

**ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ:
КОДИРОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМАХ
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

ТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОДБОРКА

ТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОДБОРКА

Предлагаемая вниманию читателей тематическая подборка статей выходит в преддверии 7-й Международной научно-технической конференции и выставки "Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA'2005" (14—16 марта 2005 г., ИГУ РАН, г. Москва). Подборка охватывает широкий круг вопросов, связанных с разработкой новых методов кодирования, модуляции и преобразования сигналов, направленных на дальнейшее повышение пропускной способности и помехоустойчивости систем передачи данных. В настоящую подборку вошли статьи, подготовленные к публикации по материалам и докладам, которые были представлены на предыдущей 6-й МНТК и выставке.

Заинтересованный читатель познакомится с новыми результатами исследований в области: синтеза сверхширокополосных сигналов с большой базой, применяющих амплитудную и внутриблоковую позиционную модуляцию; построения технически реализуемых кодеков (с кодовой скоростью, близкой к предельной), использующих нелинейные блочные корректирующие коды; разработки гибридной стратегии автоматической повторной передачи пакетов данных на основе свойства делимости помехоустойчивого кода.

Определенный практический интерес вызывают и представленные результаты исследований, связанные с имитационным моделированием многоуровневых линейных сигналов, применяемых в технологии xDSL для оценки их спектральных характеристик, а также анализа искажений структуры потока данных и определения статистических параметров канала Radio-Ethernet.

УДК 621.391.15

МНОГОПороГОВЫЕ ДЕКОДЕРЫ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СПУТНИКОВЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ: НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Ю.Б. Зубарев, член-корр. РАН, д.т.н., профессор

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

С.Е. Жуков, директор НТЦ АСС ФГУП НИИР

В.В. Строков, начальник отдела ФГУП "НИВЦ ВС", к.т.н.

Г.В. Овечкин, доцент Рязанской государственной радиотехнической академии, к.т.н.

Развитие методов цифровой передачи и обработки данных в значительной степени определяется возможностями систем обеспечения высокой достоверности передаваемой информации. Наиболее эффективным средством повышения достоверности цифровой информации является применение помехоустойчивого кодирования. Обзор наиболее перспективных методов кодирования по критерию "эффективность-производительность" проведен в [1], где указано, что наибольшее предпочтение в высокоскоростных каналах спутниковой связи заслуживают многопороговые декодеры (МПД) [2].

Ниже рассматриваются возможности этих новых методов коррекции ошибок, которые были разработаны в виде программных и аппаратных средств для систем спутниковой связи, создаваемых в ФГУП НИИР при тесном сотрудничестве с другими организациями и ведущими специалистами в области систем кодирования [3, 4].

Критерии эффективности применения кодирования. Как известно, наиболее общим показателем для качественной оценки методов декодирования является энергетический выигрыш кодирования (ЭВК). Он показывает величину допустимого снижения энергии, необходимой для передачи одного бита данных с некоторой выбранной средней вероятностью ошибки на бит $P_b(e)$ при использовании тех или иных алгоритмов кодирования и декодирования, по сравнению со случаем, когда кодирование отсутствует.

Возможности кодирования для обеспечения требуемой эффективности по критерию ЭВК представлены для когерентной двоичной фазовой манипуляции ФМ2 на рис. 1. Граница Шеннона на рисунке указана при условии, когда кодовая скорость $R = 0$ и число уровней квантования M достаточно велико, $M \gg 1$, т. е. сигнал на входе декодера непрерывный. Это соответствует минимально возможному отношению битовой энергии передачи E_b к спектральной плотности мощности

шума N_0 : $a = E_b/N_0$. Она и все другие представленные здесь границы получены из естественного условия $R \leq C$. Разумеется, при получении этих предельных оценок предполагается, что используется оптимальное декодирование со сколь угодно высокой сложностью реализации. Тогда заданные средние вероятности $P_b(e)$, скорость R и число уровней квантования модема M определяют в достаточно общем смысле меру эффективности кодирования. При переходе от $M = 2$ (случай "жесткого" модема, просто определяющего, какой символ пришел из канала) к "мягкому" модему с $M=8$, который оценивает надежность своих решений, возможно получение дополнительного ЭВК около 2 дБ. При увеличении R , наоборот, предельные возможности кода даже при наилучшем декодировании заметно снижаются. Ясно, что если требования к достоверности передачи растут, то достижимая величина ЭВК значительно возрастает. А это значит, что ценность использования кодирования в дальнейшем будет только расти, поскольку экономическая ценность его применения, исчисляемая десятками миллионов долларов, быстро увеличивается [1, 3].

В качестве примера кривая АВ на рис. 1 показывает возможности стандартного алгоритма Витерби для сверточных кодов с $R = 1/2$ и длиной кодирующего информационного регистра $K = 7$, которые широко используются в настоящее время. Алгоритм Витерби обеспечивает ЭВК порядка 5,2 дБ при $P_b(e) = 10^{-5}$, что можно признать значимым достижением для начала 70-х годов, когда этот алгоритм был реализован аппаратно. Отметим, что почти 2 дБ от полных 5,2 дБ ЭВК, как было указано выше, получены за счет "мягкого" модема. График M_2 приведен для случая работы МПД с "жестким" модемом [4]. Характеристики столь простого МПД лучше, чем АВ из-за применения гораздо более длинных кодов и их практически оптимального декодирования с помощью многопорогового алгоритма.

Реализация МПД. Программные варианты. Разработанные в НИИР программные варианты МПД [5] достигли очень высокого уровня быстродействия. К настоящему времени удалось существенно снизить среднее число операций декодирования N на двоичный символ кода. Программный МПД должен выполнять $N = 50-400$ операций в зависимости от уровня шума и избыточности используемого кода. По сравнению с другими алгоритмами с близкой эффективностью МПД на два порядка проще по числу операций [6, 7].

Подобная разница в сложности прикладных алгоритмов в настоящее время вообще чрезвычайно редка и совершенно неожиданная возможность столь больших преимуществ любого подобного метода должна максимально использоваться в соответствующих областях. Учет всех особенностей МПД позволил реализовать чрезвычайно быстрые и простые программные МПД для цифровых телевизионных систем, созданных в НИИР для использования с серийными процессорами. Энергетический выигрыш кодирования МПД для этих систем примерно на 3 дБ выше, чем АВ, в частности, при кодовой скорости $R = 3/4$, а быстродействие оказывается примерно в 4 раза выше.

Применение сигнальных процессоров и специализированных микропроцессоров позволяет достигать производительности программных МПД, составляющей десятки мегабитов в секунду [6-8].

Развитие этого перспективного направления в НИИР будет продолжено.

Аппаратная версия. Чипсет одного из вариантов реализации МПД на ПЛИС Xilinx показан на рис. 2. Этот МПД является дальнейшим развитием (начиная с 1975 г.) серии декодеров сверточных кодов на базе МПД и может считаться представителем их пятого поколения в НИИР.

Характеристики сверточного МПД при кодовой скорости $R = 1/2$ представлены на рис. 3. В нем полностью реализованы все возможности алгоритмов данного класса по распараллеливанию операций декодирования на аппаратном уровне. В результате производительность декодера ограничивается только скоростью движения данных по его регистрам сдвига, которые относятся к самым быстрым элементам схемотехники ПЛИС. Этим и определяется очень высокая производительность МПД на ПЛИС, которая составляет в различных реализованных вариантах многопорогового декодера от 160 до 480 Мбит/с и может быть еще существенно увеличена.

Как следует из графиков, представленных на рис. 3, очень простой сверточный МПД с быстродействием порядка 200 Мбит/с и задержкой около 10000 битов оказывается на 1,5 дБ лучше стандартного АВ с длиной кодового регистра $K=7$. Напомним, что улучшение ЭВК даже на 0,1 дБ считается очень серьезным достижением. Поэтому такая большая разница в ЭВК между АВ и МПД при фактически неограниченной производительности последнего позволяет утверждать, что создание в НИИР современных версий алгоритмов МПД на новейшей элементной базе является важнейшим научным и технологическим достижением в области методов помехоустойчивого кодирования.

Хорошо известно, что наиболее эффективными по критерию ЭВК являются разнообразные каскадные схемы кодирования. На рис. 3 графики КК1 и КК2 показывают возможности каскадных схем с МПД, использующих в качестве внешнего кода коды контроля на четность. Общая кодовая скорость данных каскадных схем остается близкой к $R \sim 1/2$. В первом случае для КК1 задержка декодирования составляет порядка 10 000 битов, во втором - для КК2 она близка к 40 000 битов. В обоих вариантах реализации каскадных схем производительность декодеров превышает 150 Мбит/с и также может быть значительно увеличена. Подчеркнем, что реализованное в МПД каскадирование с кодами контроля по четности, для чего в схему кодирования добавляется всего один полусумматор, оказывается несравненно проще, чем в каскадной схеме АВ с кодами Рида-Соломона. При этом каскадная схема с МПД оказывается эффективнее как по ЭВК, так и по кодовой скорости [7-8].

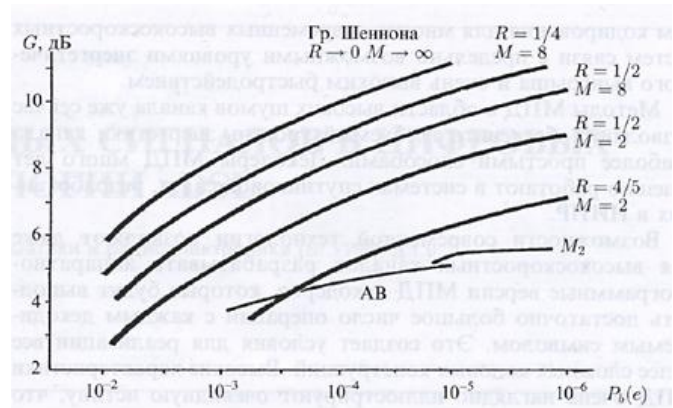


Рис. 1



Рис. 2

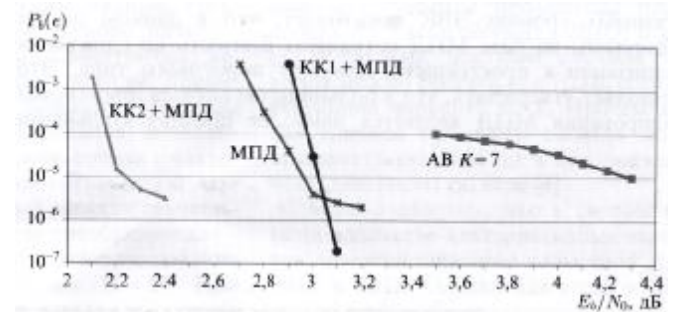


Рис. 3

Перспективы применения алгоритмов МПД. Применение более плотноупакованных кристаллов ПЛИС Spartan фирмы Xilinx позволяет перейти к схемам декодирования на основе МПД, которые обеспечивают уровень энергетики $a = E_b/N_0 \sim 1,6$ дБ, сохраняя предельно высокую производительность МПД. При отсутствии высоких требований к быстродействию МПД он обеспечит $a \sim 1,0$ дБ при задержке порядка 400 тысяч битов и быстродействии порядка 20 Мбит/с.

Уточнение технологических возможностей ПЛИС новых типов при реализации МПД в НИИР в ближайшее время будет завершено. В течение ближайших двух лет предусматривается достижение предельно возможных энергетических характеристик кодирования, близких к представленным на рис. 1, при сохранении весьма высокой производительности МПД - не менее 10 Мбит/с.

Большой объем дополнительной научной и учебно-методической информации об алгоритмах класса МПД можно найти на тематическом веб-сайте по алгоритмам МПД [8].

Выводы. Огромное преимущество МПД перед всеми другими схемами декодирования по числу операций и возможность их полного распараллеливания при аппаратной реализации позволяют считать, что в результате 30-летних исследований в НИИР разработан широкий класс многопороговых алгоритмов, которые могут быть признаны основным мето-

дом кодирования для многих современных высокоскоростных систем связи с предельно возможными уровнями энергетического выигрыша и очень высоким быстродействием.

Методы МПД в области высоких шумов канала уже сейчас позволяют обеспечить требуемый уровень энергетики канала наиболее простыми способами. Декодеры МПД много лет успешно работают в системах спутниковой связи, разработанных в НИИР.

Возможности современной технологии позволяют даже для высокоскоростных каналов разрабатывать аппаратно-программные версии МПД декодеров, которые будут выполнять достаточно большое число операций с каждым декодируемым символом. Это создает условия для реализации все более сложных кодовых конструкций. Высокие характеристики МПД очень наглядно иллюстрируют очевидную истину, что алгоритмы, нерационально использующие вычислительные ресурсы, будут всегда значительно проигрывать более простым методам, которые решают проблему декодирования более эффективно.

Несомненно, что проблемы сложности реализации кодирования сохранятся в обозримом будущем, а в связи с ростом скоростей обмена информацией требования более простой реализации декодеров будут все актуальнее. Самыми дешевыми при всех вариантах реализации окажутся алгоритмы, выполняющие только очень простые, однородные и быстрые операции. Наиболее полно этим требованием удовлетворяет МПД. А соответствие его возможностей характеристикам самых сложных методов коррекции ошибок делает МПД еще более привлекательным.

Таким образом, последнее десятилетие создало условия для достижения в реальной каналообразующей аппаратуре систем связи уровня энергетики, весьма близкого к теоретическим пределам для каналов космической и спутниковой связи. Высокие характеристики, кроме МПД, могут обеспечить всего несколько методов. Но учет проблемы сложности при сопоставимых уровнях ЭВК показывает, что в данном случае алгоритмы на базе МПД сохраняют близость по сложности реализации к простейшему декодеру порогового типа. Это позволяет утверждать, что в большинстве случаев применения кодирования МПД являются наиболее предпочтительными

для декодирования в приемлемых по стоимости высокоскоростных системах связи.

Представленные возможности МПД демонстрируют высокий уровень российских разработок в сфере систем связи различного назначения, опережающий зарубежные исследования этого типа примерно на 5-7 лет. Рассмотренные в этой статье достижения НИИ Радио обеспечивают эффективное повышение достоверности передачи в цифровых спутниковых, космических и других каналах связи самого широкого назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Золотарёв В.В., Овечкин Г.В.** Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи// *Электросвязь*. - 2003. - № 9.
2. **Самойленко СИ., Давыдов А.А., Золотарёв В.В., Третьякова Е.И.** Вычислительные сети. - М: Наука, 1981. - 278 с.
3. **Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В.** Новые технологии обеспечения высококачественной связи по радиоканалам с большим шумом на основе многопороговых декодеров/ *Труды 6-й Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение"*. Вып. VI-I. - Москва, 2004.
4. **Золотарёв В.В.** Энергетическая эффективность новейших методов помехоустойчивого кодирования/ *Современные и перспективные разработки и технологии в космическом приборостроении. Сборник докладов выездного семинара ИКИ РАН*. - Таруса, 2004.
5. **Zolotarev V.V.** The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels// *In Proc. 7-th International Symposium on Communication Theory and applications, ISCTA'03, July, 2003, Ambleside, UK*, pp.18-22.
6. **Золотарёв В.В., Овечкин Г.В.** Сравнение сложности реализации эффективных методов декодирования помехоустойчивых кодов/ *Труды 6-й Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение"*. Вып. VI-1, Москва, 2004.
7. **Золотарёв В.В., Овечкин Г.В.** Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. Под ред. члена-корр. РАН Ю.Б. Зубарева. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004. - 128 с.
8. Золотарёв В.В. Многопороговые декодеры. Специализированный веб-сайт www.mtdbest.iki.rssi.ru.

Получено 10.12.04