

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

## По материалам Международной научно-технической конференции - "DSPA'2006"

Развитие современных информационных технологий характеризуется широким практическим использованием методов и техники цифровой обработки сигналов (ЦОС) - одной из самых динамичных и быстро развивающихся технологий в мире телекоммуникаций и информатизации общества.

Отвечая целям и задачам консолидации и поддержки отечественных ученых и специалистов, работающих в области передовых информационных технологий реального времени, расширения международных научных связей и содействия внедрению высоких наукоемких технологий XXI века, Российское им. А.С. Попова совместно с компанией AUTEX.Ltd при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и при участии Федерального агентства по промышленности РФ, Министерства образования и науки РФ, Российской секции IEEE Signal Processing Society, Института радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН, Института проблем управления (ИПУ) РАН, Института проблем передачи информации (ИППИ) РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МТУСИ, МАИ, МЭИ и других ведущих российских вузов и организаций провели 29-31 марта 2006 г. в ИПУ РАН (Москва) 8-ю Международную научно-техническую конференцию и выставку "Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA'2006". В конференции и выставке приняли участие более 1200 человек из 34 городов России и стран СНГ, а также ученые из США, Германии, Финляндии, Польши, Таиланда, Пакистана и Ирана.

Работа конференции проходила в десяти секциях, восемь из которых были непосредственно связаны с решением актуальных научных проблем в области информационно-телекоммуникационных технологий. Это - "Теория сигналов и систем" (руководители - д.т.н., проф. Ю.С. Шинаков и д.т.н., проф. М.С. Немировский); "Теория и методы цифровой обработки сигналов" (д.т.н., проф. Ю.А. Брюханов); "Обработка сигналов в системах телекоммуникаций" (д.т.н., проф. Ю.Н. Прохоров); "Обработка и передача изображений" (д.т.н. В.П. Дворкович и к.ф.-м.н. А.В. Дворкович); "Цифровое радиовещание" (к.т.н., доц. Е.П. Зелевич и к.т.н., с.н.с. В.И. Щербина); "Цифровая обработка многомерных сигналов" (д.т.н., проф. В.Г. Миронов и к.т.н., доц. М.К. Чобану); "Проектирование и техническая реализация систем ЦОС" (д.т.н., проф. В.В. Витязев); "Нейрокомпьютерная обработка сигналов и изображений" (д.т.н., проф. А.И. Галушкин). На конференции было заслушано около 200 докладов, по материалам которых изданы "Труды конференции" в 2-х томах, общим объемом - 667 стр.

В своем приветствии к участникам конференции председатель Национального комитета член-корр. РАН Ю.Б. Зубарев отметил масштабность и значимость для России открывающегося научного форума, растущий из года в год интерес широкой аудитории его участников к проблемам цифровых информационных технологий реального времени, все более нарастающий приток молодежи.

На пленарном заседании в день открытия конференции были заслушаны шесть обзорных докладов, в которых нашли отражение вопросы теории и практики построения систем цифровой обработки изображений и звука в самых различных приложениях. Основной акцент был сделан в направлении решения проблем мобильного узкополосного вещания и IP TV (В.П. Дворкович, А.В. Дворкович, Ю.Б. Зубарев и др., ФГУП "НИИ радио", Москва), многоскоростной фильтрации и сжатия изображений (Т. Сарамьяки, Институт обработки сигналов Тамперского технологического университета, Финлян-

дия), обработки и воспроизведения звука (Р. Рабинштейн, С. Споре, Нюрнбергский университет, лаборатория телекоммуникаций, Германия), построения оптимальных декодеров на основе многопороговых алгоритмов (В.В. Золотарев, Ю.Б. Зубарев, МНИТИ, Москва).

Одновременно с работой конференции компанией AUTEX.Ltd была организована выставка новых информационных технологий реального времени и инструментальных средств ЦОС, в работе которой приняли участие ведущие в этой области отечественные предприятия и фирмы: ЗАО AUTEX.Ltd, ЗАО "Инструментальные системы", компании AVD Systems, Alternative Solutions, ЗАО "L-Card", ООО "Растр технологичи", НТЦ "Модуль", ГУП НПЦ "ЭЛВИС", ООО "Руднев-Шилляев", ООО "Центр АЦП", ООО "НПП Цифровые решения" и др.

В дни работы конференции и выставки состоялись семинары-презентации по новым разработкам в области DSP-технологий, которые провели хорошо зарекомендовавшие себя на российском рынке фирмы: ГУП НПЦ "ЭЛВИС", ЗАО "Инструментальные системы", ЗАО "СПИРИТ" и др. Как и в предыдущие годы, наиболее представительным и посещаемым был специализированный семинар компаний Analog Devices Inc.-AUTEX. Ltd по DSP-продукции Analog Devices, привлекший внимание более 400 участников.

С целью создания условий для всестороннего открытого обсуждения проблем и перспектив развития DSP-технологий и их широкого использования в разработках отечественных ученых и специалистов в первый день работы конференции был проведен "Круглый стол - DSPA" с участием представителей ведущих в этой области российских фирм и организаций.

В последние годы в рамках конференции все большее внимание уделяется поддержке молодых ученых, аспирантов и студентов. Проводятся конкурсы на лучший научный доклад, организуются семинары-презентации по университетским программам, активизируется работа учебно-методической секции. Награждение лауреатов конкурса молодых ученых состоялось на заключительном заседании в день закрытия работы конференции.

Следующая 9-я Международная конференция и выставка "DSPA'2007" состоится в марте 2007 г. в ИПИ РАН (Москва).

Представляемый ниже тематический выпуск "Цифровая обработка сигналов в системах телекоммуникаций" не претендует на полный охват всего спектра обсуждаемых на конференции проблем и их решений. Вместе с тем, предлагаемые вашему вниманию работы отражают наиболее актуальные направления исследований российских ученых в области применения ЦОС в информационно-телекоммуникационных системах. Это прежде всего вопросы кодирования-декодирования в системах цифровой связи, повышения эффективности высокоскоростной передачи данных в мобильных сетях на основе технологий OFDM (ортогонального частотного разделения с мультиплексированием) и MIMO (многоантенных систем как на передающей, так и на приемной стороне), эхо-компенсации в проводной телефонии в ситуации встречного разговора, цифровой фильтрации и детектирования в нелинейных радиоприемных устройствах.

В.В. Витязев

*Зам. председателя Национального комитета конференции "DSPA'2006", член редколлегии журнала "Электросвязь", профессор*

## МНОГОПороГОВЫЕ АлГОРИТМЫ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ СЕТЕЙ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ\*

Ю.Б. Зубарев, член-корр. РАН, д.т.н.

В.В. Золотарёв, главный специалист ИКИ РАН, д.т.н.

Г.В. Овечкин, доцент РГРТУ, к.т.н.

Т.А. Дмитриева, аспирант РГРТУ

Важнейшим аспектом развития информатики и телекоммуникаций в наше время стал всеобщий переход систем связи и обработки данных на цифровые методы создания, хранения и передачи информации. В последнее десятилетие прошлого тысячелетия стало реальностью преобразование почти всех источников информации и систем их передачи в цифровой вид. Переход на цифровую обработку будет завершен, видимо, лишь через 15-20 лет. Практически все страны мира уже сформировали национальные и международные программы перехода на цифровую обработку и передачу данных. В настоящий момент мир находится примерно в первой трети длинного и очень непростого пути к полной цифровизации общества.

Большое значение для научно-технической поддержки этого сложного социального и технологического процесса имеют современные методы обеспечения высокой достоверности цифрового обмена. Их реализация при отказе от аналоговых сообщений и переходе к дискретным данным становится чрезвычайно важной задачей, которая должна быть решена с учетом перспектив развития цифровых сетей связи, в том числе спутниковых. Ведущая роль при разрешении этой сложнейшей технологической проблемы отводится мощным современным методам помехоустойчивого кодирования, которые позволяют действительно эффективно использовать дорогие каналы цифровой связи.

Если в какой-то системе цифровой связи не используются корректирующие коды, это говорит об очень неэффективном использовании пропускной способности канала, обычно не превышающего нескольких процентов от его теоретически рассчитанной емкости. Причем, если требования к качеству и достоверности цифровой передачи повышаются, эффективность использования канала еще больше падает, поскольку при этом нужно, например, или увеличить мощность передачи, или снизить скорость обмена данными. Подчеркнем, что требования к достоверности передачи данных для всех конкурентоспособных эксплуатируемых и новых проектируемых систем и сетей связи быстро растут, и этот процесс, несомненно, длительный. Более того, неизбежная и очень полезная тенденция кодирования, предварительной "упаковки" информационных цифровых данных, особенно аудио- и визуальных, будет развиваться в направлении все большего сжатия исходной информации. Это уже привело к тому, что значительно возросла "хрупкость" сильно сжатых изображений, которые восстанавливаются с большими искажениями, даже если лишь ничтожная доля битов этого "упакованного" изображения принята из канала неправильно. Тем самым еще быстрее повышаются требования к достоверности передачи таких "упакованных" данных.

**Основные технологии кодирования.** 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, рабо-

тающие по алгоритму Витерби (AB). График вероятности ошибки на бит  $P_b/e$  как функции от отношения битовой энергии к спектральной плотности мощности шума  $E_b/N_0$ , при кодовой скорости  $R = 1/2$  для AB со стандартным кодом длины  $K = 7$  и гауссовского шума, который имеет место в спутниковых и космических каналах связи, представлен на рисунке кривой AB,  $K = 7$ .

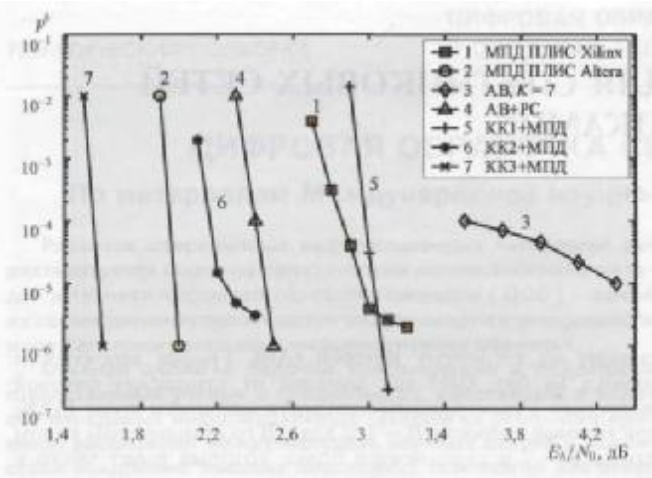
Отметим, что кроме традиционных значений эффективности, выражаемых величиной рабочих значений  $E_b/N_0$  для некоторых кодов и их декодеров или энергетического выигрыша (ЭВК), можно также говорить о к.п.д. используемых  $E_b/N_0$  для случая  $R = C$ , т.е. равенства кодовой скорости и пропускной способности 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 AB увеличилась с нескольких процентов до примерно 30%. Напомним, что для равенства  $R = C$  достигается при  $E_b/N_0 = 0,2$  дБ для гауссовского канала и приема в целом.

Ясно, что применение AB - 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 ЭВК, что позволило бы в дальнейшем повысить эффективность использования ресурсов цифровых сетей.

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

Следующие поиски новых методов кодирования за рубежом дали существенные результаты только в 1993 г., когда были открыты турбокоды 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 турбокоды действительно доказали, что работа в непосредственной близости от пропускной способности канала стала технологически доступной целью. Но в той же степени все известные в настоящее время

\* Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант №05-07-90024в.



турбоподобные методы убедительно продемонстрировали, что фундаментальная проблема теории кодирования - сложность декодирования, о которой для непростых в реализации турбодекодеров не очень сильно заботились, все же не была решена в требуемой мере даже с учетом продолжающегося прогресса микроэлементной базы. Таким образом, проблема сложности декодирования остается для техники связи очень актуальной.

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

В настоящее время разработаны МПД декодеры на ПЛИС Xilinx для скоростей передачи от 160 до 480 Мбит/с с 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 15 Мбит/с [5], даже для различных цифровых телевизионных систем: В этом направлении также ведутся новые разработки.

На рисунке представлены последние достижения в области высокоскоростных декодеров типа МПД на современных ПЛИС для кодовой скорости  $R \approx 1/2$ . Кривая МПД ПЛИС Xilinx относится к разработке сверточного МПД на ПЛИС Xilinx [2] со скоростью до 480 Мбит/с. Каскадная схема с использованием того же кода и кода контроля по четности (ККЧ) обеспечивает характеристики, показанные на рисунке кривой КК1 + МПД. Они мало отличаются от возможности стандартной и весьма эффективной каскадной схемы декодирования с АВ и декодером кода Рида-Соломона (РС) (график АВ + РС), но оказывается значительно проще, поскольку при использовании каскадирования с МПД наличие второго кода типа ККЧ добавляет всего две операции на каждый бит данных по сравнению с обычным МПД. Это не идет ни в какое

сравнение со сложностью дополнительного декодера для кода РС. При этом каскадный МПД легко реализовать, как и обычный МПД декодер, для скоростей до 500 Мбит/с и выше.

Кривая КК2 + МПД соответствует МПД декодеру с объемом памяти, увеличенным по сравнению с первым примером в 1,8 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 приведет к абсолютному преимуществу такой каскадной схемы относительно варианта каскадных кодов АВ + РС вплоть до вероятностей ошибки на бит  $P_b(e) \approx 10^{-9}$ .

Далее график МПД ПЛИС Altera приведен для декодера МПД с 40 итерациями декодирования. Подчеркнем важнейшее свойство такого аппаратного МПД: это 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 (см. рисунок). 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 в условиях столь высокого 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 лучших базовых 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 КК3 + МПД показывает возможность такой каскадной схемы с использованием МПД во внутренних каскадах. При этом применение каскадирования позволяет еще 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.

**Адаптивность МПД.** 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 этого можно достичь за счет увеличения памяти декодера, а для уменьшения задержки можно перейти от сверточных кодов к блочным или несколько трансформировать пороговые элементы декодера.

Вообще МПД 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 дает возможность легко адаптировать МПД декодеры под любые задачи повышения достоверности передачи и достигать требуемых характеристик в самые короткие сроки и простейшими средствами. В частности, характеристики МПД для сверточного кода, отмеченные на графике как МПД ПЛИС Altera, соответствующие весьма большой задержке декодирования при максимальной производительности, которая в случае применения ПЛИС Altera может достигать 320-600 Мбит/с по скорости информационного потока, допускает снижение задержки декодирования в 10 и

более раз, если допустимы энергетические характеристики на уровне каскадного кода АВ + РС, также представленного на рисунке.

Другим примером глубокой адаптивности МПД является преобразование МПД для сверточных кодов в блочный для каналов с небольшой скоростью передачи данных. При традиционном преобразовании сверточного кода в блочный высокая производительность ПЛИС обычно используется не с должной эффективностью. Поэтому рассмотрим новый вариант применения МПД для такого блочного кода, который состоит из многократных попытках коррекции принятого сообщения этим алгоритмом, но с различными настройками весов и порогов при каждой попытке коррекции [3, 7]. В связи с этим результаты декодирования при каждой попытке коррекции будут, возможно, в некоторой части символов не совпадать. Если затем выбрать результирующий информационный вектор мажоритарным образом поразрядно, например, по пяти попыткам коррекции, то следует ожидать, что и эта процедура приведет к дополнительному снижению доли ошибок в результирующем сообщении по сравнению с каждой из пяти попыток коррекции. Далее сформированный вектор можно снова подвергнуть коррекции методами МПД, в результате чего следует ожидать, что и этот усредненный вектор-решение будет хотя бы частично дополнительно улучшен.

Моделирование работы такого алгоритма показало, что его применение примерно на 0,3 дБ улучшает характеристики алгоритма. Такого улучшения характеристик блочного кода относительно сверточного обычно не наблюдается. А в приведенном примере в дополнение к улучшению энергетики декодирования происходит и многократное уменьшение задержки решения, что обеспечивается переходом к блочному кодированию вместо сверточного при намного более интенсивном использовании высокопроизводительной ПЛИС, которая несколько десятков раз обрабатывает принятое сообщение при каждой попытке коррекции с многократными итерациями.

Использование МПД позволяет также обобщать широко применяемые этим алгоритмом принципы оптимизации на всю систему приема цифрового потока, т.е. на сигнально-кодированную конструкцию в целом. В частности, поскольку в цифровых модемах системы связи можно организовать несколькими способами перераспределение энергетики между информационным и проверочным потоком данных, суммарную энергетiku передачи в целом можно дополнительно существенно понизить, что обычно и требуется от систем кодирования. Например, если взять график МПД ПЛИС  $X_{11} \times X_{11}$  на рисунке, который соответствует разработке МПД на ПЛИС  $X_{11} \times X_{11}$  [2], то без доработок декодера совместная оптимизация алгоритма и сигнально-кодированной конструкции для простой системы модуляции ФМ4 снижает допустимый уровень сигнала более чем на 1 дБ. Поскольку исходная энергетика МПД на ПЛИС согласно графику и так весьма мала, рассмотренная оптимизация должна считаться чрезвычайно эффективной, особенно с учетом того, что она не требует никаких доработок уже созданного МПД на ПЛИС. Некоторое повышение вероятности ошибки декодирования МПД для рассмотренной сигнально-кодированной конструкции легко компенсируется простейшим внешним кодом с  $R \approx 0,98$  и энергетическими потерями менее 0,1 дБ.

Выводы. Рассмотренные созданные и проектируемые простые аппаратные варианты МПД декодеров способны работать при отношении битовой энергетики к спектральной плотности мощности шума до 1,5 дБ и менее. 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 цифровых телевизионных системах.

Высокий уровень адаптивности МПД позволяет простыми методами согласовывать их характеристики с требованиями, предъявляемыми к ним системами связи. Широкое применение МПД в каналах с большим уровнем шума позволяет обеспечить более полное использование их емкости при вполне умеренных производственных и финансовых затратах на разработку систем кодирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В. Многопороговые декодеры: перспективы аппаратной реализации // В сб.: "7-я Международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Вып. VII-1. - М., 2005.
2. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Строков В.В. Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы // Электросвязь. - 2005. - № 2.
3. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник // Под редакцией Ю.Б. Зубарева. — М.: Горячая линия - Телеком. - 2004.
4. Berrou C, Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes // Proceeding of ICC'93. - Geneva, Switzerland, May 1993.
5. [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru).
6. Zolotarev V.V. The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels // In Proc. 7-th Int. Symp. on Comm. Theory and applications, ISCTA'03, July, 2003.
7. Дмитриева Т.А., Золотарев В.В. Разработка алгоритма декодирования на основе многопорогового декодера // В сб.: "8-я Международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Вып. VIII-1. - М. - 2006.

Получено 1.09.06



## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

## По материалам Международной научно-технической конференции - "DSPA'2006"

Развитие современных информационных технологий характеризуется широким практическим использованием методов и техники цифровой обработки сигналов (ЦОС) - одной из самых динамичных и быстро развивающихся технологий в мире телекоммуникаций и информатизации общества.

Отвечая целям и задачам консолидации и поддержки отечественных ученых и специалистов, работающих в области передовых информационных технологий реального времени, расширения международных научных связей и содействия внедрению высоких наукоемких технологий XXI века, Российское им. А.С. Попова совместно с компанией AUTEX.Ltd при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и при участии Федерального агентства по промышленности РФ, Министерства образования и науки РФ, Российской секции IEEE Signal Processing Society, Института радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН, Института проблем управления (ИПУ) РАН, Института проблем передачи информации (ИППИ) РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МТУСИ, МАИ, МЭИ и других ведущих российских вузов и организаций провели 29-31 марта 2006 г. в ИПУ РАН (Москва) 8-ю Международную научно-техническую конференцию и выставку "Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA'2006". В конференции и выставке приняли участие более 1200 человек из 34 городов России и стран СНГ, а также ученые из США, Германии, Финляндии, Польши, Таиланда, Пакистана и Ирана.

Работа конференции проходила в десяти секциях, восемь из которых были непосредственно связаны с решением актуальных научных проблем в области информационно-телекоммуникационных технологий. Это - "Теория сигналов и систем" (руководители - д.т.н., проф. Ю.С. Шинаков и д.т.н., проф. М.С. Немировский); "Теория и методы цифровой обработки сигналов" (д.т.н., проф. Ю.А. Брюханов); "Обработка сигналов в системах телекоммуникаций" (д.т.н., проф. Ю.Н. Прохоров); "Обработка и передача изображений" (д.т.н. В.П. Дворкович и к.ф.-м.н. А.В. Дворкович); "Цифровое радиовещание" (к.т.н., доц. Е.П. Зелевич и к.т.н., с.н.с. В.И. Щербина); "Цифровая обработка многомерных сигналов" (д.т.н., проф. В.Г. Миронов и к.т.н., доц. М.К. Чобану); "Проектирование и техническая реализация систем ЦОС" (д.т.н., проф. В.В. Витязев); "Нейрокомпьютерная обработка сигналов и изображений" (д.т.н., проф. А.И. Галушкин). На конференции было заслушано около 200 докладов, по материалам которых изданы "Труды конференции" в 2-х томах, общим объемом - 667 стр.

В своем приветствии к участникам конференции председатель Национального комитета член-корр. РАН Ю.Б. Зубарев отметил масштабность и значимость для России открывающегося научного форума, растущий из года в год интерес широкой аудитории его участников к проблемам цифровых информационных технологий реального времени, все более нарастающий приток молодежи.

На пленарном заседании в день открытия конференции были заслушаны шесть обзорных докладов, в которых нашли отражение вопросы теории и практики построения систем цифровой обработки изображений и звука в самых различных приложениях. Основной акцент был сделан в направлении решения проблем мобильного узкополосного вещания и IP TV (В.П. Дворкович, А.В. Дворкович, Ю.Б. Зубарев и др., ФГУП "НИИ радио", Москва), многоскоростной фильтрации и сжатия изображений (Т. Сарамьяки, Институт обработки сигналов Тамперского технологического университета, Финлян-

дия), обработки и воспроизведения звука (Р. Рабинштейн, С. Споре, Нюрнбергский университет, лаборатория телекоммуникаций, Германия), построения оптимальных декодеров на основе многопороговых алгоритмов (В.В. Золотарев, Ю.Б. Зубарев, МНИТИ, Москва).

Одновременно с работой конференции компанией AUTEX.Ltd была организована выставка новых информационных технологий реального времени и инструментальных средств ЦОС, в работе которой приняли участие ведущие в этой области отечественные предприятия и фирмы: ЗАО AUTEX.Ltd, ЗАО "Инструментальные системы", компании AVD Systems, Alternative Solutions, ЗАО "L-Card", ООО "Растр технологичи", НТЦ "Модуль", ГУП НПЦ "ЭЛВИС", ООО "Руднев-Шилляев", ООО "Центр АЦП", ООО "НПП Цифровые решения" и др.

В дни работы конференции и выставки состоялись семинары-презентации по новым разработкам в области DSP-технологий, которые провели хорошо зарекомендовавшие себя на российском рынке фирмы: ГУП НПЦ "ЭЛВИС", ЗАО "Инструментальные системы", ЗАО "СПИРИТ" и др. Как и в предыдущие годы, наиболее представительным и посещаемым был специализированный семинар компаний Analog Devices Inc.-AUTEX. Ltd по DSP-продукции Analog Devices, привлекший внимание более 400 участников.

С целью создания условий для всестороннего открытого обсуждения проблем и перспектив развития DSP-технологий и их широкого использования в разработках отечественных ученых и специалистов в первый день работы конференции был проведен "Круглый стол - DSPA" с участием представителей ведущих в этой области российских фирм и организаций.

В последние годы в рамках конференции все большее внимание уделяется поддержке молодых ученых, аспирантов и студентов. Проводятся конкурсы на лучший научный доклад, организуются семинары-презентации по университетским программам, активизируется работа учебно-методической секции. Награждение лауреатов конкурса молодых ученых состоялось на заключительном заседании в день закрытия работы конференции.

Следующая 9-я Международная конференция и выставка "DSPA'2007" состоится в марте 2007 г. в ИПИ РАН (Москва).

Представляемый ниже тематический выпуск "Цифровая обработка сигналов в системах телекоммуникаций" не претендует на полный охват всего спектра обсуждаемых на конференции проблем и их решений. Вместе с тем, предлагаемые вашему вниманию работы отражают наиболее актуальные направления исследований российских ученых в области применения ЦОС в информационно-телекоммуникационных системах. Это прежде всего вопросы кодирования-декодирования в системах цифровой связи, повышения эффективности высокоскоростной передачи данных в мобильных сетях на основе технологий OFDM (ортогонального частотного разделения с мультиплексированием) и MIMO (многоантенных систем как на передающей, так и на приемной стороне), эхо-компенсации в проводной телефонии в ситуации встречного разговора, цифровой фильтрации и детектирования в нелинейных радиоприемных устройствах.

В.В. Витязев

*Зам. председателя Национального комитета конференции "DSPA'2006", член редколлегии журнала "Электросвязь", профессор*

## МНОГОПороГОВЫЕ АлГОРИТМЫ ДЛя СПУТНИКОВЫХ СЕТЕЙ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ\*

Ю.Б. Зубарев, член-корр. РАН, д.т.н.

В.В. Золотарев, главный специалист ИКИ РАН, д.т.н.

Г.В. Овечкин, доцент РГРТУ, к.т.н.

Т.А. Дмитриева, аспирант РГРТУ

Важнейшим аспектом развития информатики и телекоммуникаций в наше время стал всеобщий переход систем связи и обработки данных на цифровые методы создания, хранения и передачи информации. В последнее десятилетие прошлого тысячелетия стало реальностью преобразование почти всех источников информации и систем их передачи в цифровой вид. Переход на цифровую обработку будет завершен, видимо, лишь через 15-20 лет. Практически все страны мира уже сформировали национальные и международные программы перехода на цифровую обработку и передачу данных. В настоящий момент мир находится примерно в первой трети длинного и очень непростого пути к полной цифровизации общества.

Большое значение для научно-технической поддержки этого сложного социального и технологического процесса имеют современные методы обеспечения высокой достоверности цифрового обмена. Их реализация при отказе от аналоговых сообщений и переходе к дискретным данным становится чрезвычайно важной задачей, которая должна быть решена с учетом перспектив развития цифровых сетей связи, в том числе спутниковых. Ведущая роль при разрешении этой сложнейшей технологической проблемы отводится мощным современным методам помехоустойчивого кодирования, которые позволяют действительно эффективно использовать дорогие каналы цифровой связи.

Если в какой-то системе цифровой связи не используются корректирующие коды, это говорит об очень неэффективном использовании пропускной способности канала, обычно не превышающего нескольких процентов от его теоретически рассчитанной емкости. Причем, если требования к качеству и достоверности цифровой передачи повышаются, эффективность использования канала еще больше падает, поскольку при этом нужно, например, или увеличить мощность передачи, или снизить скорость обмена данными. Подчеркнем, что требования к достоверности передачи данных для всех конкурентоспособных эксплуатируемых и новых проектируемых систем и сетей связи быстро растут, и этот процесс, несомненно, длительный. Более того, неизбежная и очень полезная тенденция кодирования, предварительной "упаковки" информационных цифровых данных, особенно аудио- и визуальных, будет развиваться в направлении все большего сжатия исходной информации. Это уже привело к тому, что значительно возросла "хрупкость" сильно сжатых изображений, которые восстанавливаются с большими искажениями, даже если лишь ничтожная доля битов этого "упакованного" изображения принята из канала неправильно. Тем самым еще быстрее повышаются требования к достоверности передачи таких "упакованных" данных.

**Основные технологии кодирования.** 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, рабо-

тающие по алгоритму Витерби (AB). График вероятности ошибки на бит  $P_b/e$  как функции от отношения битовой энергии к спектральной плотности мощности шума  $E_b/N_0$ , при кодовой скорости  $R = 1/2$  для AB со стандартным кодом длины  $K = 7$  и гауссовского шума, который имеет место в спутниковых и космических каналах связи, представлен на рисунке кривой AB,  $K = 7$ .

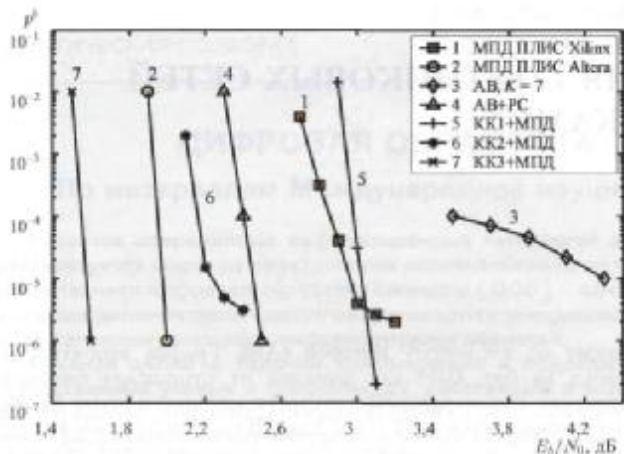
Отметим, что кроме традиционных значений эффективности, выражаемых величиной рабочих значений  $E_b/N_0$  для некоторых кодов и их декодеров или энергетического выигрыша (ЭВК), можно также говорить о к.п.д. используемых  $E_b/N_0$  для случая  $R = C$ , т.е. равенства кодовой скорости и пропускной способности 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 AB увеличилась с нескольких процентов до примерно 30%. Напомним, что для равенства  $R = C$  достигается при  $E_b/N_0 = 0,2$  дБ для гауссовского канала и приема в целом.

Ясно, что применение AB - 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 ЭВК, что позволило бы в дальнейшем повысить эффективность использования ресурсов цифровых сетей.

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

Следующие поиски новых методов кодирования за рубежом дали существенные результаты только в 1993 г., когда были открыты турбокоды 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 турбокоды действительно доказали, что работа в непосредственной близости от пропускной способности канала стала технологически доступной целью. Но в той же степени все известные в настоящее время

\* Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант №05-07-90024в.



турбоподобные методы убедительно продемонстрировали, что фундаментальная проблема теории кодирования - сложность декодирования, о которой для непростых в реализации турбодекодеров не очень сильно заботились, все же не была решена в требуемой мере даже с учетом продолжающегося прогресса микроэлементной базы. Таким образом, проблема сложности декодирования остается для техники связи очень актуальной.

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

В настоящее время разработаны МПД декодеры на ПЛИС Xilinx для скоростей передачи от 160 до 480 Мбит/с с 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 15 Мбит/с [5], даже для различных цифровых телевизионных систем: В этом направлении также ведутся новые разработки.

На рисунке представлены последние достижения в области высокоскоростных декодеров типа МПД на современных ПЛИС для кодовой скорости  $R \approx 1/2$ . Кривая МПД ПЛИС Xilinx относится к разработке сверточного МПД на ПЛИС Xilinx [2] со скоростью до 480 Мбит/с. Каскадная схема с использованием того же кода и кода контроля по четности (ККЧ) обеспечивает характеристики, показанные на рисунке кривой КК1 + МПД. Они мало отличаются от возможности стандартной и весьма эффективной каскадной схемы декодирования с АВ и декодером кода Рида-Соломона (РС) (график АВ + РС), но оказывается значительно проще, поскольку при использовании каскадирования с МПД наличие второго кода типа ККЧ добавляет всего две операции на каждый бит данных по сравнению с обычным МПД. Это не идет ни в какое

сравнение со сложностью дополнительного декодера для кода РС. При этом каскадный МПД легко реализовать, как и обычный МПД декодер, для скоростей до 500 Мбит/с и выше.

Кривая КК2 + МПД соответствует МПД декодеру с объемом памяти, увеличенным по сравнению с первым примером в 1,8 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 приведет к абсолютному преимуществу такой каскадной схемы относительно варианта каскадных кодов АВ + РС вплоть до вероятностей ошибки на бит  $P_b(e) \approx 10^{-9}$ .

Далее график МПД ПЛИС Altera приведен для декодера МПД с 40 итерациями декодирования. Подчеркнем важнейшее свойство такого аппаратного МПД: это 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 (см. рисунок). 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 в условиях столь высокого 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 лучших базовых МПД в каскадных конструкциях совместно с внешними кодами с минимальным кодовым расстоянием  $d = 3-9$  также обеспечивает значительное улучшение энергетических характеристик при декодировании. График КК3 + МПД показывает возможность такой каскадной схемы с использованием МПД во внутренних каскадах. При этом применение каскадирования позволяет еще 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.

**Адаптивность МПД.** 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 этого можно достичь за счет увеличения памяти декодера, а для уменьшения задержки можно перейти от сверточных кодов к блоковым или несколько трансформировать пороговые элементы декодера.

Вообще МПД 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 дает возможность легко адаптировать МПД декодеры под любые задачи повышения достоверности передачи и достигать требуемых характеристик в самые короткие сроки и простейшими средствами. В частности, характеристики МПД для сверточного кода, отмеченные на графике как МПД ПЛИС Altera, соответствующие весьма большой задержке декодирования при максимальной производительности, которая в случае применения ПЛИС Altera может достигать 320-600 Мбит/с по скорости информационного потока, допускает снижение задержки декодирования в 10 и

более раз, если допустимы энергетические характеристики на уровне каскадного кода АВ + РС, также представленного на рисунке.

Другим примером глубокой адаптивности МПД является преобразование МПД для сверточных кодов в блочный для каналов с небольшой скоростью передачи данных. При традиционном преобразовании сверточного кода в блочный высокая производительность ПЛИС обычно используется не с должной эффективностью. Поэтому рассмотрим новый вариант применения МПД для такого блочного кода, который состоит из многократных попытках коррекции принятого сообщения этим алгоритмом, но с различными настройками весов и порогов при каждой попытке коррекции [3, 7]. В связи с этим результаты декодирования при каждой попытке коррекции будут, возможно, в некоторой части символов не совпадать. Если затем выбрать результирующий информационный вектор мажоритарным образом поразрядно, например, по пяти попыткам коррекции, то следует ожидать, что и эта процедура приведет к дополнительному снижению доли ошибок в результирующем сообщении по сравнению с каждой из пяти попыток коррекции. Далее сформированный вектор можно снова подвергнуть коррекции методами МПД, в результате чего следует ожидать, что и этот усредненный вектор-решение будет хотя бы частично дополнительно улучшен.

Моделирование работы такого алгоритма показало, что его применение примерно на 0,3 дБ улучшает характеристики алгоритма. Такого улучшения характеристик блочного кода относительно сверточного обычно не наблюдается. А в приведенном примере в дополнение к улучшению энергетики декодирования происходит и многократное уменьшение задержки решения, что обеспечивается переходом к блочному кодированию вместо сверточного при намного более интенсивном использовании высокопроизводительной ПЛИС, которая несколько десятков раз обрабатывает принятое сообщение при каждой попытке коррекции с многократными итерациями.

Использование МПД позволяет также обобщать широко применяемые этим алгоритмом принципы оптимизации на всю систему приема цифрового потока, т.е. на сигнально-кодировую конструкцию в целом. В частности, поскольку в цифровых модемах системы связи можно организовать несколькими способами перераспределение энергетики между информационным и проверочным потоком данных, суммарную энергетiku передачи в целом можно дополнительно существенно понизить, что обычно и требуется от систем кодирования. Например, если взять график МПД ПЛИС  $X_{11} \times X_{11}$  на рисунке, который соответствует разработке МПД на ПЛИС  $X_{11} \times X_{11}$  [2], то без доработок декодера совместная оптимизация алгоритма и сигнально-кодировой конструкции для простой системы модуляции ФМ4 снижает допустимый уровень сигнала более чем на 1 дБ. Поскольку исходная энергетика МПД на ПЛИС согласно графику и так весьма мала, рассмотренная оптимизация должна считаться чрезвычайно эффективной, особенно с учетом того, что она не требует никаких доработок уже созданного МПД на ПЛИС. Некоторое повышение вероятности ошибки декодирования МПД для рассмотренной сигнально-кодировой конструкции легко компенсируется простейшим внешним кодом с  $R \approx 0,98$  и энергетическими потерями менее 0,1 дБ.

Выводы. Рассмотренные созданные и проектируемые простые аппаратные варианты МПД декодеров способны работать при отношении битовой энергетики к спектральной плотности мощности шума до 1,5 дБ и менее. 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 цифровых телевизионных системах.

Высокий уровень адаптивности МПД позволяет простыми методами согласовывать их характеристики с требованиями, предъявляемыми к ним системами связи. Широкое применение МПД в каналах с большим уровнем шума позволяет обеспечить более полное использование их емкости при вполне умеренных производственных и финансовых затратах на разработку систем кодирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В. Многопороговые декодеры: перспективы аппаратной реализации // В сб.: "7-я Международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Вып. VII-1. - М., 2005.
2. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Строков В.В. Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы // Электросвязь. - 2005. - № 2.
3. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник // Под редакцией Ю.Б. Зубарева. — М.: Горячая линия - Телеком. - 2004.
4. Berrou C, Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes // Proceeding of ICC'93. - Geneva, Switzerland, May 1993.
5. [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru).
6. Zolotarev V.V. The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels // In Proc. 7-th Int. Symp. on Comm. Theory and applications, ISCTA'03, July, 2003.
7. Дмитриева Т.А., Золотарев В.В. Разработка алгоритма декодирования на основе многопорогового декодера // В сб.: "8-я Международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Вып. VIII-1. - М. - 2006.

Получено 1.09.06