

УДК 621.396.946.2

МНОГОПороГОВЫЕ ДЕКОДЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Ю.Б. Зубарев¹, В.В. Золотарёв², С.Е. Жуков¹

- ¹ Федеральное государственное унитарное предприятие,
научно-исследовательский институт «Радио», Москва

- ² Институт космических исследований РАН, Москва

Введение

Передача информации по реальным каналам связи существенно усложняется наличием помех и искажений в канале. Эффективным средством повышения достоверности передаваемой информации является применение помехоустойчивого кодирования. Ниже изложены основы новых методов коррекции ошибок, которые были применены в системе спутниковой связи, разработанной Федеральным государственным унитарным предприятием, научно-исследовательским институтом «Радио» (ФГУП НИИР). Эти методы сравниваются с рядом других алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов.

За последние десятилетия теория и техника помехоустойчивого кодирования продвинулась далеко вперед. Появились мощные коды и методы их декодирования, обеспечивающие работу систем связи вблизи пропускной способности канала. 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, при некоторой выбранной средней вероятности ошибки на бит $P_b(e)$ в случае использования тех или иных алгоритмов кодирования и декодирования, по сравнению со случаем, когда кодирование отсутствует.

По оценкам зарубежных специалистов, проведенным более 20 лет назад [1], каждый 1 дБ ЭВК дает экономический эффект в миллионы долларов. Сейчас ценность ЭВК еще более возросла, поскольку при этом можно уменьшать размеры очень дорогих

антенн или повышать дальность связи, увеличивать скорость передачи или снижать необходимую мощность передатчика, улучшать другие важные свойства систем связи. Заметим, что стоимость современных систем связи растет все быстрее и уже совершенно не сопоставима с теми затратами, которые были возможны несколько десятилетий назад. Кроме того, сейчас существенно возрастают взаимные помехи приему между различными системами, появляется все больше экологических ограничений на мощность передатчиков, усиливается потребность в резком увеличении скоростей обмена данными между сетями, а также необходимость в значительном росте достоверности передачи информации. В дальнейшем эти тенденции в условиях глобализации экономики и взрывной информатизации общества будут только усиливаться.

Возможность значительного повышения достоверности передачи данных играет особую роль в различных системах связи общего и специального назначения. Достижение значительно более высоких, чем обычно, уровней энергетического выигрыша позволяет решить еще целый ряд особо ценных задач при работе аппаратуры кодирования в системах, изначально предназначенных для функционирования в сложных и постоянно меняющихся условиях передачи и приема цифровых данных.

В первую очередь это относится к возможности снижения уровня дублирования каналов связи, поскольку при этом оказывается возможным обеспечить малые вероятности недоставки или искажения передаваемых данных. Кроме того, как дополнительное, очень важное свойство системы связи, реализующей большие значения энергетического выигрыша кодирования (ЭВК), здесь следует рассматривать сам факт осуществления передачи в условиях низкого отношения сигнал/шум, чем характеризуются все высокоэффективные методы помехоустойчивого кодирования. При этом доля искаженных в канале связи битов данных может достигать 5 и даже 15 % от их общего числа. Это позволяет рассматривать такую передачу цифровых данных еще и как самозащищенную, поскольку правило восстановления данных (метод декодирования) может быть в принципе не понятно или регулярно изменяться, что полностью исключает в этих случаях возможность правильной оперативной интерпретации принятых цифровых потоков, например, при их несанкционированном приеме.

Наконец, в случаях необходимого высокого уровня достоверности передачи данных в высокоскоростных радиосистемах без каналов с обратной связью, по которым можно было бы осуществлять перезапрос неправильно принятых частей цифровых сообщений, применение помехоустойчивого кодирования позволяет полностью решить проблему высокой достоверности принимаемого цифрового потока. В спутниковых каналах, характеризующихся большой задержкой передаваемого сигнала, особенно для современных видов информации, требующих передачи больших массивов данных в реальном масштабе времени (мультимедиа, телеметрия, видео и т. п.), применение протоколов передачи данных без перезапроса является вынужденной необходимостью. Для этих каналов проблема повышения достоверности передачи информации выходит на первый план. Разумеется, при этом алгоритм помехоустойчивого кодирования должен быть достаточно быстродействующим, чтобы обеспечить высокоскоростную обработку входящего цифрового потока. Именно этот вариант условий работы системы без канала обратной связи и повышенные требования к достоверности принимаемых потоков являются основной причиной безусловной необходимости применения самых последних достижений теории и техники помехоустойчивого кодирования для каналов системы спутниковой связи, разработанной ФГУП НИИР.

Отсюда можно сделать очевидный вывод, что возрастание на несколько порядков (!) экономической (как и экологической, и вообще, системной!) ценности ЭВК на базе методов помехоустойчивого кодирования становится чрезвычайно актуальным аспектом уже осознанной необходимости внедрения теоретических достижений в сфере помехоустойчивого кодирования в практику создания компьютерных систем связи с использованием спутниковых каналов.

Принципы многопорогового декодирования

Рассмотренные в [2–6] методы многопорогового декодирования (МПД), которые реализуют разрабатываемые с 1972 г. принципы глобальной оптимизации функционала от большого числа переменных, оказались весьма перспективными итеративными алгоритмами в плане достижения высоких уровней

ЭВК при небольшой сложности их реализации в аппаратуре спутниковой и дальней космической связи.

Декодеры МПД, являющиеся развитием классического порогового алгоритма [7], обладают чрезвычайно важными свойствами [2]. Решения МПД при каждом изменении ими декодируемых информационных символов строго приближаются к решению оптимального декодера (ОД), обеспечивая реализацию этого процесса даже после нескольких десятков попыток коррекции кодового блока или потока символов сверточных кодов. Разумеется, для обеспечения высокой эффективности МПД при больших шумах канала необходимо всегда выбирать только специально построенные для него коды.

Характеристики декодирования

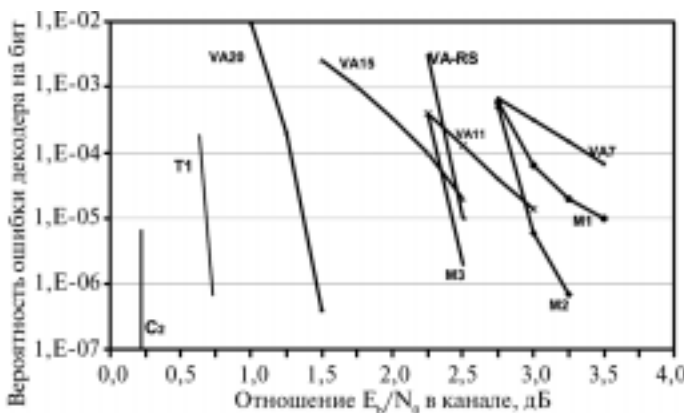
На рисунке показаны возможности различных алгоритмов декодирования как функции отношения битовой энергии передачи к спектральной плотности мощности шума канала $a = E_b/N_0$ для $R \sim 1/2$. Вертикальная линия C_2 соответствует пропускной способности канала $C = 1/2$ в гауссовом канале при $a = 0,2$ дБ. Графики ВАК показывают эффективность алгоритма Витерби (АВ) для длин кода $K = 7, 11, 15$ и 20 . Кривая Т1 соответствует лучшему турбокоду длины $n = 130\,000$ [8], а энергетика стандартной каскадной схемы для АВ с кодом Рида-Соломона (РС) дается графиком VA-RS.

Далее на рисунке представлены возможности некаскадных МПД для сверточных кодов. Кривая М1 приведена для очень простого сверточного МПД с $d_m = 9$, $I = 12$ итерациями и задержкой $L = 4800$ бит. Для $a > 3$ дБ решения МПД для этого кода совпадают с ОД (с полным перебором!).

Кривая М2 соответствует возможностям МПД с $L = 10\,000$, $d = 11$ и $I = 9$. Важно отметить, что он намного более эффективен, чем АВ с $K = 11$, который в настоящее время пока что трудно создать для высокоскоростных каналов. Этот МПД реализован в НИИР аппаратно на недорогих широкодоступных программируемых логических матрицах (ПЛИС) на информационной скорости более 80 Мбит/с.

Наконец, кривая М3 показывает возможности МПД для кода с $d_m = 13$, при задержке $L < 99\,800$ и $I < 35$. Очень существенно, что этот последний пример МПД эффективнее слож-

ной каскадной схемы стандартного АВ с РС. Представляется очевидным, что среди некаскадных схем декодирования характеристики МПД далеко опережают другие алгоритмы коррекции ошибок.



Использование МПД в каскадных кодовых конструкциях позволяет существенно улучшить возможности этого метода. Некоторые примеры каскадных схем с использованием МПД приведены в [4].

Сложность реализации алгоритма

Как отмечалось в [4, 9], главным достоинством МПД является крайне низкая сложность декодирования, определяемая как число операций на декодирование каждого информационного бита. Формально определяемая сложность — число операций у МПД — примерно на два порядка (~ 100 раз!) меньше, чем у турбоподобных кодов с сопоставимой энергетической эффективностью. Существенно, что при таких оценках особая сложность части операций, выполняемых при декодировании турбокодов, не учитывается. Поэтому реальная разница в сложности реализации МПД и турбоподобных кодов еще более значительна. Построенные по этим принципам программные версии МПД показали, действительно, очень высокую производительность и эффективность декодирования в каналах с большим уровнем шума.

Подчеркнем, что существенная разница в эффективности МПД и других методов заключается в том, что этот метод при линейной от длины кода сложности декодирования обеспечивает при правильном проектировании практически оптимальное декодирование длинных кодов.

Особенности создания МПД-декодеров

При правильном проектировании МПД функция суммирования проверок легко может быть реализована аппаратно таким образом, что она будет полностью эквивалентной простому однотактному сумматору. При этом преимущество МПД по числу операций составляет относительно других методов уже более трех десятичных порядков. Поскольку МПД допускает столь же легкое распараллеливание операций, как и алгоритм Витерби, то даже применение простейших средств параллельного вычисления позволяет легко создавать и такие варианты МПД, которые на каждом такте работы устройства декодируют по несколько битов информационного потока как в блоковом, так и в сверточном вариантах своей реализации. Несомненно, что никакие другие алгоритмы декодирования никогда не приблизятся к этому уровню быстродействия.

Оптимизация схемы МПД

Все чрезвычайно высокие параметры декодирования этими методами обеспечиваются применением предельно простой, но результативной и очень мощной процедуры оптимизации функционала на базе процедур мажоритарного декодирования, чем достигается практически оптимальное декодирование длинных кодовых конструкций, доступное ранее только для коротких кодов и алгоритма Витерби. При этом важными оказываются не только простая по своей сути модификация мажоритарного декодирования, но и обязательный выбор весьма специфических кодов из класса самоортогональных, которые обеспечивают высокие характеристики при использовании МПД благодаря очень малой их подверженности эффекту размножения ошибок декодирования. Кроме того, не менее существенным моментом для успешного развития методов МПД является также то, что при

создании этих декодеров обязательным и очень эффективным этапом проектирования всегда является оптимизация всех параметров такого декодера: значений порогов, весов проверок, правил вычисления вспомогательных функций и надежности проверок. Число оптимизируемых параметров МПД может иногда достигать нескольких сотен. Поэтому при создании МПД последний этап может потребовать иногда до 99 % процессорного времени специального автоматизированного комплекса средств создания этих высокоэффективных декодеров. Принципиально важно, что после завершения всех этапов работ фазы проектирования МПД, по-прежнему, остается простейшей схемой обработки принятых потоков данных с очень высоким быстродействием. Но подбор наиболее точно соответствующих конкретному кодеку индивидуальных значений его параметров позволяет получить весьма значительный дополнительный прирост энергетического выигрыша без излишних аппаратных и вычислительных затрат. Разумеется, два последних обстоятельства не могли быть учтены в 60-е гг., когда были опубликованы некоторые совершенно справедливые результаты по низкой эффективности попыток простого повторного декодирования на основе мажоритарных схем.

Перспективой еще более эффективной реализации МПД, несомненно, является его применение и в первых каскадах систем двухэтапного кодирования и последующего декодирования. В условиях воздействия на трассу связи различных отрицательных факторов, приводящих к стохастическим флуктуациям уровня принимаемого сигнала, таких как: пересекающие гидрометеориты, различные помехи, нестабильности наведения антенных комплексов и другие причины, — эффективность применения МПД окажется еще более значительной, что в итоге обеспечит высокие тактико-технические возможности системы в целом. Это создаст, в свою очередь, условия для разработки новых эффективных систем специальной, ведомственной, правительственной и прочей связи с характеристиками, которые соответствуют теоретическим предельным возможностям кодирования, сформулированным в теории информации отечественными учеными под руководством академика В.А.Котельникова.

Результаты моделирования работы алгоритма МПД на ПЛИС свидетельствуют о действительно высокой эффективности МПД в каналах с большими скоростями передачи данных. Это является

еще одним подтверждением правильности основных технических решений, принятых при разработке систем спутниковой связи в НИИР.

Выводы

Огромное преимущество МПД перед всеми другими схемами декодирования по числу операций, оценки которых были даны выше, давно опубликованные результаты по методам сжатия данных, многопозиционным системам модуляции [10], а также другие возможности этого очень эффективного алгоритма позволяют считать, что к настоящему времени все принципиальные задачи предпринятых теоретических и прикладных исследований МПД успешно решены. Таким образом, после 30-летних исследований 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.

Характеристики МПД в области высоких шумов канала при разумном выборе кодовых скоростей и вероятностей ошибки декодирования оказываются по энергетике канала всего примерно на 1 дБ меньшими, чем это допускают теоретические границы. В дальнейшем эта разница может быть дополнительно уменьшена без чрезмерных вычислительных затрат.

Но даже полученные к настоящему времени результаты позволяют утверждать, что основная проблема теории помехоустойчивого кодирования — эффективное простое декодирование вблизи пропускной способности канала — успешно решена на базе многопороговых алгоритмов и в дальнейшем будет представлять собой только технологическую задачу реализации на более компактных, простых и быстродействующих программных и аппаратных средствах.

Хорошим подтверждением этому являются как многолетняя работа алгоритмов МПД в уже разработанных в НИИР системах, так и принятые многовариантные решения по развитию применения методов МПД в каскадных схемах системы спутниковой связи.

В настоящее время возможности технологии позволяют даже для высокоскоростных каналов создавать аппаратно-про-

граммные версии декодеров, которые будут успевать выполнять достаточно большое число операций с каждым декодируемым символом. Это создает условия для разработки все более сложных кодовых конструкций. Но те алгоритмы, которые нерационально используют вычислительные ресурсы, все же значительно проигрывают гораздо 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 те алгоритмы, которые выполняют только очень простые, однородные и быстрые операции. Наиболее полно этим требованием удовлетворяют МПД. А соответствие его возможностей характеристикам самых сложных алгоритмов делает МПД еще более привлекательным. Конечно, в случае необходимости достижения уровней энергетического выигрыша, сравнимого с турбокодами, размеры памяти МПД и число выполняемых им операций сложения заметно возрастают. Но даже в этом случае сложность их реализации останется, видимо, существенно меньшей. Однако необходимость реализации декодеров для аппаратуры связи с энергетикой всего на несколько десятых децибела, т. е. всего на 2–4 % меньше предельно возможных значений, требует более глубокой технологической проработки и обоснования. Видимо, эти вопросы станут действительно актуальными не ранее, чем через несколько лет.

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 могут обеспечить всего несколько методов. Но учет проблемы сложности при сопоставимых уровнях ЭВК показывает, что в этом случае алгоритмы на базе МПД сохраняют близость по своей сложности реализации к простейшему декодеру порогового типа и поэтому в большинстве случаев применения кодирования являются наиболее предпочтительным алгоритмом декодирования в приемлемых по стоимости высокоскоростных системах связи.

Представленные возможности МПД демонстрируют высокий уровень российских разработок в сфере систем связи различного

назначения. Успешная длительная работа декодеров, реализующих этот алгоритм, в системе спутниковой связи, разработанной в НИИР, и новые разработки метода, которые обеспечивают повышение достоверности передачи данных в этой системе, создают хорошие условия для обеспечения широкого применения МПД-декодеров в системах связи самого широкого назначения.

Дополнительная информация по данному вопросу представлена на веб-сайте www.mtdbest.iki.rssi.ru.

Литература

1. Берлекэмп Э.Р. Техника кодирования с исправлением ошибок // ТИИЭР. 1980. Т. 68. № 5.
2. Вычислительные сети / Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарёв В.В. и др. М.: Наука, 1981.
3. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи // Электросвязь. 2003. № 9. С. 34–37.
4. Золотарёв В.В. Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов // 4-я Международная конференция. Спутниковая связь — ICSC-2000. Т. 2. МЦНТИ. 2000.
5. Zolotarev V.V. The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels // Proc. of the 7th Intern. Symp. on Communication Theory and applications. ISCTA'03. Jul., 2003. Ambleside. UK. P. 18–22.
6. Золотарёв В.В. Характеристики каскадирования многопороговых декодеров для спутниковых каналов связи // 5-я Международ. конф. «Цифровая обработка сигнала и ее применение». Доклады-2. М. 2003. С. 353–355.
7. Мессу Дж. Пороговое декодирование. М.: Мир, 1966.
8. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes // Proc. of ICC'93. Geneva Switzerland. May. 1993.
9. Золотарёв В.В. Энергетическая эффективность новейших методов помехоустойчивого кодирования // Современ. и перспектив. разработки и технологии в космич. приборостроении: Сб. докл. выездного семинара ИКИ РАН, Таруса, 2003 г. М.: ИКИ РАН, 2004. С. 312–318.
10. Золотарёв В.В. Алгоритмы кодирования символьных данных в вычислительных сетях // Вопросы кибернетики. ВК-106. 1985. С. 27–31.