

УДК 681.325.3

Ю. О. Булова, ассистент (БГТУ)

### АНАЛИЗ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК ТИПА «СТИРАНИЕ» П-КОДОМ В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Статья посвящена проблеме повышения качества передаваемой информации в каналах с ошибками типа «стирание». Рассмотрены алгоритмы кодирования и декодирования нового П-кода, основанного на фонтанном LT-коде с использованием W-циклического перемежителя. Разработано программное средство, с помощью которого произведен сравнительный анализ исправляющей способности LT- и П-кодов. Проанализирована возможность применения данных кодов в современных системах связи.

The article is devoted to the quality improvement of the transmitted information in channels with errors such as “erase”. Algorithms of encoding and decoding of the new P-code based on the fountain LT-code using the W-cycle interleaver. Developed a software tool that allows comparative analysis of the ability of the guide used LT-and P-codes. The using possibility of codes in modern communication systems is analyzed.

**Введение.** Из года в год возрастают требования к качеству связи. В данной статье рассматривается двоичный канал связи, в котором приемник способен достоверно распознать часть принятых символов, а оставшаяся часть может быть объявлена стертой.

Основными методами, направленными на повышение надежности передаваемой информации в таких каналах связи, являются:

- использование обратного канала от получателя к отправителю;
- помехоустойчивое кодирование информации с использованием случайных фонтанных кодов [1].

Обеспечение высокой скорости передачи и надежной обработки информации с минимальными задержками в условиях различных помех и излучений требует поиска новых решений, позволяющих наиболее полно использовать пропускную способность канала.

**Основная часть.** Для разработки нового фонтанного кода необходимо учитывать основные требования, предъявляемые к данному классу кодов [2]:

- код должен представлять собой потенциально неограниченный поток символов;
- кодер должен генерировать «на лету» новые кодовые символы, значения которых не зависят от предыдущих;
- алгоритм декодирования должен быть быстрым.

В качестве основы для создания нового П-кода использовались LT-код [3] и W-циклический перемежитель [4].

Алгоритм кодирования можно разбить на нескольких этапов.

1. Первый этап кодирования заключается в формировании кодовых символов со степенью  $d = 2$  (количество исходных символов для ге-

нерации кодового символа). Кодирование на данном этапе происходит, пока выполняется условие (1):

$$0 \leq i \leq K - 1, \quad (1)$$

где  $i$  – номер исходного символа, вовлеченного в операцию кодирования,  $K$  – размер исходного сообщения.

Из сообщения последовательно выбираются по 2 исходных символа  $s_i$  с шагом  $h = 2$  и суммируются по модулю 2, образуя новый кодовый символ  $x_j$  (2):

$$x_j = s_i \oplus s_{i+h}. \quad (2)$$

Каждый следующий кодовый символ включает в себя исходные символы, следующие за предыдущими, вовлеченными в операцию кодирования, через 1 бит (рис. 1).

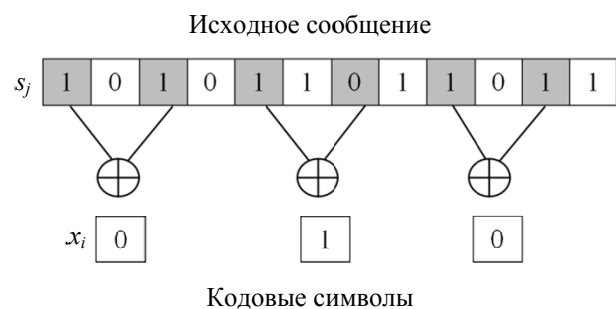


Рис. 1. Схематическое представление первого этапа кодирования

2. Кодирование на втором этапе происходит согласно формуле 2, однако начинается со смещения, т. е. операция кодирования происходит, пока выполняется условие 3 (рис. 2).

$$1 \leq i \leq K - 1. \quad (3)$$

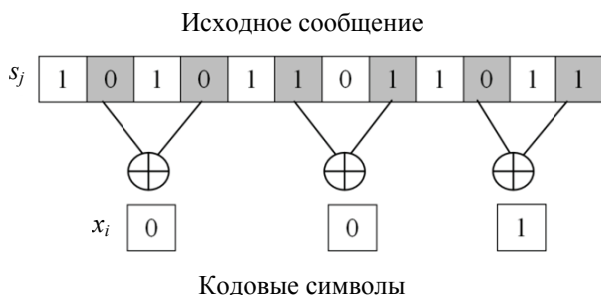


Рис. 2. Схематическое представление второго этапа кодирования

3. Третий этап кодирования заключается в формировании кодовых символов со степенью 3 путем последовательного суммирования трех соседних символов исходного сообщения по модулю 2 (4).

$$x_j = s_i \oplus s_{i+h/2} \oplus s_{i+h}. \quad (4)$$

Кодирование продолжается, пока выполняется условие 1 (рис. 3).

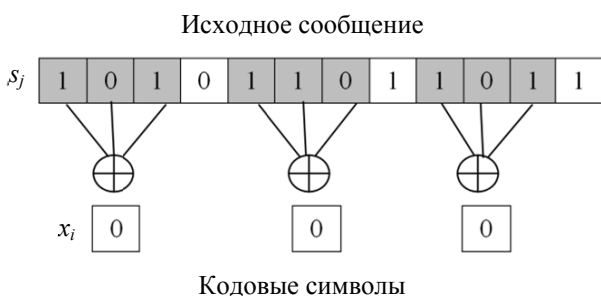


Рис. 3. Схематическое представление третьего этапа кодирования

4. Четвертый этап кодирования аналогичен третьему, но происходит согласно условию 2 (рис. 4).

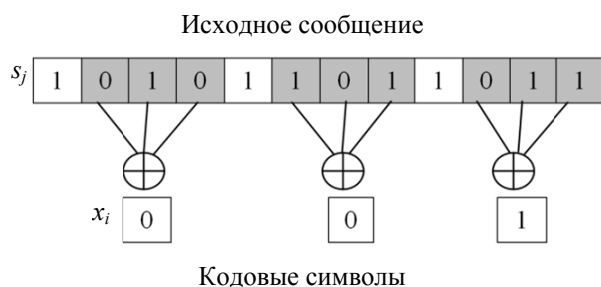


Рис. 4. Схематическое представление четвертого этапа кодирования

Процесс формирования кодовых символов начинается с первого этапа и продолжается до тех пор, пока не будет получено сообщение от приемника о достоверном приеме сообщения, либо, при отсутствии обратного канала, отправитель сам принимает решение о прекращении

процесса кодирования, руководствуясь принципом достаточности. Если сообщение не было расшифровано в течение четырех этапов – процесс кодирования возвращается к первому этапу, при этом шаг  $h$  увеличивается в 2 раза.

При кодировании образуется бинарная матрица, номер строки которой соответствует индексу кодового символа, а позиции единиц в строке – номерам исходных бит, входящих в данный кодовый символ. Кодовое слово соответствует первому столбцу матрицы (рис. 5).

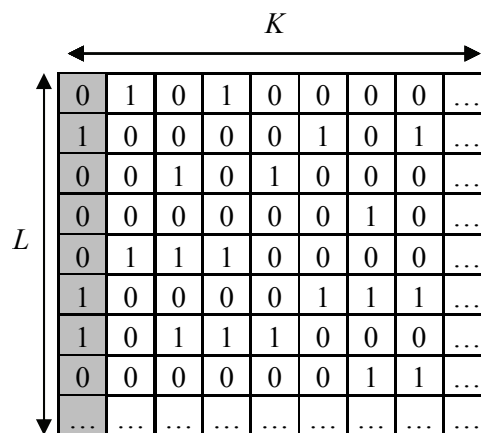


Рис. 5. Бинарная матрица кодирования

Сформированные кодовые символы образуют кодовые пакеты из  $L$  бит.

Группирование ошибок затрудняет обеспечение высокой эффективности с использованием только лишь средств кодирования. Поэтому для декорреляции ошибок типа «стирание» предлагается использовать  $W$ -циклический перемежитель:

$$\pi(j) = j \cdot W \bmod L, \quad (5)$$

где  $\pi(j)$  – местоположение разряда  $j$  после перемежения;  $W$  – шаг перемежения – некоторое целое число, взаимно простое с  $L$ , причем

$$\lfloor 0,382 \cdot L \rfloor - 2 \leq W \leq \lfloor 0,382 \cdot L \rfloor + 2. \quad (6)$$

После перемежения сообщение передается получателю, где осуществляется деперемежение и декодирование полученного сообщения. В это время кодер на стороне отправителя формирует следующий кодовый пакет.

Для деперемежения используется следующая формула:

$$\pi'(j) = \pi(j) \cdot b \bmod L, \quad (7)$$

где  $\pi'(j)$  – местоположение разряда  $\pi(j)$  после деперемежения;  $b$  – шаг деперемежения:

$$b = \frac{m \cdot L + 1}{W}, \quad (8)$$



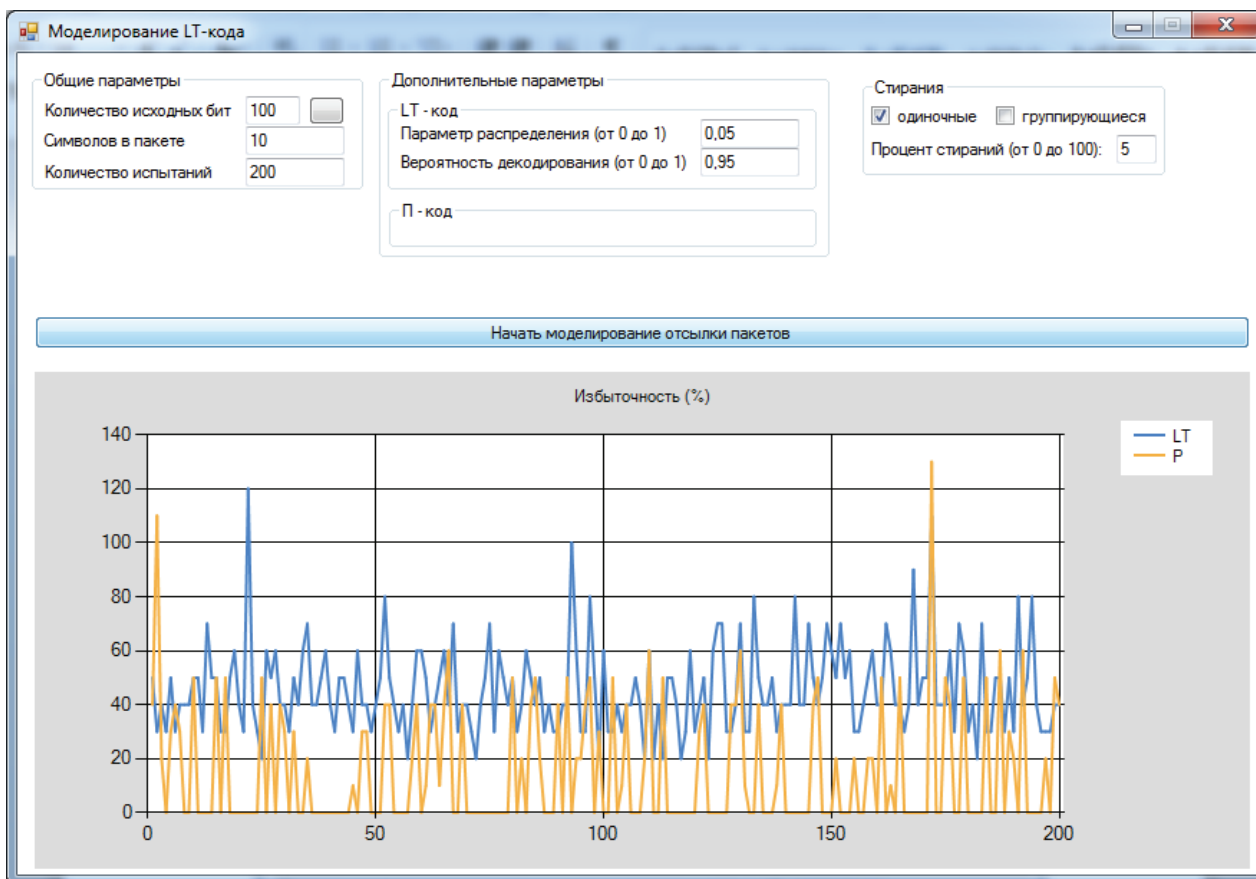


Рис. 9. Скриншот программного средства с графиком избыточности LT- и П-кодов при  $N = 100$  бит,  $L = 10$  бит

является П-код (при наличии в канале 5% стираний П-код способен декодировать сообщение при избыточности в среднем 20%), однако с увеличением количества стираний (20% и более) его эффективность значительно снижается.

Необходимо отметить, что новый П-код также позволяет пропустить стадию начальной синхронизации между кодером и декодером, которая занимает в зависимости от параметров канала связи 2–60 с.

**Заключение.** Рассмотрены алгоритмы кодирования и декодирования нового П-кода. Произведен сравнительный анализ исправляющей способности LT- и П-кода.

Таким образом, П-код может использоваться в каналах как с обратной, так и без обратной связи; позволяет пропустить стадию начальной синхронизации между кодером и декодером; показывает лучшую эффективность в сравнении с LT-кодом в каналах с небольшим количеством ошибок типа «стирание» (до 20%).

Однако следует учитывать, что описанные коды не способны обнаружить ошибку в ситуации, когда переданное кодовое слово было пре-

образовано помехами в канале в другое кодовое слово. Поэтому данные коды могут быть использованы только в каналах связи, где вероятность трансформации кодовых слов равна нулю.

### Литература

1. Варгаузин, В. Помехоустойчивое кодирование в пакетных сетях / В. Варгаузин // ТелеМультиМедиа. – 2005. – № 3. – С. 10–16.
2. Булова, Ю. О. Кодовые методы нейтрализации ошибок типа «стирание» в каналах передачи двоичной информации / Ю. О. Булова // Труды БГТУ. – 2012. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 142–145.
3. Luby, M. LT codes / M. Luby // Proc. 43rd Ann. IEEE Symp. on Foundations of Computer Science. – 16–19 November 2002. – С. 271–282.
4. Gorbunova, Yu. W-cyclic method interleaving of data for communication system / Yu. Gorbunova, P. Urbanovich // News electrical and electronic technologies and their industrial implementation: proc. VII International Conference, Zakopane, Poland, June 28 – July 1, 2011. – P. 149.

Поступила 22.03.2013