

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТИПА ТУРБО-КОДЕКОВ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Назаров Л.Е., Головкин И.В.

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

Проблемы синтеза ансамблей сигналов и алгоритмов их формирования-приема, обеспечивающих обработку информации в реальном времени и достижение вероятностно-энергетических характеристик близких к предельным характеристикам Шенноновской пропускной способности, являются актуальными при создании систем передачи информации.

Известные конструктивные процедуры формирования ансамблей сигналов близких к оптимальным ансамблям сигналов по метрическим характеристикам основаны на использовании теории помехоустойчивых кодов. Данные ансамбли сигналов обладают рядом полезных свойств, с их использованием разработаны алгоритмы оптимального и подоптимального приема. Наиболее известными из данного класса являются ансамбли сигналов на основе сверточных кодов, для них разработаны вычислительные процедуры приема – наиболее известным из которых является алгоритм оптимального приема Витерби, реализующий критерий минимальной ошибки при приеме дискретных сообщений. При приближении к вероятностным характеристикам близким к характеристикам Шенноновской пропускной способности алгоритм Витерби характеризуется чрезмерной сложностью реализации.

Альтернативой известным ансамблям сигналов по отношению к сложности реализации алгоритмов их формирования-приема и по отношению к их вероятностно-энергетическим характеристикам являются сигнально-кодовые конструкции под общим названием “турбо-коды” [1]. К принципиальным аспектам турбо-кодов относятся следующие: а) при формировании турбо-кодов используются совокупность простых сверточных или блочных кодов; б) суть алгоритмов приема турбо-кодов – итеративный посимвольный прием, основу которого составляют процедуры вычисления апостериорных вероятностей символов дискретных сообщений; в) сложность итеративного приема турбо-кодов определяется сложностью процедур посимвольного приема составляющих кодов и практически не зависит от длительности сигналов в составе турбо-кодов.

В докладе приводятся результаты исследований разработанных процедур итеративного приема турбо-кодов, формируемых путем параллельного и последовательного включения блочных кодов. Исследования показывают, что для кодовых скоростей  $\gamma > 0.5$  данный класс турбо-кодов обладает более высокими вероятностными характеристиками, чем турбо-коды на основе параллельного включения сверточных кодов. Для составляющих блочных кодов разработаны алгоритмы оптимального посимвольного приема, их основу составляет применение производительных алгоритмов спектрального преобразования в обобщенном базисе Виленкина-Крестенсона. В двоичном случае основу алгоритмов оптимального посимвольного приема составляет алгоритм быстрого спектрального преобразования в базисе Уолша-Адамара. Размерность базиса Уолша-Адамара (соответственно сложность реализации процедур приема) определяется размерностью порождающих матриц или размерностью проверочных матриц [2]. Разработанные алгоритмы посимвольного приема более эффективны по требуемому числу арифметических операций по отношению к известному алгоритму вычисления апостериорных вероятностей символов *MAP* (*maximum a posteriori probability*), а также его модификаций [3]. Вывод алгоритма *MAP* основан на описании кодовых слов в виде стационарного дискретного марковского процесса. Алгоритм *MAP* применяется для сверточных кодов, характерным свойством которых является симметричная решетчатая структура их порождающих матриц. В общем случае порождающие матрицы блочных кодов не обладают подобной симметричной структурой.

На рис.1 приведены вероятностные характеристики, полученные путем моделирования разработанных алгоритмов итеративного посимвольного приема для ряда турбо-кодов. Кривая 1 соответствует вероятности ошибки на бит для канальных двоичных сигналов без кодирования. Кривая 2 соответствует вероятности ошибки на бит для турбо-кода, формируемого на основе блочных кодов с параметрами (256,247,4): длительность дискретных сигналов турбо-кода  $n = 65536$ , размерность турбо-кода  $k = 61009$ , кодовая скорость  $\gamma = 0.931$ . Предельное значение энергетической эффективности для дискретно-непрерывного канала с аддитивным белым гауссовским шумом и алфавитом двоичных канальных сигналов, соответствующее Шенноновской пропускной способности с  $\gamma = 0.931$ , равно 3.75 дБ.

Видно, что для данного ансамбля сигналов вероятность ошибки на бит  $P_б = 10^{-5}$  достигается при

$\frac{E_б}{N_0} = 4.1$  дБ, что лишь на 0.35 дБ отличается от предельного значения.

Понижение размерности базиса Уолша (соответственно понижение сложности реализации разработанных алгоритмов посимвольного приема) возможно для ансамблей сигналов на основе составляющих блочных кодов со свойством полной или неполной прямой суммы для проверочных матриц [2]. Кривая 2 соответствует вероятности ошибки на бит для турбо-кода, формируемого на основе блочного кода с параметрами (64,48,6). Данный блочный код обладает свойством полной прямой суммы – его

проверочная матрица представляется в виде трех составляющих подматриц с размерностью равной 3. Длительность дискретных сигналов турбо-кода  $n = 4096$ , размерность турбо-кода  $k = 2304$ , кодовая скорость  $\gamma = 0.56$ . Видно, что вероятность ошибки на бит  $P_b = 10^{-5}$  достигается при отношении  $\frac{E_b}{N_0} = 1.75$  дБ.

Приведены результаты исследований разработанных алгоритмов приема рассматриваемых турбо-кодов, которые не требуют оценок энергетических параметров канала и используют лишь арифметические операции сложения-вычисления-сравнение. Исследования показали, что использование данных алгоритмов приема определяют энергетические потери до 0.5 дБ по отношению к оптимальным алгоритмам посимвольного приема.

В докладе приведены параметры реализованных устройств приема-формирования с использованием цифровых сигнальных процессоров (21065L) и программируемых логических интегральных схем (XILINX) для ряда турбо-кодов с различными кодовыми скоростями и информационными объемами.

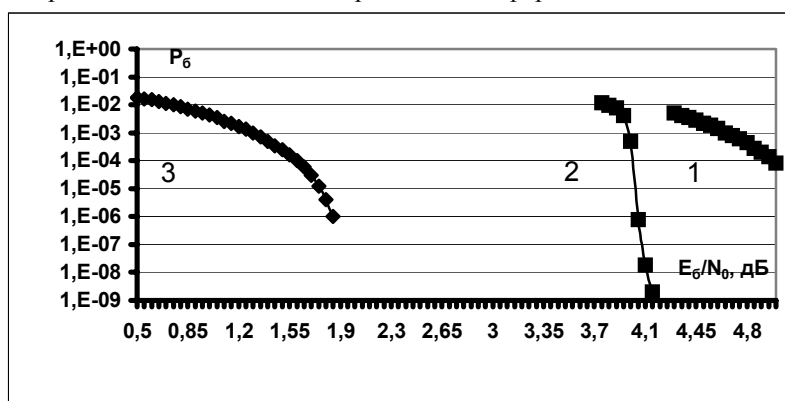


Рис.1. Вероятности ошибки на бит при посимвольном приеме ансамблей сигналов: 1 – некодированная передача; 2 – турбо-код на основе блокового кода (256,247,4); 3 – турбо-код на основе блокового кода (64,48,6).

#### Литература

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. IEEE Int. Conf. Communications. ICC'93. 1993. Geneva. Switzerland. P. 1064.
2. Назаров Л.Е. Алгоритмы посимвольного приема двоичных блоковых кодов.// Радиотехника.. 2004. №6. С. 28-35.
3. Bahl L.R., Cocke J., Jelinek F., Raviv J. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate.// IEEE Trans. Inform. Theory. 1974. V.20. N1. P.409-428.