодирования в каналах со стираниями и канале со стираниями и искажениями.

Развитие техники связи ведет к значительному росту разнообразия каналов передачи, среди которых следует указать каналы со стираниями. Согласно модели канала с независимыми стираниями при передаче каждого символа независимо с вероятностью P_C происходит его стирание (о чем декодер извещается, например, дополнительным битом признака стирания) или с вероятностью $Q_C = 1 - P_C$ осуществляется правильная передача. Пропускная способность такого канала равна в двоичном случае $C = Q_C$.

Оптимальный декодер в этом канале должен найти такое кодовое слово, которое содержало бы минимальное число стираний (или в лучшем случае совсем их не имело бы на позициях информационных символов) и совпадало бы абсолютно со всеми правильными, т.е. известными символами поступившего сообщения. Иначе говоря, решение оптимального декодера, как и пришедшее из канала сообщение, является кодовым словом, содержащим, может быть, стирания на некоторых своих позициях.

Метод многопорогового, точнее, многошагового декодирования в стирающих каналах (СтМПД) основан на том, что если есть некоторый стертый информационный символ, то он, очевидно, может быть точно восстановлен, если хотя бы один правильно принятый символ из множества относящихся к нему проверок содержит именно этот единственный стертый символ, а все остальные символы, которые входят в эту проверку, приняты правильно. Тогда, очевидно, выбранный символ будет верно восстановлен. Здесь можно отметить, что после первой попытки коррекции возможно лишь, что часть информационных символов, которые были стерты, не удалось восстановить. При этом по смыслу самого алгоритма он вообще не вносит никаких ошибок в сообщение. Но тогда попытка повторного декодирования сообщения, в котором количество стираний стало меньше, безусловно, оправдана, поскольку в рассматриваемом канале мерой эффективности декодирования является именно число восстановленных стираний в кодовом слове. Готовность декодера к повторению исправления стираний определяется просто тем, что после первой успешной попытки исправления одного из стираний для некоторого другого стертого символа в одной из проверок уменьшится число оставшихся стираний. Если в этом проверочном символе единственным оставшимся стиранием будет именно стирание символа, то в этом случае появится гарантированная

возможность исправления и этого стирания, даже если во всех других проверках, содержащих, количество стертых символов не менее двух.

Поскольку для исправления конкретного стертого информационного символа достаточно всего одного соответствующего правильно принятого проверочного символа без прочих стертых информационных символов, входящих в него, то и СтМПД будет работать в канале со стираниями при гораздо более высоких вероятностях стирания передаваемых битов по сравнению с каналами, в которых происходят только ошибки.

Таким образом, новый алгоритм, конечно, сохраняет полное тождество между всеми правильно принятыми из канала кодовыми символами и восстановленным (может быть, не полностью) сообщением.

На рис. 7 представлены зависимости вероятности невосстановления бита (стирания) на выходе декодера P_H от вероятности стирания P_C бита в канале связи. На данном рисунке кривые «МПД ($R=5/10, d=11$)», «МПД ($R=4/10, d=14$)», «МПД ($R=4/10, d=16$)», «МПД ($R=3/9, d=19$)» соответствуют эффективности многопорогового декодирования блочных самоортогональных кодов с кодовой скоростью R и кодовым расстоянием d . Длина данных кодов не превосходит 8000 бит. При получении представленных зависимостей использовалось до 10 итераций декодирования. Кривой «МПД1 ($R=5/10, d=13$)» соответствует эффективность МПД для кода $R=5/10, d=13$, получающегося при параллельном каскадировании нескольких самоортогональных кодов.

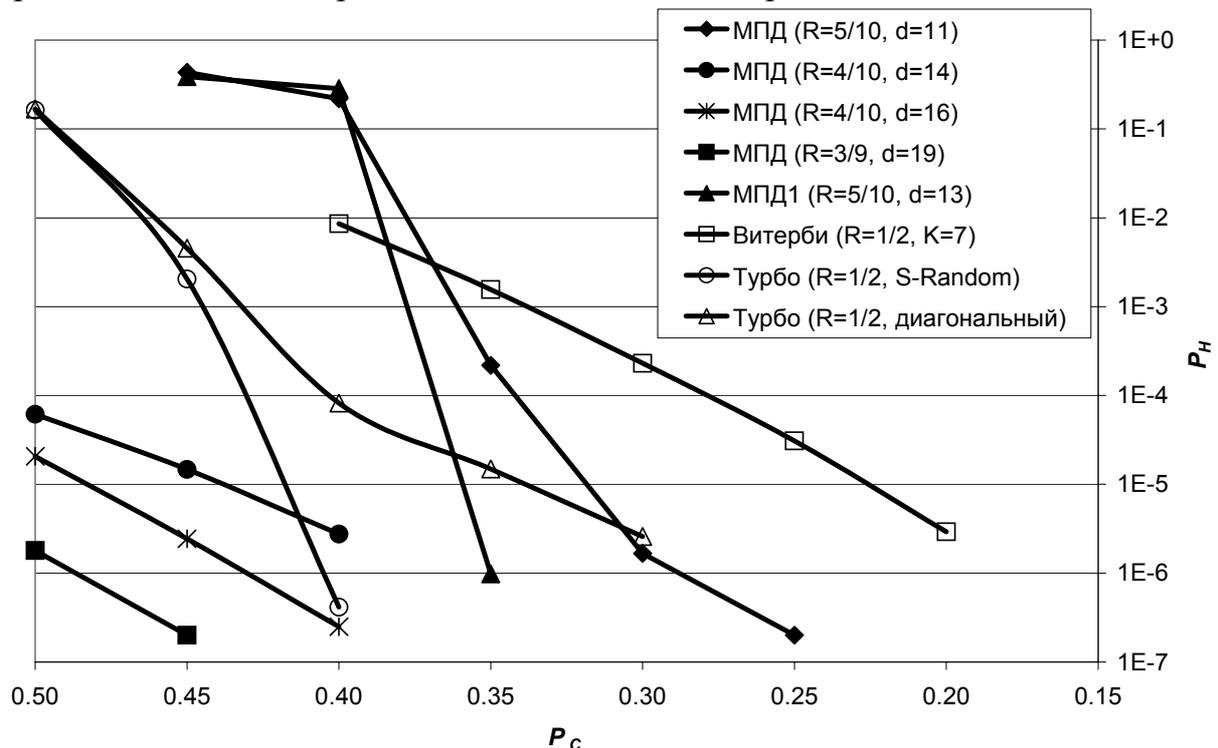


Рис. 7. Характеристики МПД в канале со стираниями

Для сравнения на рис. 7 также представлены характеристики классического алгоритма Витерби для кода с $R=1/2$ и длиной кодирующего регистра $K=7$ (кривая «Витерби ($R=1/2, K=7$)»), а также характеристики получающих все большее распространение турбо кодов с $R=1/2$ и длиной 8000

бит. Данные турбо коды состояли из двух рекурсивных систематических сверточных кодов с конструктивной длиной 3, связанных между собой псевдослучайным перемежителем длиной 4000 бит (кривая «Турбо (R=1/2, S-Random)») и диагональным перемежителем такой же длины (кривая «Турбо (R=1/2, диагональный)'). При декодировании турбо кодов использовался Max-Log-MAP алгоритм декодирования составляющих кодов, и выполнялось 10 итераций декодирования.

Из данного рисунка видно, что эффективность МПД превосходит эффективность практически реализуемого декодера Витерби и оказывается несколько хуже эффективности декодера турбо кода. Но при этом сложность практической реализации МПД (количество операций, требующихся для декодирования одного информационного бита) оказывается более чем на порядок меньше сложности декодера турбо кода.

Далее рассмотрим эффективность МПД в канале со стираниями и искажениями. Канал со стираниями и искажениями характеризуется тем, что биты по нему передаются правильно с вероятностью $1-P_C-P_O$, «стираются» с вероятностью P_C и искажаются с вероятностью P_O . При работе в таком канале МПД на каждой итерации декодирования должен уметь исправлять как стирания, так и ошибки. Процедура исправления ошибок в этом случае полностью аналогична исправлению ошибок для двоичного симметричного канала, а при декодировании стираний решение о значении восстанавливаемого бита по одной проверке вынести уже нельзя, поскольку проверка может быть ошибочной из-за возможных искажений в канале. Поэтому при декодировании стертого бита сначала среди проверок относительно данного бита ищутся все проверки, содержащие только по одному стиранию. Затем по каждой из них определяется значение стертого бита, после чего принимается окончательное решение о значении декодируемого бита по большинству голосов.

На рис. 8 представлены зависимости вероятности невосстановления бита (стирания) или его ошибочности на выходе декодера P_H+P_E от вероятности стирания P_C бита в канале при фиксированной вероятности искажения бита в канале $P_O=10^{-3}$. Здесь показаны характеристики для тех же методов коррекции ошибок, что и на рис. 7.

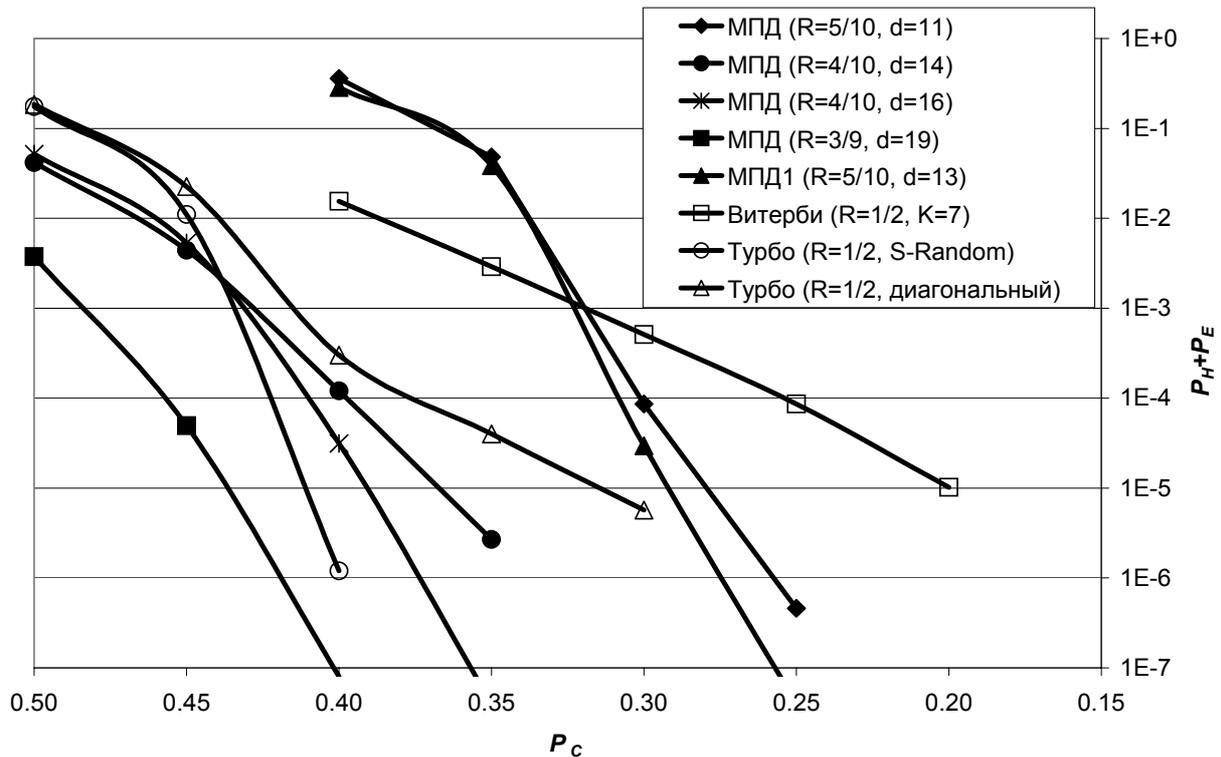


Рис. 8. Характеристики МПД в канале со стираниями и искажениями

Видно, что и в данных условиях эффективность МПД остается лучше эффективности декодера Витерби и уступает декодеру турбо кодов. Похожая ситуация сохраняется и при других кодовых скоростях.

4. В рамках дипломного проекта в Рязанском государственном радиотехническом университете под руководством одного из участников проекта Г.В. Овечкина реализован экспериментальный образец многопорогового декодера на микроконтроллере ATmega48-20PI фирмы Atmel.

В рамках этой работы были выявлены возможные сложности при микропроцессорной реализации МПД и отработаны основные технические решения.

5. Продолжается развитие имитатора цифрового канала передачи данных.

В текущем году были реализованы и внедрены в имитатор турбо коды и низкоплотностные коды, рекомендованные в стандартах DVB-RCS и DVB-RCS2. Кроме того, реализованы модели многолучевых каналов передачи данных ITU-R channel A, ITU-R channel B. Данные модели в ближайшее время также будут встроены в имитатор.

6. Ведется разработка демонстрационно-испытательного стенда с имитатором цифровых спутниковых каналов для исследования характеристик приемо-передающего оборудования.

Программный комплекс «Имитатор цифрового спутникового канала связи» (в дальнейшем ИМИТАТОР) имитирует процессы модуляции, передачи данных по каналу связи и демодуляции. ИМИТАТОР окажется полезным при

разработке цифровых сетей передачи данных. С помощью ИМИТАТОРА можно оценить эффективность работы приемопередающей аппаратуры в различных условиях, что создаст 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 качества работы систем передачи данных.

Взаимодействие ИМИТАТОРА и приемопередающего оборудования осуществляется через стандартный Ethernet адаптер по протоколу TCP/IP.

ИМИТАТОР предоставляет возможность по настройке следующих параметров спутникового канала:

1. Тип модуляции (BPSK, QPSK).
2. Отношение сигнал/шум в канале (от -10 до 50 дБ).
3. Скорость передачи данных (64, 128, 256, 512, 1024 кбит/с).
4. Задержка, вносимая спутниковым каналом (от 0 до 300 мс с шагом 10 мс).
5. Доплеровская частота (от 0 до 1000 Гц).

Для обеспечения необходимой точности моделирования в ИМИТАТОРЕ предусмотрено тестирование модели канала без участия приемопередающей аппаратуры.

7. Развивается специализированный двуязычный веб-сайт ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru.

На данном веб-сайте регулярно помещаются новые статьи, демонстрационные материалы и презентации последних результатов по МПД. Здесь же можно найти ответы на последние вопросы по кодированию и объявления о новых предстоящих или уже состоявшихся событиях в сфере разработок МПД алгоритмов.

Веб-сайт ориентирован на научно-методическую и учебно-информационную деятельность. Он содержит более 220 позиций структурированных материалов: статьи, комментарии, демонстрационные материалы, презентации, переписку с читателями сайта, компьютерные фильмы по методам МПД и другую полезную информацию. Его объёмы существенно превышают размеры порталов многих крупнейших научных и коммуникационных организаций, занимающихся аналогичными научно-технологическими проблемами. Веб-сайт читают **в 60 странах мира** и переписывают с него **за год до 5 Гбайтов** постоянно обновляемой информации.

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 выбрали самое важное сейчас направление: максимальное ускорение исследований работы МПД в области еще более высоких шумов канала. Вторым важнейшим компонентом работ по гранту является разработка макетов устройств кодера и декодера МПД на ПЛИС, 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.

Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

Сопоставление характеристик многопороговых декодеров с характеристиками лучших современных методов коррекции ошибок было приведено в расширенном отчете за 2005 год. Сопоставление полученных за отчетный период результатов с мировым уровнем было проведено в разделе 3.6 данного отчета при их описании.

Повторим лишь кратко, что в этом году удалось достичь дальнейшего очень большого роста энергетической эффективности применения МПД в самых различных каналах связи с большим уровнем шума по сравнению с результатами первого года работы по проекту. Особенно важно, что алгоритм МПД и до этого входил в число немногих лучших по энергетике методов кодирования. Именно поэтому достижение дополнительно значительного, в отдельных случаях порядка 1 дБ, прироста энергетического выигрыша в области очень больших шумов, в непосредственной близости от абсолютной (для энергетике) границы Шеннона, представляется очень важным результатом, который и провозглашался в качестве одной из главных и труднейших для достижения целей проекта.

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 2006 год со ссылками на РФФИ

1. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Дмитриева Т.А. Многопороговые алгоритмы для спутниковых сетей с оптимальными характеристиками // *Электросвязь*, №10, 2006.
2. Золотарёв В.В. Многопороговое декодирование для информационных потоков с байтовой структурой // *Мобильные системы*, №3, 2006 г.
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 // *ЦОС*, принят к печати, 2006 г.
8. Овечкин П.В. Эффективность использования многопорогового декодера в каналах связи со стираниями // *мат. Всероссийской научно-технической конференции НИТ-2006*. Рязань: 2006. С. 74–76.
9. Дмитриева Т.А., Золотарёв В.В. Разработка алгоритма декодирования на основе многопорогового декодера // *8-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и её применение»*, Доклады-1, М.: 2006. С. 57–59
10. Гринченко Н.Н., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Многопороговое декодирование в каналах с многопозиционной модуляцией // *Вестник РГРТУ*, в печати, 2006 г.
11. 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 и ее применение»*. М.: 2006. Том 1. С. 60–63.