

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ

Золотарев В.В.¹, Овечкин Г.В.²

¹Научно-исследовательский институт радио, г. Москва

²Рязанская государственная радиотехническая академия, г. Рязань

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» [1] показал, что наибольшее предпочтение в высокоскоростных каналах спутниковой связи заслуживают многопороговые декодеры (МПД) [2]. В докладе рассмотрены возможности этих методов коррекции ошибок, разработанных в виде программных и аппаратных средств ФГУП НИИР при тесном сотрудничестве с другими организациями и ведущими специалистами в области систем кодирования [3,4].

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 всего $N=50-400$ операций для декодирования одного информационного бита в зависимости от уровня шума и избыточности используемого кода. По сравнению с другими алгоритмами с близкой эффективностью МПД оказывается примерно на два порядка проще по числу операций [6]. Подобная разница в сложности прикладных алгоритмов в настоящее время вообще чрезвычайно редка и сама совершенно неожиданная возможность столь больших преимуществ одного метода должна использоваться в соответствующих областях в максимально возможной степени. Такой подход позволил реализовать чрезвычайно быстрые и простые программные МПД для цифровых телевизионных систем, созданных в НИИР для использования с серийными процессорами. МПД для этих систем способен обеспечить энергетический выигрыш кодирования (ЭВК) примерно на 3 дБ более высокий, чем энергетический выигрыш алгоритма Витерби (АВ), в частности при кодовой скорости $R=3/4$, оказываясь одновременно примерно в 4 раза более быстродействующим, чем АВ. Применение сигнальных процессоров и специализированных микропроцессоров позволяет достигать производительности программных МПД, составляющей десятки мегабитов в секунду [5-7].

Кроме этого в НИИР активно ведутся работы по созданию аппаратных версий МПД. Чипсет одного из разработанных с НИИР вариантов реализации МПД сверточного кода на ПЛИС Xilinx типа Spartan-II показан на рис. 1. Этот МПД является развитием серии декодеров сверточных кодов на базе МПД и может считаться представителем их пятого поколения.

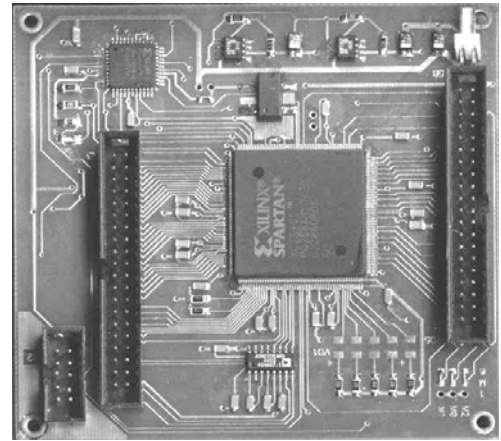


Рис. 1. ПЛИС МПД сверточного кода

Характеристики ПЛИС сверточного МПД при использовании кода с кодовой скоростью $R=1/2$ и кодовым расстоянием $d=9$ представлены на рис. 2 кривой «МПД эксперимент». Результаты эксперимента соответствуют случаю работы в канале с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании «мягкого» модема с 16 уровневой квантованием и двоичной фазовой модуляцией. В данной ПЛИС полностью реализованы все возможности алгоритмов этого класса по распараллеливанию операций

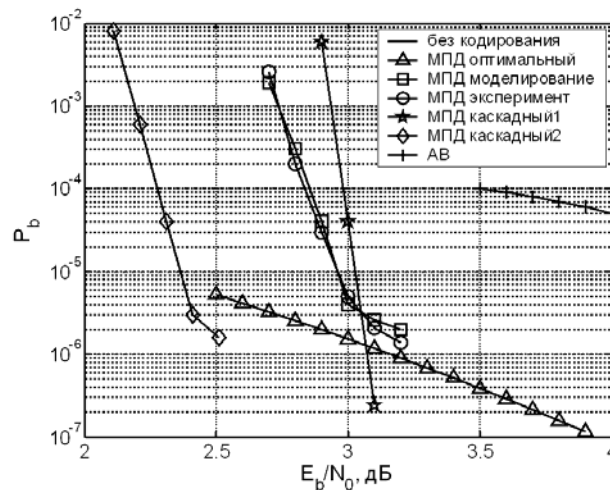


Рис. 2. Характеристики ПЛИС МПД сверточного кода в гауссовском канале

декодирования на аппаратном уровне. Поэтому 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 этого декодера от 160 до 480 Мбит/с и может быть еще существенно увеличена. Заметим, что данные характеристики хорошо согласуются с расчетными (кривая «МПД моделирование»), полученными путем проведения статистического моделирования на ЭВМ.

Как следует из вида графиков, представленных на рис. 2, очень простой сверточный МПД с быстродействием порядка 200 Мбит/с и с задержкой около 10000 битов оказывается на 1,5 дБ лучше стандартного алгоритма Витерби (АВ) с длиной кодового регистра $K=7$, характеристики которого представлены кривой «АВ». Напомним, что улучшение энергетического выигрыша кодирования (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. 2 кривыми «МПД каскадный1» и «МПД каскадный2» показаны возможности каскадных схем с МПД, использующих в качестве внешнего кода код контроля на четность. Общая кодовая скорость этих каскадных схем остается близкой к $R \sim 1/2$, а задержка декодирования составляет порядка 10000 битов для первого кода и 40000 битов – для второго. В данных вариантах реализации каскадных схем производительность декодера превышает 150 Мбит/с и также может быть значительно увеличена. Подчеркнем, что каскадирование в МПД с кодом контроля по четности, для чего в схему кодирования добавляется всего один полусумматор, оказывается во много раз проще, чем в каскадной схеме АВ с кодами Рида-Соломона, и эффективнее как по ЭВК, так и по кодовой скорости.

Применение более плотноупакованных кристаллов ПЛИС Spartan фирмы Xilinx позволяет перейти схемам декодирования на основе МПД, которые обеспечивают уровень энергетики E_b/N_0 порядка 1,6 дБ, сохраняя предельно высокую производительность МПД. При отсутствии высоких требований к быстродействию МПД он способен обеспечить энергетику около 1,2 дБ при задержке порядка 300 тысяч битов при быстродействии порядка 20 Мбит/с.

Уточнение технологических возможностей ПЛИС новых типов при реализации МПД в НИИР в ближайшее время будет завершено и достижение предельно возможных энергетических характеристик кодирования, близких к теоретическим границам, предусматривается в течение ближайших двух лет при сохранении высокой производительности МПД не менее 10 Мбит/с.

Помимо ПЛИС МПД сверточных кодов в НИИР разработана ПЛИС МПД блочного кода с кодовой скоростью $R=4/5$ и длиной порядка 4000 битов. Характеристики данной ПЛИС при работе с «жестким» модемом (в двоичном симметричном канале) представлены на рис. 3 кривой «МПД2 эксперимент». На данном рисунке также представлены результаты моделирования МПД блочного кода (кривая «МПД2 моделирование»), эффективность оптимального декодера данного кода (кривая «МПД2 оптимальный») и эффективность алгоритма Витерби для сверточного кода с $K=7$ и $R=4/5$ при работе с «жестким» (кривая «AB2») и «мягким» (кривая «AB16») модемами. Отметим, что МПД, работающий даже с «жестким» модемом,

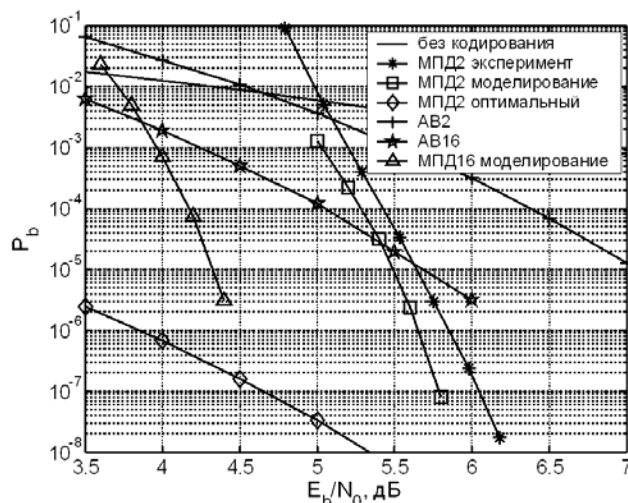


Рис. 3. Характеристики ПЛИС МПД блочного кода в ДСК

оказывается лучше алгоритма Витерби, работающего с «мягкими» решениями при $P_b < 10^{-5}$. При переходе к декодированию «мягких» решений характеристики МПД улучшатся еще примерно на 1,3 дБ (кривая «МПД16 моделирование»).

В настоящее время в НИИР ведутся работы по созданию ПЛИС МПД сверточного кода с кодовой скоростью $R=1/4$. Данная ПЛИС содержит код длиной 4000 и будет обеспечивать вероятность ошибки декодирования 10^{-6} при отношении сигнал/шум $E_b/N_0=2$ дБ.

В заключение заметим, что 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 методом кодирования для многих современных высокоскоростных систем связи с предельно возможными уровнями энергетического выигрыша и очень высоким быстродействием.

Большой объем дополнительной научной и учебно-методической информации об алгоритмах класса МПД можно найти на веб-сайте [7].

Литература

1. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи // Электросвязь, 2003. №9. С. 34–37.
2. Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарев В.В., Третьякова Е.И. Вычислительные сети. М.: «Наука», 1981. 278 с.
3. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В. Новые технологии обеспечения высококачественной связи по радиоканалам с большим шумом на основе многопороговых декодеров // 6-я Межд. конф. и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», М.: 2004. Т. 1. С. 3–8.
4. Золотарев 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. С. 312–318.
5. 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, Ambleside, UK, P. 18–22.
6. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Сравнение сложности реализации эффективных методов декодирования помехоустойчивых кодов // 6-я Межд. конф. и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», М.: 2004. Т. 1. С. 220–222.
7. Веб-сайт www.mtdbest.iki.rssi.ru.

