

## ОБРАБОТКА И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

---

УДК 681.325.3

**Н. В. Пацей**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ КОДОВ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ ПРОВЕРОК НА ЧЕТНОСТЬ

В статье рассмотрены архитектура и принцип функционирования компьютерной модели передачи, включающей кодек для адаптивного корректирующего преобразования информации на основе переменных кодов низкой плотности проверок на четность (ПНППЧ). Представлен спектр возможных параметров ПНППЧ-кода в соответствии с категорией качества канала. Приведены результаты экспериментального моделирования системы при изменяемом качестве канала.

Computer model data transmission architecture and its main operation principle with codec for adaptive conversion information correction on the basis of variable low-density parity-check codes (VLDP) are presented in the article. Spectrum in accordance with the category (subcategory) of the channel quality of possible VLDP-code parameters is shown. Finally, the experimental simulation results of system with changeable channel quality, are done.

**Введение.** К наиболее эффективным средствам обеспечения надежной цифровой передачи относятся корректирующие преобразования. За время своего интенсивного развития в технику связи были успешно внедрены пороговые декодеры, алгоритм Витерби, каскадные схемы кодирования [1], а также разработки последнего времени: алгоритмы турбо-кодирования и многопороговые декодеры (МПД) [2]. Значительную роль в теории кодирования играют каскадные методы. Они практически всегда обеспечивают гораздо более высокий энергетический выигрыш кодирования, чем исходные базовые методы, из которых они формируются [1].

Широко распространенными на сегодняшний день в системах беспроводной передачи являются турбо-коды и коды низкой плотности проверок на четность (НППЧ, или Low Density Parity Check – LDPC) [3]. В работе [4] было доказано, что НППЧ-коды имеют минимальное расстояние, линейно растущее с длиной кода, а также, что все ошибки вплоть до минимального расстояния могут быть исправлены при почти линейной сложности алгоритма декодирования. НППЧ-коды могут быть также близки к пределу Шеннона, как и турбо-коды, а некоторые нерегулярные коды могут превосходить турбо-коды при примерно одинаковых длинах и скоростях, когда длина блока достаточно велика [5–9].

В статье [10] подробно рассмотрен разработанный метод конструирования переменных кодов низкой плотности проверок на четность (ПНППЧ), алгоритмы кодирования и декодирования информации.

Целью настоящей работы является исследование практического использования кодеров, построенных на базе ПНППЧ-кода, изучение вероятности битовых ошибок при изменяемом во времени качестве канала передачи.

**Компьютерная имитационная модель передачи информации на основе НППЧ.** В соответствии с [10] была построена модель ПНППЧ-кодека на языке C#. Она содержит классы, представленные на рис. 1, определяющие архитектуру программного средства (ПС). В основе разработанной модели лежат четыре последовательных режима работы: режим генерации проверочной матрицы кода (конструирование), режим кодирования, режим передачи (включает модуляцию/демодуляцию сигнала) и режим декодирования. В качестве передающей среды применялась модель канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Для отображения символов в сигналы использовалась двоичная фазовая модуляция (BPSK). Для моделирования нормально распределенной величины был использован первый вариант преобразования Бокса – Мюллера.

В ПС базовым является класс LDPC. Он содержит методы: установки параметров кодирования и декодирования, генерации проверочных матриц, а также прямого и обратного корректирующего преобразования. Подробное описание используемых техник кодирования и декодирования приведено в [10, 11].

Отличительной особенностью построенной модели является динамическое изменение

параметров кода: скорости  $r$ , величины веса столбцов проверочной матрицы  $w_c$  (плотности проверочной матрицы), длины информационного слова  $k$ , длины кодового слова  $n$  в зависимости от изменяемого во времени значения оценки качества канала передачи. В результате кодек динамически (в процессе передачи) адаптируется к качеству канала в соответствии с рассчитанной анализатором оценкой.

Для динамического мониторинга качества канала в методы кодирования и декодирования добавлена функция вычисления CRC-кода (Check Redundancy Code). CRC-код обнаруживает, но не локализует битовые ошибки. Вычисленные и полученные значения CRC-кода поступают на анализатор, который рассчитывает на их основе значение BLER (Block Error Rate) и принимает решение о качестве канала.

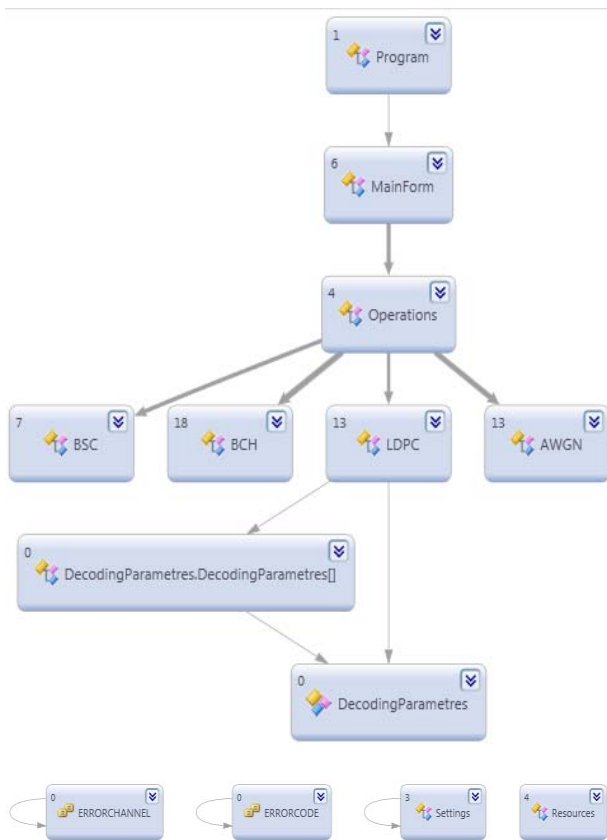


Рис. 1. Диаграмма классов программного средства

Анализатор на основании величины BLER выполняет разделение качества канала на шесть категорий и на подкатегории в каждой категории от 10 до 14. Категории/подкатегории качества канала представлены в табл. 1.

В зависимости от категории и текущих параметров  $n$ ,  $k$ ,  $w_c$  кода блок анализа выполняет определение параметров ПНППЧ-кода из множества НППЧ-кодов, представленных в табл. 2 и заложенных в компьютерную модель.

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)	BLER $< 10^{-3}$

В начальный момент запуска модели по умолчанию устанавливается категория качества А, что соответствует (64 800, 58 320, 64) ПНППЧ-коду. В процессе понижения категории/подкатегории анализатор последовательно увеличивает плотность проверочной матрицы  $w_c$  с 64 до 256 для длинных кодовых слов, уменьшает скорость кода  $r = 9/10, 8/9, 5/6, 4/5, 3/4, 2/3, 3/5, 1/2, 2/5, 1/3, 1/4$ , а затем изменяет длину слова  $n$  с 64 800 на 16 200 и весь процесс повторяется снова: увеличивается плотность проверочной матрицы и уменьшается скорость кода. Категории F будет соответствовать ПНППЧ-код с параметрами (16 200, 5400, 16).

Таблица 2

Параметры ПНППЧ-кода

$r$	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		
$w_c$	64, 128, 256		16, 64, 128	

В случае достижения приемлемого качества (категории А и В) или стабилизации будет происходить обратный процесс: увеличение скорости кода и уменьшение плотности проверочной матрицы. Таким образом, в процессе передачи периодически происходит пересчет значения BLER и переключение кода на соответствующий ПНППЧ-код.

**Заключение.** На рис. 2 представлены результаты имитационного моделирования системы передачи информации с АБГШ (на платформе Intel Pentium T2330/1.60GHz/2.0GB) [12].

Для сравнения производительности приведены результаты работы системы на основе трех различных кодов: предложенного в [11] ПНППЧ-кода, НППЧ-кода с параметрами (16 200, 14 400, 16) и НППЧ-кода с переменной скоростью кодирования (скорость кодирования уменьшается с увеличением SNR (signal-to-noise ratio, или отношение сигнал/шум) и принимает следующие значения  $r = 8/9, 7/9, 2/3, 4/9, 3/5, 2/5, 1/3$ ) на основе [8].

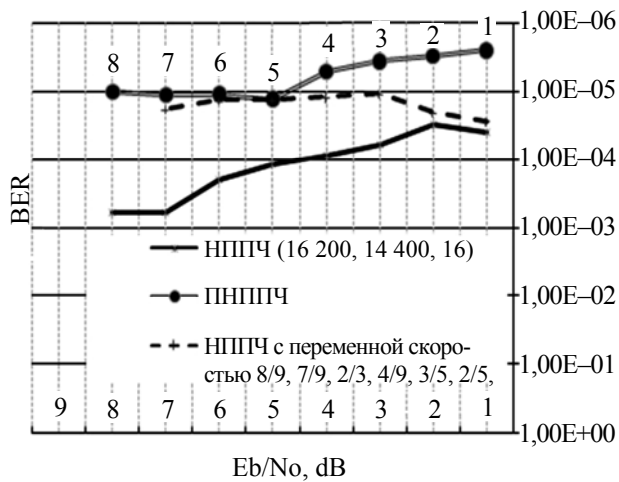


Рис. 2. Зависимость BER от SNR

Маркированные точки на рис. 2, отмеченные номерами от 1 до 8, соответствуют ПНППЧ-коду с параметрами  $n, k, w_c$  и представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Изменение значений параметров ПНППЧ-кода в процессе моделирования**

№ п/п	$n$	$k$	$w_c$	$r$	Направление изменений параметров
1	16 200	14 400	64	8/9	$\uparrow w_c$
2	16 200	10 800	16	2/3	$\downarrow r \downarrow w_c$
3	16 200	9 720	64	3/5	$\downarrow r \uparrow w_c$
4	16 200	5 400	64	1/3	$\downarrow r$
5	64 800	58 320	64	9/8	$\uparrow n \uparrow r$
6	64 800	58 320	128	9/8	$\uparrow w_c$
7	64 800	43 200	64	2/3	$\downarrow r \downarrow w_c$
8	64 800	32 400	128	1/2	$\downarrow r \uparrow w_c$

Как показывают результаты экспериментального моделирования (рис. 2), производительность предложенного метода кодирования на основе ПНППЧ-кода выше по сравнению со статическими НППЧ-кодами. Кроме того, в случае повышения категории качества канала динамически устанавливается более быстрый ПНППЧ-код, что увеличивает пропускную способность канала передачи.

**Литература**

1. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е изд. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2007. – 1104 с.
2. Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы / Ю. Б. Зубарев [и др.] // Электросвязь. – 2005. – № 2. – С. 10–12.
3. Roca, V. RFC 5170 On Low Density Parity Check (LDPC) Staircase and Triangle Forward Error Correction (FEC) Schemes / V. Roca, C. Neumann, D. Furodet [Electronic resource]. – June 2008. – Mode of access: <http://search.usa.gov>. – Date of access: 25.02.2012.
4. Gallager, R. G. Low Density Parity Check Codes / R. G. Gallager. – Cambridge, MA: MIT. – Press, 1963. – 90 p.
5. Kou, Y. Lin S. Low Density Parity Check Codes based on Finite Geometries: A Rediscovery / Y. Lin S. Kou, R. Fossorier // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 2001. – Vol. 47. – P. 2711–2736.
6. MacKay, D. Near Shannon limit performance of low-density parity-check codes / D. MacKay, R. M. Neal // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 2001. – Vol. 47. – P. 54.
7. Improved low-density parity-check codes using irregular graphs and belief propagation / M. G. Luby [et al.] // Proc. of IEEE Intern. Symposium on Inform. Theory. – 1998. – P. 171.
8. LDPC code inspection matrix generation method and inspection matrix generation device: US pat. 7089479B2, H03M 13/00 / Wataru Matsuoto [Electronic resource]. – Mode of access: <http://search.usa.gov>. – Date of access: 25.06.2011.
9. LDPC block and convolutional codes based on circulant matrices / R. M. Tanner [et al.] // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 2004. – Vol. 50, № 12. – P. 2966–2984.
10. Пацей, Н. В. Моделирование переменных кодов низкой плотности проверок на четность / Н. В. Пацей // Труды БГТУ. – 2011. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 122–127.
11. Пацей, Н. В. Метод построения системы кодирования на основе переменных кодов с низкой плотностью проверок на четность / Н. В. Пацей, Д. В. Шиман, Д. М. Романенко // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: материалы всерос. науч.-практ. конф., Самара, 17 нояб. 2011 г. / Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2011. – С. 82–84.
12. ЕСС v.2.0: свидетельство о регистрации компьютерной программы / М. М. Кебич, Н. В. Пацей, Д. М. Романенко, Д. В. Шиман; Белорус. гос. технол. ун-т. – № 260; 16.12.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4.

Поступила 25.02.2012