П.П. Урбанович, проф., д-р техн. наук,
 Н.В. Пацей, ст. преп., канд. техн. наук, Д.М. Романенко, ассист.,
 Д.В. Шиман, асп. (БГТУ, г. Минск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ ТУРБО КОДОВ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДВОИЧНЫХ ДАННЫХ

Коды, основанные на итерационной технике декодирования, являются самым заметным открытием в области теории кодирования в последние десятилетия. Турбо коды, содержащие два ($J=2$) параллельных составных кода, широко обсуждались и применяются с момента их появления [1].

Давсалар и Поллара (Divsalar and Pollara) обобщили параллельно конкатентные сверточные коды (оригинальные турбо коды) в многоуровневые турбо коды (МТК) [3]. *Определение:* J -мерный МТК состоит из J , $J \geq 3$ параллельно конкатентных кодеров со скоростью $1/2$ и $J-1$ перемежителей и имеет результирующую скорость $1/(J+1)$.

В последние годы было установлено, что многоуровневые турбо коды ($J > 2$) с простыми компонентными кодами превосходят как по быстродействию, так и по вероятности распространения ошибок (кривая BER) обычные параллельные турбо коды [2]. МТК более гибки в выборе составных элементарных кодов, которые дополняют друг друга при итерационном декодировании. Это дает возможность достигнуть более низкого порога сходимости, чем обычный турбо код.

Для построения МТК используются бинарные компонентные коды с широким спектром скоростей (Хэмминга, итеративные, сверточные, Рида-Соломона и т.д.) [3]. Кодовую структуру J -мерного МТК можно описать следующим образом: поступающая информация делится на подмножества, согласно их важности, и затем, кодируется кодами на разных кодовых уровнях. Бинарная информационная последовательность $u^{(0)} = (u_0^{(0)}, u_1^{(0)}, \dots, u_{N-1}^{(0)})$ длины N поступает на вход 0-ого кодера [2]. В то же время, последовательность $u^{(0)}$ подается на $J-1$ перемежителей, за каждым из которых следует составной кодер. После выхода из j -ого перемежителя, где $j=1, 2, \dots, J-1$, преобразованная версия последовательности $u^{(0)}$, поступает на j -ый составной кодер $u^{(j)} = (u_0^{(j)}, u_1^{(j)}, \dots, u_{N-1}^{(j)})$ [3].

Тогда, выходная последовательность j -ого кодера будет равна $v^{(j)} = (v_0^{(j)}, v_1^{(j)}, \dots, v_{N-1}^{(j)})$, где $j=1, 2, \dots, J-1$. Входная последовательность 0-ого кодера мультиплексируется с выходной последовательностью всех J кодеров и подается в канал передачи. Результирующее кодовое

слово будет равно $v = (u^{(0)}, v^{(0)}, v^{(1)}, \dots, v^{(J-1)})$, а результирующая скорость – $1/(J+1)$. Выкалывание (удаление определенных символов из кодового слова) бит может использоваться для увеличения скорости кода.

МТК можно классифицировать по правилу выкалывания информационных бит. Если все информационные биты в последовательности $u^{(0)}$ передаются, то такой код называют систематическим многоуровневым турбо кодом. В частично систематическом МТК выкалываются некоторые информационные и биты четности. Если все информационные биты выколоты, то получается несистематический МТК [4]. Сходимость МТК в значительной степени зависит от скорости выкалывания информационных и проверочных бит.

Многоуровневые турбо коды могут строиться на идентичных или различных компонентных элементарных кодах с различными скоростями [3]. Если составные элементарные коды одинаковы, то соответствующий МТК называется симметричным. Не все симметричные коды имеют хорошую производительность [2]. Известны варианты асимметричных схем [1, 2] с хорошей производительностью и низкой сложностью.

Важнейшим этапом использования помехоустойчивого кода является его декодирование. В отличие от оригинального двухкомпонентного турбо декодера, работающего в последовательном режиме, декодер многоуровневого турбо кода должен работать в параллельном режиме на основе алгоритма максимальной апостериорной вероятности (MAP).

Основная идея итерационного турбо декодирования – это деление МТК, для которого декодирование было бы достаточно сложным, на оптимальный итерационный процесс на основе SISO (soft-in-soft-out) декодеров элементарных кодов. SISO декодер может строиться на основе декодеров APP, Log-APP, Max-Log-APP или алгоритме Витерби с мягкими решениями (SOVA) [4, 5]. Такая расширенная последовательная схема декодирования МТК имеет наибольшую скорость сходимости [4, 5]. Для данной схемы коэффициент априорного логарифмического правдоподобия (LLR - log likelihood ratio) информационных бит есть комбинация последних внешних LLR для всех остальных декодеров – $L_a^{(j)}$:

$$L_a^{(j)} = \sum_{i \neq j} L_e^{(i)}. \quad (1)$$

Процесс декодирования прекращается по истечении заданного числа итераций или согласно условию остановки процесса. Информационные биты u_i оцениваются в соответствии с апостериорной LLR последнего декодера последней итерации.

Установлено что, в результате добавления дополнительных элементарных кодов МТК позволяет достичь лучшей сходимости по сравнению с турбо кодами. Порог ошибки кода в большей степени зависит от минимального расстояния и спектра расстояний. Большинство турбо кодов имеют относительно малое минимальное расстояние, которое ведет к высокому порогу ошибок на кривой вероятности ошибок. Минимальное расстояние турбо кода логарифмически возрастает в зависимости от перестановок, в отличие от J - размерного МТК ($J \geq 2$), чье минимальное расстояние возрастает в соответствии с $O(N_j^{J-2})^2$, где N - размер перемежителя. Таким образом, минимальное расстояние МТК растет быстрее по сравнению с турбо кодами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon limit error correcting coding and decoding: Turbo codes // Proc. IEEE International Conference on Communications, May 1993.- (Geneva, Switzerland).- pp. 1064-1070.

2. He C., Banerjee A., Costello Jr. D. J., Massey P. C. On the performance of low complexity multiple turbo codes // In Proc. 40th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing.- Monticello, IL (October 2002). – pp. 1168–1177.

3. Urbanovich P.P., Patsey N.V., Shyman D.V. “System of the information on the basis of a turbo coding in Matlab enviroment”. IV International Conference NEET’2005 – News electrical and electronic technologies and their industrial implementation, Zakopane, Poland, 2005.

4. Hagenauer J., Hoher P. A Viterbi decoding algorithm with soft-decision outputs and its applications // In Proc. IEEE Global Conference on Communications. - Dallas, TA (Nov. 1989). -pp. 1680–1686.

5. Han J., Takeshita O. On the decoding structure of multiple turbo codes. // In Proc. IEEE International Symposium on Information Theory. - Washington D.C. (June 2001). – p. 98.