

# ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 8296

(13) U

(46) 2012.06.30

(51) МПК

H 03M 13/11 (2006.01)

H 04L 1/00 (2006.01)

## (54) АДАПТИВНОЕ УСТРОЙСТВО КОДИРОВАНИЯ/ДЕКОДИРОВАНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ КОДОВ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ ПРОВЕРЕК НА ЧЕТНОСТЬ

(21) Номер заявки: u 20110765

(22) 2011.10.06

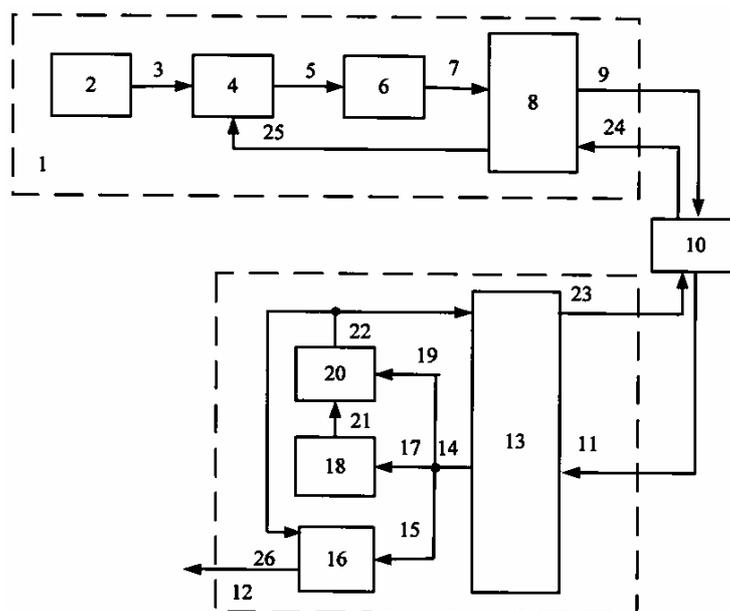
(71) Заявитель: Учреждение образования  
"Белорусский государственный техно-  
логический университет" (ВУ)

(72) Авторы: Урбанович Павел Павлович;  
Пацей Наталья Владимировна; Рома-  
ненко Дмитрий Михайлович; Шиман  
Дмитрий Васильевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение обра-  
зования "Белорусский государственный  
технологический университет" (ВУ)

(57)

Адаптивное устройство кодирования/декодирования данных на основе кодов низкой плотности проверок на четность, содержащее передатчик, приемник данных и беспроводной канал передачи, вход которого соединен с выходом передатчика данных, а выход соединен со входом приемника данных, при этом передатчик состоит из источника данных, кодера на основе кода с низкой плотностью проверок на четность и модулятора, выход которого является выходом передатчика данных, а вход соединен с выходом кодера, а приемник данных состоит из демодулятора и декодера кодов низкой плотности проверок на четность, выход которого соединен с выходом приемника данных, а вход - с выходом демодулятора, вход которого соединен со входом приемника данных, отличающееся тем,



Фиг. 1

ВУ 8296 U 2012.06.30

# BY 8296 U 2012.06.30

что в приемник данных добавлены демодулятор, вход которого является вторым выходом беспроводного канала связи, а выход - вторым входом кодера низкой плотности проверок на четность, и блок контроля четности, вход которого является выходом кодера, а выход соответственно - входом модулятора, а в передатчик добавлены модулятор, блок анализа и блок контроля четности, вход которого является выходом демодулятора, а выход - первым входом блока анализа, при этом второй вход блока анализа является выходом демодулятора, а выход - вторым входом декодера кода низкой плотности проверок на четность и входом модулятора, выход которого является вторым выходом приемника данных и вторым входом беспроводного канала.

(56)

1. Roca V., Neumann C., Furodet D. RFC 5170 on Low Density Parity Check (LDPC) Staircase and Triangle Forward Error Correction (FEC) Schemes / [Electronic resource]. - Mode of access: <http://search.usa.gov>. - Date of access: 25.06.2008.

2. Gallager R.G. Low Density Parity Check Codes, Cambridge. - MA: MIT, Press, 1963. - 90 p.

3. Патент RU 2341894 C2, МПК Н 03М 13/11 Н 04L 1/00, 2008.

4. Патент US 0199068, МПК Н 03М 13/05 G 06F 11/10, 2009.

5. Tanner R.M., Sridhara D., Sridharan A., Costello D.J., Jr. and T.E. Fuja. LDPC block and convolutional codes based on circulant matrices // IEEE Trans, on Inform. Theory. - 2004. - Vol. 50. - No. 12. - P.2966-2984.

6. Пацей Н.В. Моделирование переменных кодов низкой плотности проверок на четность. Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информатика. Вып. XIX. - Минск.: БГТУ, 2011. - С. 132-135.

---

Полезная модель к устройству кодирования и декодирования блочных кодов низкой плотности проверки на четность (НППЧ) (Low Density Parity Check - LDPC), обладающему переменной длиной кодового слова, переменной скоростью кодирования и плотностью проверочной матрицы, которое может быть использовано в системах беспроводной связи для повышения скорости и надежности передачи.

Надежная передача информации обеспечивается использованием канальных схем обнаружения и коррекции ошибок. Коды низкой плотности проверок на четность были предложены [1, 2] для использования в спутниковых и беспроводных телекоммуникационных системах связи, волоконно-оптических и системах хранения информации. Они относятся к линейным блочным кодам и задаются параметрами  $(n, k, w_c, w_r)$ , где  $n$  - длина кодового блока,  $k$  - длина информационного блока,  $w_c$  - количество единиц в каждом столбце (или функция распределения, если количество единиц меняется),  $w_r$  - количество единиц в каждой строке (или функция распределения, если количество единиц меняется). Коды НППЧ описываются с помощью проверочной матрицы  $H$  размера  $(n-k) \times n$ . Каждой проверочной матрице  $H$  ставится в соответствие порождающая матрица  $G$ . При кодировании НППЧ-кодами чаще вместо порождающей матрицы используют проверочную [2].

Известно устройство и способ кодирования/декодирования данных на основе кода разряженного контроля четности с переменной длиной блока и скоростью кодирования [3]. Согласно [3] устройство содержит четыре типа матриц контроля четности, что позволяет использовать четыре скорости кодирования  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$  и  $5/6$  и изменять длину кодового блока в пределах: 96, 192, 288, 384, 480, 576, 672, 768, 864 и 960. Недостатком устройства является ограничение на диапазон скоростей и необходимость генерации проверочных матриц в процессе работы устройства. Указанные недостатки ограничивают количество

# ВУ 8296 U 2012.06.30

возможных кодов, используемых в устройстве, а также требуют дополнительного времени на генерацию проверочных матриц.

Наиболее близким техническим решением к предлагаемому устройству является устройство кодирования/декодирования данных для кодов низкой плотности проверок на четность в беспроводных коммуникационных системах, содержащее передатчик, приемник данных и беспроводной канал передачи, вход которого соединен с выходом передатчика данных, а выход соединен со входом приемника данных, при этом передатчик состоит из источника данных, кодера на основе кода с низкой плотностью проверок на четность и модулятора, выход которого является выходом передатчика данных, а вход соединен с выходом кодера, а приемник данных состоит из демодулятора и декодера кодов низкой плотности проверок на четность, выход которого соединен с выходом приемника данных, а вход - с выходом демодулятора, вход которого соединен со входом приемника данных [4].

Устройство обеспечивает формирование проверочной матрицы кода на основе генерации базовой матрицы размером  $96 \times 96$  и 96 перестановочных матриц, расстановку перестановочных матриц в проверочной, что в итоге обеспечивает результирующие скорости кода  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$  и дает возможность изменять длину информационного блока в пределах: {36, 42, 48, 54, 56, 60, 63, 64, 66, 72, 78, 80, 81, 84, 88, 90, 96, 99, 102, 104, 108, 112, 114, 117, 120, 128, 132, 135, 136, 138, 144, 152, 153, 160, 162, 168, 171, 176, 180, 184, 189, 192, 198, 207, 216}. Недостатками представленного в [4] устройства является ограничение на скорость кодирования, короткая длина информационного блока и невозможность изменения параметров НППЧ-кода в процессе передачи без отключения канала.

Задачей настоящей полезной модели является повышение эффективности функционирования устройства кодирования/декодирования данных путем изменения динамического изменения параметров кода: скорости, величины веса столбцов проверочной матрицы (плотности проверочной матрицы) и длины кодового слова, в зависимости от изменяемого во времени значения оценки качества канала передачи, что позволит увеличить производительность системы передачи информации и увеличить ее надежность.

Поставленная задача решается тем, что в устройство кодирования/декодирования данных на основе кодов низкой плотности проверок на четность, содержащее передатчик, приемник данных и беспроводной канал передачи, вход которого соединен с выходом передатчика данных, а выход соединен со входом приемника данных, при этом передатчик состоит из источника данных, кодера на основе кода с низкой плотностью проверок на четность и модулятора, выход которого является выходом передатчика данных, а вход соединен с выходом кодера, а приемник данных состоит из демодулятора и декодера кодов низкой плотности проверок на четность, выход которого соединен с выходом приемника данных, а вход - с выходом демодулятора, вход которого соединен со входом приемника данных, введены в приемник данных - демодулятор, вход которого является вторым выходом беспроводного канала связи, а выход - вторым входом кодера низкой плотности проверок на четность, и блок контроля четности, вход которого является выходом кодера, а выход соответственно - входом модулятора, а в передатчик добавлены модулятор, блок анализа и блок контроля четности, вход которого является выходом демодулятора, а выход - первым входом блока анализа, при этом второй вход блока анализа является выходом демодулятора, а выход - вторым входом декодера кода низкой плотности проверок на четность и входом модулятора, выход которого является вторым выходом приемника данных и вторым входом беспроводного канала.

Изобретение поясняется чертежами: фиг. 1-5.

Фиг. 1 - структурная схема адаптивного устройства кодирования/декодирования данных на основе кодов низкой плотности проверок на четность.

Фиг. 2 - структурная схема блока НППЧ-кодера.

Фиг. 3 - структурная схема блока НППЧ-декодера.

Фиг. 4 - направление изменения параметров кода по табл. 2 при непрерывном ухудшении оценки качества канала.

Фиг. 5 - результаты экспериментального моделирования, зависимость BER от SNR.

Для оптимизации системы передачи информации в предлагаемом техническом решении изменен, по сравнению с прототипом [4], способ формирования проверочной матрицы кода  $H$  и добавлена возможность динамического (в процессе передачи) изменения параметров НППЧ-кода путем контроля скорости кода, размера кодового слова и плотности проверочной матрицы  $H$ . В результате устройство динамически адаптируется к качеству канала в соответствии с рассчитанной анализатором оценкой. Комбинация параметров  $k$ ,  $r$ ,  $w_c$  позволяет получить широкий спектр кодов. В дальнейшем НППЧ-код, построенный на основе общего алгоритма, но обеспечивающий различные кодовые скорости, размеры кодового слова и плотность проверочной матрицы, назовем переменным кодом низкой плотности проверок на четность (ПНППЧ).

Обобщенная структурная схема адаптивного устройства кодирования/декодирования данных на основе переменных кодов с низкой плотностью проверок на четность (фиг. 1) состоит из передатчика 1, содержащего блок источника данных 2, выход 3 которого соединен с первым входом НППЧ-кодера 4, выход 5 которого является входом блока контроля четности 6, который добавляет к закодированной последовательности значение, вычисленное на основе CRC-кода (Cyclic Redundancy Code). Блок 6 добавлен для динамического мониторинга качества канала на стороне передатчика 1. Полученный кодовый блок с выхода 7 передается на первый вход блока модуляции/демодуляции 8, выход 9 которого является выходом приемника 1 и первым входом беспроводного канала связи 10. Первый выход 11 беспроводного канала связи 10 является входом приемника данных 12, содержащего блок модуляции/демодуляции 13, первым входом соединенный с первым выходом 11 канала связи, а первым выходом 14 - с первым информационным входом 15 НППЧ-декодера 16, первым выходом 14 - со входом 17 блока контроля четности 18 и первым выходом 14 - с первым входом 19 блока анализа 20. Блок контроля четности 18 приемника 12 аналогичен по функциональному назначению блоку 6 передатчика данных 1. Блоки 6 и 18 не могут локализовать битовые ошибки, так как существует ограничение на длину измеряемого блока (CRC-4, CRC-6, CRC-16 или CRC-32), кроме того, возможны ситуации компенсации ошибок. Тем не менее, в результате добавления блоков контроля четности не требуется отключения канала для определения его качества. Вычисленные блоком 18 значения поступают через выход 21 на второй вход блока анализа 20, который на основе расчетного и вычисленного значения вычисляет BLER (Block Error Rate) и принимает решение о качестве канала. BLER - коэффициент ошибок по блокам, который равен отношению числа ошибочных блоков данных (рассчитывается на основе переданной величины CRC и рассчитанной блоком контроля четности 18) к общему числу переданных блоков. Ошибочным считается блок, содержащий хотя бы один ошибочный бит. В случае длительного анализа система передачи будет медленно адаптируемая, поэтому в данном техническом решении период измерения будет зависеть от числа переданных бит. Анализатор выполняет деление качества канала на шесть категорий и от 10 до 14 подкатегорий в каждой категории на основании BLER. Категории/подкатегории качества канала представлены в табл. 1.

В зависимости от категории/подкатегории и текущих параметров кода ( $n$ ,  $k$ ,  $w_c$ ,  $r$ ) блок анализа 20 выполняет переключение ПНППЧ-кода в соответствии с перечнем предопределенных НППЧ-кодов, предусмотренных данным решением и представленных в табл. 2. Блок анализа 20 формирует выход 22, поступающий на второй вход модулятора/демодулятора 13 и через второй выход 23 блока 13, являющийся выходом приемника 12 и вторым входом беспроводного канала связи 10. Вторым выходом беспроводного канала связи 10 является входом передатчика 1 и вторым входом 24 блока модуляции/демодуляции 8, вто-

# BY 8296 U 2012.06.30

рой выход которого соединен со вторым входом 25 НППЧ-кодера 4. Выход 22 блока анализа 20 является вторым входом НППЧ-декодера 16. Таким образом, выход 22 управляет параметрами кода в НППЧ-кодере 4 и НППЧ-декодере 16. Декодированная последовательность НППЧ-декодера 16 поступает с выхода 26 и является вторым выходом приемника 12.

В описанной схеме устройства (фиг. 1) сигналы питания и синхронизации не показаны.

Таблица 1

**Категории/подкатегории качества канала**

Категория /подкатегория	Значение BLER
A (высокое)	BLER $\rightarrow$ 0
B (хорошее) B1 - B14	$10^{-9} < \text{BLER} < 10^{-7}$
C (среднее) C1-C14	$10^{-7} < \text{BLER} < 10^{-5}$
D (ниже среднего) D1 - D12	$10^{-5} < \text{BLER} < 10^{-4}$
E (низкое) E1 - E10	$10^{-4} < \text{BLER} < 10^{-3}$
F (деградация)	$\text{BLER} < 10^{-3}$

Таблица 2

**Параметры НППЧ-кодов**

r	Длинные		Короткие	
	k	n	k	n
1/4	16 200	64 800		
1/3	21 600	64 800	5 400	16 200
2/5	25 920	64 800	6 480	16 200
1/2	32 400	64 800		
4/9			7 200	16 200
3/5	38 880	64 800	9 720	16 200
2/3	43 200	64 800	10 800	16 200
3/4	48 600	64 800		
4/5	51 840	64 800		
5/6	54 000	64 800		
7/9			12 600	16 200
8/9	57 600	64 800	14 400	16 200
9/10	58 320	64 800		
w <sub>c</sub>	256, 512, 1024		64, 128, 256	

Длины блоков кодового слова n выбраны в соответствии с ITU-T G.821, G.826 и M.2100 рекомендациями, а значение w<sub>c</sub> в таблице соответствует количеству единиц в столбцах проверочной матрицы.

На фиг. 2 представлена структурная схема НППЧ-кодера 4, содержащая блок кодирования 27 и оперативное запоминающее устройство (ЗУ) 28. Оперативное запоминающее устройство 28 предназначено для хранения различных конфигураций 54 альтернативных проверочных матриц по табл. 2. По второму входу 25, поступающему с блока анализа 20 приемника 12 через беспроводной канал связи 10 и блок модуляции/демодуляции 8, подается адрес ячеек памяти, из которых должна быть считана проверочная матрица (сигналы записи/считывания на фиг. 2 не указаны) и передана через первый выход 29 и второй выход 30 ЗУ 28 на второй и третий входы блока кодирования 27 соответственно.

Проверочная матрица регулярного НППЧ-кода  $H$  разделена на две подматрицы:

$$H = [H_d | H_p], \quad (1)$$

где  $H_p$  - двойная диагональная матрица размера  $(n-k) \times (n-k)$ , содержит проверочную часть (соответствует избыточным символам кодового слова) и  $H_d$  - матрица размера  $(n-k) \times k$ , содержит информационную часть (соответствует информационным символам кодового слова).

Так как проверочная матрица НППЧ-кода  $H$  является разреженной (содержит малое количество единиц) и структура матрицы  $H_p$  постоянна, то хранение матрицы  $H$  в ЗУ 28 может быть организовано через два массива размером  $z$ , где  $z$  - общее количество единиц в  $H_d$  матрице,  $z = w_c k$ . Условно назовем эти массивы "строка" и "конец строки". В массиве "строка" хранятся позиции (индексация начинается с нуля) последовательных строк, где размещены единицы. В случае перехода единицы из текущей на следующую строку в исходной матрице  $H$  (т.е. последняя единица в строке) в массиве "конец строки" выставляется флаг "1", в противном случае - "0". Например, для матрицы  $H$  размера  $5 \times 5$  с количеством единиц 10:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ 1 & & & & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

массивы будут выглядеть следующим образом:

Индекс $z$	0 1 2 3 4 5 6
Массив "строка"	0 1 2 3 4 0 5
Массив "конец строки"	1 1 1 1 1 0 1.

При выборе матрицы на первый выход 29 и второй выход 30 блока 28 поступают значения массивов "конец строки" и "строка" соответственно.

Блок кодирования 27 функционально представляет собой умножитель матрицы  $H$  на информационный вектор  $v$  по входу 3:

$$C = H v. \quad (3)$$

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

$$c = [v | p], \quad (4)$$

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

Так как в соответствии с [2]  $cH^T = 0$  и в эквивалентной форме  $c^T H = 0$ , то можно записать:

$$[H_d | H_p][v | p]^T = 0, \quad (5)$$

и

$$p = ((\text{inv}(H_p)H_d)v), \quad (6)$$

где  $\text{inv}(H_p)$  - инверсия матрицы.

Так как модуль кодирования 27 не содержит принципиально нового, схема и описание функционирования блока опущены.

Для формирования проверочных матриц и хранения их представлений в запоминающем устройстве 28 выполняются предварительные вычисления. Сначала формируется базовая квадратная матрица  $P_0$  размером  $m \times m$ . Параметр  $m$  может изменяться. Базовая матрица  $P_0$  генерируется на основе известного метода [5] и является единичной. Матрица  $P_0$  может частично входить в  $H_d$  (в этом случае будут использоваться только первые  $j$  столбцов или первые  $i$  строк).

В реальном устройстве необходимо выбирать  $m = 47, 87, 101$  и т.д., т.е. достаточно большое. Однако для примера выберем  $m = 5$ . После определения матрицы базового кода строятся перестановочные матрицы на основе операции циклического сдвига столбцов влево. Операция повторяется  $m-1$  раз, что позволяет получить  $P_1, \dots, P_{m-1}$  сдвиговых матриц.

Например:

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}, P_1 = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}, \dots, P_4 = \begin{bmatrix} & & & & 1 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \\ & & & & & & & 1 \\ & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}.$$

Полученные матрицы используются в дальнейшем для построения матрицы  $H_d$ .

Согласно [5] для размещения перестановочных матриц в  $H_d$  выбираются два числа  $a$  и  $b$ , принадлежащие ненулевым элементам поля Галуа. Тогда заполнение матрицы  $H_d$  размером  $(n-k) \times k$  состоит в расстановке матриц  $P_i$ , а также нулевых квадратных матриц для обеспечения заданного  $w_c$ . В общем случае  $(s, t)$ -элемент матрицы  $H_d$  равен  $P_{s,t} = b^{(s-1)a^{(t-1)}} \text{ mod } m$ , для  $1 \leq s \leq i, 1 \leq t \leq j$ :

$$H_{d(n-k,k)} = \begin{bmatrix} P_1 & P_a & P_{a^2} & \dots & P_{a^{j-1}} \\ P_b & P_{ab} & P_{a^2b} & \dots & P_{a^{j-1}b} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{b^{i-1}} & P_{ba^{i-1}} & P_{a^2b^{i-1}} & \dots & P_{a^{j-1}b^{i-1}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

При  $m = w_c$  в матрице  $H_d$  отсутствуют квадратные нулевые матрицы. Если  $w_c \leq m$ , то необходимо вводить  $m-w_c$  нулевых матриц в каждый столбец и строку подматриц матрицы  $H_d$ . Согласно (7)  $i = (n-k) / m$ , а  $j = k / m$ .

В построенной по [5] проверочной матрице  $H$  длина самого короткого цикла будет равна  $b$  и не потребуются выполнение схемы удаления циклов.

Таким образом, результирующая проверочная матрица  $H$  содержит проверочную матрицу  $H_d$ , получаемую в результате конкатенации нулевых и перестановочных  $P_0, \dots, P_{m-1}$  матриц, а также содержит расположенную справа двойную диагональную матрицу  $H_p$  (прочерки в матрице означают нулевые элементы):

$$H_{(n-k,n)} = [H_d | H_p] = \begin{bmatrix} P_1 & P_a & P_{a^2} & \dots & P_{a^{j-1}} & I_d & - & \dots & - \\ P_b & P_{ab} & P_{a^2b} & \dots & P_{a^{j-1}b} & - & I_d & \dots & - \\ \dots & - \\ P_{b^{i-1}} & P_{ba^{i-1}} & P_{a^2b^{i-1}} & \dots & P_{a^{j-1}b^{i-1}} & - & - & \dots & I_d \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $I_d$  двойная диагональная матрица вида:

$$I_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Например, сгенерируем матрицу для кода (648, 162, 3). Пусть  $m = 47, a = 2, b = 5$ , тогда согласно (7)  $i = 10, j = 3, r = 1/4$  и матрица  $H$  размерности  $480 \times 648$  будет выглядеть следующим образом (отсутствие значения в  $H$  соответствует нулевым квадратным матрицам):

$$H_{(480,648)} = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_4 & P_8 & P_{16} & P_{32} & P_{17} & P_{34} & P_{21} & P_{42} & I_d & & \\ P_5 & P_{10} & P_{20} & P_{40} & P_{33} & P_{19} & P_{38} & P_{29} & P_{11} & P_{22} & & I_d & \\ P_{25} & P_3 & P_6 & P_{12} & P_{24} & P_1 & P_2 & P_4 & P_8 & P_{16} & & & I_d \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Для уменьшения плотности матрицы, при  $w_c = 2$ , выполним прореживание матрицы (10), используя псевдослучайный генератор. В результате получим матрицу для кода (648, 162, 2):

$$H_{(480,648)} = \begin{bmatrix} P_1 & & & P_8 & P_{16} & & P_{17} & P_{34} & & P_{42} & I_d & & \\ & P_{10} & P_{20} & & P_{33} & P_{19} & & & P_{11} & P_{22} & & I_d & \\ P_{25} & P_3 & P_6 & P_{12} & & P_1 & P_2 & P_4 & P_8 & & & & I_d \end{bmatrix}. \quad (11)$$

При увеличении скорости кода  $r = 2/3$  будет сгенерирована в соответствии с (7) матрица для кода (648, 432, 9):



## BY 8296 U 2012.06.30

128), (16 200, 10 800, 256) и т.д. В случае ухудшения, отсутствия изменений или незначительного улучшения блок анализа 20 выбирает код с длинной длиной кодового слова, т.е.  $n$  изменяется с 16 200 на 64 800, и затем весь процесс повторяется снова: увеличивается плотность проверочной матрицы и уменьшается скорость кода. В случае достижения приемлемого качества категории А и В будет происходить обратный процесс: увеличение скорости кода и уменьшение плотности проверочной матрицы. Таким образом, в процессе передачи периодически происходит пересчет значения BLER и переключение на различные ПНППЧ-коды. Процесс выбора параметров кода по табл. 2 в случае непрерывного ухудшения качества может быть выражен графически (фиг. 4). Здесь номер соответствует последовательности изменения параметров, а точки - начальному и конечному положению при выборе ПНППЧ-кода.

На фиг. 5 представлены результаты компьютерного имитационного моделирования системы передачи информации [6], подтверждающие эффективность использования представленного устройства. Для сравнения производительности представлены результаты работы системы на основе трех различных кодов: ПНППЧ, НППЧ-кода (16 200, 14 400, 16) с постоянной скоростью и НППЧ с  $n = 16 200$  и переменной скоростью кодирования (скорость кодирования уменьшается с увеличением SNR и принимает следующие значения  $r = 8/9, 7/9, 2/3, 4/9, 3/5, 2/5, 1/3$ ).

Маркированные точки на фиг. 5, отмеченные номерами от 1 до 8, сняты в определенные промежутки времени и имеют параметры кода  $n, k, w_c$ , представленные в табл. 3.

Таблица 3

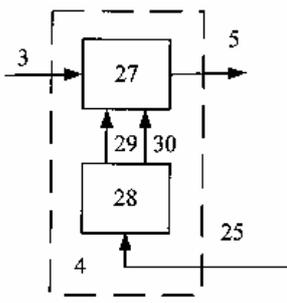
**Значения параметров кода ПНППЧ**

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$n$	16 200	16 200	16 200	16 200	64 800	64 800	64 800	64 800
$k$	14 400	10 800	9720	5400	58 320	58 320	43 200	32 400
$w_c$	64	16	64	64	64	128	64	128
$r$	8/9	2/3	3/5	1/3	9/8	9/8	2/3	1/2
направление	$\uparrow w_c$	$\downarrow r \downarrow w_c$	$\downarrow r \uparrow w_c$	$\downarrow r$	$\uparrow n \uparrow r$	$\uparrow w_c$	$\downarrow r \downarrow w_c$	$\downarrow r \uparrow w_c$

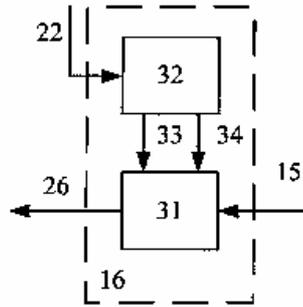
Как показывают результаты моделирования (фиг. 5), производительность предложенного метода кодирования на основе ПНППЧ-кода выше по сравнению с НППЧ-кодами. Кроме того, в случае повышения качества канала динамически устанавливается более быстрый код НППЧ, что увеличивает скорость передачи информации.

Таким образом, предлагаемое адаптивное устройство кодирования/декодирования кодов низкой плотности проверок на четность выполняет те же функции, что и известное. Однако преимущество предлагаемого устройства состоит в увеличении скорости передачи за счет динамического изменения параметров кода и эффективного хранения проверочных матриц, а также в увеличении надежности передачи за счет увеличения плотности проверочных матриц и скорости кода. Это позволяет использовать в данном устройстве адаптивные ПНППЧ-коды с различной корректирующей способностью и скоростью кода в зависимости от качества канала связи (без отключения канала), что невозможно в известном устройстве [4].

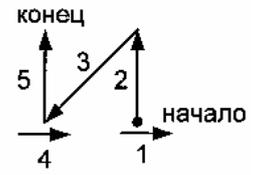
# BY 8296 U 2012.06.30



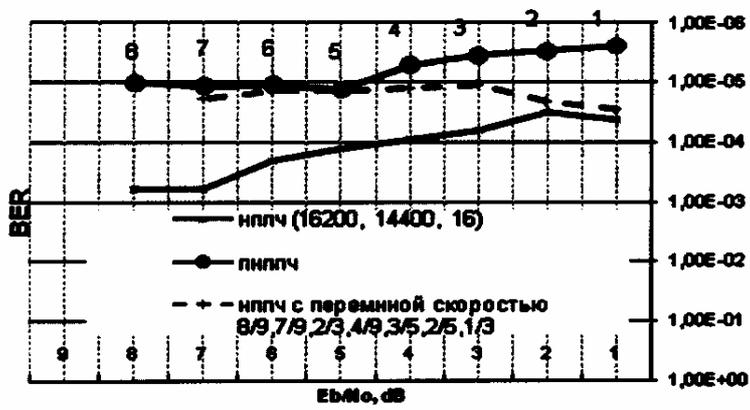
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5