

Ф. К. Борисовский – студент кафедры комплексной защиты информации

А. В. Козлов – научный руководитель

О ДЕКОДИРОВАНИИ ТУРБО-КОДА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА НЕДВОИЧНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДОВЕРИЯ

В современном мире активно развиваются технологии беспроводной связи. Уже сегодня существует множество систем, в основе которых лежит технология передачи информации в беспроводной среде: мобильная связь, беспроводной интернет, системы навигации... Для успешной передачи информации в таких системах применяется помехоустойчивое кодирование. Современные системы беспроводной связи предъявляют особые требования к декодированию помехоустойчивых кодов.

На сегодняшний день множество стандартов беспроводной связи используют, в качестве помехоустойчивого кода, турбо-код.

Одним из наиболее перспективных стандартов беспроводной связи является стандарт LTE. В этом стандарте так же используется турбо-код.

Таким образом, становится актуальной проблема разработки лучших методов декодирования линейных кодов, в частности турбо-кода. Улучшение характеристик декодирования поможет улучшить эффективность использования современных средств беспроводной связи.

В работе [1] описывается метод недвоичного распространения доверия для декодирования двоичных линейных блочных кодов. Алгоритм заключается в разбиении проверочной матрицы на квадратные блоки с дальнейшим применением декодера распространения доверия к блочной проверочной матрице. В данной работе будет рассмотрен обобщенный случай – разбиение на блоки прямоугольной формы. Пример разбиения матрицы на блоки на рисунке 1.

$$H = \begin{pmatrix} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1100 & 0000 & 0000 & 0000 & 0000 & 0000 \\ \hline 1011 & 0000 & 0000 & 0000 & 0000 & 0000 \\ \hline 0110 & 1100 & 0000 & 0000 & 0000 & 0000 \\ \hline 1101 & 1011 & 0000 & 0000 & 0000 & 0000 \\ \hline 0011 & 0110 & 1100 & 0000 & 0000 & 0000 \\ \hline 0000 & 1101 & 1011 & 0000 & 0000 & 0000 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 0000 & 0011 & 0110 & 1100 & 0000 & 0000 \\ \hline 0000 & 0000 & 1101 & 1011 & 0000 & 0000 \\ \hline 0000 & 0000 & 0011 & 0110 & 1100 & 0000 \\ \hline 0000 & 0000 & 0000 & 1101 & 1011 & 0000 \\ \hline 0000 & 0000 & 0000 & 0011 & 0110 & 1100 \\ \hline 0000 & 0000 & 0000 & 0000 & 1101 & 1011 \\ \hline \end{array} \end{pmatrix}$$

Рис. 1. Разбиение на блоки проверочной матрицы сверточного кода со скоростью 1/2. Блок 3x4.

Идея метода распространения доверия состоит в том, чтобы декодировать поочередно коды, задаваемые несколькими проверками на четность исходного кода и коды повторения до тех пор, пока не будет получено кодовое слово, либо не выйдет лимит по времени. Блочная проверочная матрица разбивается на строки и столбцы. Каждая строка соответствует проверкам кода, задаваемого несколькими проверками на четность, а каждый столбец соответственно коду повторения. Эти коды будем называть компонентными. Декодер итерирует процедуру декодирования компонентных кодов. Связи между декодерами компонентных кодов можно описать с помощью графа Таннера (рисунок 2).

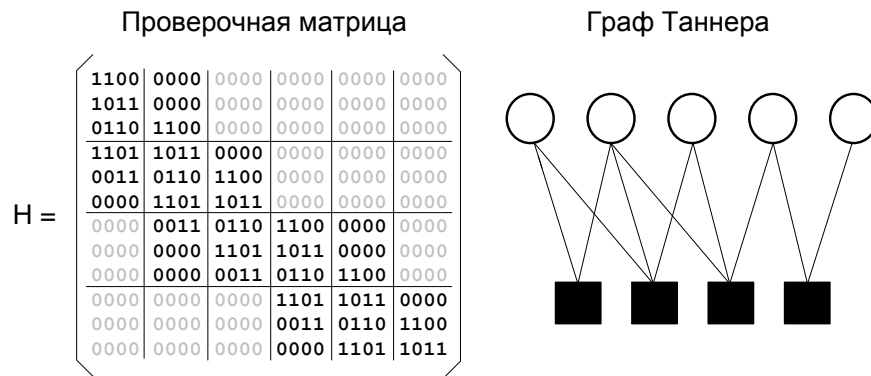


Рис. 2. Представление проверочной матрицы в виде графа Таннера

Здесь квадрат обозначает декодер кода, задаваемого несколькими проверками на четность, а круг – декодер кода повторения. Если в блочной проверочной матрице на пересечении соответствующей строки и столбца стоит ненулевой блок, это означает что существует связь, между соответствующими декодерами разных типов. Эта связь соответствует ребру в графе Таннера.

Рассмотрим общий случай. Пусть проверочная матрица разбивается на блоки высоты q и ширины w . Как и в работе [1] между вершинами в графе Таннера будут передаваться массивы вероятностей для групп из w символов кодового слова ($g \in G(2^w)$). Отличие, в случае если $q \neq w$, будет состоять в том, что отображение h_i будет являться отображением из $G(2^w)$ в $G(2^q)$.

В работе [2] рассматривается применение декодера недвоичного распространения доверия к декодированию турбо-кода. В данной работе будет рассмотрена возможность применения такого декодера к турбо-коду из стандарта 3GPP LTE.

Схема кодирования турбо-кода из стандарта LTE показана на рисунке 3.

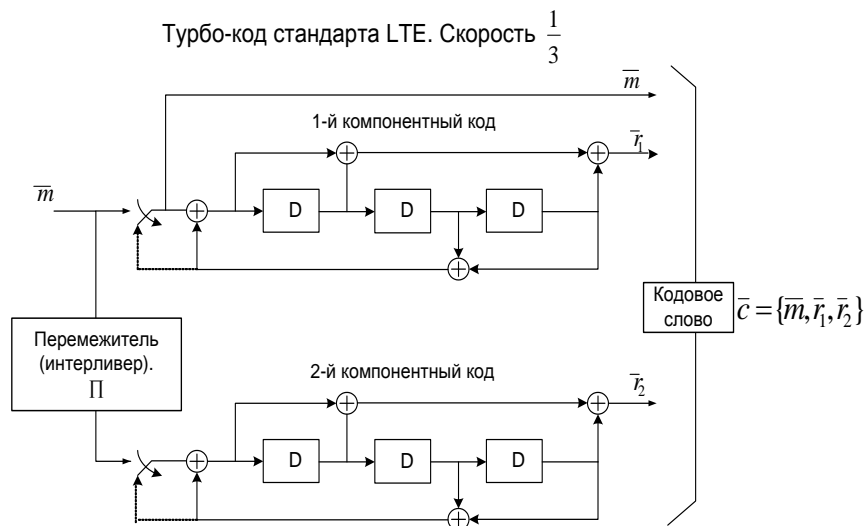


Рис. 3. Схема кодирования для турбо-кода стандарта LTE

Турбо-код стандарта LTE – турбо-код со скоростью $R=1/3$, состоящий из двух систематических сверточных кодов, связанных перемежителем (Π).

Порождающая матрица (в полиномиальном виде) для компонентных кодов выглядит следующим образом:

$$G(D) = \left[1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \right],$$

где

$$g_0(D) = 1 + D^2 + D^3,$$

$$g_1(D) = 1 + D + D^3.$$

Проверочная же матрица будет выглядеть следующим образом:

$$H_{cc} = [g_1(D), g_0(D)]$$

В двоичном виде проверочная матрица компонентного кода выглядит следующим образом:

$$H_{cc} = [H_i | H_r] = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & 1 & & & & & \\ & 1 & 1 & & & & 0 & 1 & & & & \\ & 0 & 1 & 1 & & & 1 & 0 & 1 & & & \\ & 1 & 0 & 1 & \ddots & & 1 & 1 & 0 & \ddots & & \\ & & 1 & 0 & \ddots & & 1 & 1 & 1 & \ddots & 1 & \\ & & & 1 & \ddots & & & 1 & & \ddots & 0 & \\ & & & & \ddots & 0 & & & & \ddots & 1 & \\ & & & & & 1 & & & & & 1 & \end{bmatrix}.$$

Проверочная же матрица турбо-кода тогда будет иметь следующий вид:

$$H_{tc} = \begin{bmatrix} H_i & H_r & 0 \\ H_i \cdot \Pi & 0 & H_r \end{bmatrix},$$

где $H_i \cdot \Pi$ – матрица H_i с переставленными в соответствии с перемежителем столбцами.

Двоичный и блочный образы проверочной матрицы турбо-кода LTE на рисунке 4.

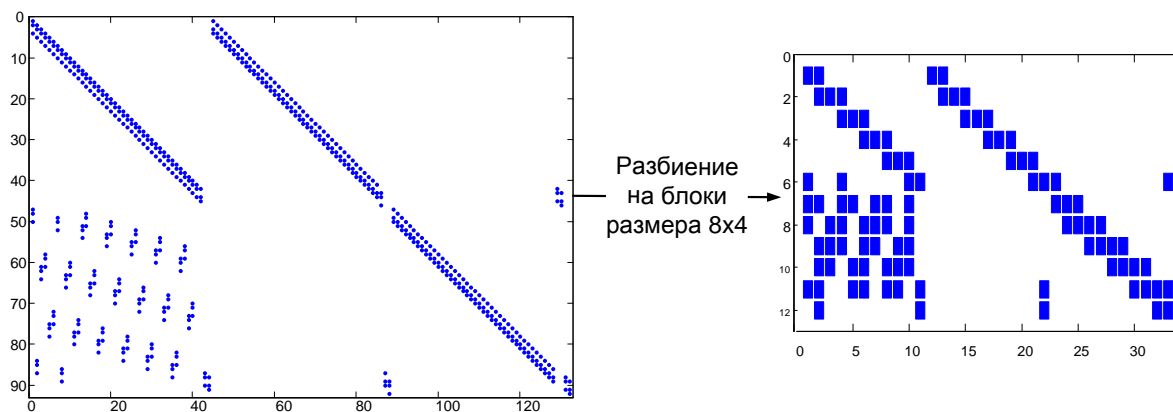


Рис. 4. Проверочная матрица турбо-кода LTE. $k=40$

В стандарте LTE перед тем как подавать символы на кодер предварительно происходит вычисление контрольной суммы информационных символов (рисунок 5). В стандарте используется два многочлена CRC – CRC24a и CRC24b.

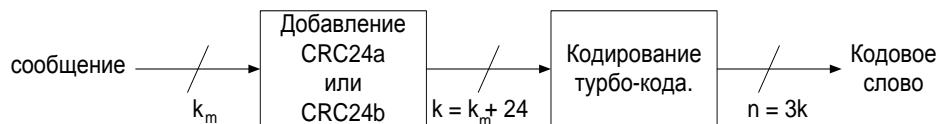


Рис. 5. Обобщенная схема кодирования стандарта LTE

Проверки контрольной суммы также можно включить в проверочную матрицу турбо-кода.

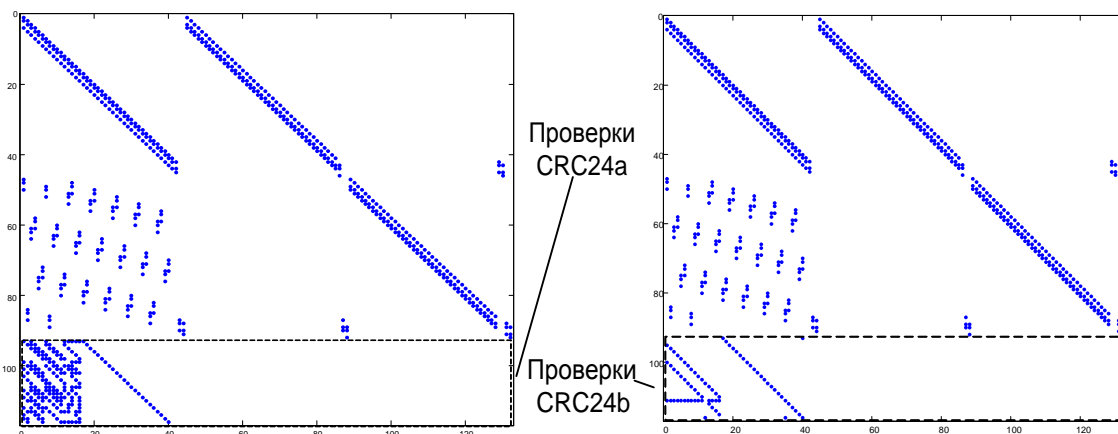


Рис. 6. Проверочная матрица с проверками CRC. $k=40$

Используя преобразование первого типа из работы [2], добавление проверок контрольной суммы в матрицу и разбив на блоки полученную матрицу можно получить следующий вид проверочной матрицы – рисунок 7.

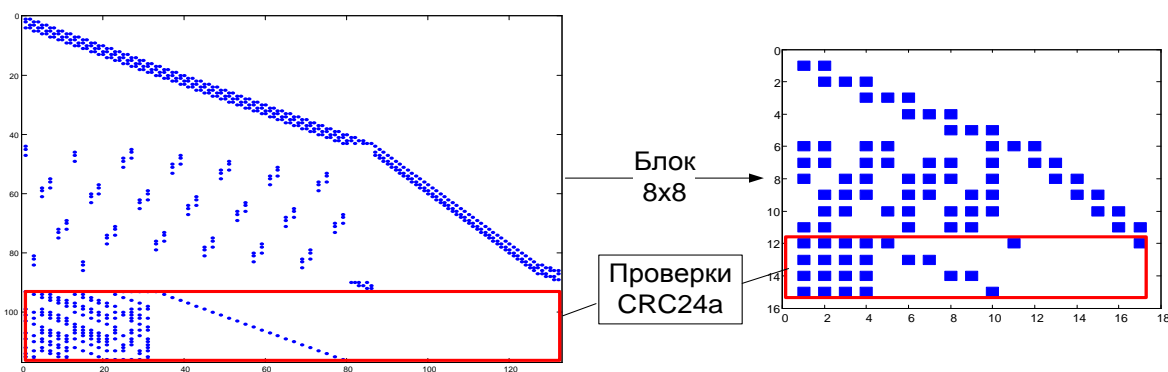


Рис. 7. Пример разбиения на блоки проверочной матрицы турбо-кода LTE после преобразования первого типа из [2]

Для проверочной матрицы на рисунке 7 было проведено моделирование декодера недвоичного распространения доверия (НРД) в канале с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ). Производилось максимум 100 итераций декодера НРД. Если декодер «сходился» к кодовому слову раньше, то декодирование останавливалось и полученное кодовое слово считалось за декодированным. В среднем в процессе моделирования декодер осуществлял 4 – 5 итераций. Результаты моделирования сравнивались с классическим итеративным турбо-декодером [4]. Результаты моделирования на рисунке 8.

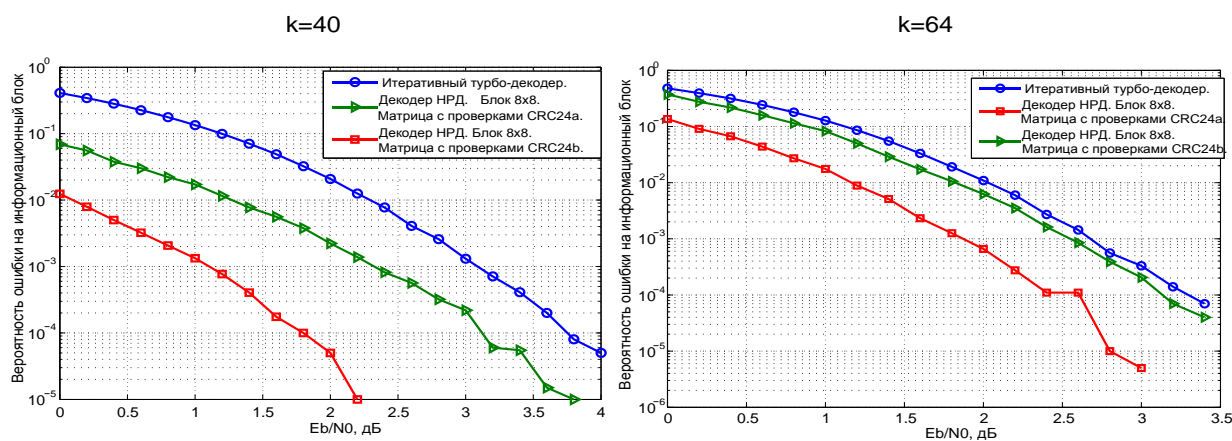


Рис. 8. Результаты моделирования

Как видно на графике (рисунок 8) с увеличением длины кодового слова характеристики декодирования ухудшаются. Таким образом, предложенный в работах [1] и [2] метод декодирования имеет смысл применять для декодирования турбо-кода LTE только на коротких длинах кодового слова.

Библиографический список

1. A. Goupil, M. Colas, G. Gelle, and D. Declercq. Fft-based bp decoding of general ldpc codes over abelian groups. *IEEE Transactions on Communications*, 55(4):644 – 649, 2007.
2. C. Poulliat, D. Declercq, and T. Lestable. Efficient decoding of turbo codes with nonbinary belief propagation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2008.
3. 3GPP TS 36.212: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding.
4. C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima. Near Shannon limit errorcorrecting coding: turbo codes. *Proceedings IEEE International Conference on Communications*, Geneva, Switzerland, pages 1064–1070, 1993.