

(Пленарный доклад на Международной конференции DSPA'06 в Москве 29-31 марта 2006г.)

ОПТИМАЛЬНЫЕ ДЕКОДЕРЫ И МНОГОПороГОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СПУТНИКОВЫХ СЕТЕЙ

Зубарев Ю.Б.¹, Золотарёв В.В.²

¹МНИТИ, ²ИКИ РАН, г.Москва

Важнейшим аспектом развития информатики и телекоммуникаций в настоящее время стал фактически всеобщий переход систем связи и обработки данных на цифровые методы создания, хранения и передачи информации. В последнюю декаду прошлого тысячелетия оказалось уже вполне реальным начать преобразование почти всех источников информации и систем их передачи к цифровому виду. Полный реальный переход на цифровую обработку будет завершён, видимо, лишь через 15-20 лет. Практически все страны мира уже сформировали национальные и международные программы перехода на повсеместную цифровую обработку и передачу данных. В настоящий момент мир находится примерно в первой трети длинного и очень непростого пути к полной «цифровизации» общества.

Ведущую роль в научно-техническом обеспечении этого сложного социального и технологического процесса играют современные методы обеспечения высокой достоверности цифрового обмена. Важно указать, что их реализация при отказе от аналоговых сообщений и перехода к дискретным данным становится чрезвычайно важной задачей, которая должна быть решена с учётом перспектив развития цифровых сетей связи, в том числе и спутниковых. Ведущая роль при решении этой сложнейшей технологической проблемы отводится мощным современным методам помехоустойчивого кодирования, которые только и позволят решить задачу действительно эффективного использования дорогих каналов цифровой связи.

Если в некоторой системе цифровой связи не используются корректирующие коды, то это соответствует очень неэффективному использованию пропускной способности канала, обычно не превышающему нескольких процентов от его теоретически рассчитанной ёмкости. Причём, если требования к качеству и достоверности цифровой передачи повышаются, эффективность использования канала ещё больше падает, поскольку при этом нужно, например, или увеличить мощность передачи, или снизить скорость обмена данными. Подчёркнём, что требования к достоверности передачи данных для всех конкурентоспособных эксплуатируемых и новых проектируемых систем и сетей связи действительно быстро растут и этот процесс, несомненно, является долгосрочным. Более того, неизбежная и очень полезная тенденция кодирования, предварительной «упаковки» информационных цифровых данных, особенно аудио и визуальных, будет развиваться в направлении всё увеличивающихся коэффициентов сжатия исходной информации. А это уже сейчас привело к тому, что значительно возросла «хрупкость» достаточно сильно сжатых изображений, которые восстанавливаются с большими искажениями, даже если лишь ничтожная доля битов этого упакованного изображения принята из канала неправильно. Тем самым ещё быстрее повышаются требования к достоверности передачи таких «упакованных» данных.

Именно все эти причины, т. е. глубокое понимание важности кодирования в цифровых системах, привели в 70-х годах прошлого века к первой большой технологической революции в системах связи, когда для спутниковых каналов стали создаваться декодеры, работающие по алгоритму Витерби (АВ). График вероятности ошибки на бит как функции от отношения битовой энергии к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 при кодовой скорости $R=1/2$ для АВ со стандартным кодом длины $K=7$ и гауссовского шума, который имеет место в спутниковых и космических каналах связи, представлен на рис.1.

Отметим, что кроме традиционных значений эффективности, выражаемых величиной рабочих значений E_b/N_0 для некоторых кодов и их декодеров или энергетического выигрыша (ЭВК), можно также говорить о к.п.д. используемых каналов. Его естественно оценивать как отношение величины E_b/N_0 для случая $R=C$, т. е. равенства кодовой скорости и пропускной способности канала, к реальному рабочему значению E_b/N_0 для используемого кода и его

декодера. Например, если рассматривать характеристики такого алгоритма декодирования, который работоспособен при отношении E_b/N_0 , на 3 дБ более высоком, чем это имеет место при равенстве $R=C$, то к.п.д. или просто эффективность использования канала в такой системе связи достигает 50%. Отсюда следует, что уже на первом этапе применения кодов в 70-х годах эффективность, т. е. именно к.п.д. использования очень дорогих каналов спутниковой связи благодаря успешной реализации АВ увеличилась с нескольких процентов до примерно 30%. Напомним, что для $R=1/2$ равенство $R=C$ достигается при $E_b/N_0 = 0,2$ дБ для гауссовского канала и приёма «в целом».

Ясно, что применение АВ, конечно, важнейшее для того времени достижение, не могло полностью удовлетворить специалистов по системам связи. Поэтому весь мир продолжал работать над созданием алгоритмов декодирования с более высоким энергетическим выигрышем кодирования (ЭВК), что позволило бы в дальнейшем повысить эффективность использования ресурсов цифровых сетей.

Дальнейшее развитие техники кодирования и самой перспективной её ветви: методов построения каскадных кодов - привело затем к реализации другой важнейшей кодовой конструкции для коммуникаций – каскадирования кодов с декодированием по АВ и кодов Рида-Соломона. Эта система кодирования была сделана на пределе технологических возможностей тех лет и, с успехом применяясь на всё более высокоскоростных каналах, заслуженно пользовалась большим успехом. Характеристики декодирования этого каскадного кода представлены на рис.1 графиком АВ-РС, который демонстрирует значительное повышение помехоустойчивости в спутниковых каналах по сравнению со стандартным АВ. Этот каскадный код уже мог обеспечить эффективность использования канала (к.п.д.) более 50%.

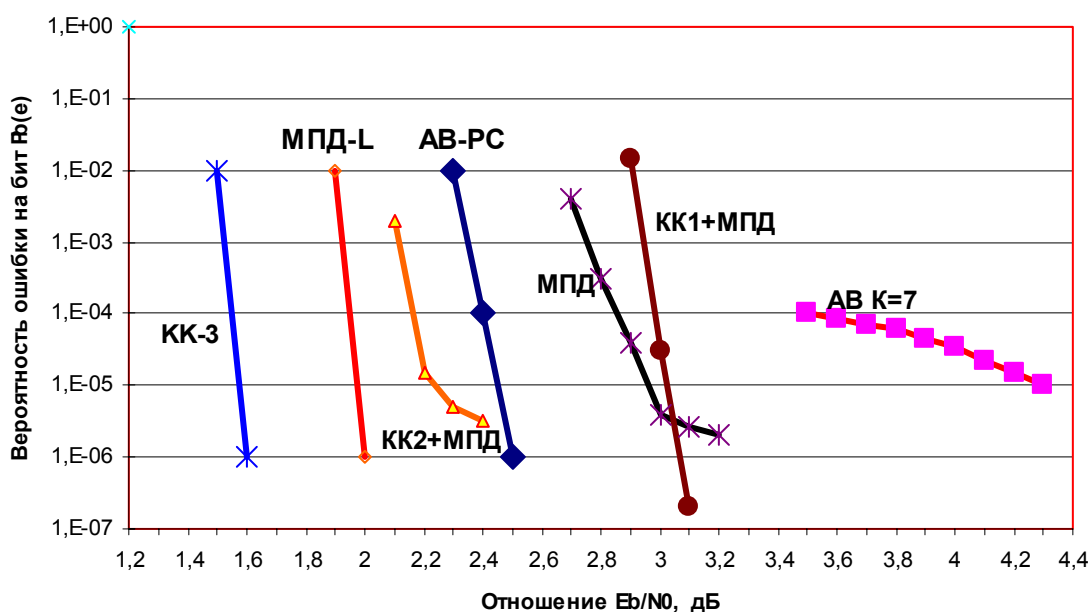
Последующие поиски новых методов кодирования за рубежом дали существенные результаты только в 1993 году, когда были открыты турбо коды с очень эффективным итеративным алгоритмом декодирования, что позволяло обеспечить передачу при уровнях E_b/N_0 , лишь на несколько десятых децибела более высоких, чем при равенстве $R=C$ [4]. За прошедшее десятилетие турбо коды действительно доказали, что работа в непосредственной близости от пропускной способности канала уже стала технологически доступной целью. Но в той же степени все известные в настоящее время турбо подобные методы убедительно продемонстрировали, что фундаментальная проблема теории кодирования: сложность декодирования, о которой для весьма непростых по своей реализации турбо декодеров вообще говоря, не очень сильно заботились, - она всё же не была решена в требуемой мере даже с учётом продолжающегося прогресса микроэлементной базы. Таким образом, проблема сложности декодирования остаётся для техники связи актуальнейшей проблемой.

В [5] и ряде публикаций авторов и других российских специалистов в области теории и техники кодирования было показано, что при сопоставимой эффективности кодирования и последующего декодирования существуют методы, в частности многопороговые алгоритмы (МПД) [1-3], которые для некоторых типичных параметров кодирования фактически на 2 десятичных порядка проще по числу операций, чем турбо декодеры. Они позволяют обеспечить высокую достоверность передачи данных в каналах при весьма высоком уровне шума и практически неограниченном быстродействии [5,6]. Их очень высокое быстродействие при аппаратной реализации определяется возможностью полного распараллеливания всех операций декодирования. Они также обладают уникальным свойством переходить только к строго более правдоподобным решениям в течение всего процесса многократного и также итеративного исправления ошибок. Во многих случаях разрабатываемые с 1972 года МПД алгоритмы достигают оптимального, т. е. самого правдоподобного решения при всего лишь линейной от длины кода сложности декодирования.

В настоящее время разработаны МПД декодеры на ПЛИС Xilinx для скоростей передачи 160-480 Мбит/с с достаточно высокими энергетическими характеристиками. Поскольку МПД характеризуется очень небольшим числом операций, программные версии этих декодеров могут исправлять в каналах с достаточно большим уровнем шума потоки данных на скоростях до 2-15 Мбит/с [5], даже для различных цифровых телевизионных систем. В этом направлении также ведутся новые разработки.

На рис.1 представлены последние достижения в области высокоскоростных декодеров типа МПД на современных ПЛИС для кодовой скорости $R \sim 1/2$. Кривая МПД относится к разработке сверточного МПД на ПЛИС Xilinx [2] на скорости до 480 Мбит/с. Каскадная схема с использованием того же кода и кода контроля по чётности (ККЧ) обеспечивает характеристики, показанные на графике «КК1+МПД». Они достаточно мало отличаются от возможностей стандартной и весьма эффективной каскадной схемы декодирования с АВ и декодером кода Рида-Соломона (РС) (график «АВ-РС»), но оказываются значительно проще, поскольку при использовании каскадирования с МПД наличие второго кода типа ККЧ добавляет всего 2 операции на каждый бит данных по сравнению с обычным МПД. Это не идёт ни в какое сравнение со сложностью дополнительного декодера для кода РС. При этом каскадный МПД легко реализовать, как и обычный МПД декодер, для скоростей порядка 500 Мбит/с и выше.

**Характеристики декодеров МПД на ПЛИС Xilinx
Итоги 2005 года**



Далее кривая «КК2+МПД» соответствует МПД декодеру с объёмом памяти, увеличенным по сравнению с первым примером в 1,4 раза, который каскадируется с тем же ККЧ. Эта простая схема также с очень высоким потенциальным быстродействием уже существенно эффективнее каскадной схемы АВ-РС как по энергетике, так и по скорости передачи. Более того, поскольку уровень остаточных ошибок у этого каскадного МПД очень невелик, то добавление любого самого простого малоизбыточного кода в качестве внешнего каскада в эту схему приведёт к абсолютному преимуществу такой каскадной схемы относительно варианта каскадных кодов АВ-РС вплоть до вероятностей ошибки на бит $P_b(e) \sim 10^{-9}$.

Далее график МПД-L приведён для декодера МПД с 40 итерациями декодирования. Подчеркнём важнейшее свойство такого аппаратного МПД: эта обычная базовая схема декодера, т. е. она даже не относится к каскадным конструкциям, но оказывается существенно более эффективной по уровню шума, при котором она работает, чем все предыдущие схемы на рис.1. Столь высокая его эффективность обусловлена новыми достижениями в поиске кодов с низким уровнем размножения ошибок при их коррекции, что в свою очередь и позволило перейти к большему числу итераций декодирования. Можно утверждать, что такая схема безусловно относится к лучшим некаскадным процедурам коррекции ошибок, известным в теории и технике кодирования. Разумеется, успешная работа МПД алгоритма в условиях столь большого уровня шума в соответствии с фундаментальными свойствами кодов оказывается возможной только при значительном увеличении их длины и задержки декодирования.

В связи с большим преимуществом каскадных схем перед базовыми методами кодирования/декодирования применение самых лучших базовых алгоритмов МПД в каскадных конструкциях совместно с внешними кодами с минимальным кодовым расстоянием $d=3\div 9$ также обеспечивает значительное улучшение энергетических характеристик при декодировании. График КК-3 показывает возможность такой каскадной схемы с использованием МПД во внутренних каскадах. При этом применение каскадирования позволяет ещё и снизить в таком декодере полную задержку принятия решений примерно в 1,5 раза при сохранении высокой производительности МПД декодера и в этом варианте применения.

Планируемые значения рабочих уровней E_b/N_0 менее 1 дБ будут достигнуты для каскадных алгоритмов МПД, видимо, в течение ближайшего года, что позволит обеспечить создание самых высокопроизводительных декодеров с предельно возможными реальными характеристиками по энергетике при вполне умеренных финансовых затратах на разработку и производство.

Важной технологической особенностью МПД декодеров является их способность варьировать свои основные параметры, сохраняя при этом или даже улучшая те характеристики, которые могут быть более важными в конкретных условиях применения кодирования. В частности, при необходимости увеличения производительности можно достичь этого за счёт увеличения памяти декодера, а для уменьшения задержки можно перейти от свёрточных кодов к блоковым или несколько трансформировать пороговые элементы декодера. Вообще МПД алгоритм позволяет в очень широких пределах менять соотношения между задержкой принятия решений, числом операций на бит, длиной кода, избыточностью и требуемыми уровнями конечной достоверности решений и скорости декодирования. Это позволяет легко адаптировать МПД декодеры под любые задачи повышения достоверности передачи и достигать требуемых характеристик в самые короткие сроки.

В процессе доклада демонстрируются новые динамические компьютерные демомультфильмы про МПД алгоритм для высоких уровней шума канала.

Выводы: Рассмотренные реализованные и создаваемые аппаратные варианты МПД декодеров способны работать при отношении битовой энергии к спектральной плотности мощности шума до 1,5 дБ. МПД декодеры уже сейчас демонстрируют рекордные уровни производительности и поэтому являются особенно предпочтительными в высокоскоростных каналах. Во многих случаях высокая производительность программных вариантов МПД декодеров достаточна даже для их применения в различных телевизионных системах.

Широкое применение МПД алгоритмов для работы в каналах с большим уровнем шума позволяет обеспечить максимально полное использование их ёмкости при вполне умеренных производственных и финансовых ресурсах на разработку систем кодирования.

Для контактов: zolotasd@yandex.ru, р.т. ИКИ РАН (095)-333-45-45, моб.: 8-916-518-86-28.

Выполненное исследование поддержано грантом №05-07-90024 РФФИ.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Веб-сайт ИКИ РАН: www.mtdbest.iki.rssi.ru.
6. V.V. Zolotarev. The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels // In Proc. 7-th Int. Symp. on Comm. Theory and applications, ISCTA '03, July, 2003, Ambleside, UK, pp. 18-22.