

(Пленарный доклад на DSPA'07 28.03.07 в Москве)
Достижение характеристик оптимального декодирования
на основе многопороговых алгоритмов.

Зубарев Ю.Б.¹, Золотарёв В.В.²

¹МНИТИ, ²ИКИ РАН

Применение многопороговых алгоритмов декодирования как двоичных, так и недвоичных цифровых потоков в гауссовских каналах с большим уровнем шума неоднократно рассматривалось на четырёх последних конференциях DSPA.

В настоящем докладе рассмотрены новые существенно улучшенные алгоритмы коррекции ошибок класса МПД в каналах с предельно высоким уровнем шума. При этом данные алгоритмы остаются чрезвычайно простыми, по-прежнему обладая характеристиками, мало отличающимися от оптимальных.

Рассмотрим двухканальную схему передачи цифровых данных по космическим или иным каналам связи с достаточно большим уровнем гауссовского шума. Выберем для некоторого отношения сигнал/шум, первоначально одинакового для каждого из двух рассматриваемых каналов связи, такое распределение общей суммарной энергии, чтобы обеспечить максимально успешное последующее декодирование принятых информационных символов на основе многопорогового декодирования двоичных блоковых или свёрточных кодов [1-3,6]. Иначе говоря, критерием наилучшего перераспределения энергии между каналами следует выбрать минимальный уровень проявления эффекта размножения ошибок (РО) при мажоритарном декодировании. В теории МПД эти вопросы достаточно полно проработаны. Снижение эффекта размножения ошибок позволяет значительно улучшить сходимость решений МПД к оптимальным, что, в свою очередь, создаёт условия для более эффективной работы алгоритмов МПД при больших уровнях шума.

При формировании такой достаточно простой сигнально-кодовой конструкции рассматриваются различные способы балансировки энергетики. Например, каналы могут быть организованы таким образом, что по одному из них передаются информационные символы кода, а по другому – проверочные. В этом случае анализ РО упрощается, что позволяет достаточно быстро и полно рассматривать применимость максимального числа кодов и соответствующих им МПД алгоритмов в подобных схемах кодирования. Такие модели каналов получили название каналов с неравномерной энергетикой (НЭК) [1,5]. Они могут быть просто реализованы в обычных трактах передачи цифровых данных.

Как показал детальный анализ ряда кодов и некоторых модификаций МПД алгоритмов для каналов с различными параметрами и неравномерной энергетикой, перемещение границы области эффективной работы МПД в сторону более высокого уровня шума канала в диапазоне кодовых скоростей $R=1/4 \div 3/4$ может составлять до 1 дБ, что очень важно, поскольку исходная эффективность МПД в каналах обычного типа оказывается уже весьма высокой [1-4,6]. При этом отношение энергетики каналов должно находиться в пределах $1,3 \div 3,2$.

Необходимость работы аппаратуры связи при более высоких уровнях шума требует увеличения числа итераций декодирования в МПД, но, как показывает практика и моделирование алгоритмов, такое увеличение обычно оказывается не более чем двукратное, что приводит к небольшой сложности реализации МПД как в программном, так и в аппаратном вариантах.

Новые полученные результаты в этой области иллюстрируются графиками рис.1, на котором представлены возможности предложенных алгоритмов и уже известных методов. График МПД-Х соответствует эффективности МПД декодера на ПЛИС Xilinx, кривые МПДmd2, МПД+КК2 и МПД+КК3 даны для применения МПД в простейших каскадных схемах. Все эти алгоритмы детально обсуждались в [2]. На рис.1 также представлены кривые эффективности для алгоритма Витерби (АВ) со стандартным кодом длины $K=7$ и для каскадной схемы АВ с кодом Рида-Соломона (РС), а также для турбо кода [7]. Вертикаль $C=1/2$ определяет пропускную способность (С) гауссовского канала, равную 0,5, к которой стремятся разработчики при улучшении характеристик декодирования при $R=1/2$. Новый результат для МПД и канала НЭК – пунктир МПД-НЭК - соответствует возможности очень простого и значительного повышения эффективности декодирования кода при задержке принятия решения не более 400'000 битов, при

котором сохраняется хорошо известная достаточно большая скорость МПД декодирования как в программном, так и особенно в аппаратном варианте. Указанное существенное улучшение эффективности многопороговых алгоритмов примерно на 1 дБ по сравнению с другими МПД декодерами, представленными на рис.1, достигнуто за прошедший период с момента проведения последней конференции DSPA. С учётом уже достигнутой близости области эффективной работы МПД к пропускной способности канала связи, можно считать, что МПД имеет хорошие перспективы по дальнейшему приближению его характеристик к границе Шеннона. При этом значительное преимущество МПД перед другими алгоритмами по числу операций, составляющее один – два десятичных порядка для различных сочетаний параметров кодирования [1,4,6], даёт основание полагать, что МПД следует активно использовать при разработках современной аппаратуры для космических и спутниковых каналов связи.

Характеристики МПД, АВ и турбо кодов в гауссовских каналах при R=1/2

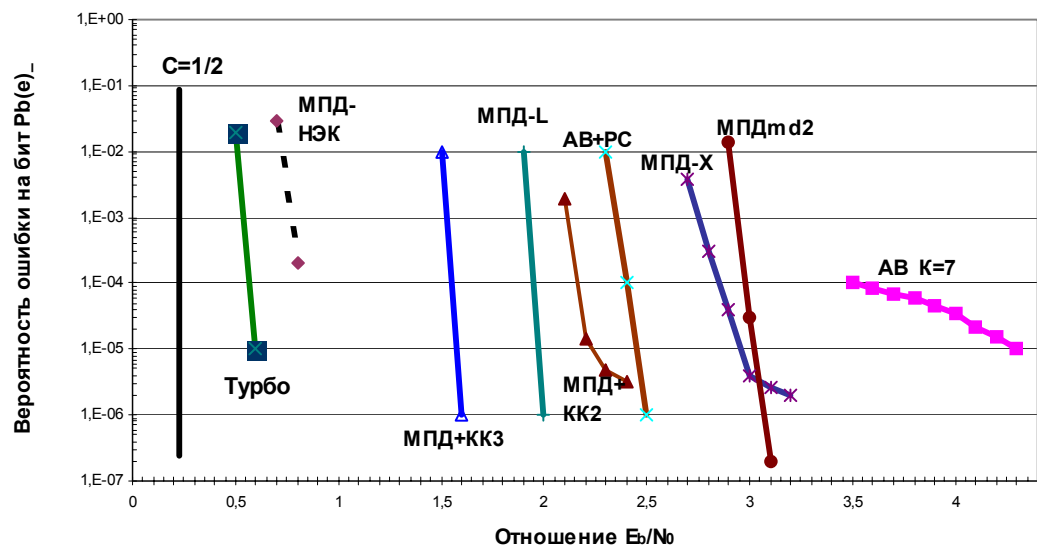


Рис.1.

Далее отметим, что за сорок лет развития мажоритарных алгоритмов коррекции ошибок в двоичных каналах в теории кодирования не было попыток обобщения этих алгоритмов на недвоичные символьные коды и соответствующие им пороговые декодеры. В настоящее время завершена многолетняя разработка полной теории для недвоичных мажоритарных методов коррекции ошибок [1,4,6]. Предложены простые в реализации коды для недвоичных цифровых потоков и созданы эффективные многопороговые алгоритмы их декодирования с весьма малым числом операций на символ данных.

Эти алгоритмы также обеспечивают стремление решений недвоичных МПД к решениям оптимального декодера (ОД), как это имеет место и в случае двоичных кодов и их декодеров. Получены аналитические оценки для традиционно вычисляемых вероятностей ошибки в первом символе кода при пороговом декодировании блоковых и свёрточных кодов, а также нижние оценки вероятностей ошибки для ОД и другие важные характеристики кодов и алгоритмов. Все достигнутые результаты в области недвоичных мажоритарных алгоритмов являются уникальными и не имеют аналогов в мировой литературе по корректирующим кодам.

Теоретические результаты, оценки характеристик и большой объём моделирования недвоичных МПД алгоритмов в каналах с большим уровнем шума показывают, что возможности этих алгоритмов существенно, на много десятичных порядков превосходят значения достижимых уровней достоверности на основе кодов Рида-Соломона любой длины. В условиях, когда для кодов с большим основанием построение алгоритма Витерби с хорошими характеристиками оказывается невозможным, а характеристики кодов РС весьма невысоки, возможности недвоичных МПД оказываются практически вообще неограниченными. При этом сложность

декодирования символьных данных оказывается весьма небольшой. Объём статистики декодирования порядка $1E9$ (миллиарда) может быть получен примерно за час работы ПК общего назначения на обычных неоптимизированных программных средствах.

Характеристики недвоичных МПД с основанием $q=256$ и кодов РС при $R=1/2$

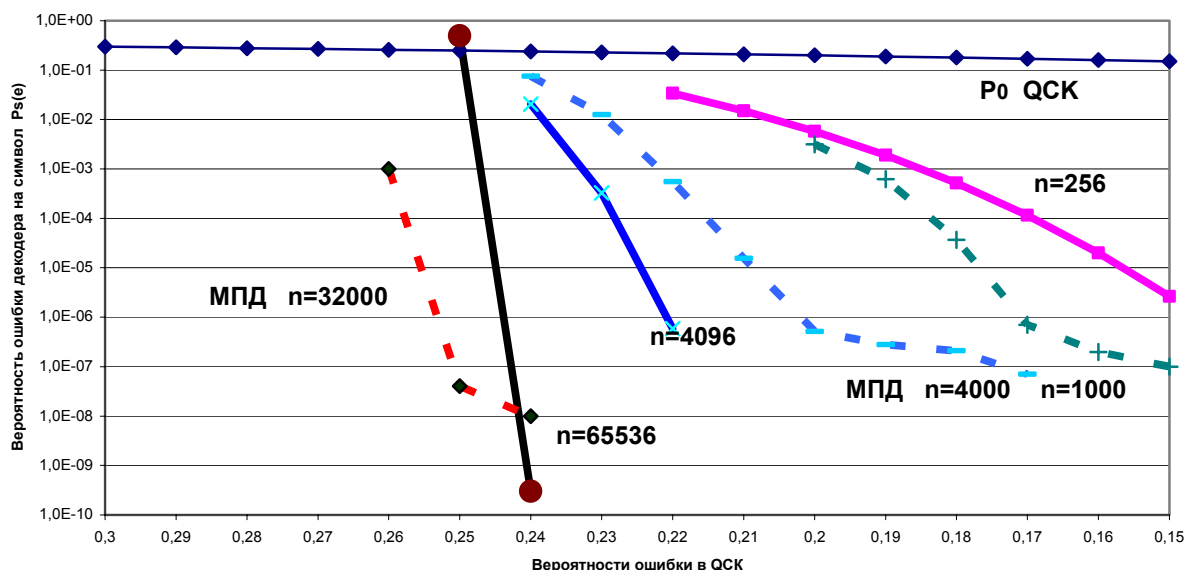


Рис.2.

На рис.2 представлены результаты моделирования недвоичного МПД алгоритма и оценок характеристик декодирования кодов РС в недвоичных каналах с независимыми ошибками для кодовой скорости $R=1/2$. Сплошные линии относятся к кодам РС соответствующей длины n , а пунктирные – недвоичному МПД с основанием (размером алфавита) $q=256$ (символ – 1 байт). Выбор такого q , соответствующего байтовой структуре символьных потоков информации, очень удобен для реализации алгоритмов обработки данных на стандартных вычислительных средствах. Из представленных графиков следует, что характеристики декодирования МПД для достаточно коротких по современным меркам кодов длины $n=32000$ байтов недостижимы для кодов РС сколько угодно большой длины. Отметим при этом, что реальное применение до сих пор находили только коды РС длины не более $n=256$. Можно также утверждать, что коды РС длины порядка 4000 вообще не будут реализованы в обозримом будущем. В то же время байтовые МПД (с алфавитом размером 256) декодеры для мажоритарно декодируемых недвоичных кодов имеют весьма высокие характеристики, которые для кода с $n=32000$ являются недостижимыми для кодов РС любой длины с $R=1/2$. Отметим, что переход к алфавиту q большего объёма увеличит эффективность МПД без сколько-нибудь заметного увеличения сложности декодирования, тогда как для длинных кодов РС увеличение размера основания кода происходит автоматически, но характеристики кодирования не улучшаются в той же степени, как у МПД, который в случае необходимости просто использует более длинные коды при фиксированном неизменном алфавите.

Таким образом, согласно рис.2, МПД реализует хорошие характеристики как при весьма простой программной реализации (что уже отмечалось выше), так и (как показало предварительное проектирование) в аппаратном виде.

Разумеется, если не требуется работа МПД в столь тяжёлой шумовой обстановке, как представлено на вышеприведённых рисунках, избыточность кодов для недвоичного МПД можно уменьшать в любой степени вплоть до нескольких процентов. В частности, большой объём моделирования недвоичного МПД алгоритма при $R=7/8$ показал, что и при небольшой избыточности многопороговое декодирование остаётся очень простым, а результирующая

достоверность декодирования мало отличается от соответствующих характеристик такого же по избыточности кода РС длины порядка 4000 символов. Но при $R=7/8$ создать быстрый декодер для кода РС такой длины более чем проблематично, тогда как МПД остаётся и для малоизбыточных кодов весьма быстрым и очень простым.

На основании сопоставления эффективности длинных двоичных кодов с МПД декодированием и сколь угодно длинных кодов Рида-Соломона, можно сделать вывод о появлении возможности простой реализации на основе мажоритарно декодируемых двоичных кодов сверхнадёжных высокодостоверных суперархивов видео-, аудио- и других специальных типов данных большого объёма с очень длинными сроками хранения. Это определяется ничтожной сложностью кодирования, простотой декодирования и очень легким контролем текущей достоверности в период хранения.

Столь же удобно и просто можно применять двоичные МПД для кодирования CD-дисков и другой цифровой продукции широкого применения.

Совокупность полученных результатов для декодирования двоичных и символьных данных позволяет считать, что выполненные исследования подтверждают возможность успешного декодирования на базе МПД при всё более высоких уровнях шума канала. Сложность самого трудного этапа кодирования – процедуры МПД декодирования на приёмной стороне всегда оказывается много меньшей, чем у других сопоставимых по эффективности с МПД алгоритмов.

Литература

1. В.В.Золотарёв. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования. Под научной редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б.Зубарева. М., «Радио и связь», «Горячая линия – Телеком», 2006, 276 с.

2. Ю.Б.Зубарев, В.В.Золотарёв. Многопороговые декодеры: перспективы аппаратной реализации. //В сб.: «7-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и её применение», 16-18 марта 2005 г.», Вып. VII-1, М., с.68-69.

3. Ю.Б.Зубарев, В.В.Золотарёв, Г.В.Овечкин, В.В.Строков. Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы.//Электросвязь, 2005, №2, с.10-12.

4. В.В.Золотарёв, Г.В.Овечкин. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник под редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б.Зубарева, М., «Горячая линия-Телеком», 2004, 128 с.

5. Ю.Б.Зубарев, В.В.Золотарёв, Г.В.Овечкин, Т.А. Дмитриева. Многопороговые алгоритмы для спутниковых сетей с оптимальными характеристиками. //Электросвязь, 2006, №10, с.9-11.

6. Веб-сайт ИКИ РАН: www.mtdbest.iki.rssi.ru.

7. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes.- Proceeding of ICC'93, Geneva, Switzerland, pp. 1064-1070, May, 1993.

P.S.

Вы можете найти детальную информацию о характеристиках МПД для малоизбыточных двоичных кодов с мажоритарным декодированием при $R=7/8$ и $R=0,95$ в нашей последней статье «Обобщение алгоритма МПД на двоичные коды» в журнале «Мобильные системы» №2, 2007 г.. Эта статья представлена также на нашем веб-сайте на странице «Метод» в рубрике «Новые статьи».

Кроме того, вам предоставлена полезная возможность переписать на свой компьютер демопрограмму МПД для малоизбыточного кода вместе с очень простой инструкцией по её использованию. Демопрограмма находится на странице «Образование», имеет небольшой объём и может быть запущена на обычном ПК.