

УДК 621.391.26

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.51.4.061](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.061)

Исследование помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций при различных моделях каналов

Т.З. Ву, Е.И. Глушанков✉

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

Резюме. Возрастающие требования к пропускной способности и надежности в современных системах беспроводной связи обуславливают необходимость в эффективных методах помехоустойчивого кодирования и многопозиционной модуляции. Сигнально-кодовые конструкции, в частности, решетчато-кодовая модуляция и кодовая модуляция с битовым перемежением, являются фундаментальными подходами для решения этой задачи. Данная работа представляет собой анализ производительности и качества указанных конструкций, выполненный посредством моделирования в среде MATLAB. Исследование охватывает широкий спектр канальных моделей: от канала с аддитивным белым гауссовским шумом до каналов с рэлеевскими и райсовскими замираниями, как с плоской, так и с частотно-селективной характеристикой. В контексте анализа сигнально-кодовых конструкций типа кодовой модуляции с битовым перемежением детально исследуется роль и количественная эффективность различных типов перемежителей. Полученные результаты не только определяют пределы эффективности каждой схемы, но и формируют основу для дальнейшей разработки методов по их улучшению. Результаты моделирования показывают высокую эффективность обеих типов сигнально-кодовых конструкций в канале Райса с плоской характеристикой и, кроме того, подтверждают ключевую роль и различие в производительности перемежителей для повышения общей помехоустойчивости в условиях канальных замираний.

Ключевые слова: сигнально-кодовые конструкции, решетчато-кодовая модуляция, кодовая модуляция с битовым перемежением, перемежитель, MATLAB.

Для цитирования: Ву Т.З., Глушанков Е.И. Исследование помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций при различных моделях каналов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2116> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.061

Investigation of the noise immunity of signal-code constructions in various channel models

T.D. Vu, E.I. Glushankov✉

*The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
Saint Petersburg, the Russian Federation*

Abstract. The increasing demands for throughput and reliability in modern wireless communication systems necessitate effective methods of error-control coding and multi-level modulation. Signal-code constructions, particularly trellis-coded modulation and bit-interleaved coded modulation, are fundamental approaches for solving this task. This paper presents an analysis of the performance and quality of the specified constructions, carried out through simulation in the MATLAB environment. The study covers a wide spectrum of channel models: from the additive white Gaussian noise channel to channels with Rayleigh and Rician fading, featuring both flat and frequency-selective characteristics. In the context of analyzing signal-code constructions of the bit-interleaved coded modulation type, the role and quantitative effectiveness of various interleaver types are investigated in detail. The obtained results not only define the performance limits of each scheme but also form a basis for the future development

of methods for their improvement. The simulation results show the high efficiency of both types of signal-code constructions in the flat Rician channel and, furthermore, confirm the key role and performance differences of interleavers in enhancing overall noise immunity under channel fading conditions.

Keywords: signal-code constructions, trellis-coded modulation, bit-interleaved coded modulation, interleaver, MATLAB.

For citation: Vu T.D., Glushankov E.I. Investigation of the noise immunity of signal-code constructions in various channel models. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=2116> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.061

Введение

В области современной цифровой связи существует фундаментальный компромисс между допустимой скоростью передачи данных, оцениваемой спектральной эффективностью, и надежностью передачи, измеряемой энергетической эффективностью. Данное соотношение ограничивается теоремой Шеннона о пропускной способности канала [1], которая определяет теоретический предел максимальной скорости передачи информации, достижимой с заданной степенью надежности в конкретном канале.

Однако приближение к этому пределу на практике сталкивается с рядом проблем, обусловленных неидеальностью канала передачи. Основой этих проблем является аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ), присущий всем электронным системам. Наряду с этим, для беспроводной среды более сложной задачей является явление многолучевых замираний, которое вызывает не только затухание, но и искажение сигнала, а также приводит к появлению коррелированных во времени ошибок (*пакетных ошибок*), что серьезно ухудшает производительность кодов с исправлением ошибок. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) представляют собой фундаментальные методы, разработанные для повышения эффективности системы передачи. Типичными представителями таких конструкций служат решетчато-кодовая модуляция (РКМ) и кодовая модуляция с битовым перемежением (КМБП). Хотя их эффективность в канале АБГШ хорошо изучена [2, 3], имеются работы и по их анализу в условиях замираний [4], однако поведение и пределы производительности данных конструкций при их использовании в сложных условиях замираний требуют более детального исследования.

В данной статье представлен анализ производительности и помехоустойчивости двух указанных СКК, выполненный посредством моделирования. Исследование охватывает широкий спектр канальных моделей, включая канал АБГШ, а также каналы с замираниями Рэлея и Райса, рассматриваемые как в сценариях с плоскими, так и с частотно-селективными замираниями. Цель работы заключается не в определении превосходящей конструкции, а в исследовании того, насколько эффективно данные схемы кодирования могут функционировать в различных канальных условиях. Особое внимание уделяется архитектуре КМБП, в рамках которой проводится углубленный анализ роли и влияния трех различных типов перемежителей: блочного, случайного и псевдослучайного.

Материалы и методы

Модели каналов передачи. При анализе систем связи фундаментальным является выбор модели непрерывного канала с АБГШ. Принятый сигнал в такой модели описывается как $y(t) = s(t) + n(t)$, где $s(t)$ – переданный сигнал, а $n(t)$ – гауссовский шум с нулевым средним. Однако в реальных беспроводных каналах сигнал также подвержен замираниям, вызванным многолучевым распространением, что приводит к

случайным изменениям амплитуды и фазы. В этом случае модель канала расширяется до вида: $y(t) = h(t) \cdot s(t) + n(t)$, где $h(t)$ – мгновенный отклик канала. Для его описания используются две основных статистические модели:

1. Канал с замираниями Райса: моделирует каналы с доминирующей компонентой прямой видимости (LOS – *аббр. от англ* Line-of-Sight). Характеризуется К-фактором – отношением мощности LOS-компоненты к мощности рассеянных компонент.

2. Канал с замираниями Рэлея: является частным случаем райсовского канала при отсутствии прямой видимости ($K = 0$). В этой модели амплитуда $|h(t)|$ подчиняется распределению Рэлея.

Помимо классификации замираний по статистическому распределению амплитуды, важным аспектом является воздействие канала на частотный спектр сигнала. Эта характеристика определяется соотношением между полосой пропускания сигнала (B_s) и полосой когерентности канала (B_c) [5], что приводит к двум основным сценариям:

1. Плоские замирания: возникают, когда $B_s \ll B_c$. В этом случае все частотные компоненты сигнала испытывают одинаковое затухание.

2. Частотно-селективные замирания: появляются, когда $B_s > B_c$, что приводит к неравномерному затуханию различных частотных компонент, вызывая искажения сигнала и межсимвольную интерференцию (МСИ).

Для борьбы с затуханием и искажениями, вызванными замираниями в канале, на приемной стороне необходимо применять методы выравнивания канала. В данной работе используется линейный эквалайзер, основанный на критерии минимума среднеквадратичной ошибки (МСКО). Цель МСКО-эквалайзера заключается в нахождении вектора весовых коэффициентов фильтра W для оценки переданного сигнала s по принятому сигналу y [6, 7]. При этом оценка сигнала в виде $\hat{s} = W^H y$ оптимизируется согласно условию МСКО $W = \min E [|s - \hat{s}|^2]$. Вектор коэффициентов эквалайзера определяется выражением: $W = [H^H H + N_0 I]^{-1} H^H$, где H – матрица канала, H^H – ее эрмитово-сопряженная матрица, N_0 спектральная плотность мощности шума, I – единичная матрица.

Теория сигнально-кодовых конструкций и методов перемежения. Решетчатая кодовая модуляция¹ представляет собой эффективный метод, применяемый в системах цифровой связи для повышения надежности и эффективности передачи данных. Суть метода заключается в совмещении помехоустойчивого кодирования со схемами модуляции, что позволяет достичь высокой производительности в каналах с сильными помехами. Для сохранения информационной скорости при добавлении избыточности кодирования в РКМ используется расширенное сигнальное созвездие. Это неизбежно приводит к уменьшению минимального евклидова расстояния между точками, что, на первый взгляд, должно вести к снижению энергетической эффективности. Однако, благодаря специальному принципу размещения точек в созвездии, известному как разбиение на множества, удается компенсировать это уменьшение и сохранить, а зачастую и улучшить, общую энергетическую эффективность. Таким образом, РКМ позволяет получить значительный выигрыш в кодировании при неизменной спектральной эффективности.

Кодовая модуляция с битовым перемежением – это метод, в котором стандартное помехоустойчивое кодирование, направленное на достижение высокой энергетической эффективности, сочетается с модуляцией высокого порядка с использованием *битового перемежителя* между кодером и модулятором. В отличие от интегрированных схем, таких как РКМ, архитектура КМБП обеспечивает гибкость за счет независимого выбора

¹ Варгаузин В.А., Цикин И.А. *Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2013. 347 с.

помехоустойчивого кода и сигнального созвездия. Ключевым компонентом архитектуры КМПБ является битовый перемежитель, играющий решающую роль в определении общей производительности системы. В каналах беспроводной связи, и в особенности в каналах с замираниями, перемежитель выступает важнейшим элементом для борьбы с пакетными ошибками. Его применение позволяет реализовать выигрыш от разнесения, обеспечиваемый канальным кодом. Таким образом, производительность системы КМПБ в значительной степени зависит от структуры применяемого перемежителя.

Выбор перемежителя часто представляет собой компромисс между эффективностью, сложностью реализации, требованиями к памяти и системной задержкой [8]. В каналах с замираниями сигнал испытывает затухание, что приводит к потере нескольких последовательных передаваемых символов и возникновению пакетных ошибок. Помехоустойчивые коды эффективны только против случайных ошибок; их корректирующая способность серьезно снижается при столкновении с пакетными ошибками. Путем перемешивания порядка битов перед модуляцией перемежитель обеспечивает распределение смежных битов в кодовом слове во времени в последовательности передаваемых символов. Вследствие этого, событие глубокого замирания, вызывающее ошибки в нескольких последовательных символах, после деперемежения на приемной стороне затронет лишь разрозненные биты внутри кодового слова. Это преобразует пакетную ошибку в несколько одиночных, почти случайных битовых ошибок, что позволяет декодеру исправлять их более эффективно.

Перемежители можно классифицировать на различные типы в зависимости от их архитектуры и метода генерации перестановок. Выбор и проектирование перемежителя не является тривиальной задачей и связано с необходимостью сбалансировать несколько конкурирующих технических факторов, в первую очередь, между эффективностью рассеивания ошибок и сложностью реализации.

Среди этих типов блочный перемежитель выделяется благодаря своей детерминированной структуре и простоте, что делает его одним из фундаментальных и наиболее широко применяемых методов. Наиболее распространенным видом блочного перемежителя является матричный перемежитель. Входной блок данных записывается в двумерную матрицу $K = M \times N$ по строкам. После полного заполнения матрицы данные считываются по столбцам для формирования перемешанного выходного потока битов. Процесс деперемежения на приемной стороне выполняет обратную операцию. Перемежитель определяется следующей формулой [8]:

$$\pi(i) = ((i - 1) \bmod N)M + [(i - 1)/N] + 1, i = 1, 2, \dots, MN.$$

Однако детерминированная и периодическая структура блочного перемежителя является и его основным недостатком. Для преодоления этого недостатка и достижения производительности, были предложены подходы, основанные на случайности. Случайный перемежитель использует перестановку, сгенерированную полностью случайным образом. Теоретически он обеспечивает наилучшую производительность с точки зрения рассеивания ошибок. Тем не менее, его неотъемлемым недостатком является требование к большому объему памяти для хранения одной и той же карты перестановок как на передающей, так и на приемной стороне, что делает его практическую реализацию затруднительной для многих приложений реального времени.

Для нахождения компромисса между высокой производительностью случайного перемежителя и практичностью структурированных подходов были разработаны псевдослучайные перемежители. S -случайный перемежитель относится к классу псевдослучайных перемежителей с ограничениями. В отличие от чисто случайного перемежителя, где перестановка генерируется без каких-либо правил, кроме уникальности позиций, S -случайный перемежитель разработан так, чтобы удовлетворять

определенному свойству расстояния, которое контролируется параметром S . Математически это условие определяется следующим образом [8]:

$$\text{если } |i - j| \leq S, \text{ то } |\pi(i) - \pi(j)| > S, i, j \in [1, 2, \dots, K], i \neq j,$$

где i и j – это индексы входных битов, $\pi(i)$ и $\pi(j)$ – соответствующие им выходные индексы. Иными словами, данный принцип гарантирует, что биты, близкорасположенные на входе (в пределах S), будут рассеяны на большое расстояние друг от друга на выходе (дальше, чем на S). Тем не менее, построение такого перемежителя сопряжено с практическими сложностями: вычислительная сложность и время выполнения алгоритма возрастают с увеличением параметра S , и, кроме того, отсутствует гарантия того, что допустимая перестановка всегда может быть найдена. Поэтому на практике значение S часто выбирается согласно эмпирическому правилу: $S < \sqrt{K/2}$, где K – длина блока. Алгоритм построения S -случайного перемежителя представлен ниже:

```
function interleaverIndices = s_random_interleaver(N, S)
    % N: количество элементов входных данных
    % S: Минимальное расстояние между элементами после перестановки
    P = 1:N;
    interleaverIndices = zeros(1, N); % массив для хранения результатов
    used = false(1, N);               % Отметить использованные элементы

    for t = 1:N
        % создать список доступных значений
        available = P(~used); % неиспользуемые элементы
        if t > 1
            available(abs(available - interleaverIndices(t-1)) < S) = [];
            %удалить элементы, которые не удовлетворяют условию
        end
        % случайным образом выбрать элемент из доступного списка
        if ~isempty(available)
            selected = available(randi(length(available)));
        else
            error('Невозможно создать перемежитель, если S слишком
велико. ');
        end
        % Обновить результаты и отметить использованные элементы
        interleaverIndices(t) = selected;
        used(selected) = true;
    end
end
```

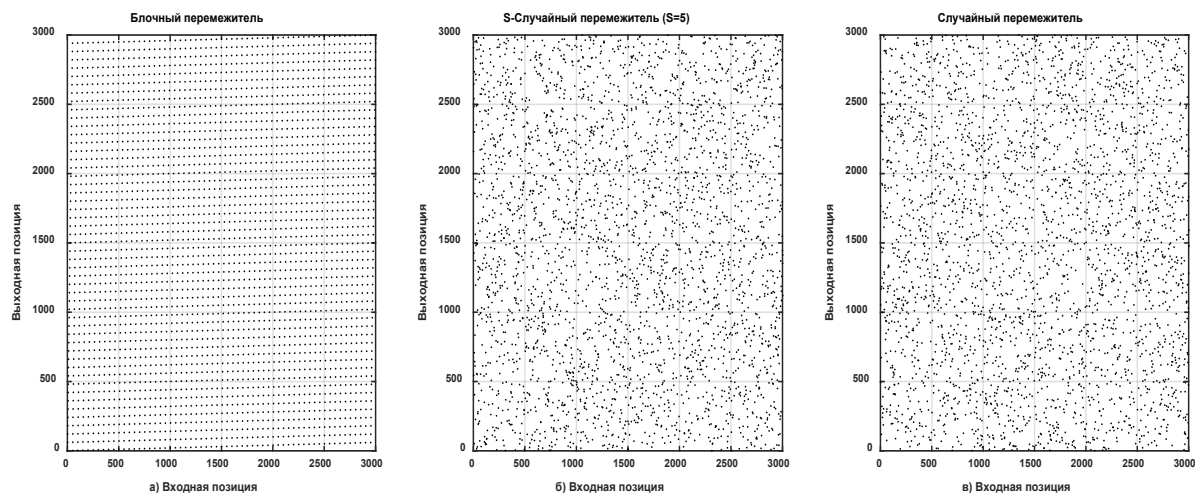



Рисунок 1 – Взаимосвязь между позицией входного бита и позицией выходного бита для перемежителей

Figure 1 – Relationship between input and output bit positions for the interleavers

Вышеописанные теоретические различия между перемежителями обуславливают их совершенно разные перестановочные и рассеивающие свойства. Для наглядной демонстрации этого проведем визуальный анализ их структуры. Результаты моделирования, представленные на Рисунке 1, дают как визуальное, так и глубокое количественное представление об основных характеристиках трех архитектур: блочного, S -случайного и чисто случайного перемежителей. Рисунок 1а демонстрирует четкую периодическую и регулярную структуру блочного перемежителя, что подтверждает детерминированную природу перестановки. Несмотря на изменение позиций битов, полная декорреляция не достигается. В отличие от этого, на Рисунках 1б и 1в, где используются S -случайный и случайный перемежители, какая-либо явная структура отсутствует. Это иллюстрирует основную цель перемежителя – декорреляцию позиций на входе и выходе.

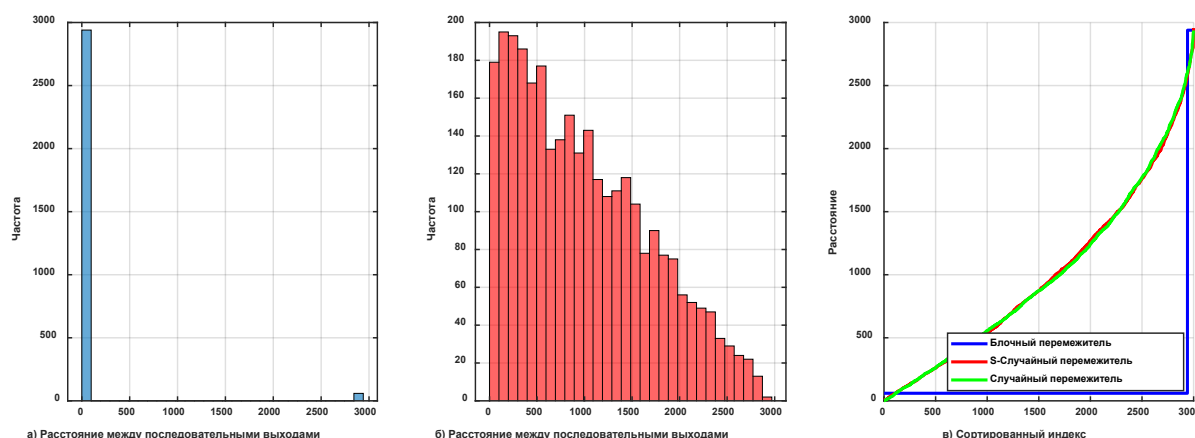


Рисунок 2 – Статистическое распределение расстояний между позициями выходных битов

Figure 2 – Statistical distribution of distances between output bit positions

На Рисунке 2 представлен анализ расстояний между последовательными выходными позициями битов. Рисунок 2а для блочного перемежителя характеризуется двумя ярко выраженными пиками. Высокий пик на малых расстояниях показывает, что большинство последовательных выходных битов происходят от очень близких входных

битов, в то время как второй, меньший пик соответствует большому расстоянию. Такое распределение указывает на низкий коэффициент рассеивания. В то же время Рисунок 2б демонстрирует гораздо более равномерное распределение. Случайный выбор выходных позиций для каждого входного бита приводит к непрерывному и разнообразному спектру расстояний. Важно отметить, что он не только создает высокую степень декорреляции, но и гарантирует минимальное расстояние разделения, исключая неблагоприятные случаи отображения, которые могут снизить производительность декодера.

Наконец, Рисунок 2в обобщает эти данные в виде интегральных функций распределения. Для блочного перемежителя кривая сначала растет очень медленно, а затем совершает резкий, почти вертикальный скачок, подтверждая, что большинство выходных позиций разделены малым расстоянием. В противоположность этому, кривые для S -случайного и случайного перемежителей показывают плавный и практически линейный рост, указывая на равномерное распределение расстояний во всем диапазоне. Тот факт, что кривые для S -случайного и случайного перемежителей почти совпадают, доказывает, что S -случайный подход успешно достигает статистических характеристик истинно случайного алгоритма, оставаясь при этом конструктивным.

Результаты и обсуждение

Основываясь на изложенных теоретических положениях, касающихся моделей каналов и методов выравнивания, в данном разделе проводится анализ экспериментальной производительности. В частности, представлено детальное исследование двух СКК: РКМ и КМБП. Эффективность этих систем, количественно оцениваемая через коэффициент битовых ошибок (BER), исследуется и сопоставляется в условиях канала с АБГШ, а также в каналах с замираниями Райса и Рэлея на основе модуляции 8-PSK (8-Phase Shift Keying) и 16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation). С целью обеспечения реалистичности моделирования, для каналов с замираниями была принята доплеровская частота 20 Гц, а для райсовского канала – К-фактор, равный 4.

Первой исследуемой архитектурой является РКМ. Для ее реализации в обеих конфигурациях (8-PSK и 16-QAM) используется кодер с длиной кодового ограничения $K = 4$. Решетчатая диаграмма, иллюстрирующая переходы состояний и соответствующие выходные символы для используемых кодеров, представлена на Рисунке 3. Число состояний кодера составляет $2^{K-1} = 2^3 = 8$. При этом для модуляции 8-PSK общее число выходных символов также равно $2^3 = 8$, в то время как для модуляции 16-QAM оно составляет $2^4 = 16$. Следует отметить, что в схеме модуляции 16-QAM кодер использует параллельные переходы. По этой причине, фундаментальная структура переходов между состояниями остается идентичной решетчатой диаграмме, используемой для 8-PSK [5].

На Рисунке 4 представлены кривые BER данной системы, полученные в различных моделях каналов передачи. Эффективность системы исследовалась в различных моделях каналов передачи. Прежде всего, из результатов моделирования видно, что система достигает своих оптимальных показателей в канале с АБГШ, который служит эталонной кривой. В отличие от этого, во всех типах каналов с замираниями наблюдается существенная деградация рабочих характеристик. В условиях плоских замираний, райсовский канал демонстрирует более высокую эффективность по сравнению с рэлеевским, что объясняется наличием LOS, которая смягчает негативное воздействие затухания.

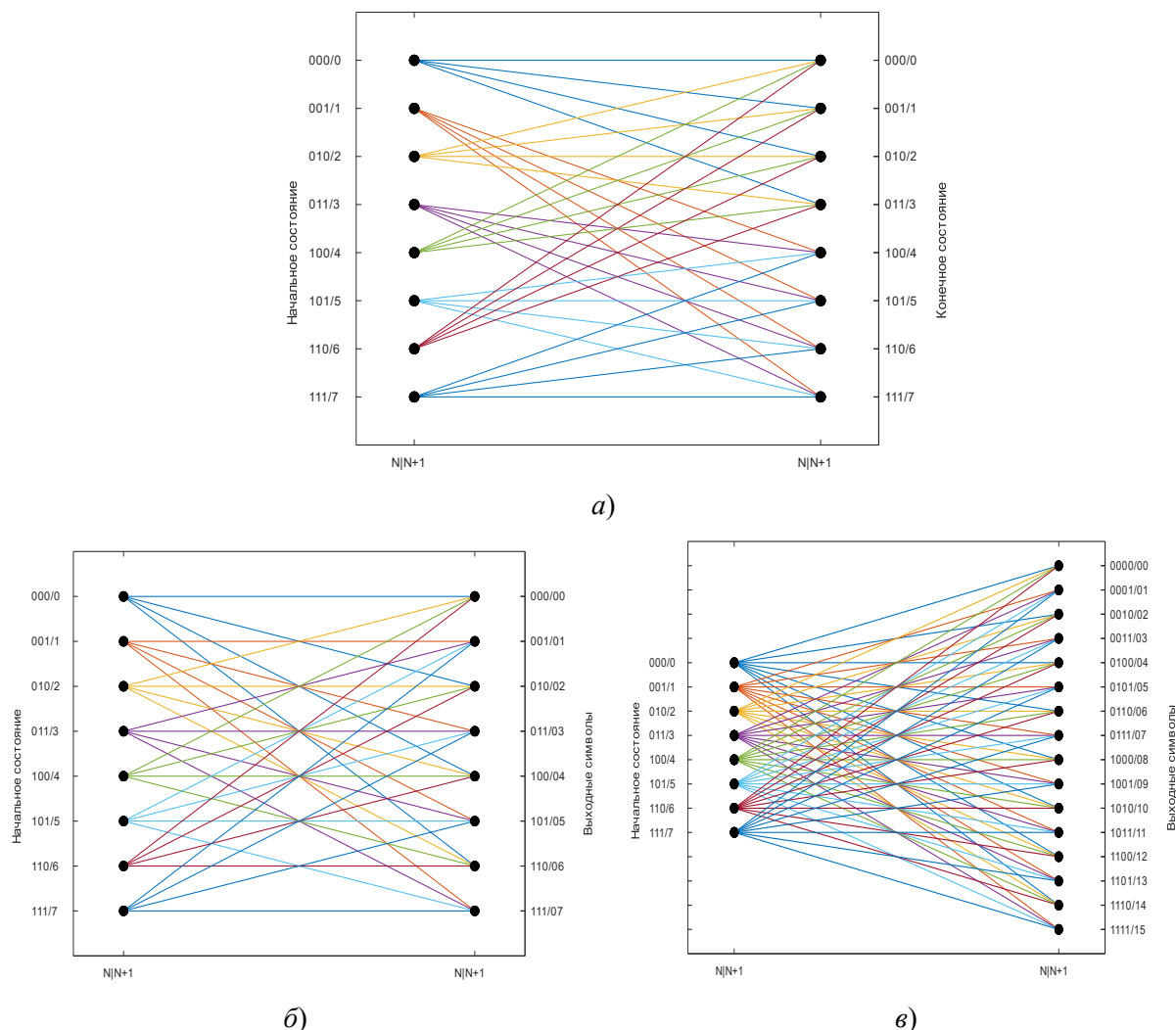


Рисунок 3 – Решетчатая диаграмма для 8-PSK и 16-QAM: *a* – диаграмма переходов состояний; *б* – диаграмма выходных символов 8-PSK; *в* – диаграмма выходных символов 16-QAM
 Figure 3 – Trellis diagrams for 8-PSK and 16-QAM: *a* – state transition diagram; *b* – 8-PSK output symbol diagram; *c* – 16-QAM output symbol diagram

В то же время, в каналах с частотно-селективными замираниями происходит катастрофическое ухудшение корректирующей способности, что справедливо как для райсовской, так и для рэлеевской моделей. Соответствующие кривые BER демонстрируют наличие ошибок, приводящих к невозможности или затруднительности демодуляции, или так называемый «пол ошибок», при котором коэффициент битовых ошибок остается на высоком уровне (на уровне $10^{-1} - 10^{-2}$) и практически не улучшается с ростом отношения E_b/N_0 . Таким образом, полученные результаты подчеркивают необходимость интеграции дополнительных методов для борьбы с последствиями замираний, чтобы повысить общую эффективность и приблизиться к предельным характеристикам, достигаемым в канале АБГШ.

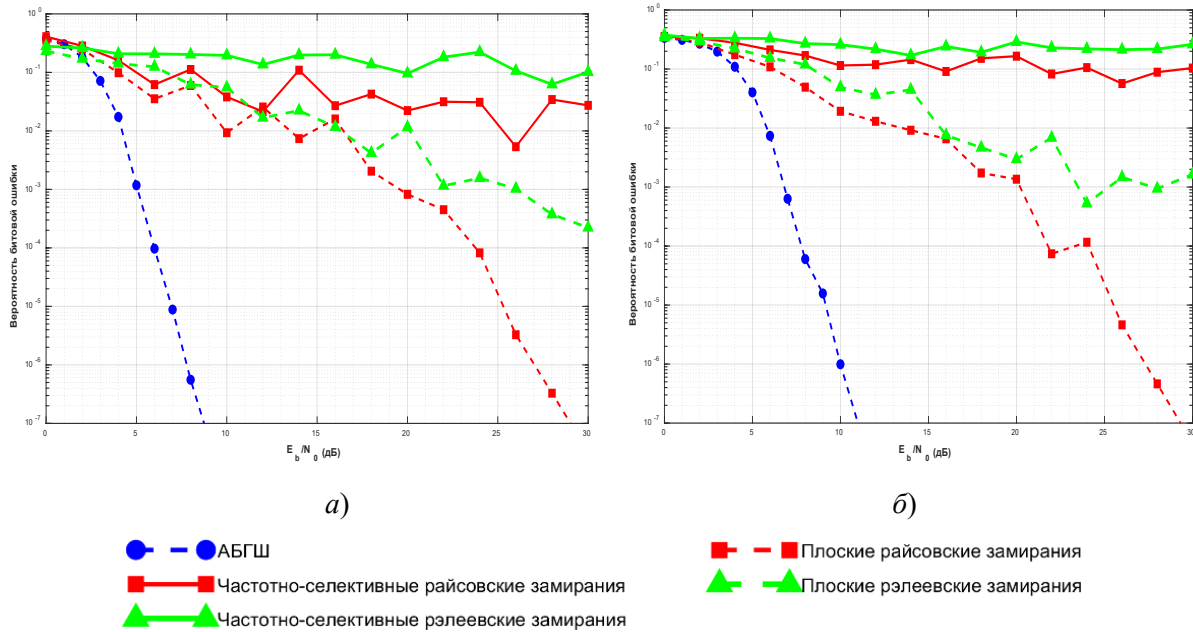


Рисунок 4 – Эффективность исправления ошибок РКМ в различных каналах передачи:
а – 8 PSK модуляция; б – 16 QAM модуляция

Figure 4 – Error correction performance of TCM in various transmission channels:
а – 8-PSK modulation; б – 16-QAM modulation

Далее представлен анализ эффективности системы КМБП. На Рисунке 5 приведены сравнительные результаты анализа BER для двух видов канальных кодов: кода БЧХ (15,5) и турбокода (кодовая скорость 1/2, длина кодового ограничения $K = 4$). Обе схемы кодирования были интегрированы с тремя различными структурами перемежения – блочной, случайной и псевдослучайной и оценены в канале с АБГШ. Полученные данные однозначно показывают, что турбокод, благодаря своей итеративной структуре декодирования, демонстрирует значительно более высокую эффективность по сравнению с кодом БЧХ во всех рассмотренных конфигурациях перемежителей. При рассмотрении кода БЧХ в отдельности, можно отметить, что показатели всех трех перемежителей в канале АБГШ практически идентичны. Это объясняется природой канала АБГШ, который вызывает независимые и случайные ошибки, в отличие от пакетных ошибок, характерных для каналов с замираниями. Следовательно, способность случайного и псевдослучайного перемежителей к рассеиванию ошибок не дает явного преимущества перед более простой блочной структурой в данных условиях.

В свою очередь, для турбокодов перемежитель играет ключевую роль даже в канале с АБГШ [8, 9]. Их итеративная структура декодирования основана на обмене «мягкой» информацией между компонентными декодерами через блоки перемежителя и деперемежителя. Эффективность данного процесса напрямую зависит от свойств используемого перемежителя^{2,3}. Результаты сравнения детерминированных и случайных перемежителей представлены в [8, 10], которые показывают, что вероятность исправления ошибок при использовании случайного и псевдослучайного перемежителей практически не различается, однако оба этих типа демонстрируют явное превосходство над блочным перемежителем. В частности, псевдослучайный перемежитель

² Королев А.И. Турбокоды и итеративное декодирование. Минск: БГУИР; 2015. 74 с.

³ Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Москва: Горячая линия-Телеком; 2004. 126 с.

обеспечивает кодовый выигрыш порядка 0,3–0,5 дБ по сравнению с блочным как для модуляции 8-PSK, так и для 16-QAM.

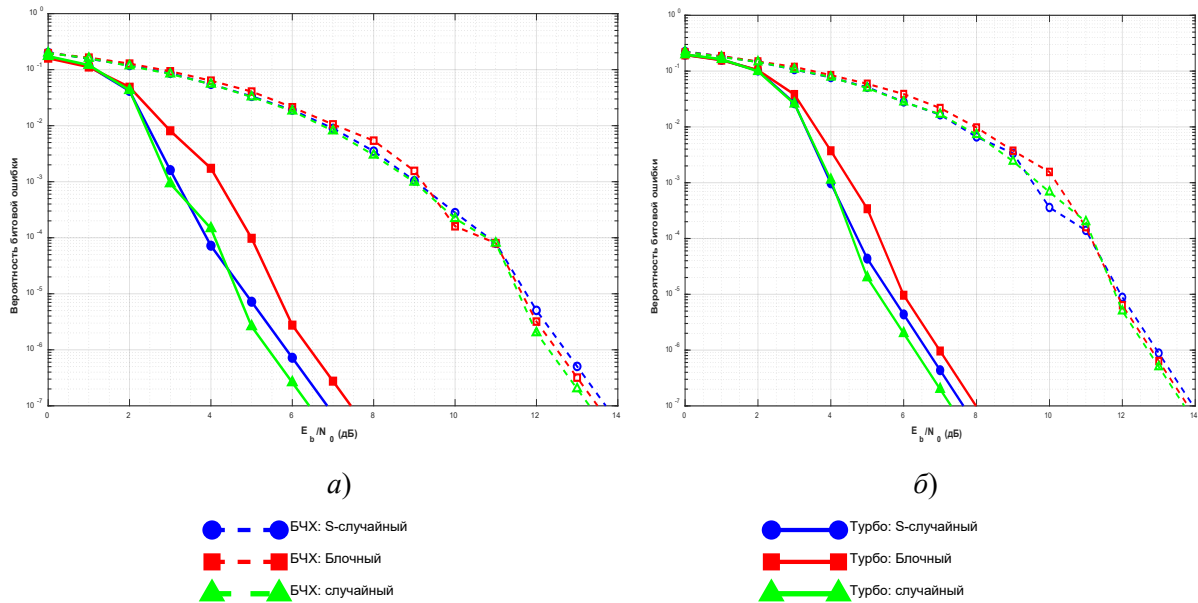


Рисунок 5 – Эффективность исправления ошибок КМПБ в различных перемежителях:

а – 8 PSK модуляция; б – 16 QAM модуляция

Figure 5 – Error correction performance of BICM with different interleavers:

а – 8-PSK modulation; б – 16-QAM modulation

На Рисунках 6 и 7 представлен детальный анализ производительности архитектуры КМПБ, в рамках которого сравниваются турбокод и код БЧХ (15,5) в сочетании с тремя структурами перемежения. Исследование проведено для четырех различных сценариев каналов с замираниями при использовании модуляции 8-PSK и 16-QAM. В среде с плоскими райсовскими замираниями система КМПБ достигает высокой эффективности в исправлении ошибок. Кривые BER как для турбокода, так и для кода БЧХ демонстрируют явную тенденцию к снижению с ростом отношения E_b/N_0 . При переходе к каналу с плоскими рэлеевскими замираниями, хотя система и сохраняет способность к исправлению ошибок, наблюдается очевидная деградация характеристик по сравнению с райсовским каналом. В частности, для модуляции 8-PSK это ухудшение соответствует проигрышу в кодировании порядка 2–4 дБ при $BER = 10^{-5}$. Эта деградация становится еще более выраженной для модуляции 16-QAM. Несмотря на то, что в ходе моделирования BER улучшается с ростом E_b/N_0 , наклон кривой эффективности значительно меньше. Это указывает на ограниченную корректирующую способность в этих условиях, где точки в сигнальном созвездии становятся более чувствительными к флуктуациям, вызванным замираниями.

Аналогично случаю с системой РКМ, работоспособность архитектуры КМПБ ухудшается в средах с частотно-селективными замираниями. Кривые BER демонстрируют наличие «пола ошибок», при котором увеличение отношения E_b/N_0 практически не приводит к улучшению коэффициента ошибок. В частотно-селективном рэлеевском канале коэффициент ошибок ограничен очень высоким уровнем, колеблясь в диапазоне от 10^0 до 10^{-1} . В свою очередь, в частотно-селективном райсовском канале, несмотря на незначительное улучшение, вероятность исправления ошибок все равно сохраняется на уровне от 10^{-1} до 10^{-2} . Основной причиной этого явления является

серьезная МСИ, вызванная частотной селективностью канала. Данный результат подтверждает, что в каналах с частотной селективностью одного лишь канального кодирования и перемежения недостаточно для обеспечения надежной связи.

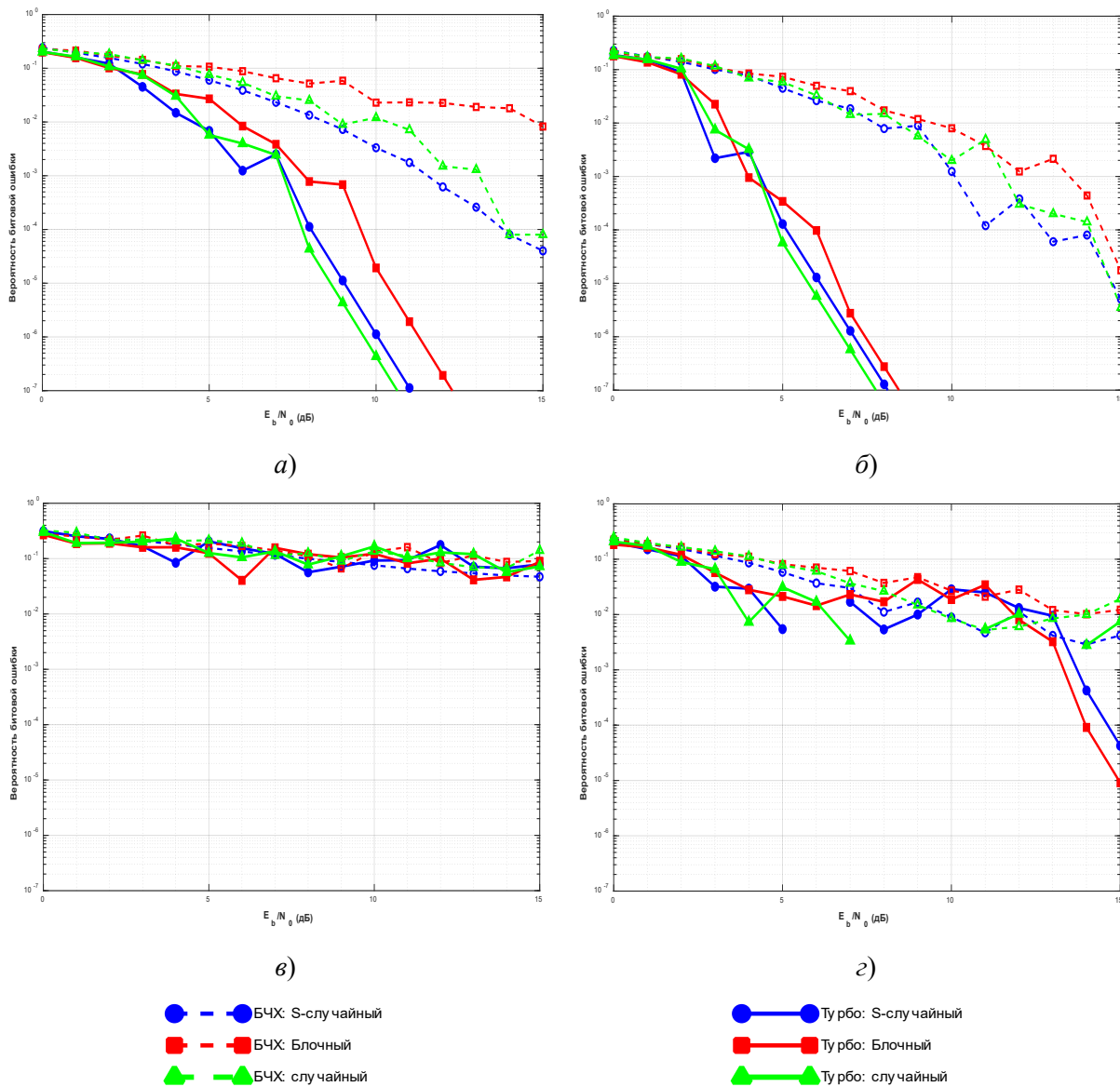


Рисунок 6 – Эффективность исправления ошибок КМПБ в канале с замиранием при модуляции 8-PSK: а – плоские рэлеевские замирания; б – плоские райсовские замирания; в – частотно-селективные рэлеевские замирания; г – частотно-селективные райсовские замирания
Figure 6 – Error correction performance of BICM with 8-PSK modulation in fading channels: а – flat Rayleigh fading; б – Flat Rician fading; в – frequency-selective Rayleigh fading; г – frequency-selective Rician fading

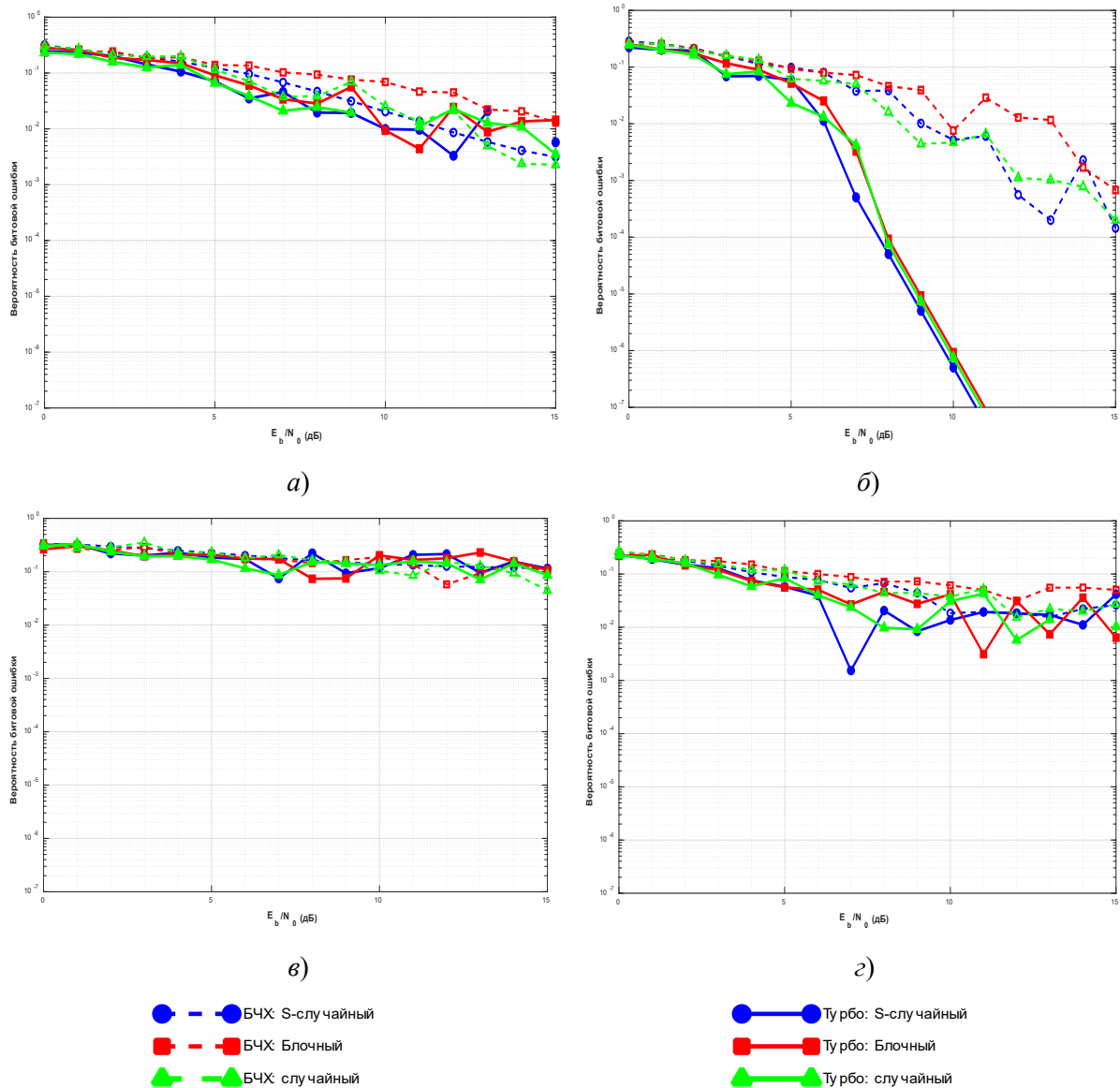


Рисунок 7 – Эффективность исправления ошибок КМПБ в канале с замиранием при модуляции 16 QAM: а – плоские рэлеевские замирания; б – плоские райсовские замирания; в – частотно-селективные рэлеевские замирания; г – частотно-селективные райсовские замирания

Figure 7 – Error correction performance of BICM with 16-QAM modulation in fading channels:
а – flat Rayleigh fading; б – flat Rician fading; в – frequency-selective Rayleigh fading;
г – frequency-selective Rician fading

Результаты моделирования также позволяют оценить роль перемежителей в условиях плоских замираний, где система сохраняет высокую корректирующую способность. В этих сценариях становится очевидным преимущество тех структур перемежения, которые обладают хорошими рассеивающими свойствами. В частности, для системы с турбокодированием при использовании модуляции 8-PSK в канале с плоскими рэлеевскими замираниями, псевдслучайный перемежитель обеспечивает кодовый выигрыш приблизительно в 2 дБ по сравнению с блочным перемежителем при значении BER, равном 10^{-5} . Этот выигрыш снижается до 0,5 дБ в более благоприятном райсовском канале. Аналогичная тенденция наблюдается и для системы с кодированием БЧХ, где псевдслучайный перемежитель также демонстрирует существенное улучшение характеристик по сравнению с его блочным аналогом. Таким образом,

полученные данные подтверждают важность выбора соответствующей структуры перемежителя для максимизации эффективности канального кода в условиях замираний.

Заключение

В данной статье была проведена оценка и сопоставление производительности двух классических СКК: РКМ и КМБП в различных моделях каналов с замираниями. Было установлено, что обе схемы кодирования демонстрируют эффективную работу в условиях плоских замираний, в особенности, в райсовском канале. Вместе с тем их эффективность существенно снижается в каналах с частотно-селективными замираниями. Этот факт подчеркивает необходимость интеграции дополнительных методов, таких как усовершенствованные техники выравнивания канала или схемы разнесения, для обеспечения надежной связи в подобных условиях.

Наряду с этим, исследование прояснило ключевую роль перемежителя в архитектуре КМБП. Сравнительный анализ показал, что случайный и псевдослучайный перемежители обладают практически эквивалентной эффективностью и оба демонстрируют значительное превосходство над традиционным блочным перемежителем в способности разрушать структуру пакетных ошибок. Это, в свою очередь, позволяет обеспечить существенный кодовый выигрыш в каналах с замираниями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*. 1948;27(3):379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
2. Ungerboeck G. Channel Coding with Multilevel/Phase Signals. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1982;28(1):55–67. <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056454>
3. Le Goff S.Y. Signal Constellations for Bit-Interleaved Coded Modulation. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2003;49(1):307–313. <https://doi.org/10.1109/TIT.2002.806152>
4. Глушанков Е.И., Елисеев Н.К. Анализ энергетической и спектральной эффективности сигналов в радиоканалах с замираниями. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2025;(2):5–13. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2025-2-5-13>
Glushankov E.I., Eliseev N.K. Analysis of Signals' Energy and Spectral Efficiency in Radio Channels with Fading. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2025;(2):5–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2025-2-5-13>
5. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. Москва: Издательский дом «Вильямс»; 2003. 1104 с.
Sklar B. *Digital Communications. Fundamentals and Applications*. Moscow: Izdatel'skii dom "Vil'yams"; 2003. 1104 p. (In Russ.).
6. Jiang Y., Varanasi M.K., Li J. Performance Analysis of ZF and MMSE Equalizers for MIMO Systems: An In-Depth Study of the High SNR Regime. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2011;57(4):2008–2026. <https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2112070>
7. Proakis J.G. *Digital Communications*. New York: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
8. Баринов А.Ю. Перемежение в канальном кодировании: свойства, структура, специфика применения. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;(1). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.13>
Barinov A.Y. Interleaving in Channel Coding: Properties, Structure, Applications. *Journal of Radio Electronics*. 2019;(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.13>

9. Колобков А.В., Хитева Д.В. Выбор типа внутреннего перемежителя для сверточного турбокода (13,15)₈. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2024;(2):15–25. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2024-2-15-25>
Kolobkov A.V., Khiteva D.V. Type Selection of Internal Interleaver for Convolutional Turbocode (13,15)₈. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2024;(2):15–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2024-2-15-25>
10. Раджабов Х.М., Раджабов У.М., Полушин П.А., Никитин О.Р. Декодирование сверточных кодов в условиях перемежения символов. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2018;(3):46–53.
Radzhabov H.M., Radzhabov U.M., Polushin P.A., Nikitin O.R. Convolutional Code Decoding Amid Symbol Interlacing. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2018;(3):46–53. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ву Тхе Зуэт, аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: vu.tz@sut.ru
ORCID: [0009-0005-0095-8352](https://orcid.org/0009-0005-0095-8352)

Vu The Duyet, Postgraduate at the Department of Radio Engineering, The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, the Russian Federation.

Глушанков Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: glushankov57@gmail.com
ORCID: [0000-0003-4148-3208](https://orcid.org/0000-0003-4148-3208)

Evgeniy I. Glushankov, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Radio Engineering, The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025; одобрена после рецензирования 15.12.2025; принята к публикации 22.12.2025.

The article was submitted 31.10.2025; approved after reviewing 15.12.2025; accepted for publication 22.12.2025.