

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391.072
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-84-95>
EDN OJGGRP



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование влияния корректирующих кодов на когерентный прием сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии шумовой и гармонической помех

В.З. Нгуен[@]

Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам
[@] Автор для переписки, e-mail: nguyenvandungvtdt@lqdtu.edu.vn

Резюме

Цели. Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ), обладающие хорошими спектральными и энергетическими характеристиками, успешно применяются во многих системах передачи информации, таких, как системы спутниковой связи, GPS, ГЛОНАСС, DVB/DVB-S2, в наборе стандартов беспроводной связи IEEE 802.11. В каналах радиосвязи на полезный сигнал действуют, кроме шумовой, разные помехи, одной из них является гармоническая, которая при большой интенсивности практически разрушает прием сигналов М-ФМ. Одним из важных требований, предъявляемых к качеству передачи данных, является устойчивость системы к ошибкам. Существуют разные способы повышения качества передачи информации, один из которых – применение технологии корректирующего кодирования. Цель статьи – оценка помехоустойчивости когерентного демодулятора сигналов М-ФМ с применением кодов Хэмминга (7,4) и (15,11) и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5) при приеме сигналов М-ФМ в условиях воздействия в канале связи шумовой и гармонической помех.

Методы. Использованы методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерного имитационного моделирования.

Результаты. С помощью компьютерного имитационного моделирования получены экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум и от интенсивности гармонической помехи для когерентного приема сигналов М-ФМ в канале с шумовой и гармонической помехами без применения корректирующих кодов и с применением кодов Хэмминга (7,4) и (15,11), сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5).

Выводы. Показано, что применение корректирующих кодов позволяет эффективно исправлять ошибки при наличии шумовой и гармонической помех с малой интенсивностью. При большой интенсивности помехи коррекция неэффективна. Результаты могут служить важным руководством при проектировании надежных и энергоэффективных систем передачи информации.

Ключевые слова: многопозиционная фазовая манипуляция, корректирующие коды, код Хэмминга, сверточный код, алгоритм декодирования Витерби, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки, гармоническая помеха

• Поступила: 19.11.2023 • Доработана: 11.02.2024 • Принята к опубликованию: 22.05.2024

Для цитирования: Нгуен В.З. Исследование влияния корректирующих кодов на когерентный прием сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии шумовой и гармонической помех. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):84–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-84-95>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Studying the influence of correction codes on coherent reception of M-PSK signals in the presence of noise and harmonic interference

Van D. Nguyen [@]

Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Vietnam

[@] *Corresponding author, e-mail: nguyenvandungvtdt@lqdtu.edu.vn*

Abstract

Objectives. Signals with multiple phase shift keying (M-PSK) exhibiting good spectral and energy characteristics are successfully used in many information transmission systems. These include satellite communication systems, GPS, GLONASS, DVB/DVB-S2, and a set of IEEE 802.11 wireless communication standards. In radio communication channels, the useful signal is affected by various interferences in addition to noise. One of these is harmonic interference. As a result, high intensity harmonic interference practically destroys the reception of M-PSK signals. One of the important requirements for the quality of data transmission is the system error tolerance. There are different ways of improving the quality of information transmission. One of these is the use of corrective encoding technology. The aim of the paper is to assess the noise immunity of a coherent demodulator of M-PSK signals using Hamming codes (7,4) and (15,11), and convolutional encoding with Viterbi decoding algorithm (7,5) when receiving M-PSK signals under noise and harmonic interference in the communication channel.

Methods. The methods of statistical radio engineering, optimal signal reception theory and computer simulation modeling were used.

Results. Experimental dependencies of the bit error rate on the signal-to-noise ratio and on the intensity of harmonic interference of coherent reception of M-PSK signals in a channel with noise and harmonic interference were obtained using computer simulation modeling. This was done without using correction codes and with Hamming code (7,4) and (15,11) and convolutional encoding with Viterbi decoding algorithm (7,5).

Conclusions. It is shown that the application of the correction codes effectively corrects errors in the presence of noise and harmonic interference with lower intensity. The correction is ineffective in the presence of high intensity interference. These results can provide important guidance in designing the reliable and energy efficient system.

Keywords: multiple phase shift keying, correction codes, Hamming code, convolutional encoding, Viterbi decoding algorithm, noise immunity, bit error rate, harmonic interference

• Submitted: 19.11.2023 • Revised: 11.02.2024 • Accepted: 22.05.2024

For citation: Nguyen V.D. Studying the influence of correction codes on coherent reception of M-PSK signals in the presence of noise and harmonic interference. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):84–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-84-95>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих исследованиях рассматривалось влияние кодирования на помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов, когда в каналах радиосвязи действует всего лишь белый гауссовский шум. Авторы в [1–13] определили эффективность разных корректирующих кодов, применяемых в кодировании каналов с различными методами модуляции. Энергетический выигрыш от применения таких кодов на конкретном примере кода Хэмминга и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби представлен в табл. 1.

На рис. 1 показаны теоретические зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 (E_b – средняя битовая энергия, N_0 – спектральная плотность мощности шума) для приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ) в канале с аддитивным белым гауссовским шумом. Сплошные линии соответствуют вероятности битовой ошибки без применения корректирующих кодов, штриховые линии – вероятности битовой ошибки с применением кода Хэмминга (7,4), штрихпунктирные – с применением кода Хэмминга (15,11), а пунктирные линии – вероятности битовой ошибки с применением сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5) [14].

В работах [15–18] проведен анализ влияния гармонической помехи при приеме сигналов с многопозиционными видами манипуляции. Показано, что гармоническая помеха является самой опасной, когда ее частота совпадает с частотой полезного сигнала. В результате ее воздействия помехоустойчивость сильно снижается.

Важнейший вклад в решение данной проблемы вносит теория помехоустойчивого кодирования. Цель работы – оценка помехоустойчивости когерентного

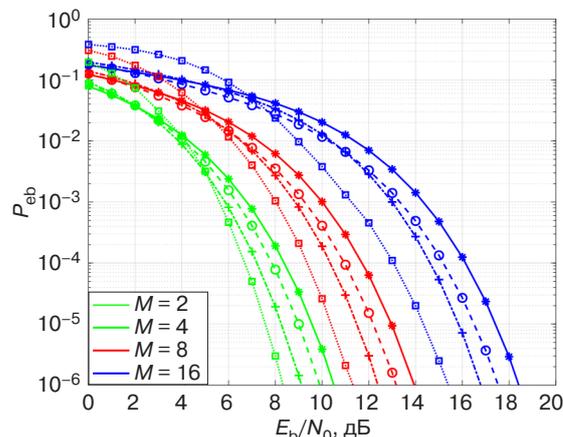


Рис. 1. Теоретические зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для приема сигналов М-ФМ в канале с аддитивным белым гауссовским шумом

демодулятора сигналов М-ФМ с применением кодов Хэмминга (7,4) и (15,11) и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5) при приеме сигналов М-ФМ в условиях воздействия в канале связи шумовой и гармонической помех.

1. МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

На рис. 2 изображена структурная схема цифровой системы передачи информации. В блоках кодера канала и декодера канала реализуется алгоритм кодирования и декодирования по коду Хэмминга или по алгоритму Витерби. Схемы формирования сигналов М-ФМ строятся на основе универсального квадратурного модулятора, а схема приема реализуется на основе многоканального когерентного демодулятора, оптимального по критерию максимального правдоподобия (рис. 3) [19, 20].

Таблица 1. Энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум (дБ) при $P_{eb} = 10^{-5}$

Режимы модуляции	Код Хэмминга (7,4)	Код Хэмминга (15,11)	Сверточное кодирование с алгоритмом декодирования Витерби (7,5)
2-ФМ, 4-ФМ	0.56	1.31	1.99
8-ФМ	0.78	1.49	2.59
16-ФМ	0.91	1.57	3.07

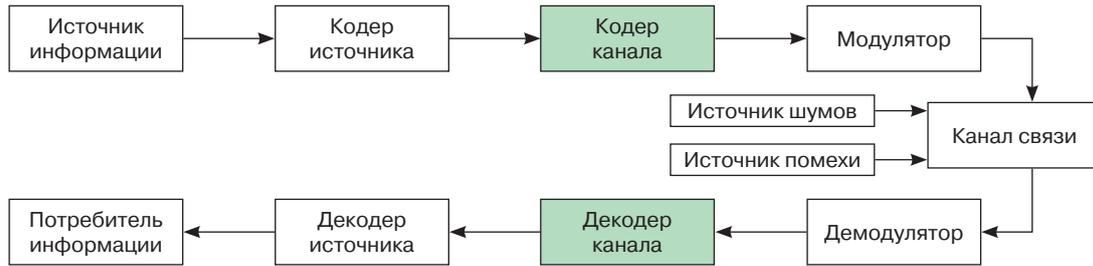


Рис. 2. Структурная схема цифровой системы передачи информации

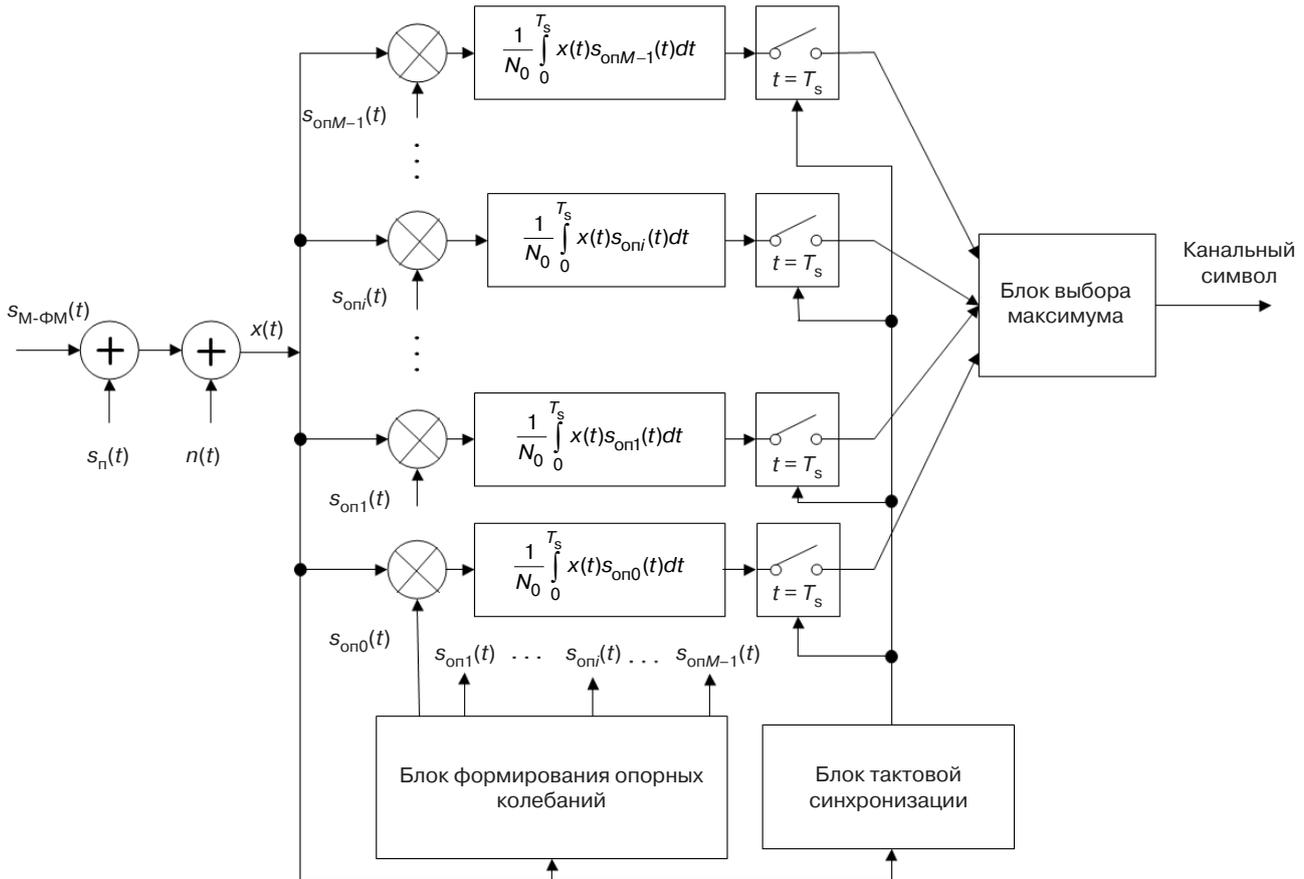


Рис. 3. Структурная схема когерентного демодулятора сигналов М-ФМ.
 t – время; $x(t)$ – входной процесс; $s_{онi}(t)$ – опорные сигналы

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ М-ФМ, ШУМОВОЙ И ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХ

Математические модели сигналов М-ФМ, шумовой и гармонической помех опишем следующим образом:

а) Математическая модель сигналов М-ФМ

Сигнал М-ФМ на тактовом интервале T_s , равном длительности канального символа, несущего информацию о $k = \log_2 M$ информационных битах, может принимать одно из M возможных значений:

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_c), \varphi_i = \frac{i2\pi}{M},$$

$$t \in (0, T_s], i = \overline{0, M-1},$$

где $A_0 = \sqrt{2E_s / T_s}$ – амплитуда сигнала; $E_s = kE_b$ – энергия канального символа; ω_0 – несущая частота; φ_c – начальное фазовое смещение сигнального созвездия сигнала.

Сигнальные созвездия М-ФМ с применением кодирования Грея представлены на рис. 4. На них отмечены сигнальные точки, соответствующие канальным символам, и пунктиром изображены границы областей принятия решения.

б) Модель шумовой помехи

В качестве шумовой помехи рассмотрим стационарный случайный процесс $n(t)$ типа «белый гауссовский шум» с дельта-функцией корреляции и нулевым средним значением.

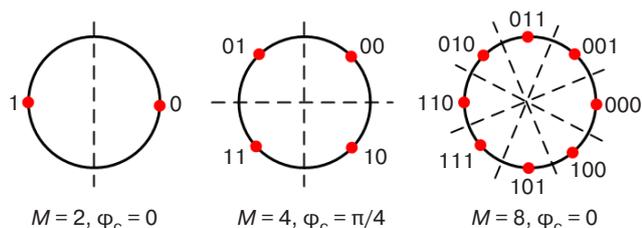


Рис. 4. Сигнальные созвездия многопозиционной фазовой манипуляции

в) Модель гармонической помехи

$$s_{\text{п}}(t) = \mu A_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_{\text{п}})t + \varphi_{\text{п}}],$$

где μ – относительная интенсивность; $\varphi_{\text{п}}$ – случайная начальная фаза помехи, равномерно распределенная на полуинтервале $(-\pi, +\pi]$; $\Delta\omega_{\text{п}}$ – расстройка помехи относительно центральной частоты спектра полезного сигнала ω_0 .

3. КОДЫ ХЭММИНГА (7,4) И (15,11)

На рис. 5 представлены диаграммы Венна для связи между битами проверки четности и битами данных в кодах Хэмминга.

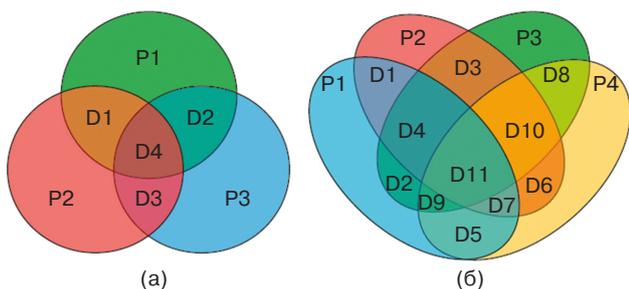


Рис. 5. Диаграммы Венна, описывающие биты проверки четности и биты данных: (а) код Хэмминга (7,4), (б) код Хэмминга (15,11) [21]

Существует некоторый набор параметров кода Хэмминга:

- число символов, предназначенных для проверки m ($m \geq 3$),
- число символов кодового сообщения $n = 2^m - 1$,
- число информационных символов $k = 2^m - m - 1$,
- возможность исправления ошибок $t = 1$ ($d_{\text{min}} = 3$),
- кодовая скорость $R = k/n$.

Применяемые в данной работе параметры кодов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры кодов Хэмминга

Параметры	Код Хэмминга (7,4)	Код Хэмминга (15,11)
m	3	4
n	7	15
k	4	11
R	4/7	11/15

4. СВЕРТОЧНОЕ КОДИРОВАНИЕ С АЛГОРИТМОМ ДЕКОДИРОВАНИЯ ВИТЕРБИ (7,5)

На рис. 6 представлена схема сверточного кодера со скоростью $1/2$, $K = 3$, генераторный полином – $[7,5]$, восьмеричный.

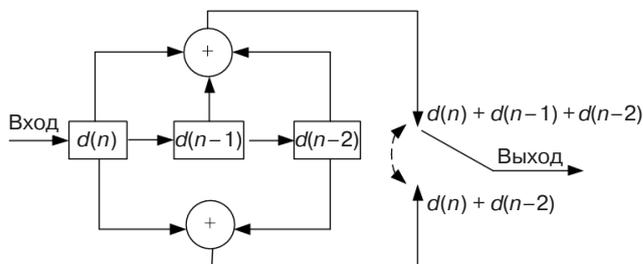


Рис. 6. Схема сверточного кодера

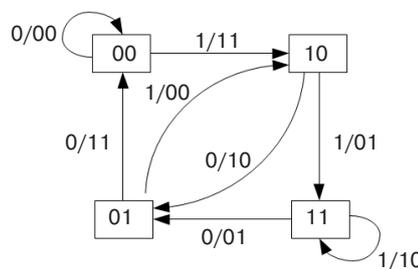


Рис. 7. Диаграмма состояний сверточного кодирования

Существует некоторый набор параметров сверточного кода:

- число информационных символов k ,
- число передаваемых в канал связи символов за один такт поступления на кодер информационного символа n ,
- относительная скорость кода $R = k/n$,
- длина ограничения K ,
- число состояний сверточного кода $2^K - 1$.

Применяемые в данной работе параметры сверточного кода приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры сверточного кода

Параметры	Значение
n	1
k	2
K	3
R	1/2

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Моделирование

Моделирование канала передачи информации было проведено с параметрами, представленными в табл. 4.

Блок-схема алгоритма моделирования показана на рис. 8.

Таблица 4. Параметры моделирования

Параметры	Значение
Отношение сигнал/шум	$E_b/N_0 = 0 \div 25$ дБ
Канал связи	Аддитивный гауссовский белый шум, гармоническая помеха
Относительная интенсивность помехи	$\mu = 0 \div 1$
Начальная фаза помехи	$\varphi = 0 \div 2\pi$
Отношение частоты дискретизации к несущей частоте	$f_d/f_0 = 20$, где $f_0 = \omega_0/2\pi$
Число информационных битов	$N = 1080000$
Режимы модуляции	2-ФМ, 4-ФМ, 8-ФМ, 16-ФМ
Типы кодов	Код Хэмминга (7,4), код Хэмминга (15,11), сверточное кодирование с алгоритмом декодирования Витерби (7,5)

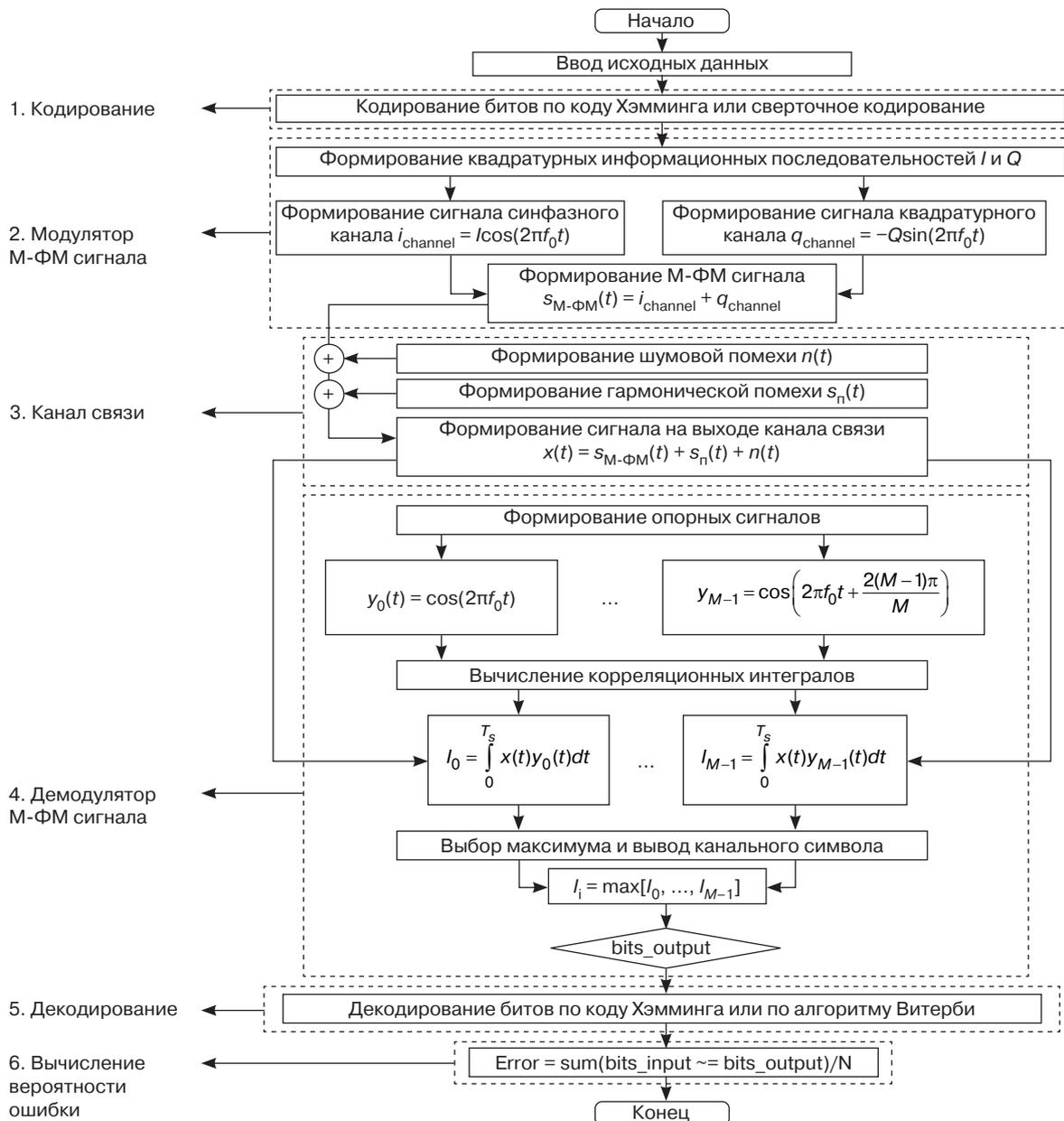


Рис. 8. Блок-схема алгоритма моделирования

При моделировании была учтена связь между отношениями сигнал/шум с кодированием и без кодирования:

$$\frac{E_{cb}}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \lg \left(\frac{k}{n} \right) \text{ (дБ)}.$$

5.2. Результаты имитационного моделирования

На рис. 9 представлены экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 и от относительной интенсивности гармонической помехи μ при когерентном приеме сигналов М-ФМ с использованием кодов Хэмминга для разной скорости кодирования.

Сплошные линии соответствуют вероятности битовой ошибки без применения кода Хэмминга, штриховые линии – вероятности битовой ошибки с применением кода Хэмминга (7,4), а штрихпунктирные – с применением кода Хэмминга (15,11).

На рис. 10 представлены экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 и от относительной интенсивности гармонической помехи μ при когерентном приеме сигналов М-ФМ при использовании сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби. Сплошные линии соответствуют вероятности битовой ошибки без применения кодирования, пунктирные линии – вероятности битовой ошибки при применении сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5).

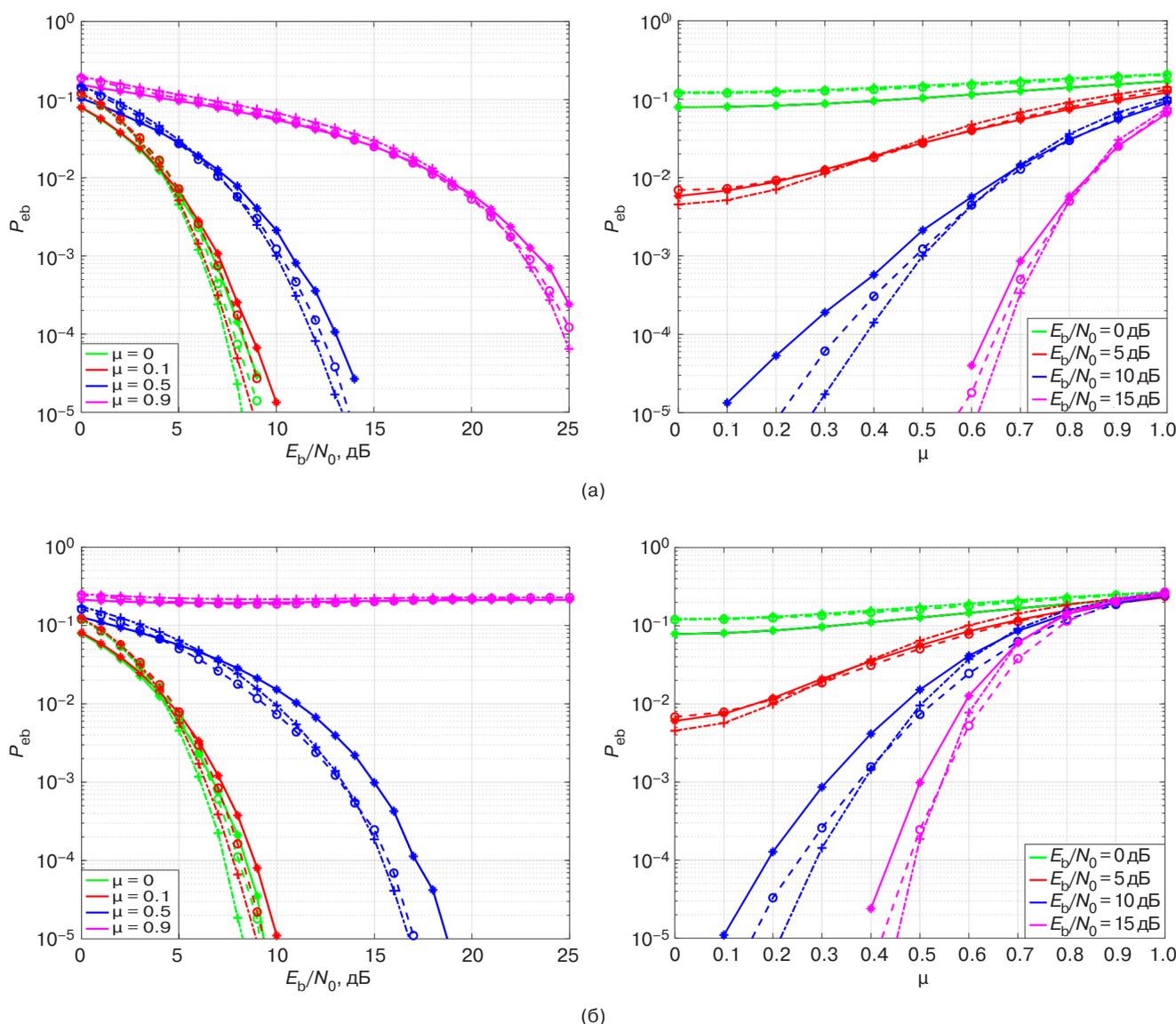


Рис. 9 (начало). Экспериментальные зависимости P_{eb} от E_b/N_0 (слева) и от μ (справа) при когерентном приеме сигналов М-ФМ с использованием кодов Хэмминга: (а) 2-ФМ; (б) 4-ФМ;

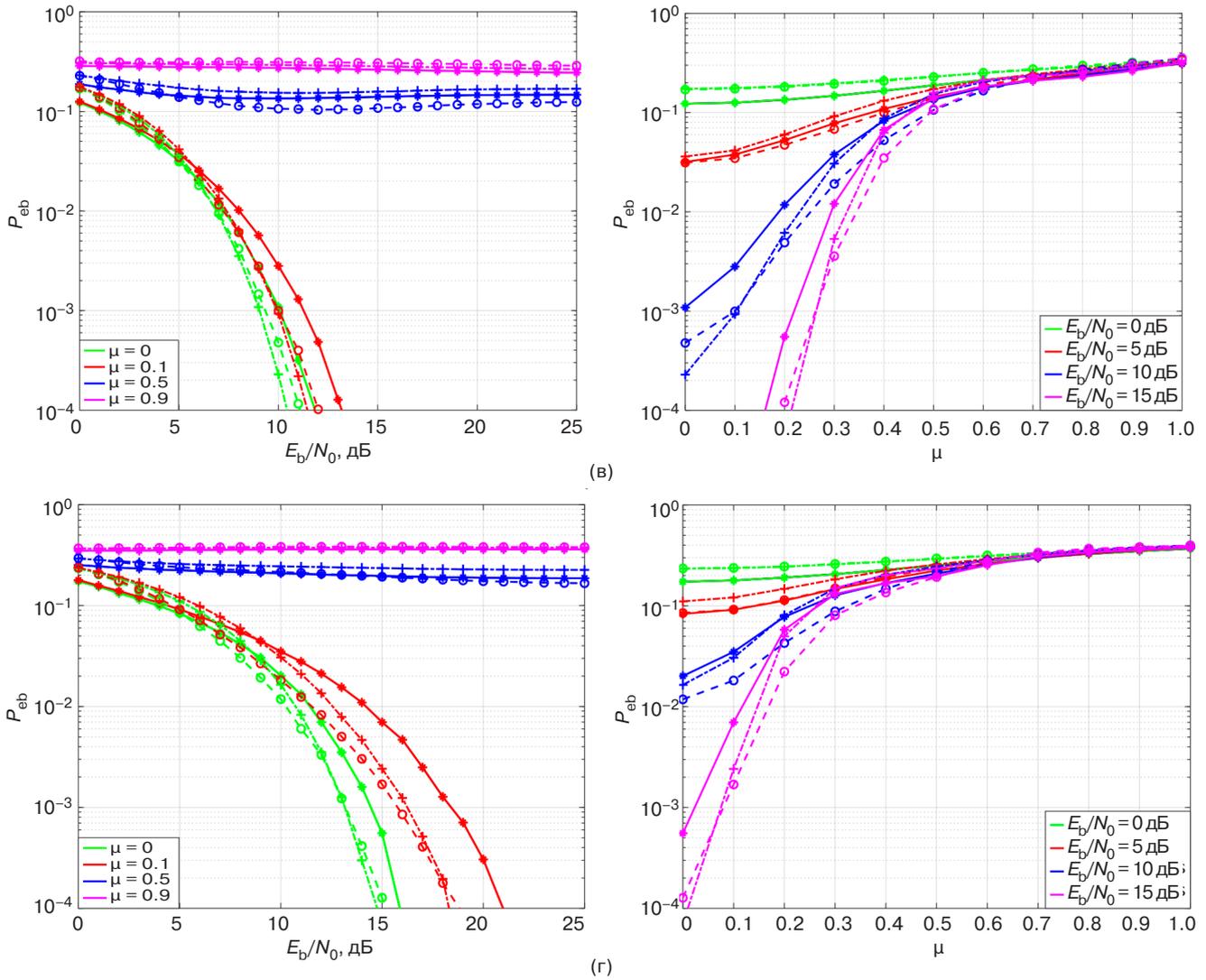


Рис. 9 (окончание). Экспериментальные зависимости P_{eb} от E_b/N_0 (слева) и от μ (справа) при когерентном приеме сигналов М-ФМ с использованием кодов Хэмминга: (в) 8-ФМ; (г) 16-ФМ

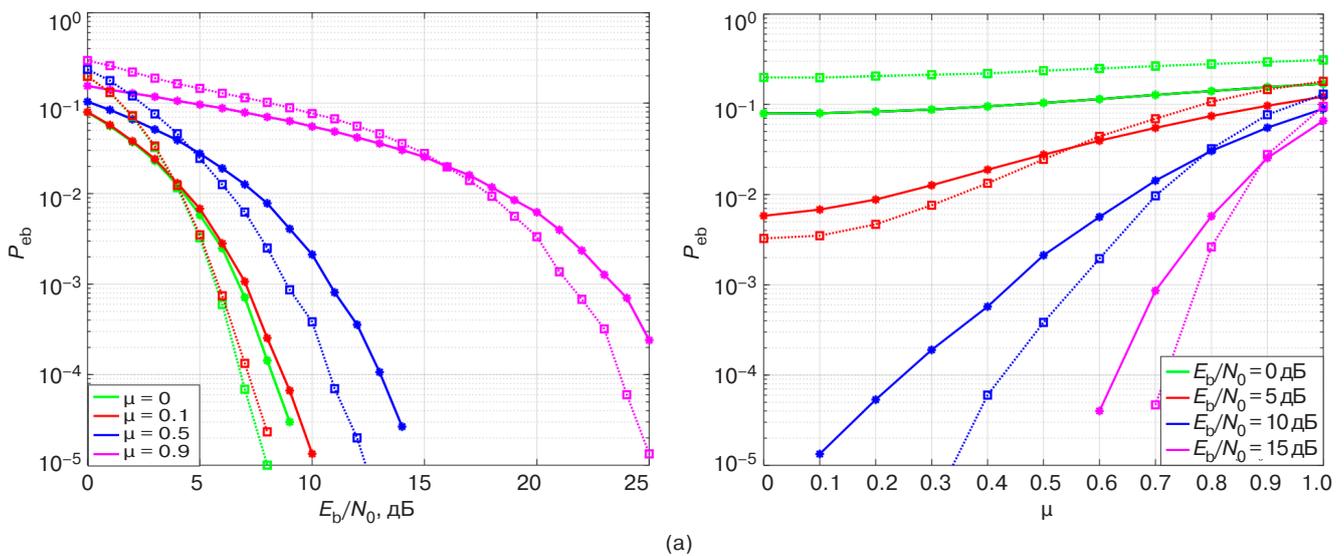


Рис. 10 (начало). Экспериментальные зависимости P_{eb} от E_b/N_0 (слева) и от μ (справа) при когерентном приеме сигналов М-ФМ при использовании сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби: (а) 2-ФМ;

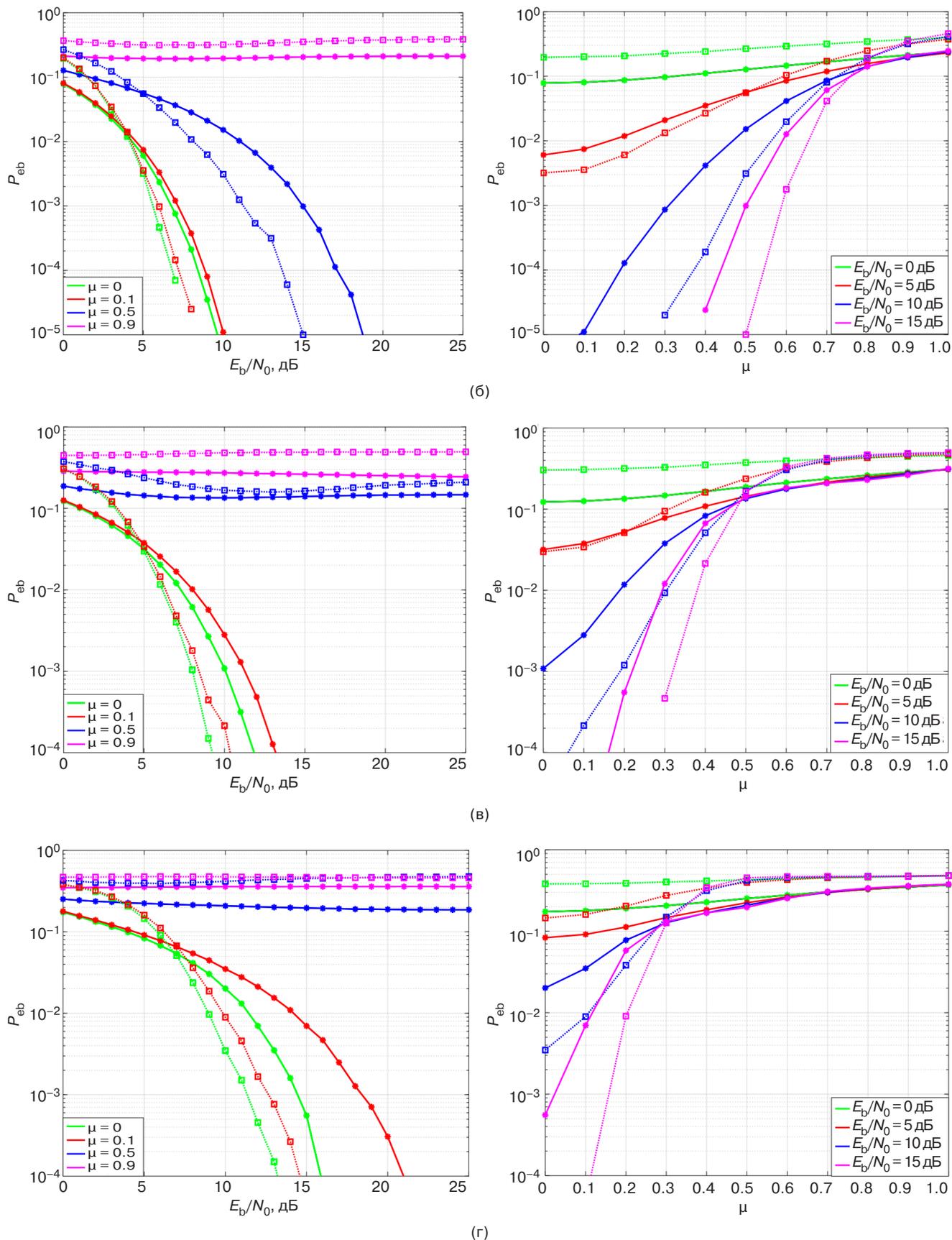


Рис. 10 (окончание). Экспериментальные зависимости P_{eb} от E_b/N_0 (слева) и от μ (справа) при когерентном приеме сигналов М-ФМ при использовании сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби: (б) 4-ФМ; (в) 8-ФМ; (г) 16-ФМ

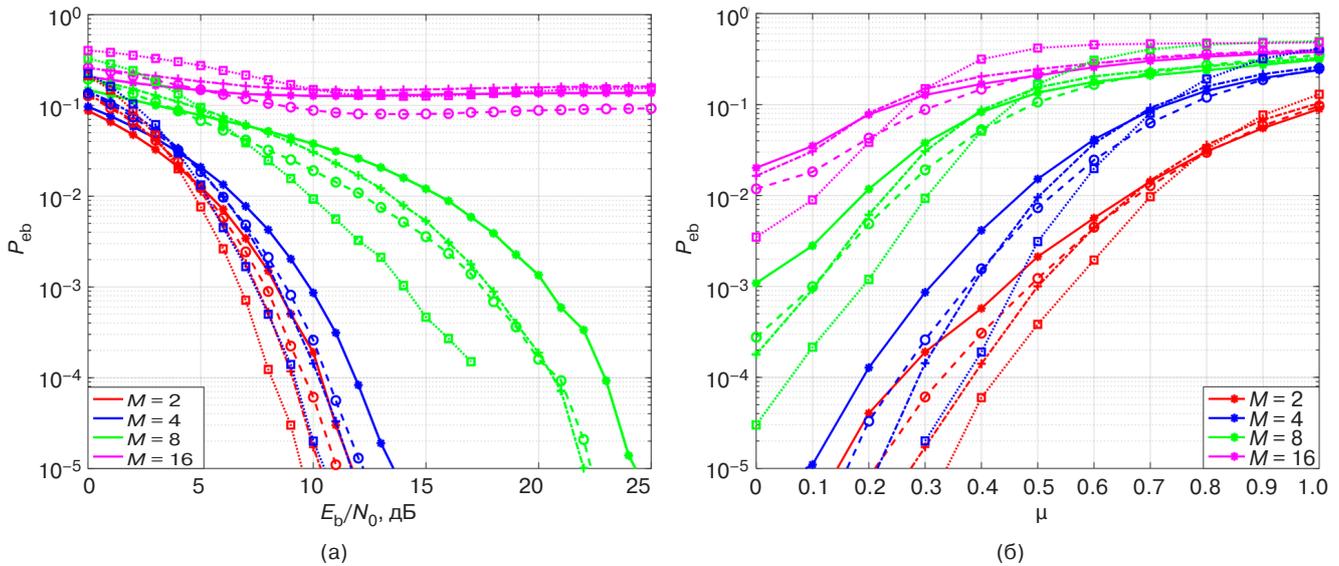


Рис. 11. Сравнительные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 (а) и от относительной интенсивности гармонической помехи μ (б) при когерентном приеме сигналов М-ФМ для разных способов кодирования

На рис. 11 представлены сравнительные экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 ($\mu = 0.3$) и от интенсивности гармонической помехи ($E_b/N_0 = 10$ дБ) при когерентном приеме сигналов М-ФМ с использованием кода Хэмминга и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби. Сплошные линии соответствуют вероятности битовой ошибки без применения кодов, штриховые линии – с применением кода Хэмминга (7,4), штрихпунктирные – с применением кода Хэмминга (15,11), а пунктирные линии – при применении сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено имитационное моделирование для оценки эффективности кодирования по коду Хэмминга и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби при когерентном приеме сигналов М-ФМ на фоне шумовой и гармонической помех. По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Имеется значительный выигрыш от применения корректирующих кодов в демодуляторах сигналов М-ФМ при наличии шумовой

и гармонической помех с малой интенсивностью. Например, при $\mu = 0.3$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ для 4-ФМ с кодом Хэмминга (7,4) энергетический выигрыш составляет 1.24 дБ, с кодом Хэмминга (15,11) – 1.6 дБ, со сверточным кодированием и алгоритмом декодирования Витерби (7,5) – 2.69 дБ; при $\mu = 0.3$ и $P_{eb} = 10^{-3}$ для 8-ФМ с кодом Хэмминга (7,4) энергетический выигрыш составляет 2.89 дБ, с кодом Хэмминга (15,11) – 2.54 дБ, со сверточным кодированием и алгоритмом декодирования Витерби (7,5) – 5.4 дБ.

2. При увеличении позиционности сигналов М-ФМ и высокой интенсивности гармонической помехи применение сверточного кодирования и алгоритма декодирования Витерби ухудшает вероятность ошибки приема сигналов М-ФМ сильнее, чем коды Хэмминга.

3. Коды Хэмминга с более высокими скоростями кодирования превосходят коды с меньшей кодовой скоростью при большом отношении сигнал/шум. Например, при $E_b/N_0 \geq 14$ дБ, $\mu = 0.5$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ для 4-ФМ с кодом Хэмминга (7,4) энергетический выигрыш составляет 1.4 дБ, с кодом Хэмминга (15,11) – 1.7 дБ; при $E_b/N_0 \geq 20.5$ дБ, $\mu = 0.3$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ для 4-ФМ с кодом Хэмминга (7,4) энергетический выигрыш составляет 2 дБ, с кодом Хэмминга (15,11) – 2.3 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abu-Baker A., Bani-Hani K., Khasawneh F., Jaradat A. The Impact of Hamming Code and Cyclic Code on MPSK and MQAM Systems over AWGN Channel: Performance Analysis. *Univers. J. Electr. Electron. Eng.* 2021;8(1):9–15. <http://doi.org/10.13189/ujeee.2021.080102>
2. Singh J., Bahel S. Comparative study of data transmission techniques of different block codes over AWGN channel using Simulink. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2014;9(12):609–615. <http://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V9P316>
3. Saraswat H., Sharma G., Mishra S.K. Performance evaluation and comparative analysis of various concatenated error correcting codes using BPSK modulation for AWGN channel. *International Journal of Electronics and Communication Engineering (IJECE)*. 2012;5(3):235–244. URL: https://www.ripublication.com/irph/ijece/ijecev5n3_01.pdf
4. Sarnin S.S., Kadri N., Mozi A.M., Ab Wahab N., Naim N.F. Performance analysis of BPSK and QPSK using errorcorrecting code through AWGN. In: *2010 International Conference on Networking and Information Technology*. IEEE; 2010. P. 178–182. <https://doi.org/10.1109/ICNIT.2010.5508536>
5. Pandey M., Pandey V.K. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes. *Int. J. Computer Appl.* 2015;119(24):43–47. <http://doi.org/10.5120/21388-4398>
6. Pushpa V., Ranganathan H., Palanivelan M. BER analysis of BPSK for block codes and convolution codes over AWGN channel. *Int. J. Pure Appl. Math.* 2017;114(11):221–230. URL: <https://acadpubl.eu/jsi/2017-114-7-ICPCIT-2017/articles/11/22.pdf>
7. Chopra S.R., Kaur J., Monga H. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes. *Indian J. Sci. Technol.* 2016;9(47):1–5. <http://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/106868>
8. El Maammar N., Bri S., Foshi J. Convolutional Codes BPSK Modulation with Viterbi Decoder. In: Noredidine G., Kacprzyk J. (Eds.). *International Conference on Information Technology and Communication System. ITCS 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer; 2018. V. 640. P. 267–278. http://doi.org/10.1007/978-3-319-64719-7_23
9. Wang J., Huang H., Liu J., Li J. Joint Demodulation and Error Correcting Codes Recognition Using Convolutional Neural Network. *IEEE Access*. 2022;10:104844–104851. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201354>
10. Ar-Reyouchi E.M., Rattal S., Ghoumid K. A Survey on Error-Correcting Codes for Digital Video Broadcasting. *SN Comput. Sci.* 2022;3(2):105. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00994-x>
11. Серченя А.А. Сравнительная оценка помехоустойчивого кодирования при использовании разных типов кодов. В сб.: *Инфокоммуникации: материалы 55-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов*. Минск; 2019. С. 49–50. URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/35911/1/Serchenya_Sravnitelnaya.pdf
12. Маглицкий Б.Н., Сергеева А.С. Оценка влияния искажений и помех на качественные показатели цифровых систем радиосвязи методом имитационного моделирования. Новосибирск: СибГУТИ; 2016. 129 с.
13. Елишев В.В., Тихонов Я.Е. Помехоустойчивость систем передачи информации с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и кодированием в условиях шумовых помех. *Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио*. 2021;1(76):163–166. URL: <https://conf-ntores.etu.ru/assets/files/2021/cp/papers/163-166.pdf?ysclid=lvxmjy9dr243257656>
14. Голиков А.М. *Кодирование в телекоммуникационных системах*. Томск: ТУСУР; 2018. 319 с.
15. Куликов Г.В., Нгуен В.З., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Научно-технические технологии*. 2018;19(11):32–38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vscalp&ysclid=lxidrb6ca649732959>
16. Куликов Г.В. Влияние гармонической помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов МЧМ. *Радиотехника*. 2002;7:42–44.
17. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;11:2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
18. Куликов Г.В., Усманов Р.Р., Трофимов Д.С. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной амплитудно-фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Научно-технические технологии*. 2020;21(1):22–29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fdxmsn&ysclid=lxireoosth700939360>
19. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
20. Sklar B. *Digital Communication: Fundamentals and Application*. 2nd ed. Prentice Hall; 2001. 1079 p.
21. Hillier C., Balyan V. Error Detection and Correction On-Board Nanosatellites Using Hamming Codes. *J. Electr. Comput. Eng.* 2019;6:1–15. <https://doi.org/10.1155/2019/3905094>

REFERENCES

1. Abu-Baker A., Bani-Hani K., Khasawneh F., Jaradat A. The Impact of Hamming Code and Cyclic Code on MPSK and MQAM Systems over AWGN Channel: Performance Analysis. *Univers. J. Electr. Electron. Eng.* 2021;8(1):9–15. <http://doi.org/10.13189/ujeee.2021.080102>
2. Singh J., Bahel S. Comparative study of data transmission techniques of different block codes over AWGN channel using Simulink. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2014;9(12):609–615. <http://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V9P316>

3. Saraswat H., Sharma G., Mishra S.K. Performance evaluation and comparative analysis of various concatenated error correcting codes using BPSK modulation for AWGN channel. *International Journal of Electronics and Communication Engineering (IJECE)*. 2012;5(3):235–244. Available from URL: https://www.ripublication.com/irph/ijece/ijecev5n3_01.pdf
4. Sarnin S.S., Kadri N., Mozi A.M., Ab Wahab N., Naim N.F. Performance analysis of BPSK and QPSK using errorcorrecting code through AWGN. In: *2010 International Conference on Networking and Information Technology*. IEEE; 2010. P. 178–182. <https://doi.org/10.1109/ICNIT.2010.5508536>
5. Pandey M., Pandey V.K. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes. *Int. J. Computer Appl.* 2015;119(24):43–47. <http://doi.org/10.5120/21388-4398>
6. Pushpa V., Ranganathan H., Palanivelan M. BER analysis of BPSK for block codes and convolution codes over AWGN channel. *Int. J. Pure Appl. Math.* 2017;114(11):221–230. Available from URL: <https://acadpubl.eu/jsi/2017-114-7-ICPCIT-2017/articles/11/22.pdf>
7. Chopra S.R., Kaur J., Monga H. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes. *Indian J. Sci. Technol.* 2016;9(47):1–5. <http://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/106868>
8. El Maammar N., Bri S., Foshi J. Convolutional Codes BPSK Modulation with Viterbi Decoder. In: Noreddine G., Kacprzyk J. (Eds.). *International Conference on Information Technology and Communication System. ITCS 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer; 2018. V. 640. P. 267–278. http://doi.org/10.1007/978-3-319-64719-7_23
9. Wang J., Huang H., Liu J., Li J. Joint Demodulation and Error Correcting Codes Recognition Using Convolutional Neural Network. *IEEE Access*. 2022;10:104844–104851. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201354>
10. Ar-Reyouchi E.M., Rattal S., Ghomid K. A Survey on Error-Correcting Codes for Digital Video Broadcasting. *SN Comput. Sci.* 2022;3(2):105. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00994-x>
11. Serchenya A.A. Comparative assessment of noise-resistant coding using different types of codes. In: *Infocommunications: Materials of the 55th Anniversary Scientific Conference of Graduate Students, Undergraduates and Students*. Minsk; 2019. P. 49–50 (in Russ.). Available from URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/359111/Serchenya_Sravnitelnaya.pdf
12. Maglitskii B.N., Sergeeva A.S. *Otsenka vliyaniya iskazhenii i pomekh na kachestvennye pokazateli tsifrovyykh sistem radiosvyazi metodom imitatsionnogo modelirovaniya (Assessment of the Influence of Distortions and Interference on the Quality Indicators of Digital Radio Communication Systems using Simulation Modeling)*. Novosibirsk: SibGUTI; 2016. 129 p. (in Russ.).
13. Elishev V.V., Tikhonov Ya.E. Noise immunity of information transmission systems with fast pseudo-random tuning of the operating frequency and coding in noise interference conditions. *Scientific and Technical Conference of the A.S. Popov St. Petersburg NTO RES devoted to Radio Day*. 2021;1(76):163–166 (in Russ.). Available from URL: <https://conf-ntores.etu.ru/assets/files/2021/cp/papers/163-166.pdf?ysclid=lvxmjy9dr243257656>
14. Golikov A.M. *Kodirovanie v telekommunikatsionnykh sistemakh (Coding in Telecommunication Systems)*. Tomsk: TUSUR; 2018. 319 p. (in Russ.).
15. Kulikov G.V., Nguyen V.D., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2018;19(11): 32–38 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vscalp&ysclid=lxidr6ica649732959>
16. Kulikov G.V. The effect of harmonic interference on the noise immunity of the correlating demodulator of the MSK signals. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2002;7:42–44 (in Russ.).
17. Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Interference immunity of reception of signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of harmonic interference. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2018;11:2 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
18. Kulikov G.V., Usmanov R.R., Trofimov D.S. Noise immunity analysis of amplitude and phase-shift keying signals reception in presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(1):22–29 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fdxmsn&ysclid=lxireoosth700939360>
19. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
20. Sklar B. *Digital Communication: Fundamentals and Application*. 2nd ed. Prentice Hall; 2001. 1079 p.
21. Hillier C., Balyan V. Error Detection and Correction On-Board Nanosatellites Using Hamming Codes. *J. Electr. Comput. Eng.* 2019;6:1–15. <https://doi.org/10.1155/2019/3905094>

Об авторе

Нгуен Ван Зунг, к.т.н., преподаватель, кафедра теории цепей – измерения, Факультет радиотехники и электроники, Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона (Вьетнам, Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236). E-mail: nguyenvandungvtdt@lqdtu.edu.vn. <https://orcid.org/0000-0002-2810-1204>

About the author

Van D. Nguyen, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer, Department of Circuit Theory – Measurement, Faculty of Radio-Electronic Engineering, Le Quy Don Technical University (236, Hoang Quoc Viet, Ha Noi, Vietnam). E-mail: nguyenvandungvtdt@lqdtu.edu.vn. <https://orcid.org/0000-0002-2810-1204>