

УДК 621.394.147

# Анализ эффективности помехоустойчивого кодирования в современных военных цифровых системах радиосвязи

В статье приведены расчеты вероятности битовой ошибки для различных видов помехоустойчивого кодирования. Согласно расчетам сделаны выводы об эффективности и целесообразности применения данных видов помехоустойчивого кодирования в современных военных цифровых системах радиосвязи.

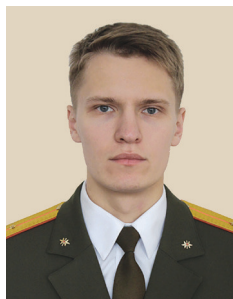
**Введение.** На современном этапе развития подсистема радиосвязи Вооруженных сил Республики Беларусь (ВС РБ) является гибридной и включает в себя системы аналоговой и цифровой радиосвязи. Цифровая система радиосвязи (ЦСРС) обладает рядом преимуществ перед аналоговой системой радиосвязи.

Основной отличительной особенностью ЦСРС является цифровая обработка сигнала, которая позволяет повысить помехоустойчивость ЦСРС с сохранением требуемой скорости передачи информации, что обеспечивается различными методами, такими как [1, 2]:

оптимальный выбор способов цифровой обработки сигналов в приемниках и параметров реализующих их устройств;

увеличение отношения сигнал/помеха за счет увеличения мощности передатчика. Этот метод может оказаться экономически невыгодным, т. к. связан с существенным ростом сложности и стоимости оборудования. Кроме этого, увеличение мощности передачи сопровождается усилением мешающего воздействия на другие системы передачи;

метод пространственной фильтрации сигналов;



**О.В. ШИДО,**  
слушатель адъюнктуры,  
старший лейтенант



**В.В. ПИСКУН,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры связи

Учреждение образования «Военная академия РБ»

метод пространственно-временной фильтрации сигналов;

применение трансверсального фильтра для борьбы с межсимвольными помехами;

рациональный выбор вида модуляции сигнала. Применяя виды модуляции, обеспечивающие значительное расширение полосы частот, можно добиться существенного повышения помехоустойчивости передачи;

использование специальных помехоустойчивых кодов;

использование механизма автоматического запроса повторной передачи (ARQ);

применение систем с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) и частотно-временных матриц (ЧВМ), методов непосредственной

модуляції несущей псевдослучайной последовательностью (ФМ ШПС) и псевдовременной импульсной модуляции (ПВИМ);

использование пространственно-временного кодирования, т. е. пространственно-временного разнесения передающих и приемных антенн (ММО, разнесенный прием) и др.

Применение данных методов особенно актуально в ЦСРС военного назначения, т. к. она функционирует в условиях непосредственного воздействия системы радиоэлектронного подавления противника. В статье приводятся результаты расчетов и сравнительного анализа эффективности помехоустойчивого кодирования в современных военных ЦСРС.

**Основная часть.** Современная классификация помехоустойчивых кодов приведена на рис. 1 [1–6].

На данный момент в ЦСРС ВС РФ применяются следующие виды помехоустойчивого кодирования:

сверточное кодирование;  
каскадное кодирование на основе кода Рида – Соломона и сверточного кода;  
код с малой плотностью проверок на четность (LDPC).

Для анализа эффективности сверточного кодирования использовалось аналитическое выражение, связывающее вероятность ошибки на бит с отношением сигнал/шум и включающее в себя параметры кода [1, 4, 5]:

$$P_{\text{СК}}(h_b^2) = \sum_{i=l_n+1}^{n_0} C_{n_0}^i P_0^i(h_b^2) [1 - P_0(h_b^2)]^{n_0-i}, \quad (1)$$

где  $n_0$  – «окно» сверточного декодирования, равное (2...5)  $K$  и зависящее от «просвета» кода (свободного кодового расстояния  $d_{\text{св}}$ );

$K$  – длина кодового ограничения, равная числу разрядов регистра сдвига сверточного кодера;

$$t_{\text{и}} = \left\lceil \frac{d_{\text{св}} - 1}{2} \right\rceil \quad \text{– число ошибок, гарантированно исправляемых кодом;}$$

$h_b^2$  – отношение сигнал/шум;

$P_0(h_b^2)$  – вероятность битовой ошибки на входе декодера.

Вероятность ( $P_{\text{СК}}$ ) зависит от вида модуляции сигнала. Для QAM-M согласно [1, 4, 5]:

$$P_0(h_b^2) = P_{\text{QAM}}(h_b^2) = \frac{2(1 - M^{-\frac{1}{2}})}{\log_2 \sqrt{M}} Q \left[ \sqrt{\left( \frac{3 \log_2 M}{M - 1} \right) 2h_b^2} \right], \quad (2)$$

где  $M$  – основание модуляции сигнала;

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad \text{– гауссовый интеграл ошибок.}$$

В соответствии с формулами (1) и (2) были выполнены расчеты вероятности битовой ошибки при QAM-16 без кодирования и с использованием сверточного кода с различными параметрами. Результаты представлены на рис. 2.

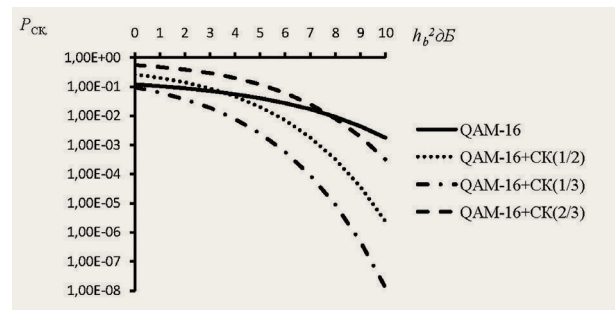


Рисунок 2 – Зависимость вероятности битовой ошибки от среднего значения отношения сигнал/шум при QAM-16 с использованием сверточного кодирования со скоростью 1/2, 1/3 и 2/3 и без него

Как видно из графиков, жесткое декодирование при  $P_{\text{СК}} = 10^{-3}$  обеспечивает энергетический выигрыш порядка 2...5 дБ практически без расширения занимаемой полосы частот. При увеличении скорости кодирования энергетическая эффективность возрастает. Из результатов расчетов следует, что сверточный код со скоростями 2/3 и 1/2 при отношении сигнал/шум менее 4...8 дБ практически неэффективен.

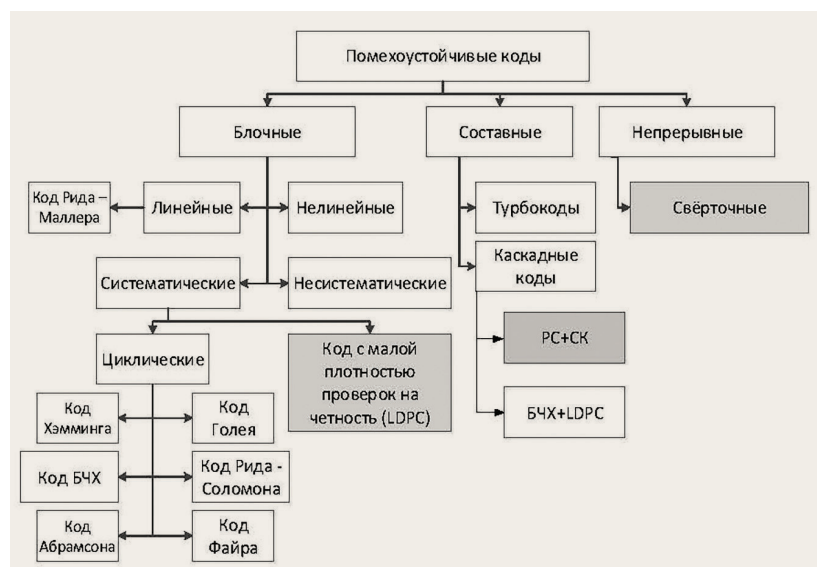


Рисунок 1 – Классификация помехоустойчивых кодов

Основные показатели эффективности для различных параметров сверточного кодирования приведены в табл. 1 [1, 2, 5, 7].

Таблица 1 – Зависимость показателей эффективности от параметров сверточного кодирования

| СКК            | Требуемое $E_b/N_0$ при $P_{\text{СК}}=10^{-6}$ , дБ | Частотная эффективность, бит/(с×Гц) |
|----------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| QAM-4+СК(1/2)  | 5,5                                                  | 1                                   |
| QAM-4+СК(3/4)  | 7,6                                                  | 1,5                                 |
| QAM-4+СК(7/8)  | 8,7                                                  | 1,75                                |
| QAM-16+СК(3/4) | 10,8                                                 | 3                                   |
| QAM-16+СК(7/8) | 12                                                   | 3,5                                 |

Для анализа эффективности каскадного кодирования на основе кодов Рида – Соломона и сверточного был взят стандарт IEEE 802.16. Структура декодера каскадного кода представлена на рис. 3 [6].

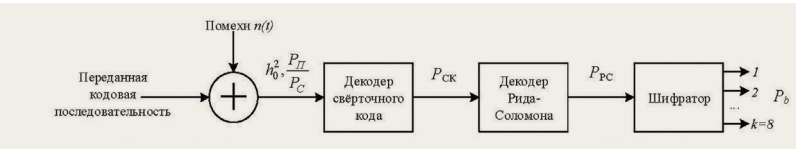


Рисунок 3 – Структура декодера каскадного кода стандарта IEEE 802.16

На рисунке обозначены:  
 $P_{\text{СК}}$  – вероятность ошибочного приема недвоичного символа с выхода сверточного декодера;  
 $P_{\text{РС}}$  – вероятность ошибочного декодирования недвоичного символа декодером Рида – Соломона;  
 $P_b$  – вероятность ошибочного приема бита сообщения.

Под помехоустойчивостью кода Рида – Соломона понимается значение вероятности

$$P_{\text{СК}} = f(h_0^2, \frac{P_{\text{П}}}{P_{\text{С}}})$$
, при которой обеспечивается заданное значение вероятности

$$P_{\text{РС}} = f(P_{\text{СК}}, N_q, T_{\text{и}}) = \text{const}$$
 [5, 6].

Вероятность  $P_{\text{РС}}$  связана с вероятностью  $P_{\text{СК}}$  выражением

$$P_{\text{РС}} = \frac{1}{N_q} \sum_{i=T_{\text{и}}+1}^{N_q} i C_{N_q}^i P_{\text{СК}}^i (1 - P_{\text{СК}})^{N_q-i}, \tag{3}$$

где  $N_q$  – длина кода;

$T_{\text{и}}$  – число исправляемых байтов;

вероятность ошибочного приема 
$$P_b = \frac{1}{2} P_{\text{РС}}.$$

Зная параметры кодов Рида – Соломона  $N_q, T_{\text{и}}$ , можно определить зависимость  $P_{\text{РС}} = f(P_{\text{СК}}, N_q, T_{\text{и}})$  для любого кода.

Для расчета вероятности битовой ошибки с выхода шифратора ( $P_b$ ) был выполнен расчет вероятности битовой ошибки с выхода декодера сверточного кода  $P_{\text{СК}}$

( $h_b^2$ ) согласно выражению (1) и вероятности битовой ошибки с выхода демодулятора  $P_{\text{QAM}}(h_b^2)$  согласно выражению (2). После подстановки данных зависимостей в выражение (3) были построены кривые (рис. 4 и 5) для различных параметров кода Рида – Соломона и сверточного кода в каскадной схеме кодирования.

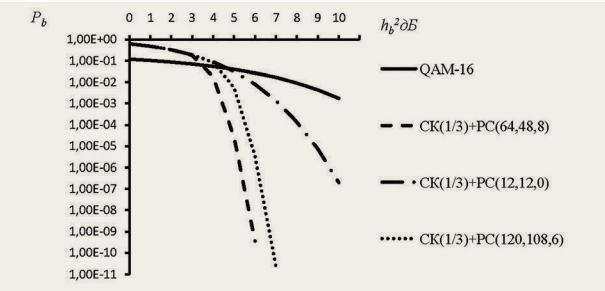


Рисунок 4 – Зависимость вероятности битовой ошибки от среднего значения отношения сигнал/шум при QAM-16 с использованием каскадного кодирования с различными параметрами кода Рида – Соломона

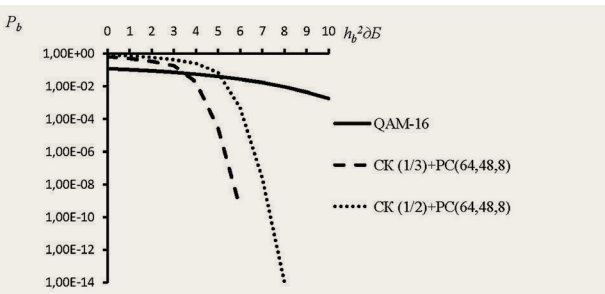


Рисунок 5 – Зависимость вероятности битовой ошибки от среднего значения отношения сигнал/шум при QAM-16 с использованием каскадного кодирования с различными параметрами сверточного кода

Анализ графиков показывает, что наибольшей помехоустойчивостью из приведенных обладает код Рида – Соломона с параметрами (64, 48, 8) в сочетании со сверточным кодированием со скоростью 1/3. Однако, несмотря на преимущество каскадной схемы кодирования перед сверточным кодом, каскадный код имеет низкую эффективность при отношении сигнал/шум ниже 4–5 дБ.

После анализа различных источников [1, 2, 5, 7] была построена табл. 2, в которой представлены основные показатели эффективности для различных скоростей каскадного кодирования на основе внешнего кода Рида – Соломона и внутреннего сверточного кода.

Таблица 2 – Зависимость показателей эффективности от скорости каскадного кодирования на основе внешнего кода РС и внутреннего сверточного кода

| СКК                | Требуемое $E_b/N_0$ при $P_{\text{СК}}=10^{-6}$ , дБ | Частотная эффективность, бит/(с×Гц) |
|--------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| QAM-4+PC+СК (1/2)  | 4,1                                                  | 0,92                                |
| QAM-16+PC+СК (3/4) | 8,4                                                  | 2,75                                |
| QAM-16+PC+СК (7/8) | 9,8                                                  | 3,21                                |

Расчет эффективности LDPC-кода выполнен с использованием программы LDPCSim16e в среде

MATLAB. Расчеты выполнены для двоичной фазовой модуляции (BPSK). На рис. 6 приведены графики зависимости битовой ошибки от отношения сигнал/шум для кода LDPC при различной скорости и без него.

Из графиков видно, что LDPC-код значительно повышает энергетическую эффективность ЦСРС с BPSK в области малого отношения сигнал/шум.

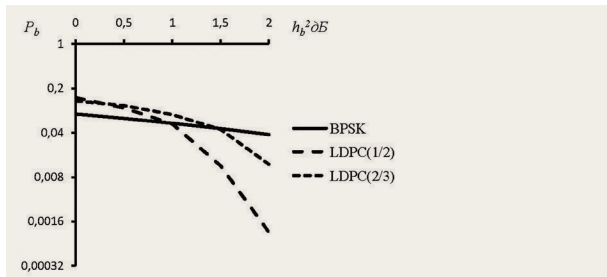


Рисунок 6 – Зависимость вероятности битовой ошибки от среднего значения отношения сигнал/шум при BPSK с использованием LDPC с различной скоростью и без него

На основе анализа источников [1, 2, 5, 7] была построена табл. 3, в которой представлены основные показатели эффективности для различных скоростей кода LDPC.

Таблица 3 – Зависимость показателей эффективности от скорости кодирования LDPC

| СКК               | Требуемое $E_b/N_0$ при $P_b=10^{-6}$ , дБ | Частотная эффективность, бит/(с·Гц) |
|-------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|
| QAM-4+LDPC (1/2)  | 1,7                                        | 1                                   |
| QAM-4+LDPC (2/3)  | 2,1                                        | 1,33                                |
| QAM-4+LDPC (3/4)  | 2,7                                        | 1,5                                 |
| QAM-16+LDPC (3/4) | 6,7                                        | 3                                   |

**Заключение.** Таким образом, анализ результатов расчетов эффективности помехоустойчивого кодирования современных военных ЦСРС показал:

низкую эффективность сверточного кодирования при значении  $E_b/N_0 \leq 4 \dots 8$  дБ;

увеличение длины внутреннего двоичного кода с целью увеличения его корректирующих свойств приводит к противоречивым результатам:

а) с одной стороны, растет помехоустойчивость передачи, т. к. увеличивается число исправляемых ошибок, вызванных преднамеренными помехами;

б) с другой стороны, уменьшается энергия одного символа двоичного кода на передачу и увеличивается вероятность ошибочного приема двоичного символа на выходе демодулятора;

в) значительно расширяется требуемая полоса рабочих частот;

увеличение скорости внутреннего сверточного кодирования приводит к росту помехоустойчивости ЦСРС, однако имеет низкую энергетическую эффективность в области малых отношений сигнал/шум;

применение кода с малой плотностью проверок на четность позволяет увеличить помехоустойчивость

ЦСРС в области малых отношений сигнал/шум, что позволит использовать их в составе каскадной конструкции в роли внутреннего кода;

повышение помехоустойчивости и частотной эффективности современных военных ЦСРС может быть обеспечено за счет применения современных видов цифровой модуляции (OFDM) и помехоустойчивого кодирования (каскадное кодирование на основе кода Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ) и кода LDPC, турбокодирование и полярные коды), а также других эффективных методов повышения помехозащищенности (системы с ППРЧ и пространственно-временного кодирования).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Варгаузин, В.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи: учеб. пособие / В.А. Варгаузин, И.А. Цикин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 352 с.
2. Волков, Л.Н., Немировский, М.С., Шинаков, Ю.С. Система цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учеб. пособие. – М.: Эко – Трендз, 2005. – 392 с.
3. Банкет, В.Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. – Одесса: Феникс, 2009. – 180 с.
4. Банкет, В.Л. Помехоустойчивое кодирование в телекоммуникационных системах: учеб. пособ. по изучению модуля 4 дисциплины ТЭС / В.Л. Банкет, П.В. Иващенко, Н.А. Ищенко. – Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2011. – 104 с.
5. Варгаузин, В.А., Цикин, И.А. Сравнительная эффективность современных сигнально-кодовых конструкций в системах радиосвязи. Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – № 1. – с. 33–41.
6. Зеленовский, Ю.В. Методы информационно-статистического анализа и алгебраического синтеза в конечном поле корректирующих кодов систем телекоммуникаций повышенной помехозащищенности с широкополосным доступом: дис. ... д-ра тех. наук: 05.12.13/ Ю.В. Зеленовский – Серпухов, 2014. – 300 с.
7. Руководство по установке и эксплуатации спутникового модема с расширенными возможностями CDM -625 производства компании Comtech EF Data, 2009. – 528 с.

*The article presents the calculations of the probability of bit error for various types of error-correcting coding. According to these calculations, conclusions were drawn about the efficiency and feasibility of using these types of noise-resistant coding in modern military digital radio communications systems.*

Получено 04.12.2018.