

Использование кодов Рида-Соломона для безопасной передачи данных по радиочастотам с использованием широкополосной связи

Н. А. Галкин ¹, А. Б. Левина ¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Россия, 197022, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Целью научно-исследовательской работы является анализ энергетического выигрыша и повышения надёжности при передаче данных с использованием кодов Рида-Соломона в зашумлённом канале широкополосной связи. В работе проведён анализ применимости кодов Рида-Соломона для обеспечения безопасной передачи информации. Сформулированы техническое и экономическое обоснование кодирования и декодирования данных, передаваемых по радиосвязи, в условиях внешних воздействий. Разработана модель оценивания целостности передаваемых данных на основе методов помехозащищённого кодирования с помощью циклических блочных кодов Рида-Соломона. По результатам исследования модели проанализированы энергетический выигрыш и повышение надёжности при передаче данных с использованием кодов Рида-Соломона в зашумлённом канале широкополосной связи.

Ключевые слова: кодирование, коды Рида-Соломона, радиочастоты, широкополосная связь, внешние воздействия.

Abstract. The purpose of the research work is to analyze the energy gain and reliability improvement in data transmission using Reed-Solomon codes in a noisy channel of broadband communication. The paper analyzes the applicability of Reed-Solomon codes for secure information transmission. A technical and economic justification for encoding and decoding radio-transmitted data under external interference is formulated. The model of integrity assessment of transmitted data on the basis of methods of noise-proof coding with the help of cyclic block Reed-Solomon codes is developed. According to the results of the model study the energy gain and reliability improvement in data transmission using Reed-Solomon codes in the noisy channel of broadband communication are analyzed.

Keywords: coding, Reed-Solomon codes, radio frequencies, broadband communication, external influences.

Введение

В свете стремительного роста беспроводных технологий и повсеместного внедрения широкополосной связи обеспечение безопасной передачи данных по радиоканалам приобретает первостепенное значение. В этом контексте использование кодов Рида-Соломона [1, 2] открывает перспективные исследовательские возможности. Данные коды обладают способностью к исправлению ошибок, что делает их особенно подходящими для передачи данных в неблагоприятных условиях с высоким уровнем помех и искажений сигнала и идеальными для широкого круга применений в беспроводных сетях, включая датчики, системы мониторинга и подобное.

В работе был проведён анализ применения кодов Рида-Соломона для обеспечения надёжной передачи данных по радиочастотам с использованием широкополосной связи, а также разработаны имитационная модель и методы оценки энергетического выигрыша и повышения надёжности при передаче данных с использованием кодов Рида-Соломона в зашумлённом широкополосном канале.

Исследование организовано следующим образом: в II разделе даётся обзор литературы, во II разделе излагаются теоретические основы, а в III разделе приводятся результаты экспериментов. Заключение представлено в IV разделе.

1. Обзор литературы

Рассмотрим несколько статей, охватывающих различные аспекты внедрения кодов Рида-Соломона, производительности и интеграции с новыми технологиями.

В основополагающей работе Блейхенбахер Д., Киайас А., Юнг М. (2003) исследуется декодирование перемежающихся кодов Рида-Соломона по зашумлённым каналам. Работа подчёркивает решающую роль кодов Рида-Соломона в предотвращении распространения ошибок и улучшении целостности данных в сложных коммуникационных средах. Данное исследование послужило краеугольным камнем для последующих работ [3].

Феррара Р., Торрес-Фигероа Л., Боше Х. и др. (2022) исследуют применение кодов Рида-Соломона в новой системе идентификации. Работа авторов демонстрирует эффективность кодов Рида-Соломона для различения легитимных и вредоносных объектов в коммуникационной сети – данный подход подчёркивает универсальность кодов Рида-Соломона за пределами традиционной коррекции ошибок, расширяя их применимость к сценариям, ориентированным на безопасность [4].

Аналогично, в исследовании Шривастава П., Сингх У. П. (2013) представлен полный обзор применения кодов Рида-Соломона для обнаружения и исправления ошибок. В работе описаны теоретические основы кодов Рида-Соломона и их способность достигать как обнаружения, так и исправления ошибок, что имеет решающее значение для надёжной передачи данных [5].

Ма Р., Син Л., Ван Ю. (2020) углубляются в анализ производительности кодов Рида-Соломона в контексте устойчивых беспроводных сенсорных сетей. Исследование демонстрирует преимущества кодов Рида-Соломона в повышении устойчивости сети и целостности данных в условиях ограниченных ресурсов – это подчёркивает практическую применимость кодов Рида-Соломона в различных сценариях беспроводной связи [6].

Акинчи Т. С., Эрдемир Г., Зенгин А. Т., и др. (2023) исследуют интеграцию методов машинного обучения с кодами Рида-Соломона для исправления ошибок в линиях электропередачи. Данное исследование показывает, что использование алгоритмов машинного обучения может дополнительно повысить эффективность и результативность кодов Рида-Соломона в сложных коммуникационных средах [7].

В работе Хамада Л., Лоренц П., Гильг М. (2021) анализируются вопросы безопасности, характерные для систем связи на основе светоизлучающих диодов (LED), и подчёркивается необходимость использования надёжных механизмов коррекции ошибок в новых коммуникационных технологиях для обеспечения безопасной и надёжной передачи данных [8].

Обзор литературы предлагает перспективные направления для будущих исследований.

- Интеграция кодов Рида-Соломона с передовыми схемами коррекции ошибок: изучение того, как сочетание кодов Рида-Соломона с другими методами исправления ошибок, такими как турбокоды или LDPC-коды, может привести к улучшению производительности в сложных коммуникационных средах.

- Изучение использования кодов Рида-Соломона в развивающихся технологиях: использование кодов Рида-Соломона в новых парадигмах связи, таких как 5G и другие, требует дальнейших исследований для оптимизации производительности и решения уникальных проблем безопасности.

- Разработка надёжных и эффективных алгоритмов декодирования: эффективные алгоритмы декодирования имеют решающее значение для практической реализации кодов Рида-Соломона в реальных системах. Дальнейшие исследования в данной области могут существенно повлиять на производительность и применимость кодов Рида-Соломона.

- Рассмотрение последствий использования кодов Рида-Соломона для безопасности в различных сценариях: анализ уязвимостей безопасности при использовании кодов Рида-Соломона в различных системах связи необходим для предотвращения потенциальных атак и обеспечения целостности данных.

Таким образом, обзор литературы показывает широкий спектр применений кодов Рида-Соломона и их актуальность для задач безопасной передачи данных в широкополосных радиоканалах.

2. Теоретический раздел

Коды Рида-Соломона [1] – не двоичные, линейные [9], циклические, блочные коды. Код Рида-Соломона представляет собой закодированные данные из конечного набора символов алфавита. Конечный алфавит – элементы поля Галуа [10].

В общем случае код Рида-Соломона задаётся следующими параметрами: n – общее количество символов, k – информационные символы (передаваемые блоки данных), символы $r = n - k$ – избыточные (проверочные) символы, которые позволяют исправлять ошибки (обнаруживать стирания) [1].

Для кода Рида-Соломона определено расстояние Хэмминга $d = n - k + 1$, являющееся максимальным. Из этого следует, что код Рида-Соломона оптимален в смысле границы Синглтона [9].

В теории помехозащищённого кодирования если код обладает расстоянием Хэмминга $d = 2t + 1$, то он позволяет восстановить до t ошибок. Следовательно, если в передаваемый блок данных внести $t = \frac{(n-k)}{2}$ ошибок, они могут быть исправлены.

Блоки передаваемых данных представляются как коэффициенты полинома $m(x)$ степени $k - 1$ (всего коэффициентов – k , столько же сколько информационных символов).

Для кодирования необходимо определить порождающий полином $g(x)$:

$$g(x) = (x + \alpha^i) \cdot (x + \alpha^{i+1}) \dots (x + \alpha^{i+d-2}), \quad (1)$$

где $i \in Z$ (выбирают равным 1 для упрощения кодирования), α – примитивный элемент поля $GF(q)$.

Кодирование Рида-Соломона бывает несистематическим и систематическим. В первом случае закодированная последовательность получается следующим образом: $c(x) = m(x) \cdot g(x)$.

В систематическом коде информационные символы передаются в изначальном виде, а в конец дописываются проверочные. Для этого необходимо сначала сдвинуть полином $m(x)$ влево: $m'(x) = m(x) \cdot x^{n-k}$ (приписать справа $n - k$ нулей). После чего закодированное сообщение получается как: $c(x) = m'(x) + m'(x) \bmod g(x)$, где $m'(x) \bmod g(x)$ – остаток от деления полинома $m'(x)$ на порождающий полином $g(x)$ [1].

Пусть на приёмной стороне была получена последовательность $r(x)$, которая была отправлена по зашумлённому каналу связи и в ней могут содержаться ошибки. Пусть максимальное количество ошибок, которые может исправить код Рида-Соломона – t , а реальное число ошибок – m , такое, что $m \leq t$. Зададим неизвестные локаторы ошибок как $X_1 = \alpha^{i_1}, \dots, X_m = \alpha^{i_m}$, а значения ошибок в полученной последовательности $r(x)$ – $Y_1 = e^{1i}, \dots, Y_m = e^{im}$. Тогда компоненты синдромного вектора находятся как

$$S_j = r(\alpha^{j+1}) = Y_1 X_1^{j+1} + \dots + Y_m X_m^{j+1}, \quad (2)$$

где $j = 0, 1, \dots, 2t - 1$.

Многочлен локаторов ошибок имеет следующий вид:

$$\sigma(x) = (1 + X_1 x) \dots (1 + X_m x) = 1 + \sigma_1 x + \dots + \sigma_m x^m. \quad (3)$$

Если подставить значение X_i^{-1} вместо x , то получится 0:

$$\sigma(X_i^{-1}) = 1 + \sigma_1 X_i^{-1} + \sigma_2 X_i^{-2} + \dots + \sigma_m X_i^{-m} = 0. \quad (4)$$

Правую и левую части умножим на $Y_i X_i^{j+m}$:

$$Y_i (X_i^{j+m} + \sigma_1 X_i^{j+m-1} + \dots + \sigma_m X_i^j) = 0. \quad (5)$$

$\forall j$ просуммируем по $i = 1, 2, \dots, m$:

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_{j=1}^m Y_i (X_i^{j+m} + \sigma_1 X_i^{j+m-1} + \dots + \sigma_m X_i^j) = \\ &= \sum_{i=1}^m Y_i X_i^{j+m} + \sigma_1 \sum_{i=1}^m Y_i X_i^{j+m-1} + \dots + \sigma_m \sum_{i=1}^m Y_i X_i^j. \end{aligned} \quad (6)$$

В итоге получаем

$$S_{j+m} + \sigma_1 S_{j+m-1} + \dots + \sigma_m S_j = 0, \quad j = 0, 1, \dots, 2t - m - 1. \quad (7)$$

Представим полученную систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} S_{m-1} & \dots & S_1 & S_0 \\ S_m & \dots & S_2 & S_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{2t-2} & \dots & S_{2t-m} & S_{2t-m-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \dots \\ \sigma_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S_m \\ -S_{m+1} \\ \dots \\ -S_{2t-1} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Алгоритм декодирования кода Рида-Соломона строится на основе алгоритма Берлекемпа-Масси [11].

На входе – полученная последовательность $r(x)$.

На выходе – исходное сообщение $m(x)$, если количество ошибок $\frac{n-k}{2}$.

Шаг 1. Определение $t = \frac{n-k}{2}$. Вычисляется синдромный вектор $S_0, S_1, \dots, S_{2t-1}$: $S_i = r(\alpha^{i+1})$, $i = 0, 1, \dots, 2t - 1$. Если все компоненты вектора равны нулю, то принятое закодированное сообщение не содержит ошибок, тогда из $r(x)$ выделяется $m(x)$ и алгоритм завершается.

Шаг 2. Для найденного синдромного вектора $S_0, S_1, \dots, S_{2t-1}$, с помощью алгоритма Берлекемпа-Мессии определяется многочлен локаторов ошибок $\sigma(x)$ степени $L = \deg \sigma(x)$.

Шаг 3. Поиск L корней найденного многочлена $\sigma(x)$.

Шаг 4. Поиск значений ошибок $Y_1, \dots, Y_L$ с помощью формул Форни:

$$Y_i = \frac{X_i^{-1} \omega(X_i^{-1})}{\prod_{1 \leq j \leq L, j \neq i} (1 - X_j X_i^{-1})}, \quad i = 1, 2, \dots, L' \quad (9)$$

где $\omega(x) \equiv \sigma(x)S(x) \bmod x^{2t}$.

Шаг 5. В последовательности $r(x)$ из символа с номером $X_j = a^{tj}$ вычитается значение Y_j , $j = 1, \dots, L$. В результате получаем $m(x)$.

В качестве разрабатываемой модели используется имитационная модель, структурная схема которой продемонстрирована на рисунке 1.

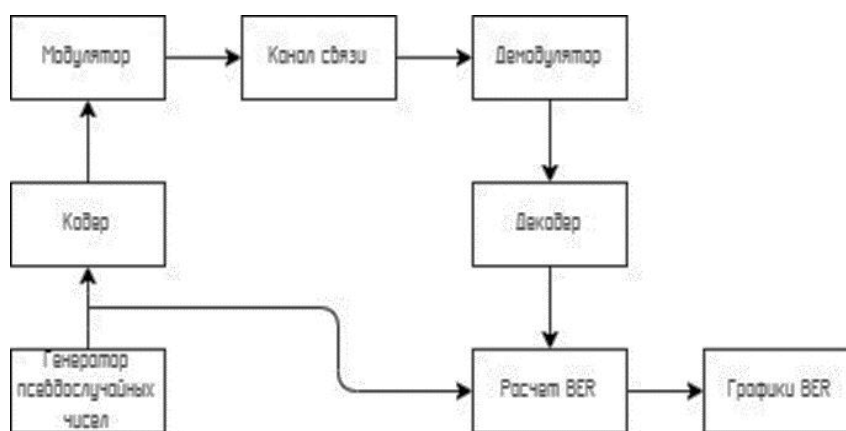


Рисунок 1 – Структурная схема модели

Структурные элементы:

- генератор псевдослучайных чисел (ПСЧ) – создание последовательности псевдослучайных битов, представляющих данные, которые будут передаваться;
- кодер – добавление избыточных бит в последовательность данных для исправления ошибок при передаче;
- модулятор – преобразование закодированной последовательности бит в аналоговый сигнал, который может быть передан по каналу связи;
- канал связи – представление среды передачи, которая может вносить задержку, потери и ошибки в передаваемый сигнал;
- демодулятор – извлечение оригинальной закодированной последовательности бит из аналогового сигнала, полученного по каналу связи;
- декодер – удаление избыточных бит из демодулированной последовательности бит, восстановление исходной последовательности данных;
- расчёт BER – вычисление частоты битовых ошибок (BER) [12], сравнивая полученную последовательность данных с исходной последовательностью;
- графики BER – отображение результатов измерения BER в виде графиков зависимости BER от различных параметров системы (например, отношения сигнал/шум [13]).

Методики оценивания энергетического выигрыша и повышения надёжности при передаче данных с использованием кодов Рида-Соломона в зашумлённом канале

широкополосной связи в общем виде выглядят идентично. Различие заключается в последнем шаге.

Шаги методик:

- 1) задать параметры кода Рида-Соломона, тип модуляции и диапазон соотношения сигнал-шум (SNR);
- 2) сгенерировать случайные битовые последовательности для передачи;
- 3) закодировать битовые последовательности с использованием кода Рида-Соломона (для закодированного случая);
- 4) модулировать биты (незакодированные или закодированные) с использованием заданной модуляции;
- 5) добавить белый гауссовский шум к модулированному сигналу в соответствии с заданным соотношением сигнал-шум;
- 6) демодулировать полученный сигнал с шумом;
- 7) декодировать демодулированные биты с использованием кода Рида-Соломона (для закодированного случая);
- 8) рассчитать частоту битовых ошибок для обоих случаев (с кодированием и без кодирования);
- 9) повторить шаги с 3 по 8 для всех значений соотношения сигнал-шум для обоих случаев;
- 10) построить графики зависимости частоты битовых ошибок от соотношений сигнал-шум для обоих случаев;
- 11) для энергетического выигрыша рассчитать разницу в дБ между соотношением сигнал-шум, требуемым для достижения заданной частоты битовых ошибок без кодирования, и соотношением сигнал-шум, требуемым для достижения той же частоты битовых ошибок с кодированием Рида-Соломона; для повышения надёжности при передаче данных – отношение частоты битовых ошибок без кодирования к частоте битовых ошибок с использованием кодирования Рида-Соломона для заданного соотношения сигнал-шум.

3. Модель оценки целостности передаваемых данных на основе кодов Рида-Соломона

Отсутствие реального оборудования и протоколов, реализующих передачу данных по радиочастотам с использованием широкополосной связи, делает имитационное моделирование наилучшим инструментом для оценки эффективности кодов Рида-Соломона. MATLAB, благодаря своей обширной библиотеке Communication Toolbox, предоставляет мощную платформу для такого моделирования.

Пример разрабатываемой схемы (для модуляции 16-QAM и передачи информации по каналу с АБГШ) в среде MATLAB проиллюстрирован на рисунке 2.

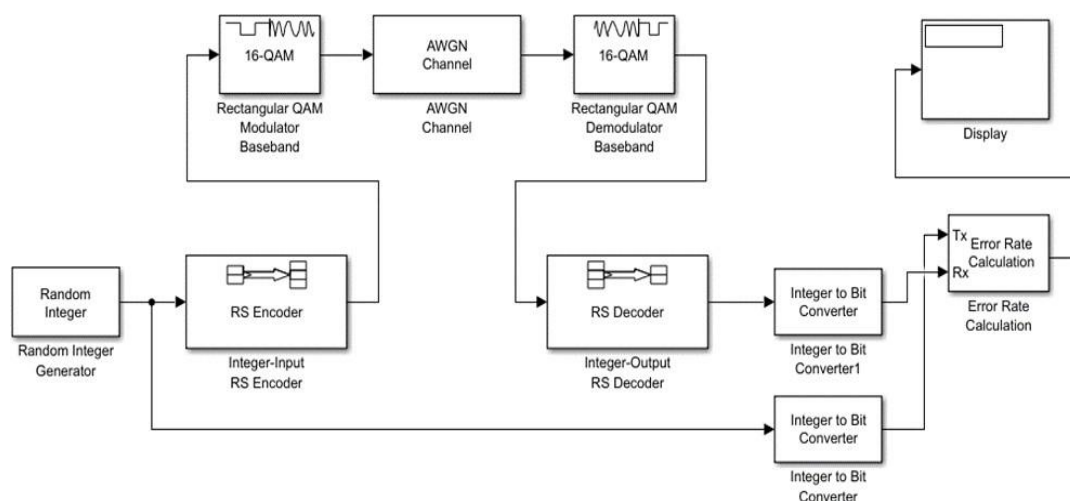


Рисунок 2 – Пример схемы в среде MATLAB

Так как интерес представляет использование кодов Рида-Соломона для безопасной передачи с сохранением целостности информации, то оценивается параметр BER (Bit Error Rate) в зависимости от SNR (Signal-to-Noise Ratio).

Данное соотношение оценивается путём построения соответствующих графиков. Анализируемая зависимость рассматривается для:

- фиксированных значений BER, и определяется значение сигнал-шум (SNR), обеспечивающее данные значения, с использованием кодирования Рида-Соломона и без него (энергетический выигрыш);
- фиксированного значения сигнал-шум (SNR), и определяется разница в BER между кодируемыми и не кодируемыми Ридом-Соломоном данными, передаваемыми с той же модуляцией, по тому же каналу связи (повышение надёжности при передаче).

В описанных далее экспериментах приняты следующие значения коэффициентов битовых ошибок (BER): 10^{-3} и 10^{-6} .

В каждом из экспериментов используется одна из трёх модуляций: BPSK, QPSK и 16-QAM, а также три вида кодов Рида-Соломона: RS(15, 7), RS(63, 55), RS(255, 247), для которых строится зависимость BER от SNR для незакодированной передачи данных.

Для фазовой модуляции BPSK, код Рида-Соломона с параметрами $(n, k) = [(15, 7), (63, 55), (255, 247)]$, отношение сигнал-шум $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$ берётся в диапазоне от 3 до 15 дБ с шагом 1 дБ. Имитация проводится до момента, пока в каждой точке $\frac{E_b}{N_0}$ не получим или 200 ошибок, или не передадим через канал 10^8 бит.

В результате моделирования получен график, представленный на рисунке 3(1). Для лучшего отображения точек пересечения кривых с прямыми $y_1 = 10^{-3}$ и $y_2 = 10^{-6}$ масштаб был увеличен (рисунки 3(2) и 3(3)).

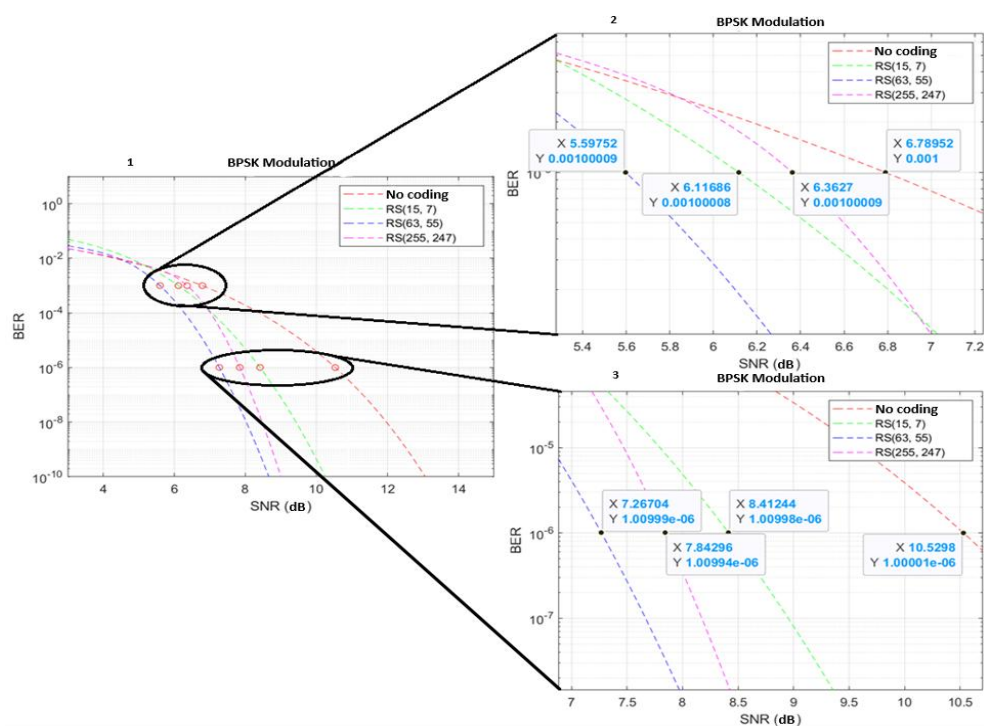


Рисунок 3 – Анализ энергетического выигрыша при использовании модуляции BPSK

Те же параметры использованы для фазовой модуляции QPSK, кода Рида-Соломона $(n, k) = [(15, 7), (63, 55), (255, 247)]$. Результат моделирования представлен на рисунке 4.

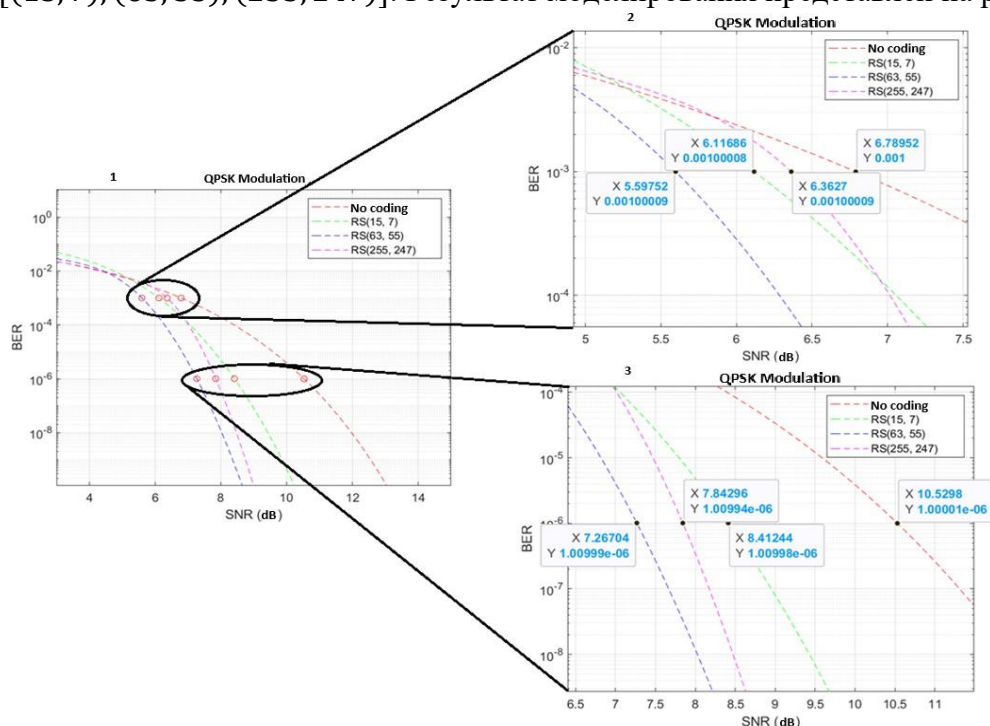


Рисунок 4 – Анализ энергетического выигрыша при использовании модуляции QPSK

Для квадратурно-амплитудной модуляции 16-QAM, код Рида-Соломона с параметрами $(n, k) = [(15, 7), (63, 55), (255, 247)]$, результаты моделирования представлены на рисунке 5.

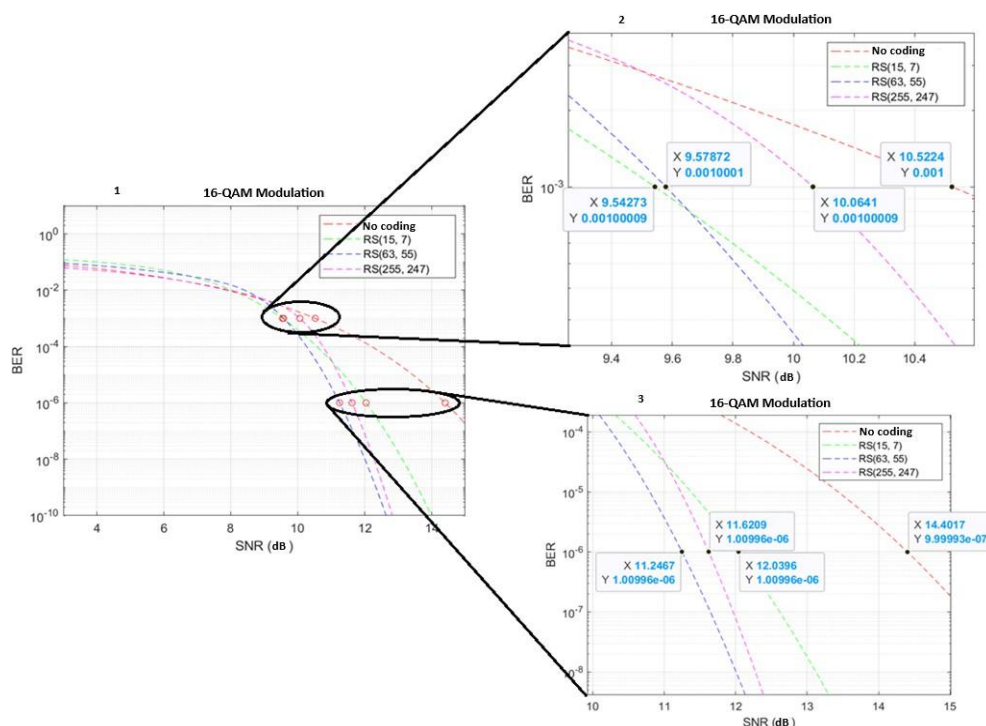


Рисунок 5 – Анализ энергетического выигрыша при использовании модуляции 16-QAM

Результаты анализа энергетического выигрыша приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа энергетического выигрыша

BER		10^{-3}			10^{-6}		
Модуляция		BPSK	QPSK	16-QAM	BPSK	QPSK	16-QAM
SNR, дБ (с кодированием)	RS(15, 7)	6,12	6,12	9,54	8,41	8,41	12,04
	RS(63, 55)	5,6	5,6	9,58	7,27	7,27	11,25
	RS(255, 247)	6,36	6,36	10,06	7,84	7,84	11,62
SNR, дБ (без кодирования)		6,79	6,79	10,52	10,53	10,53	14,4
Энергетический выигрыш, дБ	RS(15, 7)	0,67	0,67	0,98	2,12	2,12	2,36
	RS(63, 55)	1,19	1,19	0,94	3,26	3,26	3,15
	RS(255, 247)	0,43	0,43	0,46	2,69	2,69	2,78

Для всех экспериментов, описанных ниже, приняты следующие значения отношения сигнал/шум (SNR): 6 дБ, 8 дБ и 10 дБ.

В каждом из экспериментов использована одна из трёх модуляций: BPSK, QPSK и 16-QAM, для каждой применяются три типа кодов Рида-Соломона: RS(15, 7), RS(63, 55), RS(255, 247), и строятся зависимости BER и SNR. Для сравнения, зависимость строится для передачи не кодированных данных.

Рассмотрим фазовую модуляцию BPSK, код Рида-Соломона с параметрами $(n, k) = [(15, 7), (63, 55), (255, 247)]$. Результаты моделирования приведены на рисунке 6.

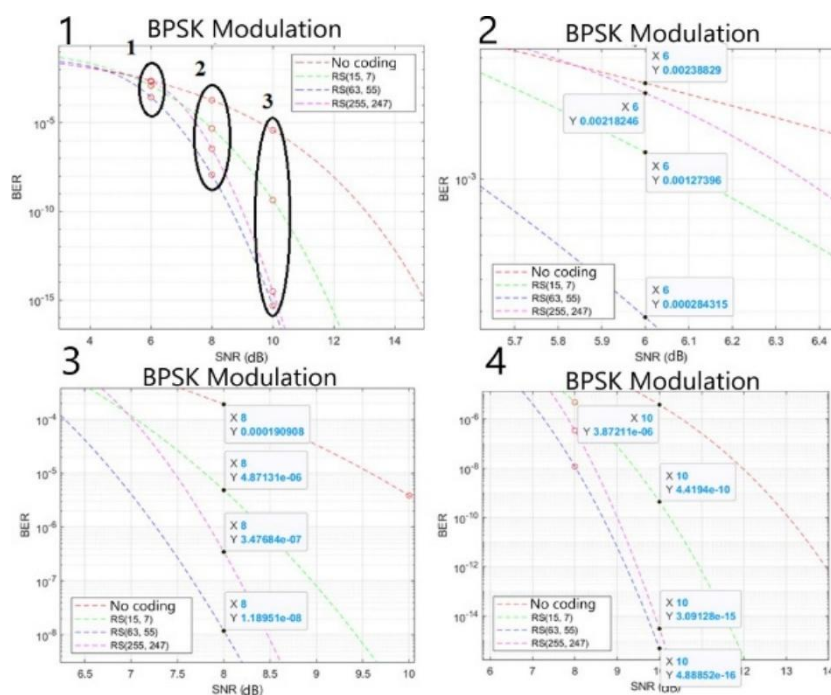


Рисунок 6 – Анализ повышения надёжности передачи данных с использованием BPSK

Для фазовой модуляции QPSK, код Рида-Соломона с параметрами $(n, k) = [(15, 7), (63, 55), (255, 247)]$, результаты моделирования показаны на рисунке 7.

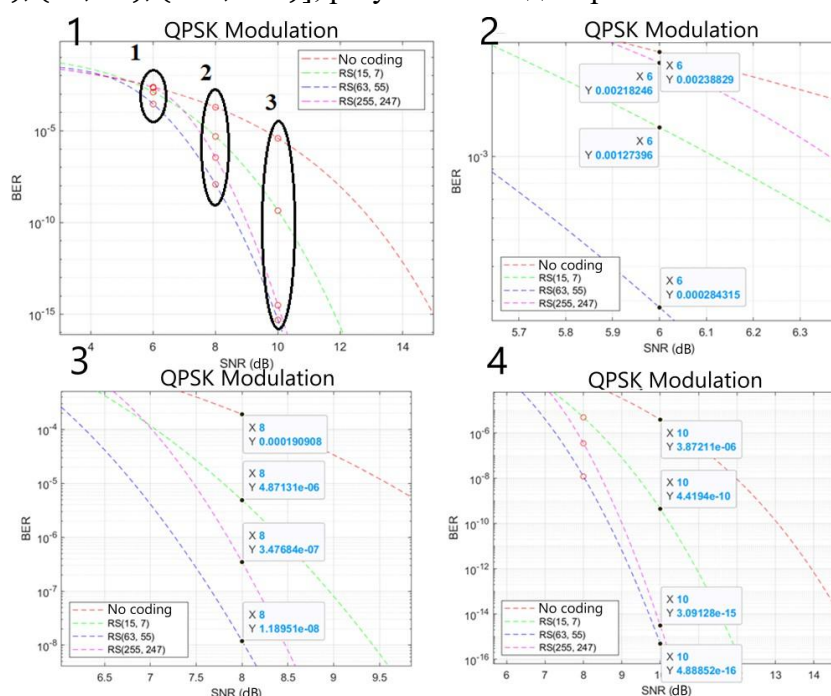


Рисунок 7 – Анализ повышения надёжности передачи данных с использованием QPSK

Для квадратурно-амплитудной модуляции 16-QAM, код Рида-Соломона с параметрами $(n, k) = [(15, 7), (63, 55), (255, 247)]$, отношение сигнал-шум $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$ берётся в диапазоне от 3 до 15 дБ с шагом 1 дБ. Моделирование проводится до тех пор, пока в каждой точке $\frac{E_b}{N_0}$ либо получим 200 ошибок, либо передадим по каналу 10^8 бит

Результат моделирования представлен на рисунке 8(1). Для оценки повышения надёжности передачи данных необходимо определить точки пересечения построенных

кривых с линиями $x_1 = 6, x_2 = 8$ и $x_3 = 10$. Пересечения с каждой из этих линий в увеличенном масштабе приведены на рисунке 8.

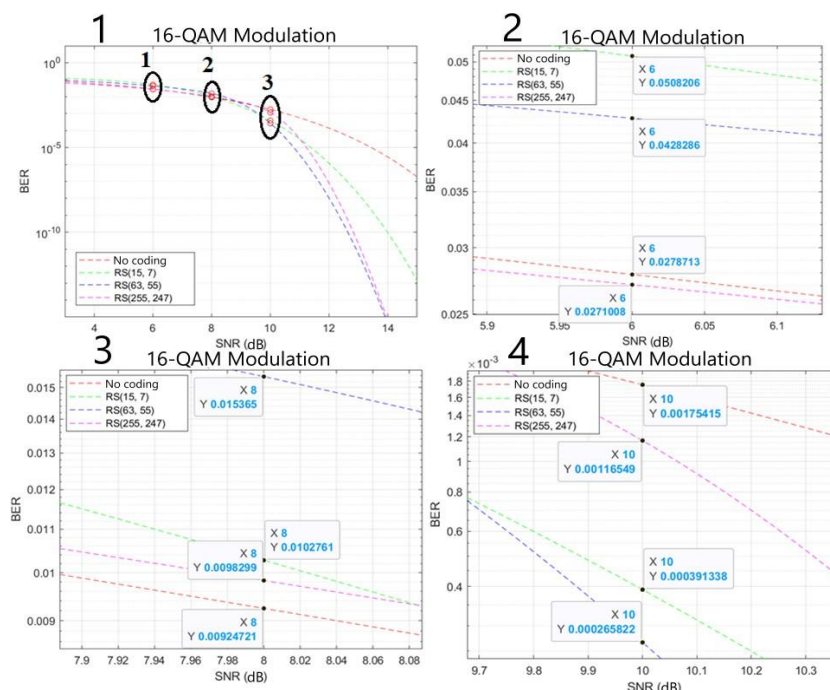


Рисунок 8 – Анализ повышения надёжности передачи данных с использованием 16-QAM
Результаты анализа сведены в таблицы 2–4.

Таблица 2 – Результаты повышения надёжности передачи данных (сигнал/шум 6 дБ)

Модуляция		BPSK	QPSK	QAM-16
BER (с кодированием)	RS(15, 7)	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$
	RS(63, 55)	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
	RS(255, 247)	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$
BER (без кодирования)		$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,79 \cdot 10^{-2}$
Повышение надёжности при передаче	RS(15, 7)	1,85	1,85	—
	RS(63, 55)	8,57	8,57	—
	RS(255, 247)	1,1	1,1	1,03

Таблица 3 – Результаты повышения надёжности передачи данных (сигнал/шум 8 дБ)

Модуляция		BPSK	QPSK	QAM-16
BER (с кодированием)	RS(15, 7)	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	10^{-2}
	RS(63, 55)	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
	RS(255, 247)	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
BER (без кодирования)		$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-3}$
Повышение надёжности при передаче	RS(15, 7)	40,82	40,82	—
	RS(63, 55)	$1,7 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	—
	RS(255, 247)	571,43	571,43	—

Таблица 4 – Результаты повышения надёжности передачи данных (сигнал/шум 10 дБ)

Модуляция		BPSK	QPSK	QAM-16
BER (с кодированием)	RS(15, 7)	$4,4 \cdot 10^{-10}$	$4,4 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-4}$
	RS(63, 55)	$4,9 \cdot 10^{-16}$	$4,9 \cdot 10^{-16}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
	RS(255, 247)	$3,1 \cdot 10^{-15}$	$3,1 \cdot 10^{-15}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$

Модуляция		BPSK	QPSK	QAM-16
BER (без кодирования)		$3,9 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Повышение надёжности при передаче	RS(15, 7)	8864	8864	4,5
	RS(63, 55)	$8 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^9$	6,7
	RS(255, 247)	$1,26 \cdot 10^9$	$1,26 \cdot 10^9$	1,5

Повышение надёжности передачи данных – параметр, показывающий во сколько раз снизился коэффициент битовых ошибок при использовании кодов Рида-Соломона по сравнению с передачей без кодирования.

Заключение

В данном исследовании рассматриваются вопросы повышения надёжности передачи данных и энергоэффективности в широкополосных системах связи с использованием кодов Рида-Соломона.

Для количественной оценки преимуществ использования данных кодов в условиях зашумлённого канала была разработана комплексная имитационная модель. Анализ показал, что значительная экономия энергии достигается за счёт исправления ошибок, эффективно снижающих пагубное влияние шума в канале на передачу данных.

Кроме того, исследование демонстрирует заметное улучшение надёжности передачи данных, повышая устойчивость широкополосных систем связи к ухудшению качества каналов.

Полученные результаты подчёркивают потенциал кодов Рида-Соломона в качестве краеугольного камня для надёжной и эффективной передачи данных в широкополосных системах связи, тем самым расширяя границы надёжного обмена данными.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-24-02 (проект FSEE-2024-0003).

Список литературы

1. Коды Рида-Соломона // [Электронный ресурс]. – URL: https://asvk.cs.msu.ru/~bahmurov/course_advanced_networks/2016/РЭР«РҮСК%20РҫРҫРҫРҫ%20РҫР«РҫР«РҫР«РҫР»P.pdf (дата обращения: 12.03.2024);
2. Levina A., Kuzmin I., Taranov S. Reed solomon codes and its application for cloud storage system // Third International Conference on Future Generation Communication Technologies (FGCT 2014), Luton, UK, 2014. pp. 46–49;
3. Bleichenbacher D., Kiayias A., Yung M. Decoding of interleaved reed solomon codes over noisy data // Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 2003. pp. 97–108;
4. Implementation and experimental evaluation of reed-solomon identification / Ferrara R., Torres-Figueroa L., Boche H., et al // European Wireless 2022; 27th European Wireless Conference, 2022. pp. 1–6;
5. Shrivastava P., Singh P. U. Error detection and correction using reed solomon codes // Error Detection and Correction Using Reed Solomon Codes, 3, 2013;

6. Ma R., Xing L., Wang Y. Performance analysis of reed-solomon codes for effective use in survivable wireless sensor networks // International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, 2020. 5(1). pp. 13–28;
7. Machine learning-based error correction codes and communication protocols for powerline communication: An overview / Akinci T. C., Erdemir G., Zengin A. T., et al // IEEE Access, 2023. 11. pp. 124760–124781;
8. Hamada L., Lorenz P., Gilg M. Security Challenges for Light Emitting Systems // Future internet. 2021. 13(11). p. 276;
9. Линейные коды // [Электронный ресурс]. – URL: https://tilde.club/~dvosipov/misc/0216_linear_codes_slides_marked.pdf (дата обращения: 12.03.2024);
10. Поле Галуа // [Электронный ресурс]. – URL: <https://bigenc.ru/c/pole-galua-82d2b4> (дата обращения: 12.03.2024);
11. Massey J. L. Shift-register synthesis and BCH decoding // IEEE Transactions on Information Theory. 1969. IT-15(1). pp. 122–127;
12. BER (bit error rate) // Словарь терминов [Электронный ресурс]. – URL: <https://mobilradio.ru/information/vocabulary/ber.htm> (дата обращения: 12.03.2024);
13. Отношение сигнал-шум в цифровых системах связи // [Электронный ресурс]. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/966/202/lecture/5258> (дата обращения: 12.03.2024).