

Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов

В.В.Золотарев (Москва)(В кн.: 4-я Международная конференция «Спутниковая связь-2000», том 2, Москва, 2000, с.20-25.) (e-mail: zolotasd@yandex.ru, тел. р. (095)-261-54-44, (095)-333-23-56, моб.: 8-916-518-86-28)

Как известно, использование помехоустойчивого кодирования позволяет обеспечивать заданные достоверности передачи цифровых данных в спутниковых и других каналах связи при существенно более низком уровне сигнала по сравнению с вариантом передачи без кодирования [1, 2]. Для каналов, в которых энергетика передачи ограничена, это создает эффект увеличения мощности передатчика, что и обуславливает техническую ценность использования кодирования. Например, применение алгоритма Витерби (AB) на кодовой скорости $R=1/2$ и длине кодирующего регистра $K=7$ при использовании «мягкого» демодулятора обеспечивает при двоичной ФМ энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), равный при вероятности ошибки на бит $P_b(e)=10E-5$ величину порядка 5,2 дБ (график 4 на рис.1). Вертикаль Сдск указывает на границу пропускной способности канала ДСК, равную 0,5, т.е. $C=R$.

Указанная величина ЭВК оказывается достаточно большой, чтобы активно применять коды в реальных системах связи. Но она существенно ниже теоретически достижимой границы, соответствующей для указанных выше параметров кодирования и канала величине 9,4 дБ. Однако дальнейшее повышение ЭВК для реальных систем кодирования связано с быстрым, а в некоторых случаях даже экспоненциальным с ростом длины кода усложнением обработки сигнала на приемной стороне. Поэтому для многих высокоскоростных каналов, к которым предъявляются повышенные требования к достоверности приема цифровых данных, достижение больших значений ЭВК оказывается крайне сложной и очень важной целью, которая может быть реализована на основе кодирования.

Вместе с тем задача полного использования энергетики каналов становится все более актуальной как из-за технических и экологических ограничений на мощность излучаемых сигналов, так и из-за конечной емкости выделяемых для тех или иных систем связи полосы частот. Поэтому, хотя рост вычислительных возможностей, закладываемых в аппаратуру связи, позволяет решать многие сложные задачи, недоступные ранее, проблема повышения ЭВК на длительное время останется актуальнейшей задачей связи для многих типов каналов.

Одним из простейших способов увеличения ЭВК является использование многопороговых декодеров (МПД) [2,3]. Они представляют собой модификацию обычных пороговых декодеров [4], с помощью которых при правильном выборе весьма специфических кодов длиной в сотни и тысячи битов, отобранных по критериям минимизации известного эффекта размножения ошибок, удается получить декодируемое сообщение, мало отличающееся от результата оптимального декодера, но при линейной сложности алгоритма декодирования вместо экспоненциальной, как, в частности, это имеет место при использовании АВ. В правильно построенном МПД для хорошего в указанном выше смысле кода оказывается возможным многократное уточнение принятого из канала сообщения до тех пор, пока решение МПД не станет близким к решению оптимального, по максимуму правдоподобия, декодера. При этом количество таких попыток последовательного улучшения решения предыдущего шага декодирования может быть от трех до ста и более.

На рис.1 приведен график 2 зависимости вероятности ошибки на бит $P_b(\epsilon)$ от уровня шума в канале типа ДСК для свёрточного МПД и кода с расстоянием $d=11$ при кодовой скорости $R=1/2$. Приведенный результат относится к случаю использования простого “жесткого” двоичного демодулятора, который уменьшает пропускную способность формируемого им канала по сравнению с “мягким” модемом, используемым декодерами АВ, почти на 2 дБ. Тем не менее, МПД оказывается настолько более эффективным, что даже в таких совершенно неэквивалентных условиях сравнения его характеристики несколько превосходят характеристики АВ. Подчеркнем, что это оказалось возможным из-за почти оптимального решения МПД для гораздо более длинного кода, чем код длины $K=7$, который был взят для оценки возможностей АВ. График 1 дан для МПД и кода с $d=9$, а 3 – для кода с $d=13$. Это теоретические данные, неоднократно подтвердившиеся в эксперименте.

В целях более удобного сопоставления алгоритмов декодирования и по ЭВК пунктиром на рис.1 указаны уровни равного ЭВК для кодов с $R=1/2$: $G=4$, $G=6$ и $G=8$ дБ. Они помогают сравнить коды по главному критерию их эффективности – энергетическому.

Для иллюстрации результата работы алгоритмов в одинаковых условиях использования «мягких» модемов был взят код с $R=1/2$ и соответствующий МПД. В связи с тем, что используемый для МПД код имел весьма большую длину и минимальное кодовое расстояние $d=9$, его декодирование практически не отличалось от оптимального даже при отношении сигнал/шум в канале порядка – 1,0 дБ, как следует на рис.1. На графике m9 приведены теоретическая оценка и совпадающие с ней результаты моделирования работы этого МПД. Для $d=7$ и $d=11$ аналогичные характеристики представлены графиками m7 и m11.

Исходя из известных оценок и представленных результатов, можно считать, что МПД обеспечивает теоретически предельные характеристики по ЭВК при весьма высоких уровнях шума. Отметим, что если осуществляется переход к более длинным кодам, то при их декодировании по АВ рост эффективности оказывается не столь значительным, как можно было бы ожидать. Детально этот вопрос рассматривался в [6]. В частности, код с $K=11$ [1, рис.12.13] при использовании АВ также при $R=1/2$ характеризуется графиком 5, а возможности кода с декодированием по АВ для $K=15$ приведены на графике 6, что показывает ограниченный рост эффективности этого алгоритма даже в случае роста объема вычислений АВ по сравнению с $K=7$ на много десятичных порядков.

Заметим, что увеличение эффективности МПД оказывается значительным по сравнению и с обычным пороговым декодированием, и с АВ вследствие такой организации в нем процедур коррекции, когда при свёрточном варианте реализации кодирования задержка декодирования становится весьма значительной, достигая нескольких тысяч и более кодовых символов из-за большого роста длины кодов и значительного числа итераций декодирования, если при этом используются свёрточные коды, а не блоковые. Но следует подчеркнуть, что с теоретической точки зрения высокая эффективность обеспечивается только действительно весьма длинными кодами. На рис.1 представлены для $R=1/2$ в обычном ДСК нижние оценки вероятности ошибки на бит блоковых кодов длины от $n=1000$ до $n=10000$ в предположении оптимального декодирования, что заведомо недостижимо. Графики 7, 8 и 9 снова соответствуют кодам с $K=7$, 11 и 15, декодируемым по АВ, но в ДСК, т.е. при моделировании их работы с «жестким» модемом, когда в равных условиях оцениваются потенциальные возможности кодов, а не алгоритмов.

Сравнение основных конкурирующих алгоритмов для спутниковых и космических каналов связи в [2] и в данном докладе показывает, что среди базовых алгоритмов коррекции ошибок предпочтительными являются АВ для коротких кодов и МПД, а в ДСК у МПД конкурентов в принципе быть не может, так как в этом случае предлагается метод декодирования, который часто мало отличается по эффективности от оптимального, но имеет очень простую реализацию. Если же большая задержка принятия решения не является ограничением, МПД оказывается много быстрее, чем АВ, а также эффективнее и в гауссовских каналах.

Полезно подчеркнуть и то, что указанная в [5] Берлекэмпом и использованная в [2] ценность дополнительно получаемого с помощью кодирования ЭВК, равная 1 млн. долл. за каждый децибелл выигрыша, в настоящее время многократно возросла из-за дефицита свободного спектра частот и множества технических и экологических проблем ограничительного плана. Это значит, что алгоритмы декодирования и далее будут очень высоко цениться по обеспечиваемому ими уровню ЭВК, быстрдействию и простоте реализации.

Как известно, на основе базовых алгоритмов можно строить и каскадные схемы декодирования, которые еще более повышают эффективность применения кодирования. Они заслуживают отдельного анализа. Но представляется очевидным, что каскадные схемы всегда оказываются тем более эффективными, чем более высокие результаты обеспечивают коды и алгоритмы их декодирования, используемые на каждой ступени соответствующей кодовой конструкции. Отсюда можно сделать достаточно правдоподобное предположение о том, что МПД и в каскадных или итеративных схемах обеспечат более высокие характеристики, чем в случае других подходов к реализации каскадирования. Следует также отметить, что и сама идея каскадирования изначально была связана с использованием весьма длинных кодов. А это как раз и соответствует той области кодовых параметров, в которой выбор длинных кодов позволяет организовать эффективное декодирование на базе алгоритмов типа МПД.

Таким образом, представленные в докладе данные позволяют указать на новые возможности реализации алгоритмов кодирования типа МПД, мало отличающихся от оптимальных в широком диапазоне параметров каналов спутниковой и космической связи. Применение МПД на практике уже доказало достижимость заявляемых характеристик и широкие возможности их применения для блоковых, сверточных, параллельных, итеративных и каскадных кодов при использовании как двоичных, так и недвоичных, в том числе многопозиционных сигналов. Дополнительные сведения по этой тематике можно также получить от автора .

Литература.

- 1.. Р.Блейхут. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. Мир, М.,1986.
- 2.. В.В.Золотарев. Использование помехоустойчивого кодирования в технике связи. Электросвязь.1990, №7, с.7-10.
- 3.. С.И.Самойленко и др. Вычислительные сети. Наука, М., 1981.
- 4.. Дж.Месси. Пороговое декодирование. Мир, М., 1966.
- 5.. Э.Р. Берлекэмп. Техника кодирования с исправлением ошибок. ТИИЭР, 1980, т.68, №5.
- 6.. В.В.Золотарев. Простые методы исправления ошибок в каналах с большим уровнем шума. Радиотехника, №10, 1991, с.79-82.
- 7.. Данные тезисы: В.В.Золотарев. Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов. – В кн.: 4-я Международная конференция «Спутниковая связь-2000», том 2, Москва, 2000, с.20-25.

