

УДК 681.391

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-2-69-81>

EDN: OLWQTV

## Исследование энергетической эффективности сигнально-кодовых конструкций на основе каскадных и турбокодов для перспективных радиотехнических систем

✉ Ву Т. З., ✉ Глушанков Е. И., ✉ Фам К. К.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи.** В современных радиотехнических системах обеспечение необходимого компромисса между энергетической и спектральной эффективностью рассматривается как одна из наиболее актуальных задач. При этом применение сигнально-кодовых конструкций путем рационального объединения методов помехоустойчивого кодирования и многопозиционной модуляции представляется перспективным направлением для совместной оптимизации энергетической и спектральной эффективности, что и обуславливает актуальность данного исследования. **Цель работы:** исследование энергетической эффективности сигнально-кодовых конструкций на основе решетчатой кодовой модуляции и многоуровневой кодовой модуляции при их сочетании с помехоустойчивыми каскадными кодами и турбокодами. **Метод исследования** основан на компьютерном моделировании в среде MATLAB с целью оценки различных вариантов построения сигнально-кодовых конструкций в радиотехнических системах путем сравнения вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал / шум. **Научная новизна** заключается в разработке и исследовании энергетической эффективности сигнально-кодовых конструкций с использованием помехоустойчивых каскадных и турбокодов в рамках структур решетчатой и многоуровневой кодовой модуляции и фазовой манипуляции. **Результаты** моделирования демонстрируют повышенную энергетическую эффективность применения сигнально-кодовых конструкций на основе совместного использования каскадных и турбокодов в схемах решетчатой кодовой модуляции и многоуровневой кодовой модуляции по сравнению с традиционными подходами, где кодирование и модуляция разделены на отдельные последовательные процессы. **Теоретическая и практическая значимость:** представленные результаты могут быть применены в перспективных радиотехнических системах с целью повышения энергетической и спектральной эффективности при передаче данных по каналам с постоянными параметрами и аддитивных белым гауссовским шумом.

**Ключевые слова:** сигнально-кодовые конструкции, решетчатая кодовая модуляция, многоуровневая кодовая модуляция, помехоустойчивость, каскадные коды, турбокоды, фазовая манипуляция

### Библиографическая ссылка на статью:

Ву Т. З., Глушанков Е. И., Фам К. К. Исследование энергетической эффективности сигнально-кодовых конструкций на основе каскадных и турбокодов для перспективных радиотехнических систем // Информационные технологии и телекоммуникации. 2025. Т. 13. № 2. С. 69–81. DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-2-69-81. EDN: OLWQTV

### Reference for citation:

Vu T. D., Glushankov E., Fam K. K. Investigation of the Energy Efficiency of Signal-Code Constructions Based on Concatenated and Turbo Codes for Prospective Radio Communication Systems // Telecom IT. 2025. Vol. 13. Iss. 2. PP. 69–81 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-2-69-81. EDN: OLWQTV

## Введение

Традиционный подход к проектированию радиотехнических систем, который предполагает использование отдельных процедур помехоустойчивого кодирования и многопозиционной модуляции сигналов, имеет существенные ограничения в применении, особенно при необходимости одновременного удовлетворения жестких требований к энергетической и спектральной эффективности. Были исследованы методы помехоустойчивого кодирования, которые продемонстрировали свою высокую энергетическую эффективность [1], однако их использование приводит к снижению спектральной эффективности, так как кодовая скорость  $R < 1$ . Напротив, применение многопозиционной модуляции позволяет повысить спектральную эффективность, но ценой снижения энергетической эффективности [1, 2]. Именно поиск решения этого фундаментального компромисса привел к разработке методов, рационально объединяющих кодирование и модуляцию. Такой совместный подход к оптимизации и получил название «сигнально-кодовые конструкции» (СКК) [3].

Основу помехоустойчивой части разрабатываемых СКК составляют наиболее мощные классы кодов, обеспечивающие высокий энергетический выигрыш. Среди помехоустойчивых кодов рассмотрим: 1) *каскадные коды*, которые благодаря характерной структуре с использованием двух (или более) последовательно соединенных составляющих кодеров (обычно внешнего и внутреннего кода) позволяют значительно повысить энергетическую эффективность радиотехнической системы как при влиянии пакетных, так и случайных ошибок; 2) *турбокоды*, основанные на принципе параллельного кодирования и механизме итеративного декодирования с обменом «мягкой» информацией между составляющими декодерами, что дает значительное преимущество в эффективности исправления ошибок.

Таким образом, данная работа посвящена исследованию и разработке новых СКК, основанных на этих двух классах кодов, и их интеграции в схемы решетчато-кодовой (РКМ) и многоуровневой кодовой (МКМ) модуляций. Проводится сравнительная оценка производительности разработанных комбинированных систем (по сравнению с существующими) при функционировании в канале передачи с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

## Решетчатая кодовая модуляция

В отличие от систем связи, выполняющих кодирование и модуляцию отдельно, в СКК на основе РКМ эти два процесса интегрируются в единое целое посредством использования сверточных кодов для разбиения множества сигналов [3–5]. Входные данные кодируются в последовательности двоичных символов сверточным кодером, которые затем отображаются на сигнальные точки в модуляционном созвездии посредством решетчатой диаграммы. Эта решетка представляет переходные состояния кодера и разработана таким образом, чтобы евклидово расстояние между сигнальными точками в созвездии было максимизировано, что, в свою очередь, снижает вероятность ошибок передачи в условиях помех.

Процесс разложения исходного множества начинается с модуляционного созвездия, в котором все сигнальные точки разделяются на подмножества по иерархическому принципу таким образом, чтобы минимальное евклидово расстояние между точками в каждом подмножестве постепенно увеличивалось [3–5]. При восьмипозиционной фазовой манипуляции (ФМ-8) созвездия исходного множества имеют евклидово расстояние, равное  $d_0 = 2\sin(\pi/8) \approx 0,765$ . Как видно из рисунка 1, на первом этапе разбиения первый кодирующий бит разделяет множество на два подмножества, каждое из которых содержит четыре точки, с минимальным евклидовым расстоянием, равным  $d_1 = 2\sin(\pi/4) = \sqrt{2} \approx 1,41$ . Затем каждое подмножество  $B_0$  и  $B_1$  делится на два меньших подмножества, содержащих две точки, соответственно:  $C_0, C_1$  и  $C_2, C_3$ , с минимальным евклидовым расстоянием, равным  $d_2 = 2\sin(\pi/2) = 2$ . Эти евклидовы расстояния после разбиения множества удовлетворяют условию  $d_2 > d_1 > d_0$ , что позволяет оптимизировать различие сигналов между подмножествами в условиях действия помех типа АБГШ. По завершении процесса разбиения элементарные сигналы получают соответствующие трехразрядные комбинации вида  $b_1, b_2, b_3$ .

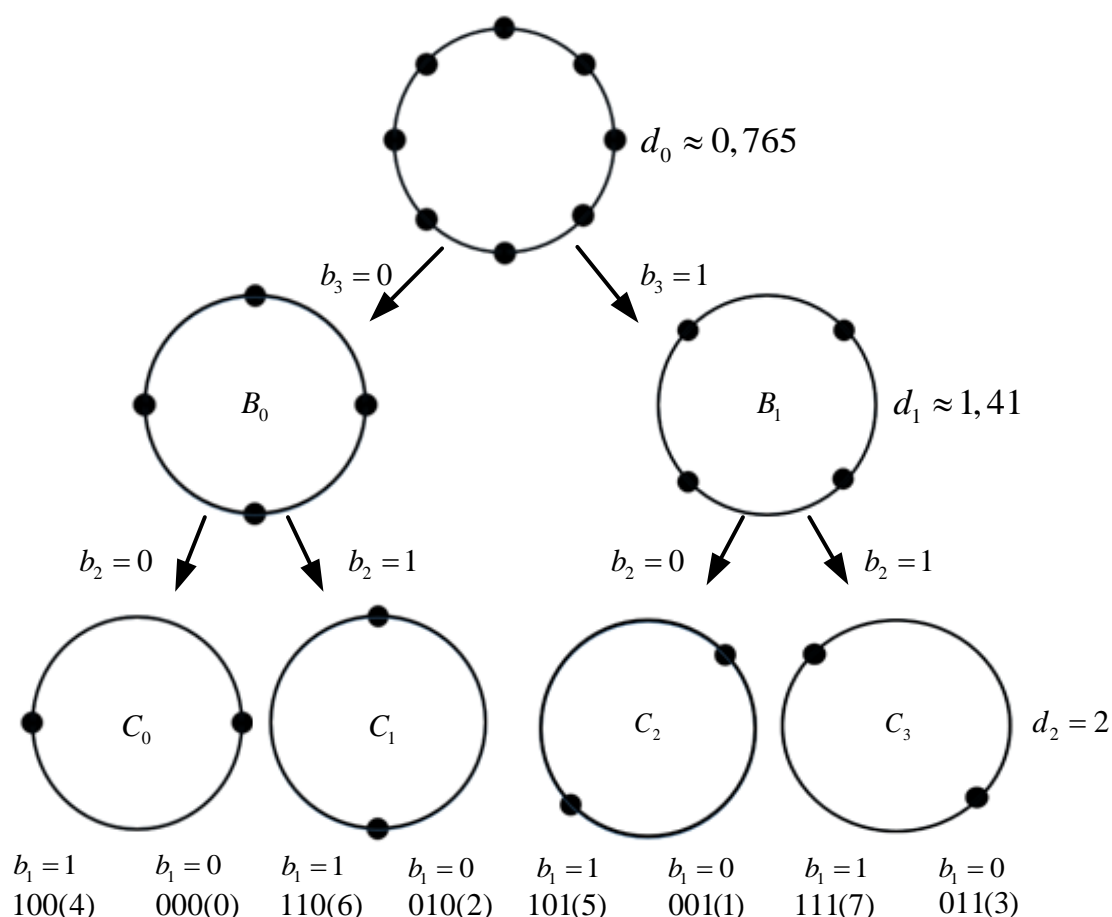


Рис. 1. Схема разложения множества ФМ-8

Схема ФМ-8 РКМ представлена на рисунке 2.

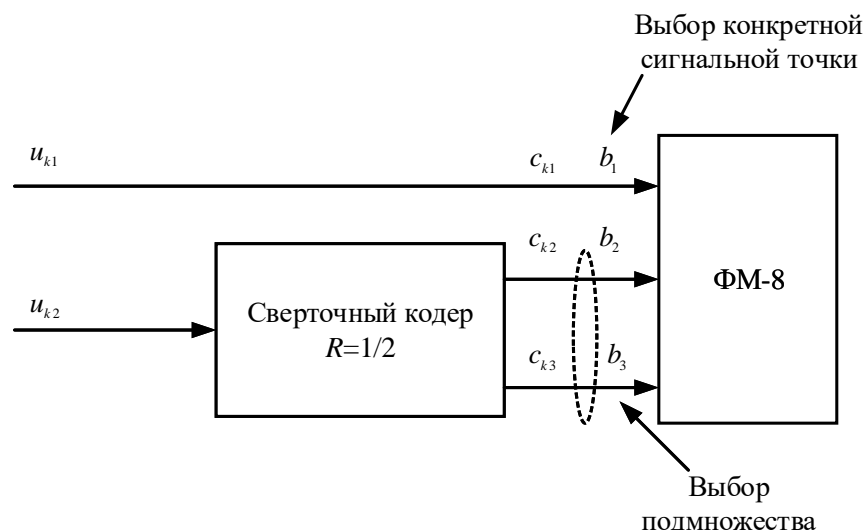


Рис. 2. Схема ФМ-8 РКМ

При этом входящие данные разделяются на два потока, которые содержат:  $u_{k1}$  и  $u_{k2}$ , представляющие собой два двоичных информационных символа на момент времени  $t$ . Поток, содержащий  $u_{k1}$ , передается непосредственно на модулятор без кодирования, что делает его более уязвимым к искажениям. В то же время поток, содержащий  $u_{k2}$ , кодируется сверточным кодером с кодовой скоростью  $1/2$ , т. е. один входной бит  $u_{k2}$  вырабатывает два выходных бита  $c_{k2}$  и  $c_{k3}$ , повышая устойчивость сигнала при передаче по каналу с помехами. Некодированный бит  $c_{k1}$  и два кодированных бита  $c_{k2}$  и  $c_{k3}$  совместно определяют сигнальную точку в созвездии ФМ-8 [3–5]. В частности, два кодированных бита  $c_{k2}$  и  $c_{k3}$  используются для выбора подмножества в сигнальном созвездии, тогда как некодированный бит  $c_{k1}$  определяет конкретную сигнальную точку внутри выбранного подмножества. Таким образом, скорость кодирования системы составляет  $R = 2/3$ , т. е. на каждые два входных информационных бита формируется три выходных кодовых бита, которые затем отображаются на одну точку ФМ-8 в созвездии. Удельная скорость передачи данных определяется как:

$$\gamma = R \log_2 m = (2/3) \log_2 8 = 2 \text{ бит/с/Гц},$$

где  $R$  – скорость кодирования системы,  $m$  – количество точек в созвездии.

Согласно [6], энергетический выигрыш от применения ФМ-8 РКМ по сравнению с не кодированной ФМ-4 рассчитывается по следующей формуле:

$$\bar{\beta}_{\text{код}} = 10 \lg \frac{\bar{d}_{\text{св}}^2}{d_{(\text{ФМ-4})\text{min}}^2},$$

где  $\bar{d}_{\text{св}}$  – свободное евклидово расстояние разработанной схемы РКМ (на основе ФМ-8);  $d_{(\text{ФМ-4})\text{min}}$  – минимальное евклидово расстояние между сигнальными точками в созвездии ФМ-4.

На рисунке 3 показаны результаты моделирования, которые сравнивают энергетическую эффективность коррекции ошибок сверточного кода в системах ФМ-8 РКМ, ФМ-8 без РКМ и ФМ-4 без кодирования. Моделирование проводится с использованием сверточного кодера с порождающими полиномами, соответственно:  $G_1(X) = 1 + X + X^2 + X^3$  и  $G_2(X) = 1 + X + X^3$  (или  $G(G_1, G_2) = [17, 15] = [1111, 1101]$ ), длина кодового ограничения  $K = 4$ , число состояний кодера  $Q = 2^{K-1} = 2^{4-1} = 8$ .

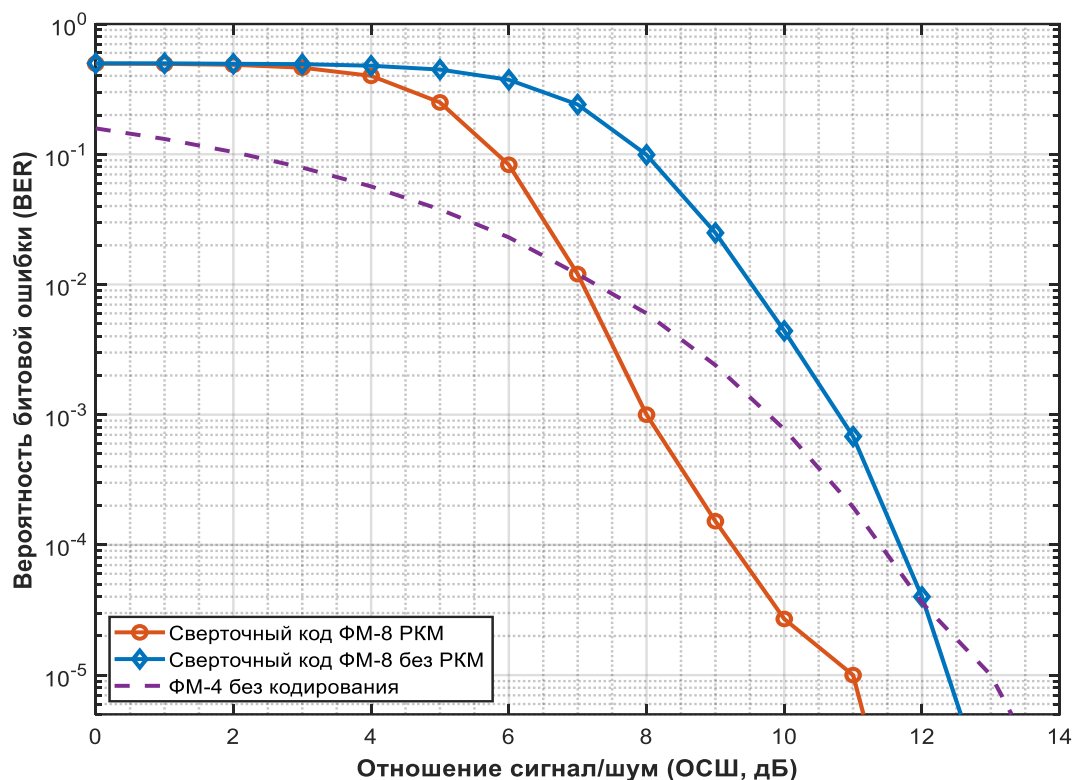


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал / шум в системах ФМ-8 РКМ, ФМ-8 без РКМ, ФМ-4 без кодирования по каналу АБГШ

Результаты моделирования показали, что при вероятности битовой ошибки (BER, аббр. от англ. Bit Error Rate), равной  $10^{-5}$ , применение РКМ обеспечивает выигрыш кодирования на 2 дБ по сравнению с ФМ-4 без кодирования и на 1,5 дБ по сравнению со случаем ФМ-8 без использования РКМ. При одинаковой спектральной эффективности  $\gamma = 2$  бит / с / Гц ФМ-8 с РКМ представляет собой оптимальное решение, обеспечивающее компромисс между энергетической и спектральной эффективностью.

Указанный выше выигрыш кодирования не только демонстрирует техническое улучшение, но и имеет практическую значимость, позволяя системе более эффективно функционировать в условиях реальных спутниковых каналов связи с высокоэллиптическими и геостационарными космическими аппаратами СВЧ диапазона, аппроксимируемых каналами с АБГШ.

## Каскадные коды и турбокоды в сочетании РКМ

Для увеличения энергетической эффективности РКМ предлагается использование ее вместе не со стандартными одиночными сверточными кодами, как было рассмотрено ранее и предлагалось в известных работах [3–6], а с каскадными и турбокодами: такое сочетание представляет собой новые СКК, не описанные ранее в литературе.

Каскадное кодирование в сочетании с РКМ представляет собой метод интеграции двух уровней кодирования с модуляцией в единой системе. В данной структуре кодера-модулятора сверточный код используется в качестве внутреннего кода, непосредственно интегрированного с РКМ, в то время как недвоичный код Рида – Соломона играет в роль внешнего кода для повышения энергетической эффективности. Входная информация кодируется внешним кодом Рида – Соломона. Выходные данные от кода Рида – Соломона, уже закодированные для противодействия пакетным ошибкам, затем подаются на вход перемежителя, расположенного между внешним и внутренним кодами и предназначенного для распределения пакетных ошибок в случайные ошибки после прохождения через канал передачи, что позволяет внутреннему коду эффективно обрабатывать ошибки.

Для внутреннего кода такая тесная интеграция процессов кодирования и модуляции через решетчатую структуру состояния обеспечивает максимальное евклидово расстояние между подмножествами в созвездии. Разработанная СКК, включающая совместные процессы кодирования и декодирования каскадного кода в сочетании с РКМ, представлена на рисунке 4.

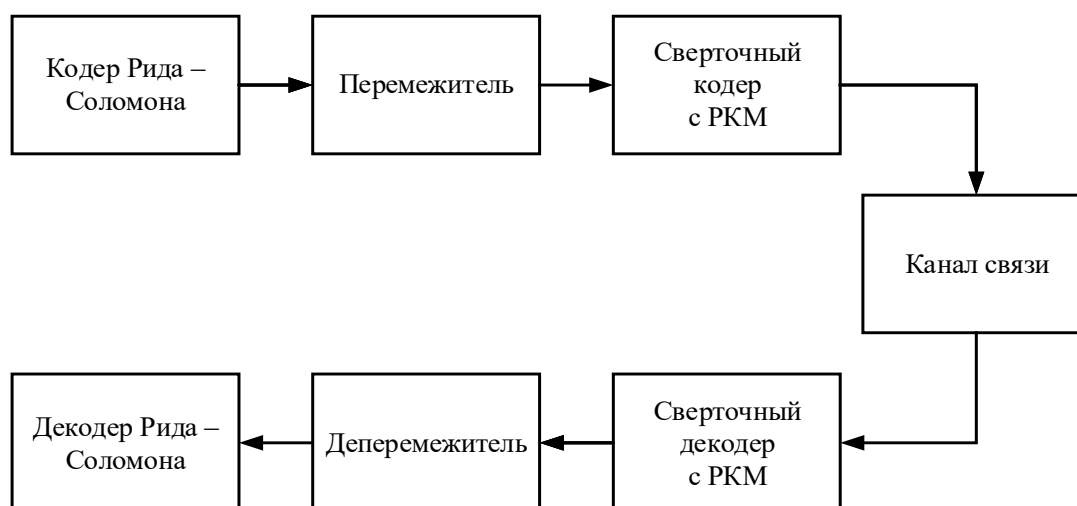


Рис. 4. СКК на основе каскадного кода в сочетании с РКМ

Турбокоды представляют собой класс мощных помехоустойчивых кодов, отличающихся способностью достигать высокой эффективности в каналах с АБГШ [7–9]. Благодаря этим преимуществам турбокоды нашли широкое применение в различных системах связи. Поэтому была реализована идея применения турбокода в схемах РКМ, где сверточный код заменяется турбокодом с целью достижения более высокой эффективности коррекции ошибок при разумном

уровне сложности. Разработанная СКК на основе схемы турбокодирования, совмещенной с РКМ, представлена на рисунке 5.

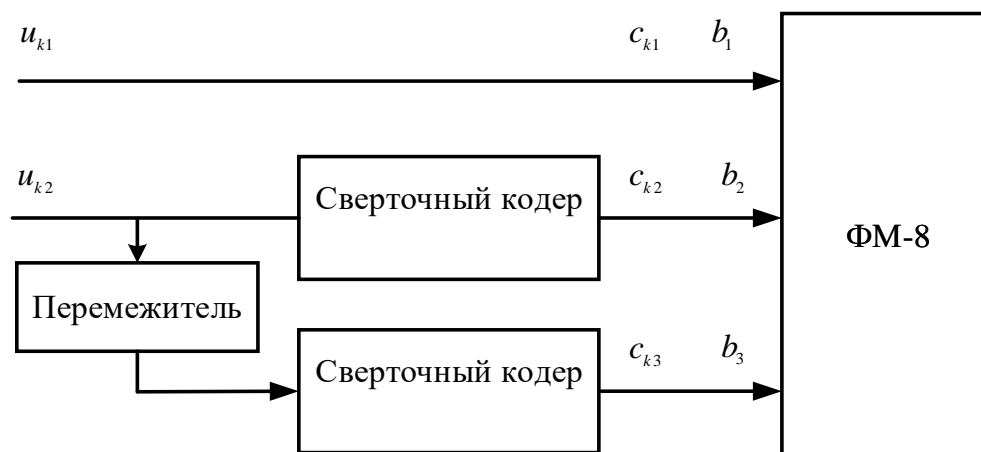


Рис. 5. СКК на основе турбокода в сочетании с РКМ

Базовый турбокод обычно проектируется со скоростью кодирования  $1/3$ , однако в данном исследовании он был заменен кодером со скоростью  $1/2$ , полученной путем выкалывания битов четности. Биты после кодирования отображаются на сигнальное созвездие ФМ-8, формируя сигнальную точку из комбинации трех битов  $b_1, b_2, b_3$ . В этой схеме бит  $b_1$  определяет положение сигнальной точки в верхней или нижней половине созвездия, а комбинация  $b_2 b_3$  выбирает фазу сигнальной точки.

Декодер осуществляет итеративный процесс декодирования, в котором информация, декодированная первым составляющим декодером, служит априорной информацией для второго составляющего декодера, и наоборот. Выражение для расчета отношения правдоподобия при итерационном декодировании турбокода имеет следующий вид [10]:

$$L(u_k) = \ln \left[ \frac{P(u_k = +1)}{P(u_k = -1)} \right],$$

где  $P(u_k = m)$  – апостериорная вероятность при  $u_k = +1$  и  $u_k = -1$ .

Благодаря итеративному процессу декодирования и вычислению логарифмического отношения правдоподобия получается оценка  $\hat{u}_{k2}$  информационного бита  $u_{k2}$ . На основе значения  $\hat{u}_{k2}$  определяются соответствующие оценки  $\hat{b}_2$  и  $\hat{b}_3$  для закодированных битов  $b_2$  и  $b_3$ . Далее производится вычисление евклидова расстояния между синфазно-квадратурными парами сигналов  $(\hat{x}, \hat{y})$  и сигнальными точками  $(0\hat{b}_2\hat{b}_3)$  и  $(1\hat{b}_2\hat{b}_3)$ . Это позволяет получить оценку значения  $\hat{u}_{k1}$  некодированного бита  $u_{k1}$ .

Результаты моделирования разработанных СКК, представленные на рисунке 6, показывают, что схема турбокода в сочетании с РКМ обеспечивает наилучшую эффективность коррекции ошибок среди исследованных конфигураций.

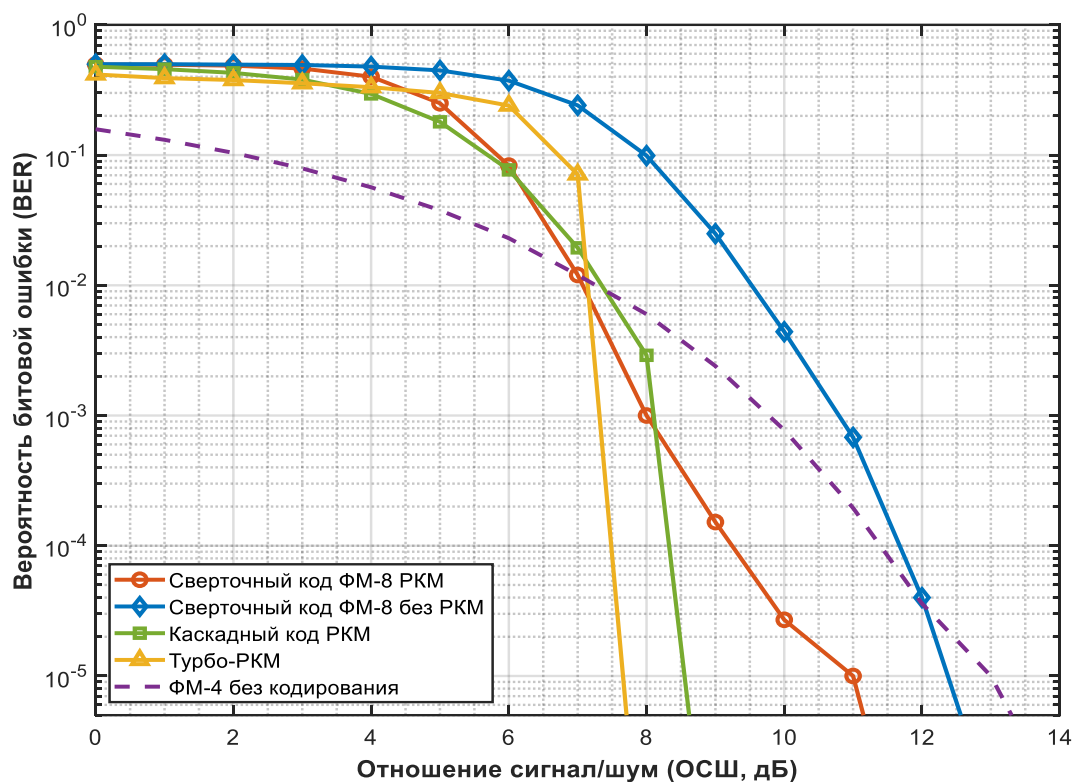


Рис. 6. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал / шум кодов в сочетании с РКМ по каналу АБГШ

Для  $BER = 10^{-5}$  турбо-РКМ достигает выигрыша кодирования 0,8 дБ по сравнению со случаем использования каскадного кода в сочетании с РКМ, и 3,2 дБ – по сравнению со случаем традиционного использования одиночного сверточного кода с РКМ. Эти результаты подтверждают, что интеграция каскадных кодов и турбокодов с РКМ значительно улучшает энергетическую эффективность при передаче информации по каналу с АБГШ.

### Каскадный код на основе МКМ

В схемах МКМ входящая информация разделяется на несколько потоков данных (уровней). Перед последующим отображением на модуляционное созвездие информационные потоки кодируются либо отдельными кодами, либо кодами с различными скоростями кодирования [10]. Рисунок 7 иллюстрирует простой пример МКМ на основе кодов Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ). Использование различных скоростей кодирования для разных потоков данных обеспечивает неравномерную защиту [11–13]. Коды с низкой скоростью кодирования применяются для потоков данных, требующих более высокой степени защиты, обеспечивая повышенную надежность исправления ошибок. Напротив, коды с высокой скоростью кодирования используются для оптимизации спектральной эффективности канала передачи.

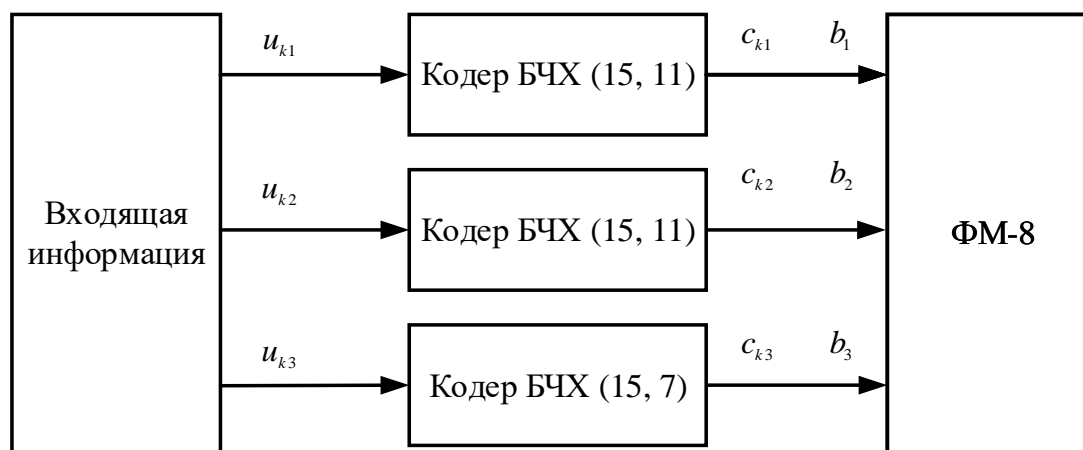


Рис. 7. Коды БЧХ ФМ-8 на основе МКМ

В рамках исследования разработаны СКК на основе каскадных кодов в сочетании с РКМ и МКМ при использовании метода модуляции ФМ-8. Параметры моделирования для используемых кодов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры моделирования систем каскадных кодов

Внешний код	Внутренний код	Вид СКК
Код Рида – Соломона (255, 223)	Сверточный код (17, 15)	На основе РКМ
Код БЧХ (63, 57)	Сверточный код (17, 15)	На основе РКМ
Код Рида – Соломона (255, 223)	Коды БЧХ (15, 7), (15, 11), (15, 11)	На основе МКМ

Для каскадного кода с МКМ выходные данные кодера Рида – Соломона после символического перемежения поступают на вход кодеров БЧХ. Процесс кодирования выполняется на трех различных уровнях, при этом средняя скорость кодирования кодеров БЧХ составляет:

$$R = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} = \frac{11/15 + 11/15 + 7/15}{3} \approx 0,64,$$

где  $R_1, R_2, R_3$  – кодовая скорость каждого кодера.

На этапе декодирования системы МКМ применяется параллельное декодирование, при котором каждый уровень декодируется независимо, без обмена информацией между декодерами. Данный подход приводит к потере информации, которой могли бы обмениваться декодеры, но при этом снижает распространение ошибок между уровнями. Более того, механизм параллельного декодирования обеспечивает преимущество в виде уменьшенной задержки декодирования, поскольку декодеры функционируют независимо, что повышает общую скорость процесса. Результаты моделирования разработанных СКК для канала с АБГШ представлены на рисунке 8.

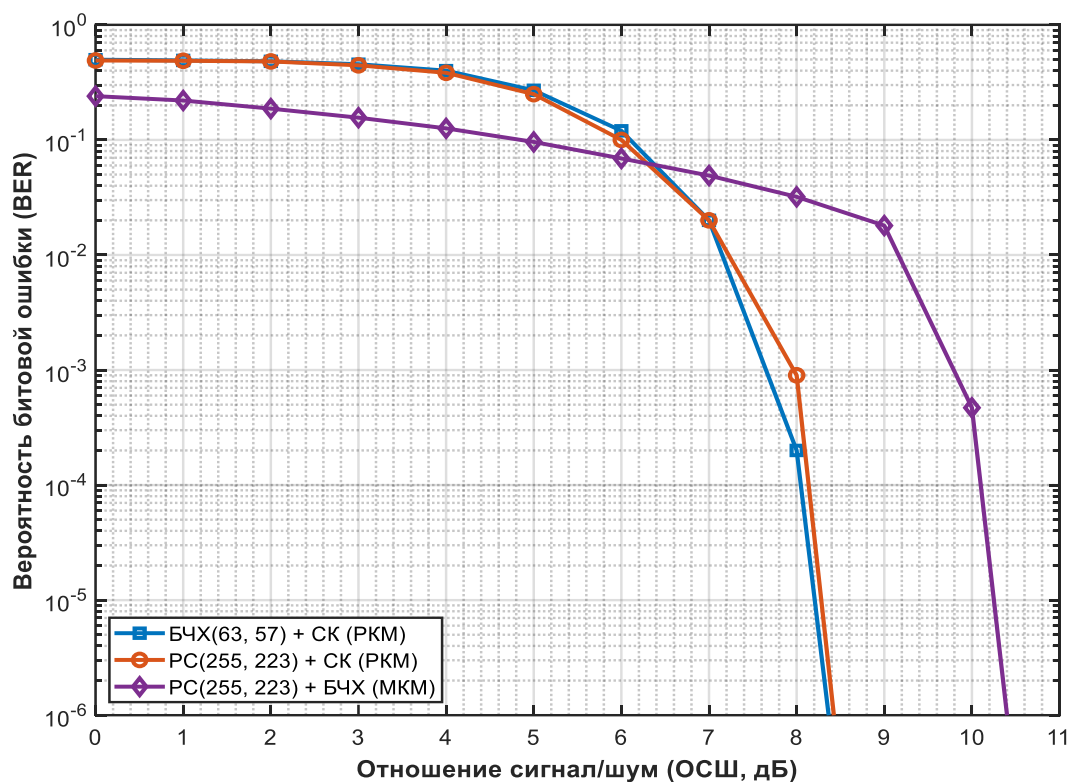


Рис. 8. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал / шум для СКК на основе каскадных кодов в сочетании с РКМ и МКМ

Из рисунка 8 видно, что предложенные СКК на основе каскадных кодов с внешним кодом Рида – Соломона, кодом БЧХ и сверточным внутренним кодом дают практически одинаковую эффективность на всех уровнях отношения сигнал / шум (ОСШ). При уровнях ОСШ ниже 6,5 дБ эти коды менее эффективны, чем каскадный код с внешним кодом Рида – Соломона и внутренним кодом БЧХ, но по мере увеличения ОСШ наблюдается разница в эффективности, при этом выигрыш в кодировании составляет 2 дБ при  $BER = 10^{-5}$ .

### Заключение

Разработанные СКК на основе интеграции сверточных кодов с РКМ продемонстрировали значительное улучшение характеристик энергетической эффективности без увеличения требуемой ширины полосы пропускания, превосходя системы с отдельной реализацией кодирования и модуляции. Дальнейшее улучшение этих характеристик, как показано в данной работе, достигается путем интеграции в СКК более мощных каскадных и турбокодов, что и являлось основной целью исследования. Однако следует отметить, что повышение энергетической эффективности сопровождается увеличением сложности системы и ростом вычислительных затрат. Это является важным фактором, который необходимо учитывать при выборе СКК для радиотехнических систем.

Кроме того, перспективным подходом представляется создание СКК путем объединения каскадных кодов с МКМ, использующих параллельное декодирование. Этот метод позволяет снизить сложность системы и задержку декодирования, сохраняя при этом приемлемый уровень энергетической эффективности, и может рассматриваться как перспективное будущее направление развития радиотехнических систем.

### Литература

1. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. New York: McGraw-Hill, 2001. 1150 p.
2. Kishore G. S., Rallapalli H. Performance Assessment of M-ary ASK, FSK, PSK, QAM and FQAM in AWGN Channel // Proceedings of International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP, 04–06 April 2019, Chennai, India). IEEE, 2019. PP. 0273–0277. DOI: 10.1109/ICCSP.2019.8697922
3. Варгаузин В. А., Цикин И. А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 352 с. EDN: SDSMUX
4. Ungerboeck G. Trellis-Coded Modulation with Redundant Signal Sets. Part I: Introduction // IEEE Communications Magazine. 1987. Vol. 25. Iss. 2. PP. 5–11.
5. Viterbi A. J., Wolf J. K., Zehavi E., Padovani R. A Pragmatic Approach to Trellis-Coded Modulation // IEEE Communications Magazine. 1989. Vol. 27. Iss. 7. PP. 11–19. DOI: 10.1109/35.31452
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.
7. Глушанков Е. И., Ву Т. З. Исследование простых и комбинированных сверточных кодов в радиотехнических системах // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025, Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 г.): сборник научных статей. В 3 т. Т. 2. СПб.: СПбГУТ, 2025. С. 74–79. EDN: LRKVIC
8. Королев А. И. Турбокоды и итеративное декодирование: учебно-методическое пособие. Минск: БГУИР, 2015. 74 с.
9. Фам К. К., Глушанков Е. И., Ву Т. З. Исследование адаптивных цифровых линий радиосвязи с обратной связью // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 3. С. 52–67. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-52-67. EDN: VZWUMY
10. Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. М.: Научно-техническое издательство Горячая линия-Телеком, 2004. 126 с. EDN: TPMDGJ
11. Schramm P. Multilevel Coding with Independent Decoding on Levels for Efficient Communication on Static and Interleaved Fading Channels // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'97, 01–04 September 1997, Helsinki, Finland). 1997. Vol. 3. PP. 1196–1200. DOI: 10.1109/PIMRC.1997.627075

12. Imai H., Hirakawa S. A New Multilevel Coding Method Using Error-Correcting Codes // IEEE Transactions on Information Theory. 1977. Vol. 23. Iss. 3. PP. 371–377. DOI: 10.1109/TIT.1977.1055718

13. Быховский М. А. Гиперфазовая модуляция – оптимальный метод передачи сообщений в гауссовских каналах связи. М.: Техносфера, 2018. 310 с.

**Статья поступила 22 сентября 2025 г.  
Одобрена после рецензирования 13 октября 2025 г.  
Принята к публикации 20 октября 2025 г.**

### **Информация об авторах**

*Ву Тхе Зуэт* – аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: vu.tz@sut.ru

*Глушанков Евгений Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: glushankov.ei@sut.ru

*Фам Конг Куен* – аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: fam.kk@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-2-69-81>  
EDN: OLWQTV

## Investigation of the Energy Efficiency of Signal-Code Constructions Based on Concatenated and Turbo Codes for Prospective Radio Communication Systems

 T. D. Vu ,  E. Glushankov,  K. K. Fam

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Problem Statement.** In modern radio engineering systems, achieving the necessary trade-off between energy and spectral efficiency is considered one of the most pressing tasks. In this context, the application of signal-code constructions through the rational combination of error-control coding methods and multi-position modulation appears to be a promising direction for the joint optimization of energy and spectral efficiency, which underscores the relevance of this research. **The purpose of the work:** to investigate the energy efficiency of signal-code constructions based on trellis coded modulation and multilevel coded modulation when combined with error-control concatenated codes and turbo codes. **The research method** is based on computer simulation in the MATLAB environment with the aim of evaluating various options for building signal-code constructions in radio communication systems by comparing the bit error rate as a function of the signal-to-noise ratio. **The scientific novelty** lies in the development and investigation of the energy efficiency of based on error-control concatenated and turbo codes within the frameworks of trellis and multilevel coded modulation and phase shift keying. **Results.** The simulation results demonstrate the increased energy efficiency of applying signal-code constructions based on the joint use of concatenated and turbo codes in trellis coded modulation and multilevel coded modulation schemes, compared to traditional approaches where coding and modulation are separated into distinct sequential processes. **Theoretical and practical significance:** the presented results can be applied in prospective radio communication systems with the aim of increasing energy and spectral efficiency during data transmission over channels with constant parameters and additive white Gaussian noise.

**Keywords:** signal-code constructions, trellis-coded modulation, multilevel coded modulation, error resilience, concatenated codes, turbo codes, phase shift keying

### Information about Authors

*Vu The Duyet* – the Postgraduate Student at the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications).  
E-mail: [vu.tz@sut.ru](mailto:vu.tz@sut.ru)

*Glushankov Evgeny* – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: [glushankov.ei@sut.ru](mailto:glushankov.ei@sut.ru)

*Fam Kong Kuen* – the Postgraduate Student at the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: [fam.kk@sut.ru](mailto:fam.kk@sut.ru)