

Золотарев В.В., Овечкин Г.В.

МНОГОПороГОВОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ ДЛя ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Институт космических исследований, г. Москва

Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань

Анализируется возможность применения многопороговых декодеров (МПД) в оптических линиях связи. Представлены результаты компьютерного моделирования МПД при декодировании высокоскоростных самоортогональных кодов. Показано, что МПД позволяет обеспечить уровень достоверности передачи цифровых данных, требуемый в оптических линиях связи.

Рост объема передачи данных во всех системах становится все более значительным. Этому способствует развитие телекоммуникаций, стерео-, видео систем, спутникового вещания и разработка все более высоких стандартов телевидения высокой четкости (пHDTV). Важную роль в организации цифрового обмена выполняют оптические линии связи (ОЛС).

Главное требование к схемам кодирования и последующего декодирования в подобных системах наряду с очень высокой достоверностью (требуется обеспечить вероятность ошибки декодирования порядка $10^{-15}..10^{-17}$) состоит в обеспечении предельно быстрой обработки данных, т.е. декодирования на приемном конце линии ОЛС, поскольку скорости передачи таких линий обычно существенно более высокие, чем у электронных систем. Рекомендации ИТУ по применению кодирования [1, 2] свидетельствуют о необходимости выбора только самых быстродействующих декодеров для каналов связи такого типа. 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 таких обратных связей, которые сильно снижают скорость продвижения данных по таким регистрам. К ним относятся всякие цепи деления полиномов и узлы, выполняющие другие сложные вычисления. Результаты проведенного исследования показали, что наиболее подходящими к применению в ОЛС по данным критериям являются многопороговые декодеры (МПД) самоортогональных кодов [3, 4]. 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 от длины кода 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, что значительно ускоряет его работу на больших скоростях. Более того, в патенте России [5] решена задача как бы «мгновенного» формирования решения порогового элемента в МПД. Эти технические решения превращают МПД в теоретически самое быстродействующее устройство обработки, 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. Кроме того, так как МПД алгоритмы особенно эффективны при кратных скоростях, то применяя, например, не коды с $R=4/5$, а коды с $R=12/15$, когда используются 12 информационных и 3 проверочных регистра, или даже коды с $R=24/30$, можно существенно повысить быстродействие МПД декодера. Кроме того, всегда можно реализовать и простое параллельное использование МПД в линиях кодирования и декодирования.

Следует отметить, что большинство специалистов [6, 7] стремятся как можно больше увеличить кодовую скорость R используемого в ОЛС кода. Однако это лишено каких-либо оснований. Ограничения на кодовую скорость R при передаче данных по ОЛС не связаны с жесткими ограничениями мощности сигнала передатчика. Это позволяет чрезмерно не увеличивать R , что создает условия для значительного, в 10..100 раз упрощения используемых процедур декодирования. Физическая скорость декодирования при отказе от слишком высоких скоростей также может возрасти в десятки раз просто из-за выбора более простого декодера.

Далее рассмотрим возможности МПД при их использовании в ОЛС. На рис. 1 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 [7, 8]. 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. На графике **2Dec** указана точка **K₀**. 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 Институте космических исследований РАН [9].

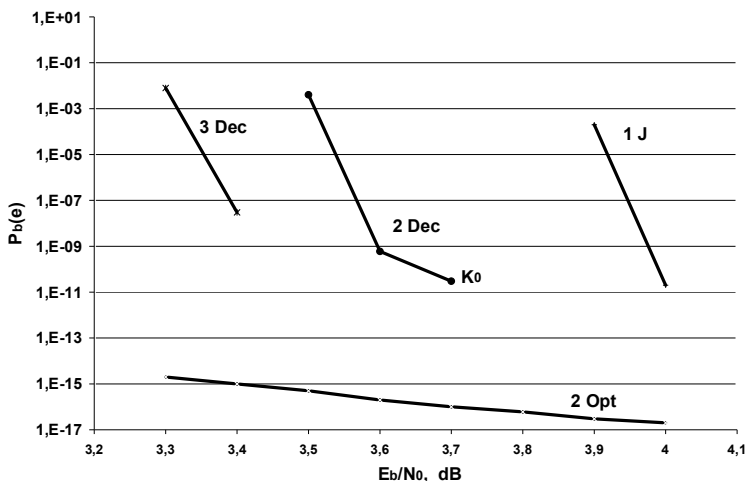


Рис. 1. Эффективность МПД для кодов с кодовой скоростью $R=4/5$ в гауссовских каналах

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 миллионов 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 [3, 4]. Все результаты трех вариантов МПД, представленных на рис. 1, в случае применения указанной выше схемы каскадирования, как и при использовании других внешних кодов, будут, конечно же, улучшены. Но при этом даже характеристики второго некаскадного кода изначально оказываются лучшими, чем в каскадных схемах кодирования, полученных в [7, 8]. 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.

Таким образом, по данным разных коллективов исследователей применение МПД в ОЛС является весьма перспективным и позволяет получить высокую эффективность декодирования, которая рекомендуется в документах ИТУ [1, 2].

Большой объем научно-методических и учебно-демонстрационных материалов по МПД алгоритмам представлен на специализированных двуязычных веб-сайтах www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru. Все работы по МПД в последние годы ведутся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №12-07-97533), Института космических исследований, Рязанского государственного радиотехнического университета и Правительства Рязанской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ITU-T, Rec. G.975, Forward error correction for submarine systems, Telecommunication Standardization Section, International Telecom Union, Nov. 1996.
2. ITU-T G. 975.1, Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine system, Telecommunication Standardization Section, International Telecom Union, Feb. 2004.

3. Золотарев В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования. - М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 239 с.
4. 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.
5. Золотарев В.В. Метод декодирования помехоустойчивого кода. Патент РФ №2377722, БИ №36, 2009.
6. J. Justesen, K.J. Larsen, L.A. Pedersen. Error correcting coding for OTN. IEEE Comm. Magazine, Vol.48, No.9, pp.70-75, Sep.2010.
7. 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.
8. M.A. Ullah, R. Omura, T. Sato, H. Ogivara. Multi-Stage Threshold Decoding for High Rate Convolutional Codes for Optical Communications. AICT 2011: The Seventh Advanced international Conference on Telecommunications, pp. 87-93.
9. Золотарев В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Высокоскоростной многопороговый декодер для систем передачи больших объемов данных // Научно-технический сборник «Техника средств связи», серия «Техника телевидения», юбилейный выпуск. – М.: МНИТИ, 2010. С. 41–43.