

(Пленарный доклад на 6-й Международной конференции
"Цифровая обработка сигналов и её применение,
ЦОС-2004" в Москве, 31.03.04-02.04.04г.)

Новые технологии обеспечения высококачественной связи по радиоканалам с большим шумом на основе

многopороговых алгоритмов

Ю.Б.Зубарев, В.В.Золотарёв, Э.И.Кумыш,
А.А.Липатов, М.С.Петров, А.А.Плотников

ФГУП НИИР

Москва

Представлены достижения теории и техники помехоустойчивого кодирования последнего десятилетия. Анализируются эффективность и сложность реализации декодеров. Подчеркивается высокая экономическая ценность применения новейших методов кодирования в цифровой связи.

1. Высокая достоверность - основа развития цифровых систем.

Динамичный переход нашей технологической цивилизации на цифровые системы обработки и передачи информации создает много проблем при проектировании современных систем информатики и телекоммуникаций. Одной из важнейших задач, которые при этом необходимо решать во всех подобных системах, является обеспечение высокой достоверности передачи данных. Совершенно очевидно, что только при безусловно правильных цифровых данных, поступивших на дальнейшую обработку, имеет смысл развивать весьма капиталоемкие технологии информатизации общества.

2. Критерии эффективности кодирования.

При проектировании систем связи наиболее удобно оценивать эффективность применения кодирования как величину снижения отношения битовой энергии сигнала к спектральной мощности шума в канале связи E_b/N_0 в случае применения помехоустойчивого кодирования по сравнению со случаем, когда передача осуществляется без такого кодирования. Этот критерий называется энергетическим выигрышем кодирования (ЭВК). Фактически ЭВК соответствует эффекту увеличения мощности передатчика, пересчитанной на одинаковые скорости передачи информационных потоков. Например, эффективность стандартного алгоритма Витерби (АВ) близка к $G=5$ дБ. Но граница Шеннона для пропускной способности канала C показывает, что ЭВК для кодовой скорости $R \sim 1/2$ может быть более 9 дБ. Таким образом, до уровня ЭВК, достижение которого гарантировано теорией, этому декодеру ещё весьма далеко. Подчеркнем, что зарубежные специалисты оценивали каждый 1 дБ ЭВК в миллионы долларов более 20 лет назад [1]. Сейчас важность увеличения ЭВК многократно возросла, поскольку при этом можно уменьшать размеры очень дорогих антенн или повышать дальность связи, увеличивать скорость передачи или снижать необходимую мощность передатчика, а также улучшать другие существенные свойства систем связи. Именно поэтому проблеме увеличения ЭВК во всём мире уделяется

огромное внимание, а достоинства простых и эффективных алгоритмов декодирования невозможно переоценить.

3. Новые принципы реализации алгоритмов декодирования.

Развитие техники декодирования помехоустойчивых кодов в течение многих десятилетий удивительным образом никак не было связано с методами решения задачи оптимизации функционала от многих переменных.

Эта задача в настоящее время решена методами многопорогового декодирования (МПД). Исследования этого алгоритма, продолжавшиеся более 30 лет, в настоящий момент успешно завершены [1,3-5]. Декодеры этого типа строго приближаются к решению оптимального декодера при всех изменениях декодируемых символов. Таким свойством не обладает ни один из известных в настоящее время методов исправления ошибок при больших уровнях шума канала. Разумеется, для обеспечения высокой эффективности МПД при больших шумах канала всегда необходимо выбирать только специально построенные для него коды с минимально возможным уровнем размножения ошибок декодирования [2,6].

4. Сложность реализации алгоритма

Одним из важнейших достоинств МПД является крайне низкая сложность декодирования. При оценке затрат МПД на декодирование одного бита формально определяемая сложность как число операций у МПД примерно на 2 порядка (!!!) меньше, чем у турбо кодов с сопоставимой энергетической эффективностью [1,4,6]. Результаты прямого сравнения МПД и алгоритмов для турбо кодов действительно показали разницу в скорости программных реализаций этих декодеров при одинаковых по уровню шума условиях до 70 раз [7-9].

В наиболее естественном своём виде аппаратный декодер характеризуется производительностью, которая определяется только максимально допустимой скоростью продвижения данных по регистрам сдвига декодера w_{\max} . Разумеется, регистры сдвига, как простейшие элементы цифровой техники, могут быть весьма быстрыми. При типичных для алгоритмов МПД значениях кодовой скорости $R=k_0/n_0 < 1$, где $k_0=3 \div 20$, получаем, что производительность W МПД будет ограничена только суммарной скоростью продвижения данных по всем регистрам декодера, т.е. $W = w_{\max} * k_0$. Отсюда следует, что реальное преимущество МПД по скорости работы на самом деле составляет в некоторых случаях относительно других методов уже около 3-х десятичных порядков. Тем самым применение алгоритмов МПД в аппаратуре связи вообще снимает проблему быстродействия декодеров в системах высокоскоростных коммуникаций. Полученные результаты носят принципиальный характер. Достижение столь малых уровней сложности при такой же энергетической эффективности, как и у МПД, для всех других известных сейчас методов декодирования практически невозможно.

5. Эффективность МПД алгоритмов

Характеристики МПД как при самостоятельном использовании, так и в сложных кодовых конструкциях существенно лучше, чем АВ и различные каскадные схемы. Во всех случаях достижения значительных уровней ЭВК порядка 8 дБ МПД оказывается и в программном, и в аппаратном вариантах реализации в 40 - 220 раз проще

других систем кодирования со стандартными параметрами. Дополнительные данные об эффективности и быстродействии этого алгоритма приведены в [1-6,9].

6. Изменение облика новых систем связи

Снижение энергетика канала на 3 дБ, достаточно просто обеспечиваемое с помощью МПД, дополнительное к текущему уровню эффективности стандартных средств кодирования, увеличивает ёмкость каналов спутниковой связи вдвое. Учитывая, что для современного уровня технологии реализация декодеров типа МПД вообще не представляет никаких трудностей, можно считать, что применение МПД почти эквивалентно удвоению абсолютного числа таких каналов и сетей без сколько-нибудь заметных финансовых вложений. Это соответствует экономии средств, сопоставимой с объёмом производства в отрасли связи.

Возможность достижения столь большого уровня ЭВК позволяет на принципиально новой основе проектировать системы подвижной спутниковой связи, поскольку именно здесь можно получить и уменьшение полосы используемых частот, и гораздо более высокие уровни энергетического выигрыша. Одновременно это значительно улучшит характеристики абонентских станций.

Применение МПД позволяет при соответствующем выборе его параметров увеличить протяжённость пролётов РРЛ, что также может дать экономию при строительстве новых линий в миллионы долларов.

Особенно большие возможности открываются для алгоритмов МПД при модернизации систем радиовещания в диапазонах НЧ, СЧ, и ВЧ по технологиям Международного консорциума DRM. Значительные возможности МПД по достижению высоких уровней ЭВК здесь также привлекательны по экономическим соображениям.

При использовании МПД в системах спутникового многопрограммного ТВ вещания на скоростях до 45 Мбит/с можно значительно снижать размеры антенн или практически без существенных затрат увеличить число стволов на спутнике. Столь же эффективно этот алгоритм можно применить для ТВ высокой чёткости.

Ещё одно новое направление применения кодирования на базе МПД, благодаря простоте его реализации – непосредственная обработка сигналов на борту спутника.

Кроме того, МПД будет очень полезен при решении задач дистанционного зондирования Земли, поскольку при этом легко достижимо очень высокое быстродействие этого алгоритма. В этом случае будет возможно обеспечение скоростей передачи до сотен Мбит/с.

Наконец, подчеркнём, что при текущих непрерывно возрастающих требованиях к достоверности цифрового обмена необходимые для этого уровни ЭВК также существенно увеличиваются. В этих условиях практически не существует альтернативы методам МПД, уже сейчас способным обеспечить высокие уровни ЭВК при столь малой сложности реализации, которая недоступна в обозримом будущем для других алгоритмов.

7. Выводы.

Все чрезвычайно высокие параметры МПД обеспечиваются применением предельно простой, но результативной и очень мощной процедуры оптимизации функционала от очень большого числа переменных на базе методов мажоритарного декодирования, чем достигается практически оптимальное декодирование длинных кодовых конструкций. Таким образом, совершенно новые принципы декодирования очень длинных кодов позволили создать МПД - очень эффективную и одновременно весьма простую при любой реализации схему обработки принятых потоков данных с предельно высоким быстродействием. В настоящее время МПД фактически является

единственным претендентом на использование во всех высокоскоростных сетях передачи данных, где необходимо совместить требования максимально возможного уровня энергетического выигрыша кодирования и минимальной сложности обработки.

Литература

1. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В.. Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи. - "Электросвязь", Москва, №9, 2003 г., с.34-37.
2. Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарёв В.В., Третьякова Е.И. Вычислительные сети. – М.: Наука, 1981, 278 с.
3. Золотарёв В.В. Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов. - В кн.: 4-я Международная Конференция "Спутниковая связь – ICSC-2000", Т.2, с. 20-25, М.: МЦНТИ, 2000.
4. Zolotarev V.V.. The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels. -In Proc.: 7-th International Symposium on Communication Theory and applications, held on 13-18 July 2003, St. Martin's College, Ambleside, UK, pp.18-22.
5. Золотарёв В.В. Характеристики каскадирования многопороговых декодеров для спутниковых каналов связи. - 5-я международная конференция "Цифровая обработка сигнала и её применение", М., 2003 г., с. 353-356.
6. Золотарёв В.В. Многопороговые декодеры. - Веб-сайт www.mtdbest.iki.rssi.ru .
7. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes. –Proc. ICC'93, Geneva, Switzerland, pp. 1064-1070, May 1993.
8. Andrews K., Berner J., Chen V., Dolinar S., Pollara F., Stanton V. Turbo-decoder implementation for the deep space network. - IPN Progress Report 42-148, Feb. 15, 2002.
9. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В.. Сложность реализации эффективных методов помехоустойчивого кодирования. ЦОС-6, Доклады, в печати, 2004.