

УДК 681.391

Овечкин П.В., Овечкин Г.В., Золотарев В.В.

Рязанская государственная радиотехническая академия

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАСКАДНЫХ СХЕМ КОДИРОВАНИЯ НА БАЗЕ МНОГОПороГОВОГО ДЕКОДЕРА

В статье рассматриваются каскадные схемы кодирования, состоящих из сверточных самоортогональных кодов, декодируемых с помощью многопороговых декодеров, и таких кодов, как код с контролем четности и короткий сверточный код, декодируемый с помощью декодера Витерби.

При передаче цифровых данных по каналу с шумом всегда существует вероятность того, что принятые данные будут содержать ошибки. Для уменьшения частоты появления ошибок до приемлемой обычно применяется помехоустойчивое кодирование. На сегодняшний день известно несколько методов коррекции ошибок, позволяющих работать вблизи пропускной способности канала [1]. Среди них можно выделить разработанные российскими специалистами многопороговые декодеры (МПД) [2], программные версии которых даже при большом уровне шума выполняют на два порядка меньшее число операций, чем другие алгоритмы.

На рис. 1 представлены характеристики МПД в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) в случае использования двоичной фазовой модуляции (ФМ2) для нескольких самоортогональных кодов (СОК) с кодовым расстоянием  $d=9$ , выбранных в соответствии с критерием минимизации эффекта размножения ошибок (РО). Данная модель канала была выбрана потому, что она достаточно точно описывает реальные спутниковые и некоторые другие типы каналов. При получении представленных зависимостей использовалось порядка 10 итераций декодирования. Для сравнения на рисунке пунктирными линиями представлены графики зависимости вероятности ошибки оптимального декодирования данных кодов. Как следует из представленных графиков, применение МПД для декодирования кодов с малым РО обеспечивает практически оптимальное декодирование, что позволяет получить энергетический выигрыш более 7 дБ при  $P_b=10^{-5}$ . На данном рисунке кривой «МПД ПЛИС» также представлены характеристики ПЛИС МПД сверточного кода, разработанной ведущими специалистами в области помехоустойчивого кодирования.

На рис. 1 для сравнения представлены характеристики классического декодера Витерби для сверточного кода с конструктивной длиной  $K=7$  и кодовой скоростью  $1/2$  и  $2/3$ . Видно, что МПД в данных условиях оказывается значительно лучше практически реализуемого декодера

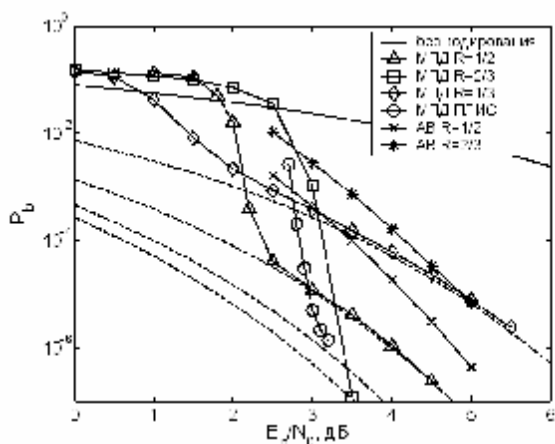


Рис. 1. Эффективность многопороговых декодеров в канале с АБГШ при использовании ФМ2

Витерби, причем с повышением кодовой скорости разница в эффективности становится все более внушительной.

Из теории кодирования известно, что каскадные коды, в которых информация последовательно кодируется с помощью нескольких методов, обладают существенно лучшей эффективностью, чем используемые для их построения коды [3]. Поэтому для дальнейшего повышения эффективности от применения кодирования представляется возможным использовать МПД в составе различных каскадных схем кодирования. При этом совместно с МПД желательно использовать самые простые методы коррекции ошибок (код с контролем четности, короткий сверточный код) для сохранения простоты практической реализации результирующей схемы.

Для исследования каскадных кодов на базе МПД были разработаны программные средства, позволяющие определять вероятность ошибки декодирования при заданном отношении сигнал/шум в канале связи с АБГШ при использовании ФМ2. Отличительной чертой программы является возможность построения графиков зависимости вероятности ошибки декодирования от отношения сигнал/шум.

На рис. 2 показаны графики зависимости вероятности ошибки декодирования на бит от отношения сигнал/шум в вышеописанной модели канала для различных кодеков. На данном рисунке кривая «МПД ( $R=1/2$ ,  $d=9$ )» отражает эффективность обычного МПД для СОК с кодовой скоростью  $R=1/2$  и кодовым расстоянием  $d=9$ .

Кривой «МПД ( $R=1/2$ ,  $d=9$ ) + ККЧ» на рис. 2 показаны характеристики каскадного кода, состоящего из кода с контролем

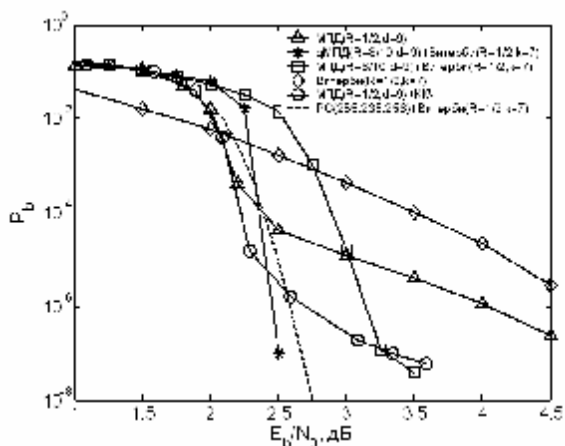


Рис. 2. Результаты моделирования каскадных кодеров на базе МПД в канале с АБГШ

четности [3] длиной  $n_1=25$  и того же СОК, что и при получении вышерассмотренного графика. Следует отметить, что при получении данной зависимости код с контролем четности использовался на нескольких итерациях декодирования, тем самым как бы «помогая» МПД при декодировании внутреннего СОК. Как следует из сравнения характеристик МПД и каскадного кода с ККЧ на его основе, последний позволяет в 10 и более раз уменьшить вероятность ошибки декодирования по сравнению с обычным МПД, что позволяет получить дополнительный энергетический выигрыш порядка двух или даже трех децибел. Также отметим, что каскадный код, состоящий из кода Рида-Соломона (255, 235, 256) и сверточного кода с кодовой скоростью  $R=1/2$  и длиной кодового ограничения  $K=7$ , декодируемый с помощью оптимального алгоритма Витерби, даже при меньшей общей кодовой скорости ( $R=0,437$ ) сильно уступает каскадной схеме на базе МПД и ККЧ при  $P_b > 10^{-6}$ . К сожалению, данный способ каскадирования позволяет улучшить характеристики МПД только в области его эффективной работы.

Вероятность битовой ошибки каскадного кода, состоящего из СОК с кодовой скоростью  $R=8/10$  и кодовым расстоянием  $d=7$ , декодируемого с помощью МПД, и сверточного кода с  $R=1/2$ ,  $K=7$ , декодируемого с помощью алгоритма Витерби, представлена на рис. 2. кривой «МПД ( $R=8/10$ ,  $d=7$ ) + Витерби ( $R=1/2$ ,  $K=7$ )». Из сравнения данного графика с графиком эффективности декодера Витерби для составляющего кода (кривая «Витерби ( $R=1/2$ ,  $K=7$ )») видно, что

каскадная схема оказывается лучше, начиная с отношения сигнал-шум порядка 2,8 дБ. Сравнение данного кода с каскадной схемой на базе МПД и ККЧ показывает, что последний оказывается лучше примерно на 0,7 дБ для вероятности ошибки декодирования большей  $10^{-7}$ . При меньшей вероятности ошибки декодирования эффективность данных схем примерно одинакова.

Существенно лучшие результаты по эффективности показывает каскадный кодек, состоящий из недвоичного СОК [4] для  $Q=256$ , декодируемого с помощью qМПД, и сверточного кода, декодируемого алгоритмом Витерби. Вероятность битовой ошибки данного каскадного кода представлена на рис. 2 кривой «qМПД ( $R=8/10$ ,  $d=7$ ) + Витерби ( $R=1/2$ ,  $K=7$ )». Как следует из анализа представленных графиков переход к недвоичным кодам позволил увеличить энергетическую эффективность кодирования примерно на 0,8 дБ. Это объясняется тем, что ошибки на выходе декодера Витерби обычно группируются в пакеты, каждый из которых, в случае использования  $q$ -ичных кодов, искажает всего один или два  $q$ -ичных символа.

Дополнительно следует отметить, что характеристики каскадного кода, состоящего из недвоичного СОК и короткого сверточного кода оказываются примерно на 0,2 дБ лучше характеристик широко используемого каскадного кода, состоящего из кода Рида-Соломона и сверточного кода, декодируемого с помощью декодера Витерби (характеристики данного каскадного кода представлены на рис. 2. кривой «РС (255, 235, 256) + Витерби ( $R=1/2$ ,  $K=7$ )»). Подчеркнем, что увеличение энергетического выигрыша даже на 0,1 дБ уже считается серьезным достижением. Еще одним очень важным преимуществом данной каскадной схемы является простота ее реализации. Схема гораздо проще, чем схема кодирования/декодирования каскадного кода, состоящего из кода Рида-Соломона и кода Витерби.

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

### Библиографический список

1. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи // Электросвязь, 2003. №9. С. 34–37.
2. Овечкин Г.В., Золотарев В.В. Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы // Электросвязь, №2, Москва 2005. С. 10–12.
3. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 126 с.
4. Золотарев В. В. Многопороговое декодирование в недвоичных каналах // «Вопросы радиоэлектроники», вып. 12. М.: 1984.
5. <http://www.mtdbest.iki.rssi.ru/>.