

Характеристики каскадирования многопороговых декодеров для спутниковых каналов связи

В.В.Золотарёв

Необходимость обеспечения высокой помехоустойчивости при небольшой сложности кодирования требует развития простых методов быстрого и эффективного декодирования корректирующих кодов. Предложены методы каскадирования на основе многопороговых декодеров (МПД) с простой реализацией, близкой по числу операций к простейшим мажоритарным декодерам.

Применение многопороговых декодеров (МПД) [1-3] позволяет обеспечить результаты обработки принятого кода, почти совпадающие с оптимальным декодированием (ОД). При этом сложность реализации МПД по объёму вычислений остаётся фактически близкой к линейной от длины кода, что соответствует самому простейшему из известных декодеру Мессе [4]. Основным свойством МПД является сходимость к решению ОД при всех изменениях декодируемых символов. В связи с этим обеспечение эффективного использования МПД непосредственно связано с возможностью создания условий для максимально длительного процесса коррекции символов. Эта задача была решена путем построения для МПД специальных кодов с очень малым потенциальным уровнем группирования ошибок при мажоритарном декодировании.

Заметим, что действительно различных эффективных методов декодирования в реальных спутниковых каналах связи на самом деле весьма немного. Наиболее известны декодеры, реализующие алгоритм Витерби (АВ), классические каскадные схемы, например, с использованием АВ и кодов Рида-Соломона (АВ-РС) [5], а также различные новые способы каскадирования, начало развитию которых положили турбо коды (ТК)[6]. При этом нельзя использовать слишком длинные коды для АВ, поскольку при этом с ростом длины кода экспоненциально растёт сложность декодера. Возможности каскадной схемы (АВ-РС) также ограничены сложностью реализации обеих составляющих её кодов. Сложность реализации ТК в значительной мере определяется сложностью тех оптимальных декодеров, которые обычно являются составной частью алгоритмов этого типа, например, АВ для не очень длинного кода. Если сложность рассматривать как, в основном, число операций декодера, то для ТК сложность соответствующего декодера АВ нужно еще умножить на коэффициент порядка $10 \div 20$, что связано с вычислением в некоторых случаях достаточно сложных функций. Важным достоинством ТК является возможность достижения на их базе весьма высоких характеристик декодирования. И наконец, как уже отмечалось выше, достаточно высокие характеристики достижимы на базе алгоритмов типа МПД, которые могут фактически оптимально декодировать специальные длинные коды при очень небольших вычислительных затратах.

На рис.1 представлены возможности перечисленных выше каскадных методов. По горизонтальной оси указана энергетическая эффективность кодирования - отношение энергии на информационный бит к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 , а по вертикали - вероятность ошибки декодирования на бит $P_b(e)$. Вертикальная линия S_m соответствует пропускной способности канала $C=1/2$ при двоичной модуляции и мягком модеме с квантованием на 16 уровней, что практически совпадает со случаем непрерывного неквантованного приёма. График *турбо* - лучший результат для турбо кодов, полученный авторами метода [6], при весьма высокой сложности реализации (до 10 000 операций, здесь и далее - на бит данных) для кода длины $K=65$ тыс. битов и кодовой скорости $R=1/2$. График *АВ-РС* соответствует возможностям каскадной схемы для АВ с двоичным кодом длины $K=7$ и кодом РС длины 255

байт [7]. Далее указаны нижние оценки для возможностей двух кодов, названных плетёными (*ПЛЕТ-К1,2*) длины $K=10000$ и $K=1000$ соответственно, в которых развиты идеи, близкие к турбо кодированию, позволяющие упростить декодирование [8].

Наконец, обратимся к возможностям МПД. Этот метод достаточно эффективен в своём базовом некаскадном варианте в гауссовском канале, обеспечивая при небольшой задержке и $R \approx 1/2$ оптимальное декодирование длинных кодов с вероятностью ошибки на бит $P_b(e) \sim 10^{-5}$ для уровня энергетики $E_b/N_0 \geq 3$ дБ. Простые и тем не менее очень эффективные каскадные схемы МПД с кодами контроля по чётности, практически не увеличивающими вообще сложность декодирования, представлены на рис.1 графиками *МПД-К1,2*. Число итераций выполнения обычных пороговых процедур суммирования проверок и их сравнения с порогом не больше $J=20$ в обоих случаях. Задержка в свёрточном варианте для первого кода не более 40 тыс. бит, а у второго - менее 5000. Величины задержки при необходимости могут быть уменьшены.

Наиболее существенным фактором при выборе предпочтительных декодеров для реальной аппаратуры связи является то, что при $E_b/N_0 \geq 3$ дБ всегда можно применять обычный МПД даже без каскадирования и осуществлять декодирование, практически совпадающее оптимальным, с помощью декодера, который почти совпадает с простейшим пороговым декодером (ПД) [4]. Число итераций декодирования в таком МПД, несколько раз только суммирующем взвешенные проверки и сравнивающим результат с порогом, обычно $J=4 \div 8$, а схема этого простейшего декодера может быть сделана как одноканальной, так и ещё более быстродействующей, что является решающим фактором для высокоскоростных каналов связи.

При $E_b/N_0 \leq 3$ и $R \approx 1/2$ в спутниковом канале сравнение сложности различных декодеров по числу операций показывает, что МПД во всех случаях применения каскадирования оказывается примерно на 2 порядка проще. При реализации одноканального суммирования на пороге нескольких небольших целых чисел, что только и требуется для МПД, разница по сложности со всеми другими известными алгоритмами декодирования превысит 3 десятичных порядка при сопоставимой эффективности по энергетике.

Хотя формальная сложность МПД оценивается сверху соотношением $M_1=2*(J+2)*(d+1)$, где d – минимальное кодовое расстояние используемых в МПД кодов, оказывается, что при возможности ухудшения вероятности ошибки декодера всего вдвое, что обычно вполне допустимо, можно реализовать процесс декодирования так, чтобы число операций МПД оценивалось сверху как $M_2=4*(d+3)+J*3$. Здесь учтены и операции при декодировании МПД в каскадной схеме. Таким образом, МПД вообще почти не увеличивает сложность с ростом J .

К настоящему времени создано несколько поколений аппаратуры декодирования на базе МПД и есть решения ведущих предприятий отрасли связи о перспективности работ в этом направлении и их поддержке.

Применение МПД в современной каналообразующей аппаратуре позволит существенно ускорить процесс снижения допустимых отношений сигнал/шум в дорогостоящих системах связи, что создаст более благоприятные условия для развития высокоскоростных информационных сетей.

ИКИ РАН: т.(095)-333-23-56, 333-13-01;

НИИРадио: (095)-261-03-27, 261-54-44,

д.т.(095)-573-51-32, моб.:8-916-518-86-28,

e-mail: zolotasd@yandex.ru, (или zolotarev@iki.rssi.ru как резервный).

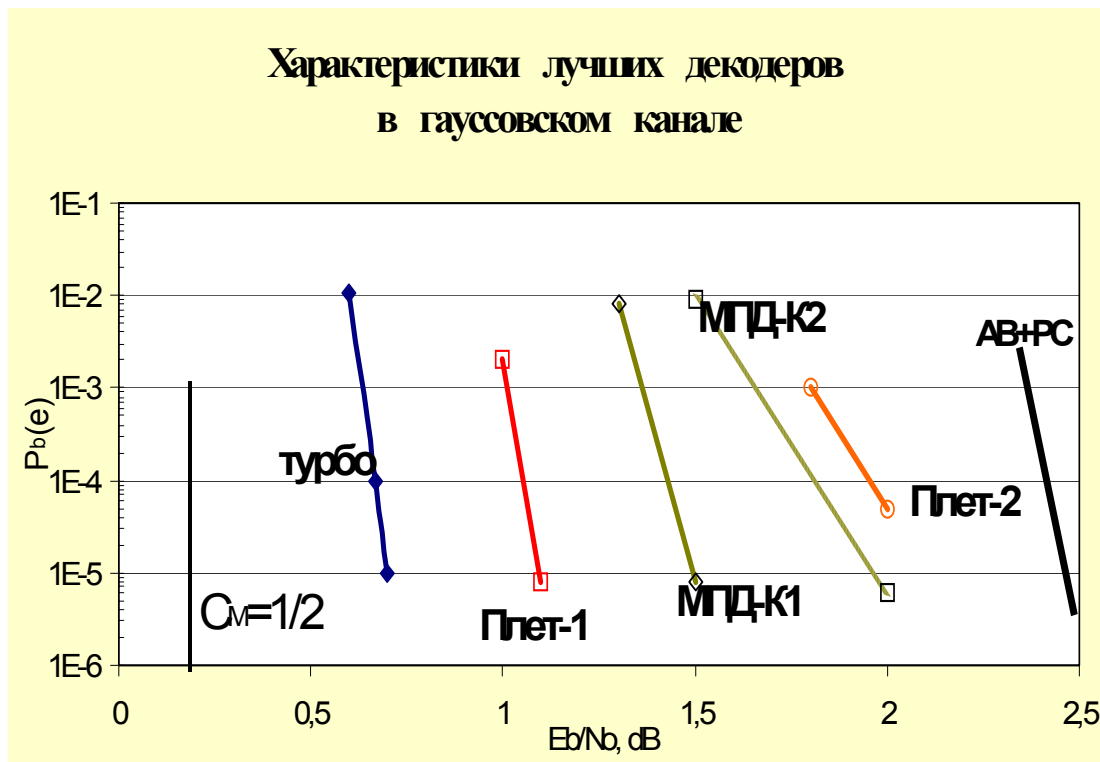


Рис.1.

Литература

1. Золотарёв В.В. Использование помехоустойчивого кодирования в технике связи. - Электросвязь. 1990, №7, с.7-10.
2. Золотарёв В.В. Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов //В кн.: 4-я Международная Конференция "Спутниковая связь – ICSC-2000", Т.2, М.: МЦНТИ, 2000, с. 20-25.
3. Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарёв В.В., Третьякова Е.И. Вычислительные сети. – М.: Наука, 1981.
4. Месси Дж. Пороговое декодирование.. – М.: Мир, 1966.
5. Форни Д. Каскадные коды. – М.: Мир, 1970.
6. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes //Proceeding of ICC'93, Geneva, Switzerland, pp. 1064-1070, May 1993.
7. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987.
8. Freudenberger J., Bossert M., Shavgulidze S., Zyablov V. Woven codes with outer warp: variations, design and distance properties //Journal on Selected Areas in Communications issue on The Turbo Principle: From Theory to Practice, 2001.
(Данный материал опубликован в кн.: "5-я Международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигнала и её применение 12-14 марта", Доклады-2, с.353-355, Москва, Россия)