

Г.В. Овечкин

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОПороГОВОГО ДЕКОДЕРА САМООРТОГОНАЛЬНЫХ КОДОВ

Рассматриваются несколько способов улучшения характеристик многопорогового декодера (МПД), основанных на его использовании в составе различных кодовых конструкций. Предлагаемые методы позволяют при незначительном усложнении схем кодирования и декодирования повысить эффективность МПД более чем на 1 дБ при вероятности ошибки декодирования $P_b=10^{-5}$.

ВВЕДЕНИЕ. В теории кодирования известно несколько методов кодирования и декодирования, позволяющих работать вблизи пропускной способности канала [1...4]. Особое место среди них занимают многопороговые декодеры (МПД) [4...10], позволяющие почти оптимально декодировать даже очень длинные самоортогональные коды (СОК) с линейной от длины кода сложностью исполнения.

Схема МПД сверточного СОК с кодовой скоростью $R=1/2$, кодовым расстоянием $d=5$, длиной кодового ограничения $n_A=14$ и тремя итерациями декодирования $I=3$ представлена на рис. 1. Как видно, МПД является дальнейшим

котором отмечаются измененные пороговым элементом (ПЭ) информационные символы.

На рис. 2 представлены характеристики МПД в двоичном симметричном канале (ДСК) для нескольких СОК с кодовым расстоянием $d=9$, выбранных в соответствии с критерием минимизации эффекта размножения ошибок (РО). При получении данных зависимостей использовалось от 5 до 15 итераций декодирования. Для сравнения на рисунке пунктирными линиями представлены графики зависимости вероятности ошибки оптимального декодера. Как следует из представленных графиков, применение МПД для декодирования кодов с малым РО обеспечивает

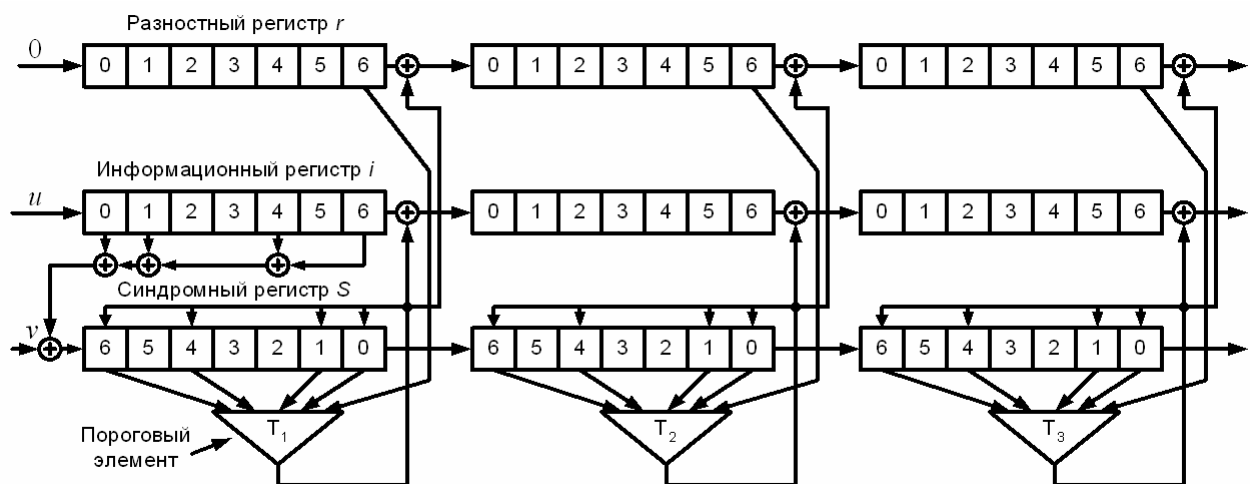


Рис. 1

развитием простейшего порогового декодера (ПД) Мессис [11]. В основе работы МПД лежит принцип итеративного декодирования, при котором декодер многократно исправляет информационные символы пришедшего из канала сообщения. Отметим, что МПД сохраняет простоту и быстрдействие обычного ПД, поскольку каждая итерация декодирования отличается от ПД только наличием «разностного» регистра, в

почти оптимальное декодирование, что позволяет получить энергетический выигрыш кодирования (ЭВК) более 5 дБ при $P_b=10^{-5}$ в ДСК.

Характеристики МПД в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) при использовании квантования на 16 уровней для тех же кодов представлены на рис. 3. Как видно, и в данном случае практически достигается решение оптимального декодера. Таким образом,

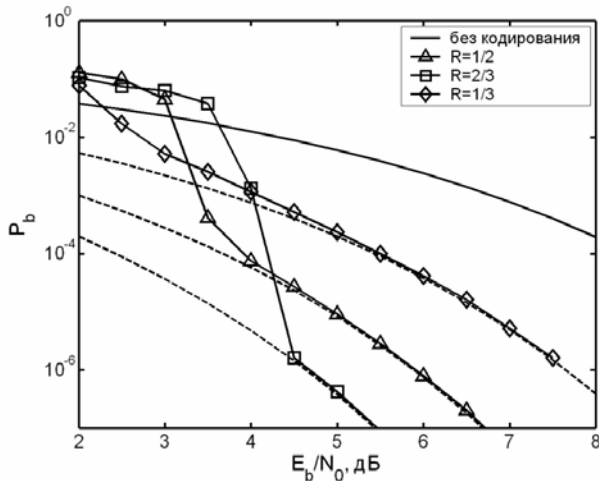


Рис. 2

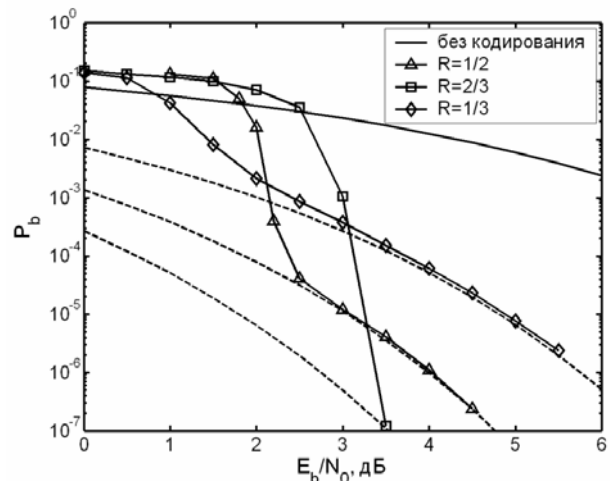


Рис. 3

переход к мягким решениям позволяет увеличить ЭВК на 1,5..2 дБ по сравнению с применением только жестких решений. Заметим, что такие результаты недостижимы при использовании практически реализуемого оптимального алгоритма Витерби [12] из-за экспоненциального роста сложности его реализации от конструктивной длины кода.

К сожалению, МПД можно применять только к кодам с небольшим кодовым расстоянием d , в связи с чем оказывается затруднительным повышение выигрыша от кодирования за счет применения других, более длинных кодов.

Среди возможных подходов к улучшению характеристик МПД следует выделить его использование в составе каскадных схем кодирования, таких как параллельные коды [13], коды с неравномерной энергетикой и коды с выделенными ветвями. Хотя отдельное использование каждого из данных подходов приводит лишь к незначительному (0,3..0,7 дБ) повышению эффективности по сравнению с обычным МПД, совместное применение этих схем позволяет добиться улучшения результатов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – разработка каскадных схем кодирования на основе МПД, позволяющих улучшить эффективность кодирования по сравнению с базовым МПД.

КАСКАДИРОВАНИЕ СОК, ДЕКОДИРУЕМОГО С ПОМОЩЬЮ МПД, С КОДАМИ С КОНТРОЛЕМ ЧЕТНОСТИ. Особое место среди кодовых схем на базе МПД занимает каскадирование с кодами контроля по четности (ККЧ) [14], использование которых позволяет повысить эффективность применения кодирования. Особенность данной схемы заключается в том, что такое каскадирование практически не требует дополнительных затрат на оборудование

(в схему кодирования требуется добавить лишь один сумматор по модулю 2), тогда как использование в каскадном коде, например, кодов Рида-Соломона несравненно сложнее.

Рассмотрим принцип работы декодера каскадного кода, внешним кодом которого является ККЧ, а внутренним – самоортогональный код (СОК), декодируемый с помощью МПД. При этом длину n_1 ККЧ необходимо выбирать достаточно большой (порядка 25..100) для того, чтобы потери в энергетике из-за уменьшения общей кодовой скорости были незначительными.

На первом этапе работы декодера, как в любом каскадном коде, осуществляется декодирование принятой из канала последовательности с помощью декодера внутреннего кода, т.е. МПД. Пусть после последней итерации МПД помнит все суммы проверок относительно всех декодированных символов. Тогда для исправления одиночных ошибок с помощью ККЧ для всех n_1 символов блока данного кода вычисляется достоверность решения $\Delta_i = |m_i - T|$, где m_i – сумма проверок относительно i -го символа, T – значение порога на пороговом элементе последней итерации декодирования, $i=1..n_1$. Затем, в случае обнаружения с помощью ККЧ ошибки (т.е. в случае отличия от нуля суммы элементов блока ККЧ по модулю 2), исправляется символ, достоверность Δ_i которого минимальна. Если есть несколько символов с минимальной достоверностью, то изменение информационных символов не производится.

На рис. 4 представлены верхние оценки вероятностей ошибки в ДСК при использовании двоичной фазовой модуляции для СОК с $d=7, 9, 11$ (здесь и далее считается, что данные СОК декодируются с помощью МПД) и каскадной схемы на его основе (длина ККЧ n_1 выбрана равной 25). Методика получения данных оценок под-

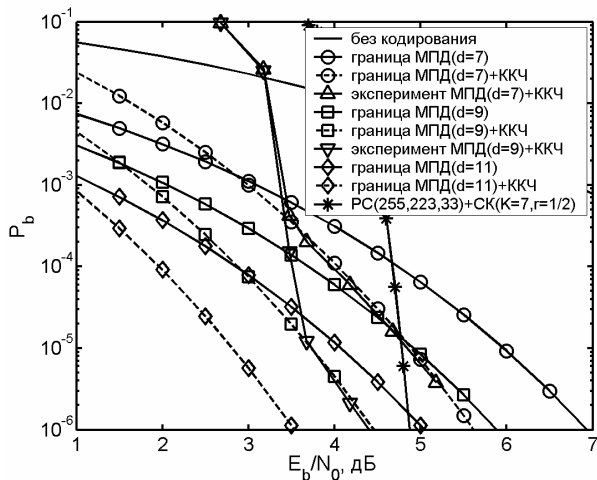


Рис. 4

робно рассмотрена в [14]. На этом же рисунке показаны результаты моделирования каскадного кода на базе СОК с $R=1/2$, $d=7$ и $d=9$. Заметим, что использование примитивного ККЧ совместно с СОК позволило получить дополнительный энергетический выигрыш около 1..1,5 дБ при вероятности ошибки на выходе декодера $P_b=10^{-5}$.

Эффективность работы каскадной схемы, состоящей из тех же СОК и ККЧ с $n_1=50$, в канале с АБГШ отражена на рис. 5. Как видно, и в данном случае каскадный код оказывается значительно лучше некаскадного. Следует отметить, что при получении представленных зависимостей ККЧ использовался на нескольких итерациях декодирования, тем самым как бы «помогая» МПД при декодировании внутреннего СОК. Также отметим, что значительно более сложный каскадный код, состоящий из кода Рида-Соломона (255, 223, 33) и сверточного кода с длиной кодового ограничения $K=7$ и кодовой скоростью $R=1/2$, декодируемый с помощью оп-

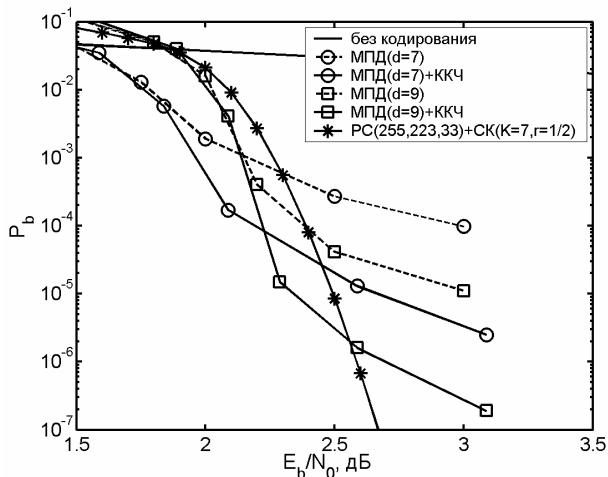


Рис. 5

тимального алгоритма Витерби, даже при меньшей кодовой скорости ($R \approx 0,437$) уступает каскадной схеме на базе МПД при $P_b > 10^{-6}$. Заметим, что рассмотренный способ каскадирования позволяет улучшить характеристики МПД только в области его эффективной работы.

ПРИМЕНЕНИЕ МПД В СХЕМАХ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ КОДИРОВАНИЕМ. Для приближения границы эффективной работы МПД к пропускной способности канала возможно его применение в ранее упомянутых схемах параллельного кодирования [13]. В основе построения данных схем лежит выделение в СОК C_0 с кодовым расстоянием d_0 и кодовой скоростью R_0 некоторого составляющего кода C_1 с кодовой скоростью $R_1 > R_0$, тоже являющегося СОК. Кодовое расстояние d_1 выделенного кода выбирается значительно меньшим d_0 , и, следовательно, область его эффективной работы будет ближе к границе Шеннона. При декодировании параллельного кода сначала выполняются несколько итераций декодирования составляющего кода C_1 , позволяющие примерно на порядок снизить вероятность ошибки в принятой из канала информационной последовательности, после чего в процесс декодирования включается оставшаяся часть кода C_0 . Отличительной особенностью данной схемы кодирования является то, что здесь внешний код работает с кодовой скоростью R_0 , в то время как в обычных каскадных кодах кодовая скорость внешнего кода близка к единице. Данное свойство обеспечивает существенное преимущество МПД перед другими каскадными конструкциями.

Для примера на рис. 6 и 7 представлены результаты моделирования схем с параллельным кодированием в ДСК и канале с АБГШ для СОК с $R_0=6/12$, $d_0=13$ и $R_0=5/10$, $d_0=15$. В параллельном коде с $d_0=13$ в данном случае был выделен

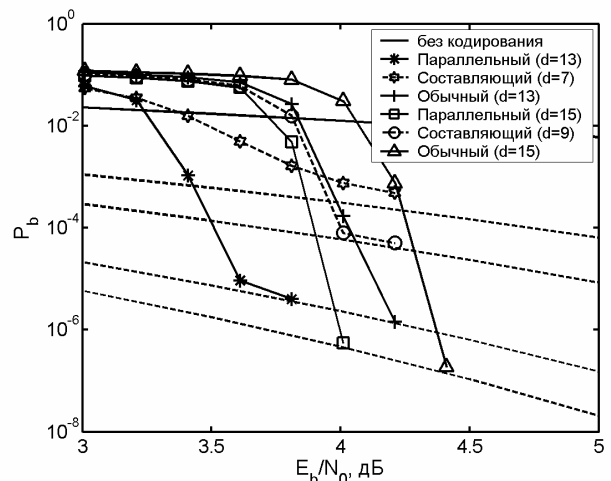


Рис. 6

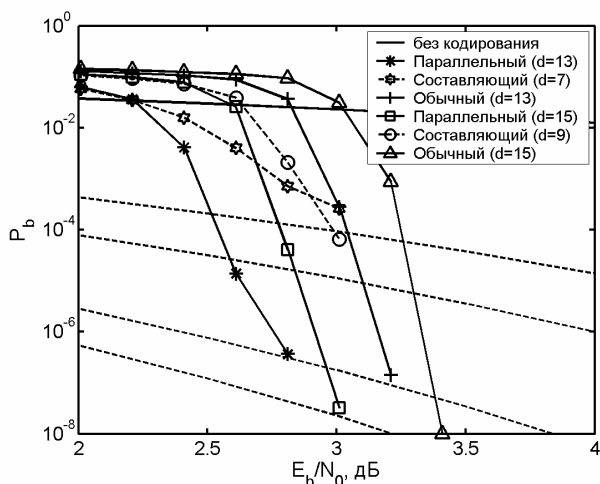


Рис. 7

внешний код с $R_1=6/11$, $d_1=7$, а в коде с $d_0=15$ был выделен код с $R_1=5/9$, $d_1=9$. Зависимости «составляющий» здесь отражают вероятность ошибки на выходе выделенных кодов параллельной схемы. Пунктирными линиями без маркеров на данных рисунках показаны вероятности ошибки оптимального декодирования кодов с $d=7, 9, 11, 13$ и 15 . Для сравнения на рис. 6 и 7 также показаны характеристики декодируемых с помощью МПД обычных СОК с аналогичными d и R .

Как следует из анализа представленных зависимостей, применение параллельного кодирования позволяет приблизить границу эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В работе были рассмотрены два метода улучшения эффективности МПД. Первый из них заключается в добавлении к СОК, декодируемому с помощью МПД, внешнего ККЧ, что позволяет на 1–2 порядка уменьшить вероятность ошибки в области эффективной работы МПД. Второй метод состоит в выделении в обычном СОК некоторого составляющего кода, используемого в декодере в качестве внутреннего по отношению ко всему СОК. Данный способ, названный параллельным кодированием, позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ. Следует отметить, что представленные схемы кодирования обладают почти такой же сложностью практической реализации, что и обычный МПД [4], а, следовательно, оказываются существенно проще известных методов декодирования при сопоставимой эффективности. Учитывая вышесказанное, рассмотренные в работе методы защиты информации от ошибок можно рекомендовать к применению в перспективных высокоскоростных цифровых системах связи.

Дополнительную информацию о МПД можно найти на сайте [15].

Библиографический список

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes // Proc. of the Intern. Conf. on Commun (Geneva, Switzerland). 1993, May. P. 1064–1070.
2. Divsalar D., Jin H., McEliece R. J. Coding theorems for «turbo-like» codes // Proc. 36th Allerton Conf. on Commun. Control and Computing. Allerton, Illinois. 1998, Sept. P. 201–210.
3. Jin H., Khandekar A., McEliece R. Irregular repeat-accumulate codes // Proc. 2nd Int. Symp. on Turbo Codes and Related Topics (Brest, France). 2000, Sept. P. 1–8.
4. Zolotarev V.V. The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels // Proc. 7th Intern. Symp. on Commun. Theory and Applications 7ISCTA'03 (St. Martin's College, Ambleside, UK, 13–18 July). 2003. P. 18–22.
5. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи // Электросвязь. 2003. № 9. С. 34–37.
6. Золотарев В.В. Недвоичные многопороговые декодеры // Цифровая обработка сигналов. 2003. № 3. С. 10–12.
7. Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарев В.В., Третьякова Е.И. Вычислительные сети. М.: Наука, 1981. 277 с.
8. Золотарев В.В. Использование помехоустойчивого кодирования в технике связи // Электросвязь 1990. № 7. С. 7–10.
9. Золотарев В.В. Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов // Спутниковая связь. ICSC-2000: Тез. докл. 4-й Международной конф. М.: МЦНТИ, 2000. Т. 2. С. 20–25.
10. Золотарев В.В. Коды и кодирование. М.: Знание, 1990. 64 с.
11. Мессис Дж. Пороговое декодирование / Пер. с англ.; Под ред. Э.Л. Блоха. М.: Мир, 1966. 208 с.
12. Витерби А. Границы ошибок для сверточных кодов и асимптотически оптимальный алгоритм декодирования // Некоторые вопросы теории кодирования. М.: Мир, 1970. С. 142–165.
13. Золотарев В.В. Параллельное кодирование в каналах СПД // Вопросы кибернетики. 1986. Вып. 120. С. 56–58.
14. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Использование многопорогового декодера в каскадных схемах // Вестник РГРТА. 2003. Вып. 11. С. 112–115.
15. Веб-сайт www.mtdbest.iki.rssi.ru.