ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ ПО ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ

Золотарев В.В. [1], Овечкин Г.В. [2], Гринченко Н.Н.[2]

1 – Институт космических исследований, г. Москва, Россия;
2 – Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань, Россия
g_ovechkin@mail.ru

For optical transport network forward error correcting codes play an important role. In such network very simple for implementation and simultaneously high bit-error rate (BER) performance codes and decoders are needed. In the paper the multithreshold decoders (MTD) for convolutional and block self-orthogonal codes (SOC) are discussed. It's shown MTD provides near optimum decoding of SOC with linear complexity only at very high noise level. So MTD can be applied in high rate optical transport network. The BER performance of MTD is analyzed also. It's shown MTD provides BER required in optical channels.

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются оптические линии связи (ОЛС), обеспечивающие передачу больших объемов данных с огромной скоростью, составляющей сотни Гбит/с. Для повышения достоверности передачи данных в таких системах используется помехоустойчивое кодирование, применение которого позволяет существенно повысить к.п.д. использования канала. Главное требование к схемам кодирования и последующего декодирования в ОЛС наряду с очень высокой достоверностью (вероятность ошибки порядка 10^{-17}) состоит в обеспечении предельно быстрого декодирования данных. Поэтому в ОЛС можно применять только самые быстродействующие декодеры.

Очевидно, что самыми быстрыми будут декодеры, которые состоят только из большого числа самых быстрых элементов микроэлектроники – больших блоков памяти или длинных регистров сдвига. Более того, в них не должно быть длинных цепей обратных связей, которые сильно снижают скорость продвижения данных по таким регистрам. Результаты в [1] показали, что наиболее подходящими для высокоскоростных систем по данным критериям являются многопороговые декодеры (МПД) самоортогональных кодов [2, 3]. Для МПД показано, что они позволяют почти оптимально (т.е. так же хорошо, как и переборные экспоненциально сложные от длины кода методы) декодировать даже очень длинные коды с линейной сложностью исполнения, демонстрируя при этом хорошую корректирующую способность.

МПД декодер состоит практически только из регистров сдвига без обратных связей и выполняет лишь простейшие операции суммирования и сравнения небольших целых чисел, что значительно ускоряет его работу на больших скоростях. Более того, авторами метода уже решена задача как бы «мгновенного» формирования решения порогового элемента в МПД. Эти технические решения превращают МПД в теоретически самое быстродействующее устройство для декодирования данных, так как при этом регистры сдвига декодера перемещают данные с максимально возможной для них скоростью, поскольку оценки порогового элемента декодера всегда появляются прямо в момент сдвига данных по регистру. Таким образом, данные в таком декодере всегда пролетают по декодеру с максимально возможной скоростью для выбранной элементной базы. Опишем данный метод декодирования более подробно и рассмотрим вопросы применения МПД для повышения достоверности хранения больших объемов данных и передачи данных по ОЛС.

Принципы работы многопороговых декодеров

Многопороговый декодер (МПД) [2, 3] является развитием простейшего порогового декодера Месси и позволяет декодировать как блоковые, так и сверточные самоортогональные коды (СОК). В основе работы МПД лежит итеративное декодирование, в процессе которого оказывается возможным приблизиться к решению оптимального декодера в достаточно широком диапазоне кодовых скоростей и уровней шума в канале. При этом МПД сохраняет простоту и быстродействие обычного порогового декодера.

Для реализации операции кодирования СОК можно использовать простейшие схемы, построенные на основе регистров сдвига. Пример схемы кодера блокового СОК, заданного порождающим полиномом $g(x) = 1 + x + x^4 + x^6$, представлен на рис. 1 [2, 3]. Данный код характеризуется параметрами: длина кода n=26, длина информационной части k=13, кодовая скорость R=1/2, кодовое расстояние d=5.

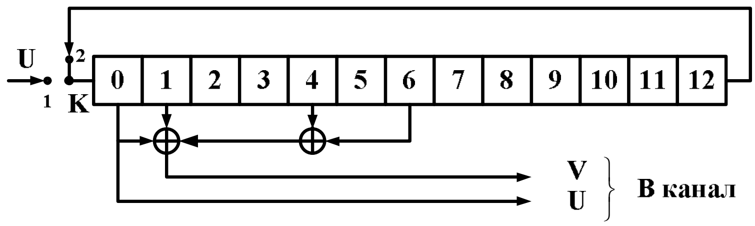

Рис. 1. Кодер блокового СОК с R=1/2, d=5 и n=26

Достаточно простым является и сам МПД, пример схемы реализации которого для такого же блокового кода показан на рис. 2. Наиболее сложной частью МПД является пороговый элемент (ПЭ), который при принятии решения о необходимости коррекции декодируемого символа просто суммирует свои входы и сравнивает полученную сумму с порогом. Более подробное описание принципов работы МПД можно найти в [2, 3].

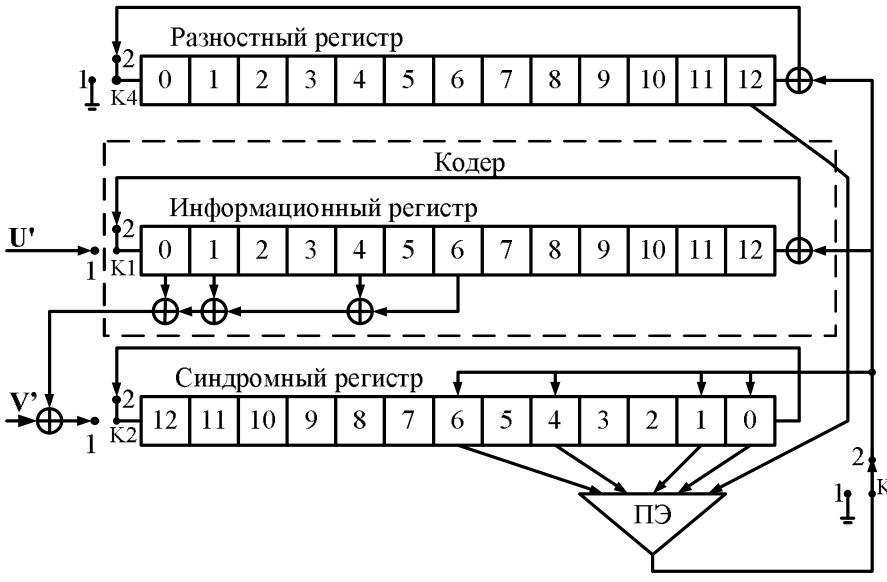

Рис. 2. Многопороговый декодер блокового СОК с R=1/2, d=5 и n=26

В [3] показано, что основным свойством МПД является строгое приближение его решения к решению оптимального (по максимуму правдоподобия) декодера при каждом изменении декодируемого символа. Однако процесс перехода от одного кодового слова к другому, более правдоподобному, может прекратиться до того, как МПД достигнет решения оптимального декодера. Основной причиной этого является значительная подверженность пороговых декодеров, являющихся составной частью МПД, эффекту размножения ошибок (РО) [3]. Данный эффект проявляется в том, что после совершения декодером ошибки через ветви обратной связи в синдром попадает большое число ошибок декодера, которые мешают правильному декодированию информационных символов на последующих итерациях. Это приводит к существенному росту вероятности ошибки декодирования. Следовательно, основным способом приближения решения МПД к решению оптимального декодера является уменьшение размножения ошибок [3].

В работах [2, 3] рассмотрены подходы, позволяющие оценить подверженность кода РО и построить коды с минимальным РО. Показано, что для получения наилучших характеристик необходимо использовать коды, в которых присутствует несколько информационных и проверочных ветвей. Типичная схема кодера такого кода, содержащего две информационные и две проверочные ветви, представлена на рис. 3. При использовании кода такой структуры удается добиться существенного снижения уровня размножения ошибок за счет уменьшения числа общих ошибок, участвующих при декодировании разных информационных битов [3]. Следует отметить, что как программная, так и аппаратная реализация МПД для данного кода также не представляет никакой сложности. В [3] авторами показано, что только за счет грамотного выбора кода и оптимизации его структуры без усложнения схемы декодирования можно получить дополнительный энергетический выигрыш порядка 1..1,5 дБ. Именно такие коды и используются в дальнейшем.

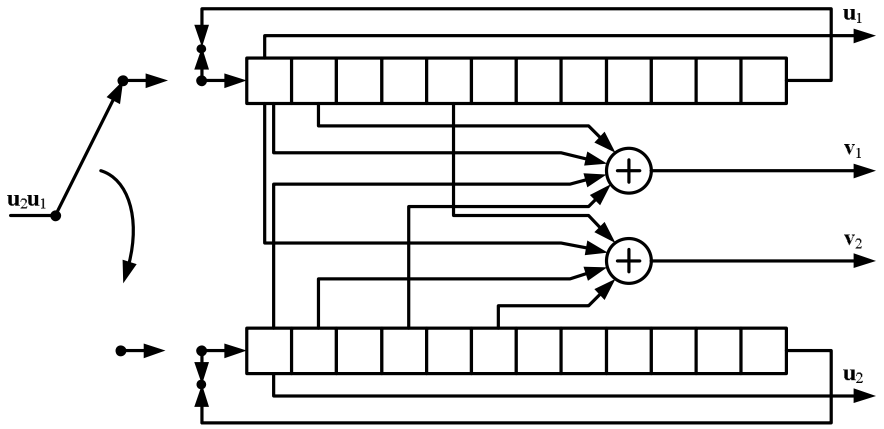

Рис. 3. Схема кодера блокового СОК с двумя информационными и двумя проверочными ветвями

Применение МПД для повышения достоверности передачи данных в ОЛС

Далее рассмотрим возможности МПД при их использовании совместно с высокоскоростными кодами, например, подходящими для применения в ОЛС. На рис. 4 представлены характеристики различных МПД сверточных кодов для кодовой скорости R=4/5 в гауссовском канале. График **1J** показывает возможности довольно сложного варианта использования МПД декодера японскими специалистами [4, 5]. В их схемах присутствуют цепи обратной пересылки данных, заметно снижающие быстродействие схемы, которая без таких цепей была бы более высокоскоростной. График **2Dec** приведен для МПД декодера, использующего код, нижняя оценка оптимального декодирования которого соответствует графику **2Opt**. При программном моделировании МПД даже для такого быстрого алгоритма требуемый большой объем эксперимента для оценки вероятности ошибки декодирования порядка P_b(e)=10^{-17} невозможен.

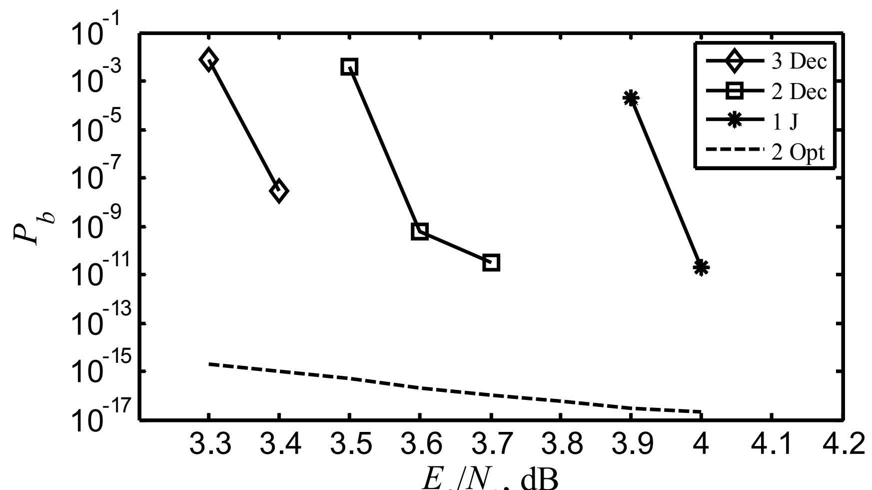

Рис. 4. Эффективность МПД для кодов с кодовой скоростью R=4/5 в гауссовских каналах

На графике **2Dec** указана точка $\mathbf{K_0}$. Она соответствует моделированию работы МПД и полному отсутствию ошибок на его выходе. Поэтому вероятность ошибки декодирования в данной точке оценена как $1/N$, где N – объем эксперимента, т.е. число декодированных битов данных в гауссовском канале. К этому можно добавить, что нами были проведены аналогичные эксперименты с другими кодами с несколько меньшими значениями минимального кодового расстояния d. Они показали, что во всех этих случаях по мере роста отношения сигнал/шум E_b/N_0 вероятности ошибки $P_b(e)$ для МПД с такими кодами действительно быстро падали и характеристики МПД достигали уровня оптимального декодера при E_b/N_0=3,7 дБ или меньше. Результаты этих экспериментов позволяют считать, что и данный код при использовании МПД позволит достичь уровня оптимального декодера, определяемого нижней границей **2Opt**, при таком же уровне шума 3,7 дБ. Если этого, тем не менее, не произойдет, то достижение уровня оптимального декодирования, по меньшей мере, при E_b/N_0=3,8 дБ можно считать гарантированным. Разумеется, гораздо более точные оценки возможностей МПД могут быть получены на аппаратных макетах МПД декодеров, которые разрабатываются в ИКИ РАН [3]. Последний график **3Dec** соответствует варианту применения МПД в случае, когда не требуется достичь обычными некаскадными методами кодирования очень малых вероятностей ошибки на выходе устройства декодирования. Отметим, что графики **2Dec** и **3Dec** соответствуют работе МПД при существенно большем уровне шума, чем у декодера, характеристики которого даны на графике **1J**. Для МПД, представленного на графике **3Dec**, требуется около 0,5 миллиона кодовых символов задержки принятия решения при 25 итерациях декодирования сверточного кода.

Понятно, что способность работать при большом уровне шума позволяет применять все представленные алгоритмы с различными модификациями МПД и в каскадных схемах разного типа [2, 3]. Все результаты трех вариантов МПД, представленных на рис. 4, в случае применения каскадных схем коррекции ошибок будут, конечно же, улучшены. Но при этом даже характеристики второго некаскадного кода изначально оказываются лучшими, чем в каскадных схемах кодирования, полученных в [4, 5]. Особенно заметным при каскадировании будет улучшение параметров 3-го кода, поскольку он работает при более высоком уровне шума, чем 2 предыдущих. Но при каскадировании всех типов всегда надо принимать дополнительные меры для того, чтобы не очень сильно снижать скорости обработки, так как при этом нарушается принцип мгновенного исправления ошибок в МПД при их движении по регистрам сдвига декодера.

Заключение

Приведенные результаты позволяют считать, что МПД методы действительно относятся к уникальным алгоритмам, способным обеспечивать эффективное декодирование при большом уровне шума, выполняя очень небольшое число операций и достигая высочайших уровней достоверности передачи и хранения цифровой информации и скорости ее обработки в высокоскоростных линиях связи и в устройствах хранения данных. Во всех этих случаях используются очень ограниченные ресурсы, такие, как простые микропроцессоры или самые дешевые ПЛИС, что и определяет простоту и эффективность новых методов помехоустойчивого кодирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, ИКИ РАН, РГРТУ. Большой объем дополнительной информации о МПД можно найти на веб-сайте www.mtdbest.ru.

Литература

1. *Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В.* Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь. М., 2008. №12. С.2–11.

2. *Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В.* Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов // Цифровая обработка сигналов, 2008, №1, С.2–11.

3. *Золотарев В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В.* Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования. М.:Горячая линия–Телеком, 2012. 239с.

4. *M.A. Ullah, K. Okada, H. Ogivara.* Multi-Stage Threshold Decoding for Self-Orthogonal Convolutional Codes. IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E93-A, No.11, pp. 1932 -1941, Nov. 2010.

5. *M.A. Ullah, R. Omura, T. Sato, H. Ogivara.* Multi-Stage Threshold Decoding for High Rate Convolutional Codes for Optical Communications. AICT 2011: 7-th Advanced international Conference on Telecommunications, pp. 87-93.