

## РАЗРАБОТКА КАСКАДНЫХ СХЕМ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК НА ОСНОВЕ МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ\*

Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В., Овечкин П.В.

Рязанская государственная радиотехническая академия, г. Рязань

Одной из важнейших проблем при создании высокоскоростных цифровых систем связи является правильный выбор методов кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов, необходимых для организации достоверной передачи цифровой информации. Использование помехоустойчивых кодов понижает требуемое отношение сигнал/шум в канале связи и позволяет получить энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), каждый децибел которого более 20 лет назад оценивался в миллионы долларов в среднемасштабных системах [1]. Сейчас стоимость ЭВК многократно возросла, поскольку он позволяет уменьшать размеры очень дорогих антенн, повышать дальность связи, увеличивать скорость передачи данных, снижать необходимую мощность передатчика. Именно поэтому проблеме увеличения ЭВК во всем мире уделяется огромное внимание, а достоинства простых и эффективных алгоритмов декодирования невозможно переоценить.

На сегодняшний день известно несколько методов коррекции ошибок, позволяющих работать вблизи пропускной способности канала [1]. Среди них наибольший интерес вызывают разработанные российскими специалистами многопороговые декодеры [2] (далее МПД), которые являются лучшими по соотношению эффективности и сложности реализации, а их программные версии даже при большом уровне шума выполняют на два порядка меньшее число операций, чем другие алгоритмы. В основе работы МПД лежит итеративное декодирование, что позволяет вплотную приблизиться к решению оптимального декодера в достаточно широком диапазоне кодовых скоростей и уровней шума в канале. При этом МПД сохраняет простоту и быстрдействие обычного порогового декодера, что делает его очень привлекательным для применения в существующих и вновь создаваемых высокоскоростных каналах связи.

На рис. 1 кривой «MTD(R=1/2,d=9)» представлены результаты моделирования МПД самоортогонального кода (СОК) с кодовой скоростью  $R=1/2$  и минимальным кодовым расстоянием  $d=9$  в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) при использовании двоичной фазовой модуляции. Для сравнения на данном рисунке показаны зависимости вероятности ошибки  $P_b$  от отношения сигнал-шум на бит  $E_b/N_0$  оптимального декодера (кривая «Opt(R=1/2,d=9)») аналогичного кода при тех же условиях.

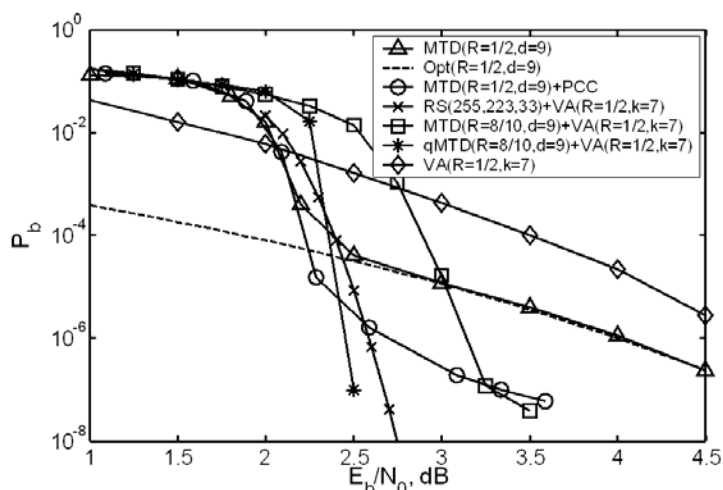


Рис. 1. Эффективность методов коррекции ошибок в канале с АБГШ

Из сравнения данных зависимостей следует, что характеристики МПД практически совпадают с характеристиками оптимального декодера даже при достаточно высоком уровне шума в канале связи. Кроме того, характеристики МПД оказываются существенно лучше стандартного алгоритма Витерби с длиной кодового регистра  $k=7$ , характеристики которого представлены на рис. 1 кривой «VA(R=1/2,k=7)».

Главным достоинством МПД является крайне малая сложность декодирования. Как и в случае обычного порогового декодера, в МПД на каждой итерации суммируются взвешенные проверки, которые сравниваются с порогом и изменяются вместе с декодируемым символом, если этот порог превышен. Число итераций декодирования  $I$  в этом случае обычно не более 50, а общая сложность декодирования с помощью МПД, очевидно, оценивается для  $d < 25$  как  $N_1 \sim (d+2) \cdot (I+4)$ .

Но объем повторяющихся вычислений сумм на пороге можно значительно снизить, поскольку символы на каждом из пороговых элементов изменяются в процессе декодирования весьма редко. Если при тех же условиях возможно ухудшение характеристик МПД всего на 0,1 дБ по энергетике, что обычно вполне

допустимо, то объем вычислений в МПД уменьшается до  $N_2 \sim C_1 \cdot d + C_2 \cdot I$ , где константы  $C_1$  и  $C_2$  – небольшие целые числа.

Из полученной оценки непосредственно следует, что формально определяемая сложность как число операций у МПД почти на 2 порядка меньше, чем у турбоподобных кодов с сопоставимой энергетической эффективностью [3]. Такое преимущество МПД по сложности реализации необходимо использовать.

Среди существующих подходов к повышению эффективности МПД можно выделить его использование в составе различных каскадных схем кодирования, которые, как следует из теории кодирования [4], позволяют значительно увеличить эффективность от применения кодирования по сравнению с базовыми некаскадными методами. При этом совместно с МПД желательно использовать самые простые методы коррекции ошибок для сохранения простоты практической реализации результирующей схемы.

В докладе обсуждаются несколько каскадных схем кодирования/декодирования [5], в которых в качестве составляющих кодов использовались СОК, декодируемые с помощью МПД. Совместно с СОК в разработанных схемах использовался код с контролем четности и короткий сверточный код, декодируемый с помощью оптимального декодера Витерби.

Для исследования перечисленных каскадных кодов были разработаны программные средства, позволяющие определять вероятность ошибки декодирования при заданном отношении сигнал/шум в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании двоичной фазовой модуляции. Данная модель канала достаточно точно описывает реальные спутниковые и некоторые другие типы каналов. Также программные средства позволяют исследовать характеристики каскадных кодов в некотором диапазоне отношений сигнал/шум в канале связи. Результаты такого исследования наглядно представляются в виде графика.

При каскадировании МПД с кодами с контролем четности (далее ККЧ) [5] внешним кодом является ККЧ. Его длина выбирается достаточно большой (50–100) для того, чтобы общая скорость кода практически не изменилась. В процессе работы декодера каскадного кода принятая из канала последовательность сначала декодируется с помощью МПД, а затем с помощью декодера ККЧ. Отличительной чертой данной схемы коррекции ошибок является ее малая сложность практической реализации, всего лишь на несколько процентов превосходящая сложность реализации обычного МПД.

Результаты моделирования данной схемы кодирования/декодирования при длине ККЧ  $n=50$  представлены на рис. 1 кривой «MTD( $R=1/2, d=9$ )+PCC». Следует заметить, что при получении графиков декодер ККЧ использовался не только после последней, но и после нескольких промежуточных итераций МПД, тем самым как бы «помогая» МПД при декодировании внутреннего СОК. Результаты моделирования показывают, что использование совместно с МПД кода с контролем четности позволяет примерно на два порядка уменьшить вероятность ошибки в области эффективной работы МПД. Также отметим, что каскадный код, состоящий из кода Рида-Соломона (255, 235, 33) и сверточного кода с кодовой скоростью  $1/2$  и длиной кодового ограничения  $k=7$ , декодируемый с помощью оптимального алгоритма Витерби, даже при меньшей общей кодовой скорости ( $R \sim 0,437$ ) несколько уступает каскадной схеме на базе МПД при  $P_b > 10^{-6}$  (кривая «RS(255,235,256)+VA( $R=1/2, k=7$ )»). К сожалению, рассмотренный способ каскадирования позволяет улучшить характеристики МПД только в области его почти оптимальной работы.

В каскадной схеме МПД с Витерби [6] внешним кодом является МПД, а Витерби – внутренним. При кодировании сначала используется кодер блокового СОК, закодированная последовательность с выхода которого поступает на кодер короткого сверточного кода. Затем результат кодирования сверточным кодом передается по каналу связи. Декодирование полученного кода производится в обратном порядке, то есть принятая из канала последовательность сначала декодируется декодером Витерби, а затем решения с выхода декодера Витерби декодируются с помощью МПД. Заметим, что в качестве внешнего кода может использоваться как обычный двоичный, так и недвоичный СОК.

Результаты моделирования данных схем кодирования представлены на рис. 1 кривыми «MTD( $R=8/10, d=9$ )+VA( $R=1/2, k=7$ )» и «qMTD( $R=8/10, d=9$ )+VA( $R=1/2, k=7$ )». В первой схеме в качестве внешнего кода использовался двоичный СОК с кодовой скоростью  $R=8/10$  и кодовым расстоянием  $d=9$ , декодируемый с помощью МПД при 10 – 15 итерациях кодирования, а в качестве внутреннего – сверточный код с кодовой скоростью  $R=1/2$  и конструктивной длиной  $k=7$ , декодируемый с помощью оптимального декодера Витерби. Во второй схеме вместо двоичного внешнего СОК применялся недвоичный СОК с теми же параметрами при использовании 8-ми битовых символов ( $q=256$ ).

Из результатов моделирования следует, что каскадный кодек, состоящий из двоичного СОК и сверточного кода уступает по эффективности не только соответствующему каскадному кодеку с qМПД (более 0,6 дБ), но и кодеку Рида-Соломона с Витерби (около 0,5 дБ) и кодеку МПД с ККЧ (более 0,7 дБ). Также данный кодек при отношении сигнал/шум в канале связи меньше 3 дБ работает хуже, чем обычный МПД, поэтому применение каскадного кода МПД с Витерби на практике нецелесообразно.

Существенно лучшие результаты по эффективности показывает каскадный кодек, состоящий из недвоичного СОК и сверточного кода, который выигрывает 0,2 дБ даже у такого широко применяемого

каскадного кода, как код Рида-Соломона с Витерби при гораздо меньшей сложности практической реализации. Заметим, что данная схема коррекции ошибок может быть легко использована в существующих системах передачи данных, в которых уже используется декодер Витерби, простым добавлением аппаратно или программно реализованного недвоичного МПД. Такое преимущество использования недвоичного СОК перед двоичным объясняется тем, что ошибки на выходе декодера Витерби обычно группируются в пакеты, которые могут исказить всего несколько символов недвоичного кода. В результате даже при большой вероятности битовой ошибки на выходе декодера Витерби вероятности символьной ошибки на входе МПД будет незначительной, и МПД будет выполнять практически оптимальное декодирование используемого кода.

Представленные в докладе возможности МПД демонстрируют высокий уровень российских разработок в сфере систем связи различного назначения и обеспечивают эффективное повышение достоверности передачи в цифровых спутниковых, космических и других каналах связи самого широкого назначения.

Дополнительную информацию о МПД можно найти на сайте [7].

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №05-07-90024в)

#### Литература

1. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи // Электросвязь, 2003. №9. С. 34–37.
2. Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 126 с.
3. В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин. Сравнение сложности реализации эффективных методов декодирования помехоустойчивых кодов // мат. 6-й межд. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М.: 2004. Том. 1. С. 220–222.
4. Форни Д. Каскадные коды / Пер. с англ. под ред. Самойленко С.И. М.: Мир, 1970. 208 с.
5. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Использование многопорогового декодера в каскадных схемах // Вестник РГРТА. 2003. Вып. 11. С. 112–115.
6. Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Эффективность каскадных схем кодирования на базе многопорогового декодера // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2005. С. 119-123.
7. Веб-сайт [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru).