ИССЛЕДОВАНИЕ НЕДВОИЧНЫХ МНОГОПОРОГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ В КАНАЛАХ СВЯЗИ С ПАКЕТИРУЮЩИМИСЯ ОШИБКАМИ

Золотарёв В.В.[1], Овечкин Г.В.[2], Овечкин П.В.[2]

[1]Институт космических исследований
[2]Рязанский государственный радиотехнический университет

К современным системам передачи цифровых данных предъявляются очень жесткие требования по безошибочности передачи информации. Для обеспечения таких требований используют методы помехоустойчивого кодирования, применение которых позволяет улучшать многие важные характеристики систем передачи данных, например, экономить мощность передатчика, увеличивать дальность связи, уменьшать размеры антенн и др. Немаловажную роль помехоустойчивые коды играют и в системах хранения данных, в которых необходимо обеспечивать высокую надежность долговременного хранения информации на носителе.

В настоящее время специалисты в области помехоустойчивого кодирования проявляют большой интерес к недвоичным кодам, работающим с цифровыми данными на уровне символов, например, с байтами информации. Недвоичные коды применяются в каналах с группирующимися ошибками, в качестве составляющих элементов различных каскадных кодов, для защиты от ошибок информации на различного рода носителях (CD, DVD, Blu-ray и др.).

Анализ недвоичных корректирующих кодов и алгоритмов их декодирования показал, что широкое применение в реальных системах передачи и хранения информации из недвоичных кодов нашли только коды Рида-Соломона [1]. Однако декодеры коротких кодов Рида-Соломона, которые и применяются на практике, не могут обеспечить высокую эффективность декодирования, а для длинных кодов Рида-Соломона невозможно создать декодер из-за высокой сложности его реализации.

Среди других методов коррекции ошибок наиболее перспективным является метод недвоичного многопорогового декодирования [2, 3], обеспечивающий практически оптимальное декодирование даже очень длинных недвоичных самоортогональных кодов (СОК) при любом размере символа. Отличительными особенностями данного метода являются линейная сложность реализации и высокая эффективность коррекции ошибок. Поэтому недвоичный многопороговый декодер (qМПД) может с успехом применяться в высокоскоростных системах передачи и хранения больших объемов информации.

Рассмотрим характеристики недвоичных многопороговых декодеров в q-ичном симметричном канале (qСК). Зависимости вероятности символьной ошибки P_s после декодирования от вероятности символьной ошибки P_0 в qСК для кодов с кодовой скоростью R=1/2 представлены на рис. 1. Здесь кривыми *1* и *2* показаны характеристики qМПД для кодов с длиной блока n=4000 и 60000 символов при использовании 8-ми битовых символов (размер алфавита q=256). Объем моделирования в нижних точках данных графиков составлял от $5\cdot10^{10}$ до $2\cdot10^{12}$ символов, что свидетельствует о крайней простоте метода. Для сравнения на данном рисунке кривой *4* показаны характеристики (255, 128) кодов Рида-Соломона для q=256. Из рис. 1 видно, что эффективность qМПД оказывается гораздо лучше эффективности кодов Рида-Соломона для символов такого же размера. При увеличении длины блока qМПД разница в эффективности становится еще более существенной. Характеристики qМПД при использовании двухбайтовых символов представлены на рис. 1 кривой *3*. Здесь использовался код с R=1/2 и n=32000 символов. Отметим, что очень простой для реализации qМПД декодер для двухбайтового кода длины 32000 оказывается способным обеспечить помехоустойчивость, принципиально недостижимую даже для кода Рида-Соломона длины 65535 двухбайтовых символов (кривая *5* на рис. 1), декодер для которого чрезвычайно сложен для реализации. При этом qМПД для двухбайтовых символов практически ни в чем не сложнее однобайтового, так как даже обычные микропроцессоры одинаково просто и быстро работают и с однобайтовыми символами, и с 2-х и даже с 8-байтовыми символами.

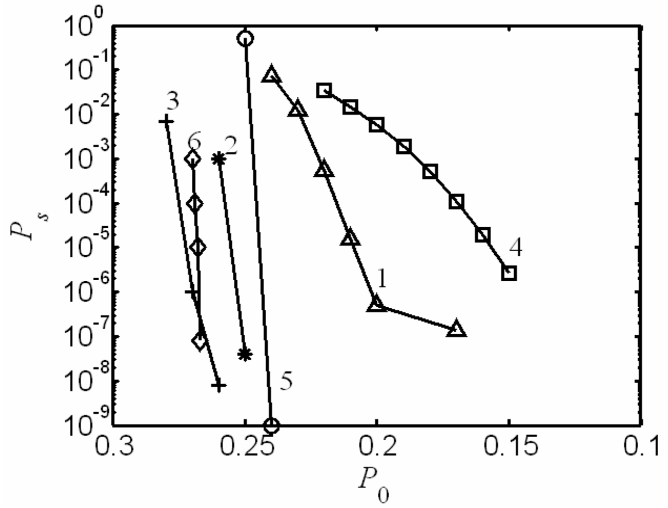

Рис. 1. Характеристики недвоичных кодов с R=1/2 в qСК

До настоящего времени были известны характеристики qМПД только для q-ичных симметричных каналов, где ошибки появлялись независимо друг от друга с равной вероятностью. Однако часто в реальных системах передачи и хранения информации возникают пакеты ошибок, которые обычно существенно ухудшают эффективность классических методов коррекции ошибок. Пакеты ошибок могут быть вызваны источником периодического шума, например, расположенным поблизости радиолокатором, многолучевым распространением сигнала, каким-то вращающимся механизмом или в случае возникновения царапин и отпечатков пальцев на оптическом носителе. Традиционно, для того чтобы разбить пакеты ошибок применяется перемежитель. Однако использование перемежителя усложняет процесс обработки сигнала, особенно при большом размере блока. Кроме того, использование информации о состоянии канала без применения перемежения иногда позволяет достигать лучшей эффективности декодирования [4]. Каналы с пакетирующимися ошибками могут быть описаны моделью канала Гилберта-Эллиота [5, 6], который является наиболее простым представителем данного класса каналов.

Канал Гилберта-Эллиота может находиться в двух состояниях: “плохой” и “хороший”. С вероятностью P_{bad} канал изменяет свое состояние с хорошего на плохое, а с вероятностью $1-P_{\text{bad}}$ остается в состоянии “хороший”. С вероятностью P_{good} канал изменяет свое состояние с плохого на хорошее, а с вероятностью $1-P_{\text{good}}$ остается в состоянии “плохой”. В том случае, если канал находится в состоянии “хороший”, вероятность искажения символа при передаче по каналу достаточно мала и равна P_{g}, а вероятность правильной передачи символа равна $1-P_{\text{g}}$. Когда канал находится в состоянии “плохой”, вероятность искажения символа достаточно высока и равна P_{b}, а вероятность правильной передачи символа равна $1-P_{\text{b}}$.

На рис. 2 показана зависимость частоты символьных ошибок на выходе qМПД от средней вероятности ошибки P_e в канале Гилберта-Эллиота с параметрами P_{good}=0.1, P_{g}=0.01, P_{b}=0.99 и при различных P_{bad}, определяемой в соответствии с выражением

$$P_e = \frac{P_{bad} \cdot P_b + P_{good} \cdot P_g}{P_{bad} + P_{good}}.$$

На данном рисунке кривой *3* показаны характеристики qМПД для кода с R=1/2, d=17 и длиной блока n около 100000 однобайтовых символов. В процессе декодирования данного кода выполнялось от 10 до 40 итераций. Видно, что такой qМПД эффективно исправляет около 25% ошибок в данном канале, в то время как декодер кодов Рида-Соломона длиной 255 однобайтовых символов, характеристики которого представлены кривой *1*, справляется только с 1% ошибок. Использование несколько более длинных кодов Рида-Соломона для символов большего размера позволяет получить лишь немного лучшие результаты (кривая *2* на рис. 2), а использование еще более длинных кодов Риде-Соломона ограничивается высокой сложностью реализации их декодеров. Следовательно, недвоичные МПД оказываются значительно эффективнее декодеров для кодов Рида-Соломона и проще для реализации и в каналах с группирующимися ошибками.

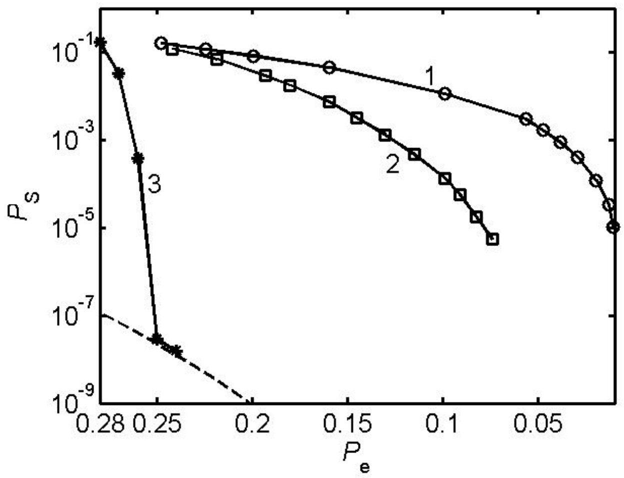

Рис. 2 Характеристики *q*МПД и декодера кодов Рида-Соломона в канале Гилберта-Эллиота

Таким образом, сравнение кодов Рида-Соломона и недвоичных самоортогональных кодов, декодируемых *q*МПД, показало, что коды Рида-Соломона уступают недвоичным СОК по эффективности и при этом имеют гораздо большую вычислительную сложность декодирования. Кроме того, *q*МПД эффективно работает не только в каналах с независимыми ошибками, но и в каналах с пакетирующимися ошибками, что делает превосходство *q*МПД над кодами Рида-Соломона еще более существенным.

Это позволяет считать, что в дальнейшем *q*МПД смогут заменить коды Рида-Соломона в разнообразных системах передачи и хранения данных, обеспечивая работу подобных систем в значительно более сложных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №08-07-00078).

Литература

1. Reed I. S., Solomon G. Polynomial codes over certain finite fields // J. Soc. Industrial Appl. Math., 1960, vol. 8, P. 300–304.
2. Золотарев В.В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования – М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. 232 с.
3. Веб-сайт ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru.
4. Chen J., Tanner R. M. A hybrid coding scheme for the Gilbert-Elliott channel // IEEE Transactions on Communications, №54(10), p. 1787–1796, 2006.
5. Mushkin M., Bar-David I. Capacity and Coding for the Gilbert-Elliott channels // IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-35 №.6, p. 1277–1290, 1989.
6. Richardson T. Modern coding theory – Cambridge University Press, 2008, 272 p.

RESEARCH OF NON-BINARY MULTITHRESHOLD DECODERS IN COMMUNICATION CHANNELS WITH ERROR BURSTS

Zolotarev V.V., Ovechkin G.V., Ovechkin P.V.

Abstract. Error-correcting coding is applied to correction of the errors arising at data transmission over physical channels. In many cases in real systems it is convenient to work with data having byte structure. By this time among non-binary codes only Reed-Solomon codes was found practical application. Considerably better efficiency non-binary multithreshold decoders (qMTD) of self-orthogonal codes possess. In the report characteristics of non-binary multithreshold decoders in q-ary symmetrical channel and in Gilbert-Elliott channels with error bursts are considered. It is shown that efficiency of qMTD appears much better than efficiency of Reed-Solomon codes with similar parameters. It allows to consider that qMTD can replace Reed-Solomon codes in various communication and data storage systems.