

УДК 681.3.053

**М. Ф. Виткова**, аспирант (БГТУ); **Д. М. Романенко**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ)

### АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА КОДИРОВАНИЯ (ДЕКОДИРОВАНИЯ) НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ ИТЕРАТИВНЫХ КОДОВ И МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ

В статье рассмотрены основные параметры качества бинарного цифрового канала связи, способы их измерения, достоинства и недостатки. Представлена общая структурная схема разработанной системы, схемы блоков кодирования, декодирования и блока анализа. Описан принцип действия адаптивной системы, назначение и особенности каждого из блоков, а также их достоинства и недостатки. Ключевой особенностью разработанной адаптивной системы является возможность расчета параметра BER в режиме передачи реального трафика с последующим выбором наиболее подходящего корректирующего кода.

The article describes main quality parameters of the binary digital communication channel, methods of measurement, advantages and disadvantages. A general structural scheme of the developed adaptive system, schemes of coding, decoding and analysis blocks are presented. The operation principle of the adaptive system action, the purpose and particular of each blocks, and also advantages and disadvantages are described. The main features of the developed adaptive system is the possibility to calculate the BER in the transmission mode of the real traffic with a choice of the most suitable correcting code.

**Введение.** В современном мире системы передачи информации в целом не могут постоянно гарантировать безошибочность передаваемых данных. Можно отметить, что ключевой составляющей практически любой современной системы передачи информации является цифровой канал, по которому данные передаются в дискретном (как правило, двоичном) виде. По ряду причин под воздействием внутренних и внешних факторов передаваемые по каналу связи данные подвергаются воздействию различных помех. Поэтому нарушается целостность информации, возникают ошибки в передаваемых битовых последовательностях.

Надежность передачи напрямую зависит от качества канала. На сегодняшний день существует большое число параметров, позволяющих оценить качество цифрового бинарного канала, а также способов их измерения.

**Основная часть.** Измерение параметров качества бинарного канала осуществляется, как правило, в двух режимах: в режиме передачи реального (информационного) трафика и в режиме с отключением связи. Каждый из этих режимов имеет свои возможности и ограничения, подразумевающие в том числе и измерение тех или иных параметров качества канала. Так, например, явным достоинством первого режима является возможность измерять параметры без отключения связи, но точность определения ошибок ограничивается определенным блоком [1]. Наиболее распространенным параметром, измеряемым в данном режиме, является коэффициент ошибок по блокам BLER – block error rate [1]. Возможность локализовать единичную битовую ошибку при определении параметра BIT (bit errors – количество ошибоч-

ных бит) обеспечивается полным или частичным отключением связи и передачей специальной генерируемой тестовой последовательности. Реальная принятая последовательность битов сравнивается с «предсказанной» (на стороне приемника), которая, в свою очередь, точно совпадает с генерируемой последовательностью.

Число ошибочных бит BIT или BIT ERR (bit errors) является одним из основных параметров при измерении цифрового бинарного канала. Также к параметрам, имеющим весьма существенное значение, можно отнести коэффициент BER (bit error rate – параметр ошибки по битам), который является производным от коэффициента BIT и равен отношению числа битовых ошибок к общему числу бит, переданных за время проведения теста по каналу:

$$BER = \frac{BIT}{N_{\text{общ}}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{общ}}$  – общее число передаваемых бит.

С практической точки зрения наибольший интерес представляет режим измерений качества бинарного канала без отключения связи, но при этом целесообразным является определение именно параметра BER.

В ходе исследований установлено, что система кодирования (декодирования) на основе многомерных итеративных кодов и многопорогового декодера позволяет определять коэффициент BER при передаче реального трафика и динамически изменять параметры кодов с целью повышения надежности и производительности системы передачи информации, фактически адаптируясь к изменяющимся условиям передачи и приводящие к изменению вероятности

сти появления ошибок определенного типа. Локализовать единичную битовую ошибку в реальном режиме передачи информации возможно за счет использования алгоритма определения кратности исправляемой ошибки [2] и модифицированного алгоритма выбора пороговых значений [3].

Структурная схема адаптивной системы изображена на рис. 1.

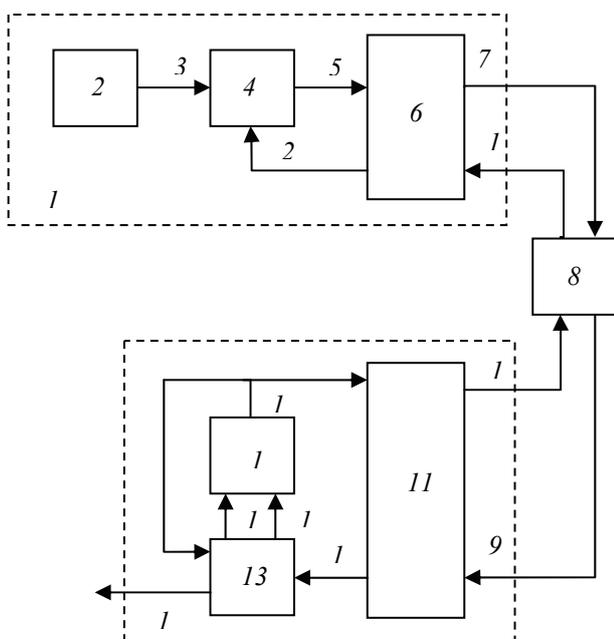


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы кодирования (декодирования):

- 1 – передатчик данных; 2 – источник данных;
- 3, 5, 7, 9, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20 – входы и выходы структурных блоков;
- 4 – блок кодирования;
- 6, 11 – модулятор (демодулятор); 8 – канал связи;
- 10 – приемник данных; 13 – блок декодирования;
- 16 – блок анализа

Разработанная система включает передатчик данных, приемник и бинарный канал связи. На стороне передатчика содержатся следующие блоки: источник данных, блок кодирования, модулятор (демодулятор). На стороне приемника располагаются такие блоки, как модулятор (демодулятор), блок декодирования, блок анализа.

Блок кодирования, структурная схема которого представлена на рис. 2, состоит из кодера и запоминающего устройства (ЗУ), которое хранит проверочные матрицы трехмерных итеративных кодов с числом линейно-независимых паритетов 5, 7, 9, для информационных последовательностей 64, 128, 256, 512 бит, а также с разной скоростью кода (табл. 1). Кодер формирует избыточные символы на основании хранящихся в ЗУ проверочных матриц трехмерных итеративных кодов.

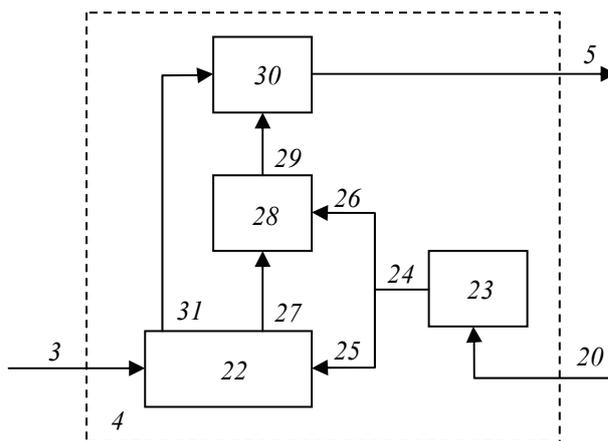


Рис. 2. Структурная схема блока кодирования: 3, 5, 20 – входы и выходы блока кодирования; 22 – блок деления информационной последовательности (БДИП); 23 – ЗУ; 24, 25, 26, 27, 29 – входы и выходы структурных элементов блока кодирования; 28 – кодер; 30 – блок объединения кодовой последовательности (БОКП)

Таблица 1

**Параметры трехмерных итеративных кодов**

| Скорость кода <i>r</i>                           | Количество паритетов |     |     |
|--|----------------------|-----|-----|
|  | 5                    | 7   | 9   |
| Длина информационной последовательности <i>k</i> |                      |     |     |
| 4/13   |                      |     | 64  |
| 4/11   |                      | 64  |     |
| 8/21   |                      |     | 128 |
| 8/19   |                      | 128 |     |
| 16/37  |                      |     | 256 |
| 4/9  | 64                   | 128 | 256 |
| 16/35  |                      | 256 |     |
| 8/17   |                      |     | 512 |
| 1/2  | 128                  | 256 |     |
| 8/15   | 128                  | 512 |     |
| 4/7  | 256                  |     |     |
| 16/27  | 256                  |     |     |
| 8/13   | 512                  |     |     |

Проверочная матрица *H* трехмерного итеративного кода состоит из двух подматриц *H<sub>v</sub>* и *H<sub>p</sub>*:

$$H = [H_v | H_p], \tag{2}$$

где *H<sub>v</sub>* – матрица размера  $(n - k) \times k$ , содержит информационную часть (соответствует информационным символам кодового слова); *H<sub>p</sub>* – диагональная матрица размера  $(n - k) \times (n - k)$ , содержит проверочную часть (соответствует избыточным символам кодового слова).

Описываемая адаптивная система предполагает динамическое изменение параметров кода, одним из которых является объем

информационной части. Изменять данный параметр позволяют блока деления и объединения битовых последовательностей, которые также входят в состав блока кодирования.

Проверочные матрицы  $H$  трехмерных итеративных кодов хранятся в ЗУ в виде двумерных массивов размером  $(n - k) \times n$ . В информационной части  $Hv$  массива размещены единицы в тех позициях, которые соответствуют индексам информационных битов, участвующих в формировании проверочных символов, и нули. В проверочной части  $Hr$  отмечены проверочные символы, соответствующие каждой строке подматрицы  $Hv$ .

Кодер функционально представляет собой умножитель подматрицы матрицы  $Hv$  на информационный вектор  $v$  по входу 3:

$$c = Hv \times v. \tag{3}$$

Кодовое слово, получаемое на выходе 5, может быть представлено вектором

$$c = [v | p], \tag{4}$$

где  $v$  – входной вектор длины 1, ...,  $k$  (информацию, которую надо закодировать);  $p$  – вектор проверочных разрядов длины 1, ...,  $(n - k)$ .

На стороне приемника система содержит блок декодирования (рис. 3), состоящий из многопорогового декодера, БА (рис. 4) и ЗУ, которое хранит тот же класс трехмерных итеративных кодов, что и ЗУ блока кодирования.

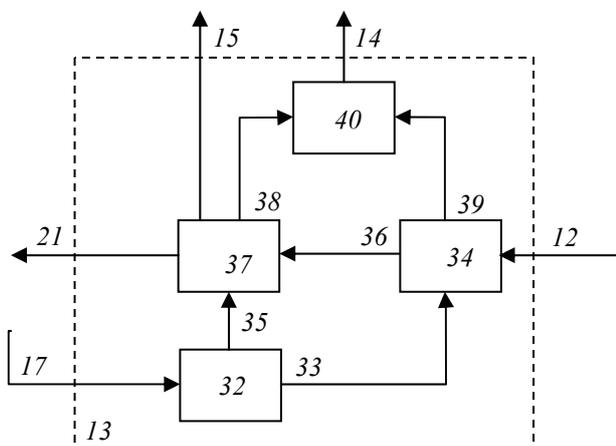


Рис. 3. Структурная схема блока декодирования:

12, 14, 15, 17, 21 – входы и выходы блока декодирования; 32 – ЗУ; 33, 35, 36, 38, 39 – входы и выходы элементов блока кодирования; 34 – блок деления кодовой последовательности (БДКП); 37 – многопороговый декодер; 40 – блок объединения информационной последовательности (БОИП)

В состав блока декодирования входят также блоки деления и объединения битовых последовательностей. БА содержит два блока: блок определения кратности исправляемой ошибки и блок определения качества канала.

Блок определения кратности исправляемой ошибки рассчитывает число ошибочных бит, которые накапливаются и через определенное множество переданных пакетов позволяют рассчитать коэффициент ошибок по битам BER.

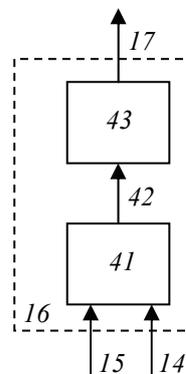


Рис. 4. Структурная схема блока анализа: 14, 15, 17 – входы и выходы блока анализа; 41 – блок определения кратности исправляемой ошибки; 42 – выход блока определения кратности ошибки; 43 – блок определения качества канала

Блок определения качества канала по рассчитанному коэффициенту BER оценивает качество канала по табл. 2 и принимает решение о выборе кода (табл. 1) для следующего передаваемого информационного пакета. В том случае, если нет возможности определить кратность исправляемой ошибки, качество канала предлагается определять по числу пропущенных стадий, как показано в табл. 3. Отметим, что определить число пропущенных стадий позволяет модифицированный алгоритм выбора пороговых значений.

Таблица 2

**Определение качества канала по коэффициенту BER**

| Категория      | Значение BER              |
|----------------|---------------------------|
| А (высокое)    | BER → 0                   |
| В (хорошее)    | $10^{-8} < BER < 10^{-7}$ |
| С (среднее)    | $10^{-7} < BER < 10^{-5}$ |
| Д (низкое)     | $10^{-4} < BER < 10^{-3}$ |
| Е (деградация) | $BER < 10^{-3}$           |

Таблица 3

**Определение качества канала по числу пропущенных стадий**

| Категория      | Количество пропущенных стадий, % | Число паритетов |
|----------------|----------------------------------|-----------------|
| А (высокое)    | >66                              | 5               |
| В (хорошее)    | 52–66                            |                 |
| С (среднее)    | 41–52                            |                 |
| Д (низкое)     | 32–41                            |                 |
| Е (деградация) | 24–32                            |                 |

Окончание табл. 3

| Категория      | Количество пропущенных стадий, % | Число паритетов |
|----------------|----------------------------------|-----------------|
| A (высокое)    | >75                              | 7               |
| B (хорошее)    | 66–75                            |                 |
| C (среднее)    | 58–66                            |                 |
| D (низкое)     | 51–58                            |                 |
| E (деградация) | 44–51                            |                 |
| A (высокое)    | >80                              | 9               |
| B (хорошее)    | 74–80                            |                 |
| C (среднее)    | 68–74                            |                 |
| D (низкое)     | 63–68                            |                 |
| E (деградация) | 56–63                            |                 |

Статистические данные, полученные ранее в результате моделирования многопорогового декодирования трехмерных итеративных кодов с модифицированным алгоритмом выбора пороговых значений для следующей стадии, дают возможность сделать вывод о том, что ошибки низкой кратности позволяют декодеру пропустить большее число стадий, ошибки более высокой кратности (4 и более) могут привести к тому, что стадии декодирования не будут пропущены вообще.

Качество канала предлагается условно разделить на пять категорий: А (высокое), В (хорошее), С (среднее), D (низкое) и Е (деградация) (табл. 2).

Рассмотрим принцип работы устройства на примере. В начальный момент функционирования устройства в случае отсутствия информации о качестве канала применяется код, подходящий по длине передаваемой информационной последовательности и с наибольшей скоростью. Допустим, на вход блока кодирования поступило информационное сообщение длиной 253 бита, значит, в соответствии с табл. 1 будет использован код (256, 16/27, 5).

На начальном этапе деление информационной последовательности не требуется, поэтому БДИП добавляет в начало передаваемого сообщения три нулевых бита и передает сформированную последовательность на первый вход 27 кодера. На второй вход 26 кодера от ЗУ поступает проверочная матрица. Таким образом, кодовая последовательность с выхода кодера поступает на вход 29 БОКП, который убирает добавленные в начало последовательности нулевые биты и через выход 5 передает кодовую последовательность на первый вход блока модуляции (демодуляции). Блок модуляции (демодуляции) выполняет преобразование и передает информацию в дискретный канал связи.

После передачи информации по каналу связи на стороне приемника выполняется обратное

преобразование блоком модуляции (демодуляции) и полученная кодовая последовательность поступает на вход 12 блока декодирования, а именно на первый вход БДКП, который добавляет в начало кодовой последовательности три недостающих нулевых бита и через выход 36 передает последовательность на первый вход многопорогового декодера, а через выход 39 – на второй вход БОИП количество добавленных бит. На второй вход 35 многопорогового декодера от ЗУ поступает выбранная проверочная матрица, на основании которой многопороговый декодер обнаруживает и исправляет ошибки в принятой последовательности, определяя при этом кратность исправляемой ошибки и число пропущенных стадий, которые поступают на вход 15 блока анализа и накапливаются там. Через выход 38 информационная последовательность поступает на первый вход БОИП, который убирает добавленные нулевые биты и отправляет информационную последовательность через выход 14 на блок анализа.

Блок анализа по возможности рассчитывает значение BER. Через заданное число передаваемых информационных блоков БА получает значение качества канала (табл. 2, 3), например  $BER = 2,7E10^{-4}$ , что соответствует категории D, и формирует выход 17, который поступает на второй вход блока декодирования 13 (необходим для корректной работы декодера при следующей передаче) и на второй вход 20 блока кодирования (через так называемую «обратную связь» – модулятор (демодулятор) передатчика 11, бинарный канал и модулятор (демодулятор) приемника 6).

В ходе передачи при любой категории качества канала за исключением А анализатор уменьшает скорость кода  $r$ , а затем увеличивает количество паритетов  $a$  в коде. Возможное изменение параметров выбранных кодов в случае постоянного ухудшения качества канала представлено в табл. 4. Так как в рассматриваемом примере качество канала ниже категории А, то анализатор уменьшает скорость кода и соответственно по табл. 1 выбирает новый код (256, 4/7, 5).

Из запоминающих устройств блоков кодирования и декодирования считывается соответствующая проверочная матрица, на основе которой будут работать кодер и многопороговый декодер.

При следующей передаче в случае неудовлетворительного качества канала анализатор повысит число паритетов и будет выбран код (256, 1/2, 7), скорость которого тоже будет снижена. В дальнейшем в зависимости от рассчитанного значения BER может быть переключение кодера (декодера) на трехмерные итеративные коды (256, 16/35, 7), (256, 4/9, 9), (256, 16/37, 9).

Таблица 4

## Значения параметров кода

| №                                | 1                       | 2              | 3                         | 4              | 5                         | 6              | 7                         | 8              | 9                         | 10             | 11                        |
|----------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|
| $k$                              | 256                     | 256            | 256                       | 256            | 256                       | 256            | 128                       | 128            | 128                       | 128            | 128                       |
| $r$                              | 16/37                   | 4/7            | 1/2                       | 16/35          | 4/9                       | 16/37          | 8/15                      | 1/2            | 4/9                       | 8/19           | 8/21                      |
| $a$                              | 5                       | 5              | 7                         | 7              | 9                         | 9              | 5                         | 5              | 7                         | 7              | 9                         |
| Направление изменения параметров | $\uparrow r \uparrow a$ | $\downarrow r$ | $\downarrow r \uparrow a$ | $\downarrow r$ | $\downarrow r \uparrow a$ | $\downarrow r$ | $\uparrow r \downarrow a$ | $\downarrow r$ | $\downarrow r \uparrow a$ | $\downarrow r$ | $\downarrow r \uparrow a$ |

В случае ухудшения, отсутствия изменений или незначительного улучшения блок анализа выбирает код с меньшим объемом информационной части, т. е.  $k$  изменяется с 256 на 128 и выбирается код (128, 8/15, 5). Эту возможность дают БДИП и БОКП блоков кодирования и декодирования. Затем весь процесс повторяется снова: уменьшается скорость кода и увеличивается число паритетов, т. е. будут последовательно выбраны следующие коды: (128, 8/15, 5), (128, 1/2, 5), (128, 4/9, 7), (128, 8/19, 7), (128, 8/21, 9). При необходимости можно уменьшить параметр  $k$  до 64 бит.

В случае достижения приемлемого качества канала (категории А и В) будет происходить обратный процесс: уменьшение числа паритетов и увеличение скорости кода, т. е. если нет необходимости использовать код с более высокой скоростью, то возможен возврат к коду с более низкой скоростью (движение вниз по табл. 1). Таким образом, в процессе передачи периодически происходит пересчет значения BER и переключение на различные трехмерные итеративные коды.

Функциональность предложенного устройства аналогична адаптивному устройству кодирования (декодирования) данных на основе кодов низкой плотности проверок на четность [4]. Результаты моделирования [5] адаптивного устройства [4] показали, что динамическое изменение параметров кода приводит к повышению производительности предложенного метода кодирования (декодирования) по сравнению с кодированием (декодированием) без изменения параметров. Кроме того, в случае повышения качества канала динамически устанавливается более быстрый код, что увеличит скорость передачи информации.

**Заключение.** Предлагаемое адаптивное устройство кодирования (декодирования) данных на основе итеративных кодов и многопорогового декодирования позволяет динамически изменять параметры используемых итеративных кодов, что дает возможность

использовать более быстрый код, увеличивая тем самым скорость передачи информации. Также можно использовать несколько кодов для одной передаваемой последовательности и определять количество ошибочных бит, что в свою очередь позволяет оценить качество канала по коэффициенту ошибок по битам BER в режиме без отключения связи.

## Литература

1. Канаков В. А. Новые технологии измерения в цифровых каналах передачи информации: учеб.-метод. материал по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации». Н. Новгород: НГТУ им. Н. И. Лобачевского, 2006. 91 с.
2. Urbanovich P. P., Vitkova M. F., Romanenko D. M. The algorithm for determining the multiplicity of errors by multithreshold decoding of iterative codes // News electrical and electronic technologies and their industrial implementation: proc. VIII International Conference, Zakopane, Poland, June 18–21, 2013. Zakopane, 2013. P. 148.
3. Виткова М. Ф. Анализ возможности оптимизации многопорогового декодирования многомерных итеративных кодов // Сборник научных работ 63-й научно-технической конференции студентов и магистрантов БГТУ, Минск, 23–28 апр.: в 4 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2012. Ч. 4. С. 332–335.
4. Адаптивное устройство кодирования / декодирования данных на основе кодов низкой плотности проверок на четность: пат. 8296 Респ. Беларусь, Н 03 М 13/11 Н 04 L 1/00 / П. П. Урбанович, Н. В. Пацей, Д. М. Романенко, Д. М. Шиман; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т; заявл. 6.10.11; опубл. 30.06.12.
5. Пацей Н. В. Моделирование переменных кодов низкой плотности проверок на четность // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2011. Вып. XIX. С. 132–135.

Поступила 20.03.2014