

УДК 621.391.1

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.002](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.002)

Исследование методов разнесенного приема в радиоканалах с замираниями

К.К. Фам, Е.И. Глушанков✉

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

Резюме. Современные системы цифровой радиосвязи предъявляют высокие требования к энергетической и спектральной эффективности при воздействии различных типов помех, особенно в сложных условиях распространения радиоволн. В связи с этим вопросы исследования существующих методов работы в радиоканалах с замираниями, а также разработки новых методов для решения данной задачи являются актуальными. Цель настоящей работы заключается в исследовании методов разнесенного приема, направленных на повышение устойчивости радиосигнала к замираниям. В рамках исследования рассматриваются подходы к комбинированию известных методов разнесения, а также предлагается новый модифицированный метод пространственного приема. Используемые методы: сравнение различных вариантов комбинирования методов разнесенного приема в пространстве в адаптивной системе с обратной связью основано на моделировании в среде MATLAB воздействия различных замираний на процесс передачи данных в канале. Новизна: предлагаемый метод разнесения предполагает выполнение комбинирования сигналов методом оптимального сложения при разнесенном приеме только на определенном количестве приемных антенн, которое выбирается на основе результатов оценки состояния канала, поскольку сложение сигналов от всех приемных антенн, когда качество принимаемого сигнала является высоким, не представляется необходимым, а только существенным образом усложняет решение. Результаты: использование предлагаемого решения обладает преимуществами по сравнению с методом оптимального сложения, поскольку оно снижает вычислительную сложность, так как суммирование сигналов происходит не от всех, а только от части приёмных антенн. Предлагаемое решение целесообразно применять в тех случаях, когда необходимо одновременно обеспечить высокую энергетическую и спектральную эффективность цифровых радиосистем. Особую актуальность данное решение приобретает в условиях ухудшенного качества приема, вызванного воздействием внешней среды с выраженным эффектом замираний.

Ключевые слова: разнесенный прием, метод автовыбора, метод сложения с равными весами, метод оптимального сложения, адаптивная система с обратной связью, помехоустойчивое кодирование, канал с замираниями.

Для цитирования: Фам К.К., Глушанков Е.И. Исследование методов разнесенного приема в радиоканалах с замираниями. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1944> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.002

Investigation of diversity reception methods in radio channels with fading

K.K. Fam, E.I. Glushankov✉

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

Abstract. Modern digital radio communication systems impose stringent requirements on energy and spectral efficiency under the influence of various types of interference, particularly in challenging radio wave propagation conditions. Consequently, the investigation of existing methods for operating in radio

channels with fading, as well as the development of new approaches to address this challenge, remains highly relevant. The primary objective of this study is to investigate diversity reception techniques aimed at enhancing signal robustness against fading. The study examines approaches to combining known diversity methods and proposes a new modified spatial reception method. The methodology employed includes a comparative analysis of various combinations of spatial diversity reception techniques within an adaptive feedback system, based on simulations conducted in the MATLAB environment to evaluate the impact of different fading types on data transmission in a channel with feedback. The novelty of this work lies in the proposed diversity method, which involves signal combining through optimal summation in diversity reception, performed only on a selected subset of receiving antennas. This subset is determined based on channel state estimation results, as summing signals from all receiving antennas is deemed unnecessary and significantly increases complexity when the received signal quality is already high. The results demonstrate that the proposed solution offers advantages over the conventional optimal summation method by reducing computational complexity, as signal summation is limited to a portion of the receiving antennas rather than all of them. The proposed solution is particularly suitable for applications requiring simultaneous optimization of both energy efficiency and spectral efficiency in digital radio systems. Its relevance becomes especially pronounced under degraded reception conditions caused by environmental factors inducing severe fading effects.

Keywords: diversity reception, selection combining, equal gain combining, maximal ratio combining, adaptive system with feedback, error-control coding, fading channel.

For citation: Fam K.K., Glushankov E.I. Investigation of diversity reception methods in radio channels with fading. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1944> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.002

Введение

С развитием современных систем беспроводной связи возрастают требования к передаче большого объема информации с высокой скоростью, при этом необходимо также обеспечивать качество приема информации. Однако процесс передачи происходит при воздействии множества типов помех в реальных условиях, среди которых влияние замираний существенно ухудшает качество принимаемого сигнала. Именно поэтому нахождение методов повышения качества сигнала в условиях замираний является актуальной проблемой. В настоящее время известен ряд решений задачи повышения помехоустойчивости цифровых систем радиосвязи на основе следующих подходов [1]:

- 1) разнесенный прием;
- 2) адаптация;
- 3) применение обратной связи;
- 4) применение современных и эффективных методов кодирования и модуляции.

Для оценки эффективности методов, перечисленных выше, в данной работе исследуются эти методы в различных условиях замираний. На основе этого предлагаются возможности комбинирования данных методов с целью максимального снижения воздействия различных типов помех на передаваемый сигнал.

Материалы и методы

Канал с замираниями. Предположим, что переданный сигнал и сигнал, полученный после его передачи через канал с замираниями, представлены следующими выражениями:

$$S_{\text{пер}} = A(t) \cos[\omega_0 t + \psi(t)]. \quad (1)$$

$$S_{\text{пр}}(t) = b(t)A(t - \tau) \cos[\omega_0 t + \psi(t - \tau) - \phi(t)] + n(t), \quad (2)$$

где $b(t)$ характеризует амплитудные замирания, $\phi(t)$ – фазовый сдвиг по несущей частоте.

Для описания изменения $b(t)$ и $\phi(t)$ можно использовать распределение вероятностей, называемое четырехпараметрическим законом распределения. Аналитически это распределение может быть представлено в следующем виде [2, 3]:

$$w(b) = \frac{b}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{b^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_x^2 \sigma_y^2 + m_y^2 \sigma_x^2}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) \times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(2k+2s-1)!(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^k m_y^{2s} \sigma_x^{2s}}{k!(2s)! 2^k \sigma_y^{2k+4s} m_x^{k+s}} \times b^{k+s} I_{k+s}\left(\frac{m_x}{\sigma_x^2} b\right), \quad (3)$$

$$\omega(\phi) = [\sigma_x \sigma_y \exp\left(\frac{m_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_y^2}{2\sigma_y^2}\right) / 2\pi(\sigma_y^2 \cos^2 \phi + \sigma_x^2 \sin^2 \phi)] \times \{1 + K\sqrt{\pi} \exp(K^2)[1 + \Phi(\sqrt{2}K)]\}, \quad (4)$$

$$K = \frac{m_x \sigma_y^2 \cos \phi + m_y \sigma_x^2 \sin \phi}{\sigma_x \sigma_y \sqrt{\sigma_y^2 \cos^2 \phi + \sigma_x^2 \sin^2 \phi}}, \quad (5)$$

где m_x , σ_x^2 , m_y , σ_y^2 – математическое ожидание и дисперсия квадратурных компонент x и y соответственно; $I_{k+s}(Z)$ – модифицированная функция Бесселя порядка $k+s$; k и s – число неоднородностей в радиоканале по координатам x и y соответственно; $\Phi(\cdot)$ – интеграл вероятности.

При комбинировании различных значений четырех параметров m_x , σ_x^2 , m_y , σ_y^2 такого распределения можно описать ряд широко распространенных распределений, обычно используемых при моделировании каналов с замираниями, таких как распределение Рэлея, Райса, нормальное, усеченно-нормальное и другие. В связи с этим данное распределение и называется четырехпараметрическим распределением.

С соответствующими значениями $m_x \neq 0$; $m_y = 0$; $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma$ выражение (3) превращается в распределение Райса, которое характеризует явление, при котором принимаемый сигнал формируется за счет многолучевости и наличия прямой видимости между передатчиком и приемником:

$$w(b) = \frac{b}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(b^2 + m_x^2)}{2\sigma^2}\right] I_0\left[\frac{bm_x}{\sigma^2}\right]. \quad (6)$$

В случае отсутствия прямой видимости ($m_x = 0$) распределение Райса превращается в распределение Рэлея:

$$w(b) = \frac{b}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{b^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (7)$$

Одним из наиболее эффективных способов снижения воздействия затухания канала на качество передачи сигнала является использование разнесенного приема [4], при котором сигнал принимается несколькими антеннами, разнесенными в пространстве. Для реализации предложенного метода требуется использование одной передающей антенны и нескольких приемных антенн, при этом выбор расстояния между приемными антеннами должен обеспечивать выполнение условия, при котором интерференционные замирания сигнала в лучах разнесения являются некоррелированными.

На основе комбинирования сигналов из различных ветвей разнесения классификация методов комбинирования при разнесенном приеме может быть представлена следующим образом [5]:

1) автовыбор (англ. *Selection Combining, SC*);

- 2) сложение с равными весами (англ. *Equal Gain Combining, EGC*);
- 3) оптимальное сложение (англ. *Maximal Ratio Combining, MRC*).

Для удобства исследования трёх вышеуказанных методов преобразуем выражение (3) к следующему виду:

$$S_{\text{пр}}(t) = b(t)A(t - \tau) \exp\{j[\psi(t - \tau) - \phi(t)]\} + n(t) = h(t)S_{\text{пер}}(t - \tau) + n(t). \quad (8)$$

где $h(t) = [b(t) \exp(-j - \phi(t))]$ – коэффициент передачи в каждой ветви; $S_{\text{пер}}(t - \tau)$ – передаваемый сигнал с учетом задержки.

Методы разнесенного приема.

Метод автовыбора. Основная идея этого метода заключается в выборе одной из ветвей на основе какого-либо признака, связанного с наибольшей мощностью сигнала. В данном случае можно выбрать сигнал на основе оценки отношения сигнал/шум в каждой ветви, то есть с использованием значения $|h(t)|^2$. При этом полученный сигнал представлен следующими выражениями:

$$S_{\text{прSC}}(t) = h_{i^*}(t)S_{\text{пер}}(t - \tau) + n(t), \quad (9)$$

где i^* – индекс ветви с наилучшим значением $|h(t)|^2$.

Достоинством этого метода является наиболее простая реализация алгоритма. В случае, если принятый сигнал обладает хорошим качеством, данный метод оказывается эффективным, снижая сложность системы, поскольку обработка осуществляется только для сигнала, полученного от одной из приемных антенн. Однако это также является недостатком данного метода, поскольку в условиях сильных помех, когда сигнал подвергается значительным потерям, использование только одной антенны не обеспечивает достаточной эффективности [6, 7].

Метод сложения с равными весами. Данный метод позволяет устранить недостатки метода автовыбора, так как этот метод объединяет сигналы со всех ветвей, что обеспечивает более высокую эффективность. Для этого метода не требуется оценивать коэффициент передачи на всех ветвях, а лишь синхронизировать фазы всех полученных сигналов и складывать их с равными весами [7, 8]. Сигнал, полученный после применения метода EGC, представлен следующими выражениями:

$$S_{\text{прEGC}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{пр}}(t) e^{-j\angle h_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_i| S_{\text{пер}}(t - \tau) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n(t) e^{-j\angle h_i}, \quad (10)$$

где N – количество ветвей.

Метод оптимального сложения. Данный метод обеспечивает более высокую эффективность по сравнению с двумя предыдущими методами. Эффективность этого метода достигается за счет вычисления коэффициента передачи на всех ветвях и выполнения комбинирования сигналов с учетом результатов этих вычислений [9, 10]. В данном случае принятый сигнал описывается следующим выражением:

$$S_{\text{прMRC}}(t) = \sum_{i=1}^N S_{\text{пр}}(t) h_i^* = (\sum_{i=1}^N |h_i|^2) S_{\text{пер}}(t - \tau) + \sum_{i=1}^N n(t) h_i^*, \quad (11)$$

где h_i^* – комплексно-сопряженный коэффициент передачи h_i .

Хотя этот метод и обладает высокой эффективностью, его реализация отличается значительной сложностью, поскольку требуется определение коэффициента передачи для всех приемных антенн. Один из предлагаемых вариантов решения этой проблемы состоит в применении данного метода к некоторому числу N_1 из общего количества N приемных антенн ($N_1 < N$).

Принцип функционирования предложенного метода заключается в том, что используется оптимальное количество приемных антенн, определяемое на основе результатов оценки состояния канала. Под задачами контроля состояния канала

понимается применение коэффициента ошибок Рош на приемной стороне в качестве критерия оценки состояния канала связи. Количество используемых приемных антенн увеличивается до максимального значения, равного N , при условии, что значение коэффициента Рош остается ниже ожидаемого значения вероятности ошибки Рож. Алгоритм сложения разнесенных сигналов по предлагаемому и известным методам представлен на Рисунке 1. Предлагаемый метод обеспечивает преимущества по сравнению с известными методами за счет того, что использует меньшее количество приемных антенн, при этом сохраняя требования к качеству принимаемого сигнала.

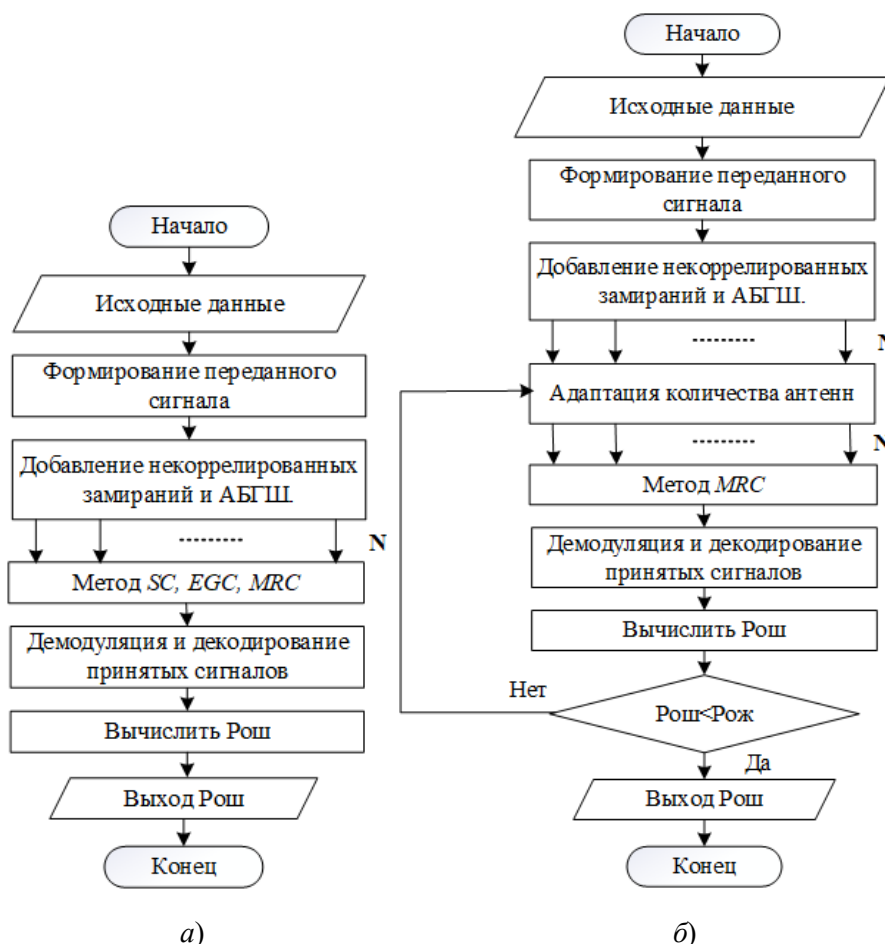


Рисунок 1 – Общая структурная схема алгоритмов сложения сигналов:

a – по методам SC , EGC , MRC ; b – по предлагаемым методам

Figure 1 – General structural diagram of signal summation algorithms

a – by SC , EGC , MRC methods; b – by the proposed methods

Адаптивная система с ОС. Для обеспечения повышенной устойчивости к замираниям сигнала предлагается использование методов разнесенного приема в рамках адаптивной системы с обратной связью (ОС), структурная схема которой представлена на Рисунке 2 [11].

В данной системе также используются результаты оценки состояния канала, основанные на вычислении значений коэффициента Рош, для осуществления корректировки параметров или методов кодирования и модуляции с целью повышения эффективности [12]. Для канала с ОС вероятность ошибки используется для принятия решения о формировании сигнала «Подтверждение» (когда $Рош < Рож$) или сигнала «Переспрос» в противоположном случае, после чего сформированный сигнал передается

через ОС. На основе сигнала, полученного через обратный канал, исходные данные либо передаются далее через прямой канал, либо текущие данные передаются повторно с изменением других методов кодирования и декодирования [13, 14].

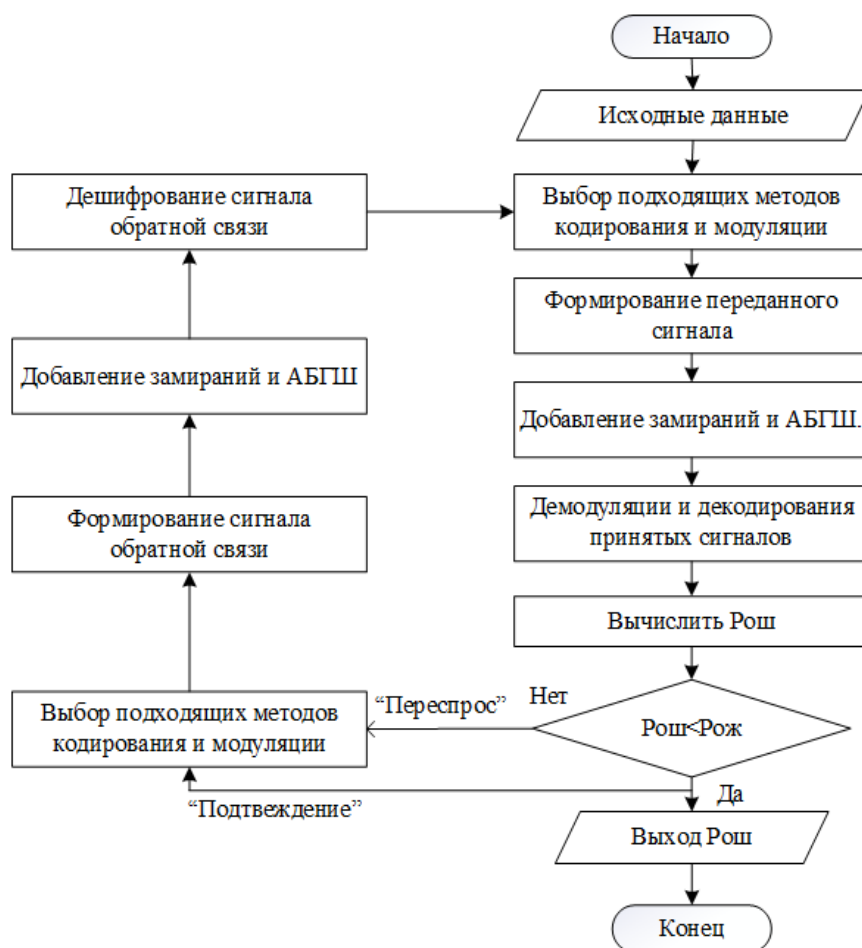


Рисунок 2 – Алгоритм обработки сигналов в адаптивной системе с ОС
Figure 2 – Signal processing algorithm in an adaptive system with feedback

Выбор методов кодирования и модуляции учитывает не только обеспечение энергетической эффективности, но и необходимость достижения высокой спектральной эффективности. Именно поэтому в данной работе исследовалась возможность применения современных методов кодирования (Таблица 1), широко используемых в настоящее время в адаптивных системах с ОС. К ним относятся коды с низкой плотностью проверок на четность (*LDPC*, англ. *Low Density Parity Check Code*) [15, 16], турбокоды (ТК) [17, 18] и каскадные коды (КК), основанные на коде Рида-Соломона в сочетании со сверточным кодом [19, 20].

Таблица 1 – Параметры помехоустойчивого кодирования
Table 1 – Parameters of Error-Control Coding

Типы кодов	Параметры кодов
Каскадный код	PC (255;239) + СК $\left(\nu = 3; R = \frac{1}{2}\right)$
Код <i>LDPC</i>	$L = 64800; R = \frac{5}{6}$
Турбокод	$L = 65536; \nu = 3; R = \frac{1}{2}$

Результаты и обсуждение

Рассматривается процесс передачи информации по каналам с замираниями Рэля и Райса. На Рисунках 3–5 представлены результаты анализа характеристик методов кодирования при их применении комбинирования с методами суммирования сигналов в условиях разнесенного приема. Предположим, что максимальное количество приемных антенн, которое может быть использовано, равно четырем; для методов *SC*, *EGC*, *MRC* используется это количество приемных антенн, в то время как предлагаемое решение использует количество приёмных антенн в зависимости от результатов оценки качества канала связи. На каждом рисунке количество используемых антенн (КИА), соответствующее значениям $E_b N_0$, отображается числами в рамках различного цвета.

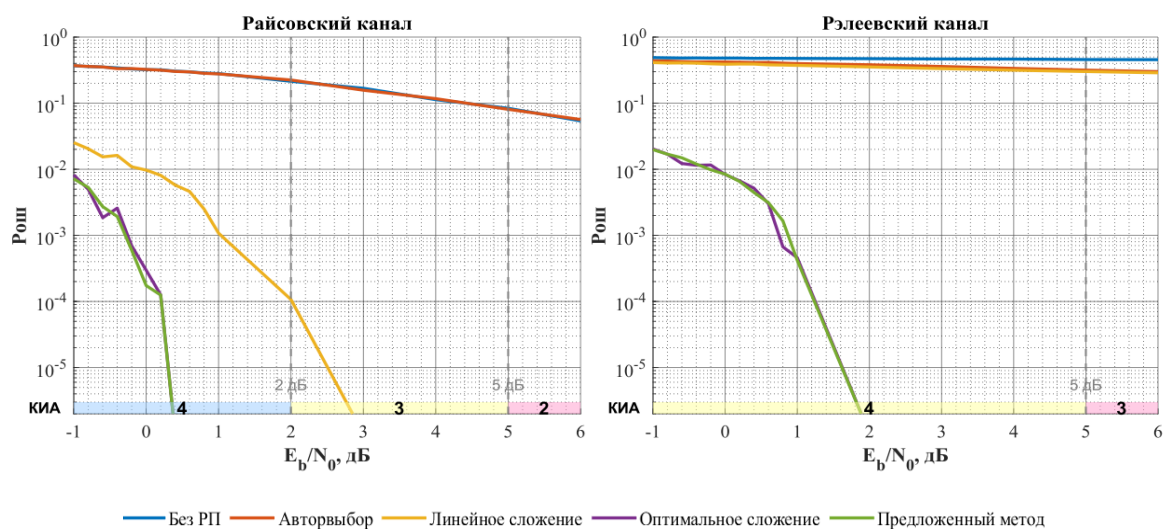


Рисунок 3 – Характеристики КК в канале с замираниями
Figure 3 – Characteristics of CC in a channel with fading

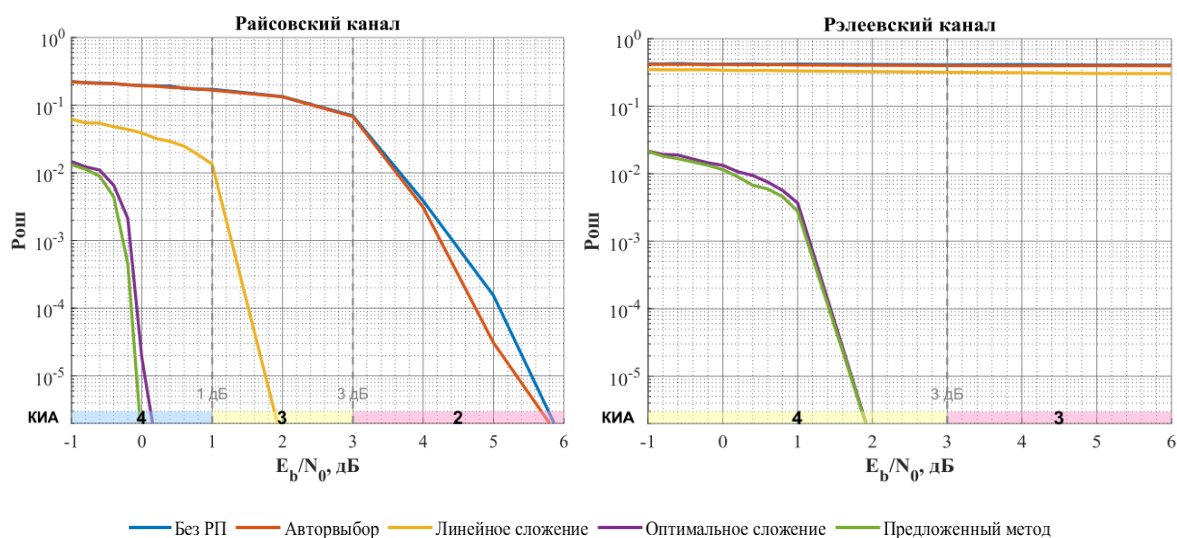


Рисунок 4 – Характеристики кода LDPC в канале с замираниями
Figure 4 – Characteristics of LDPC code in a channel with fading

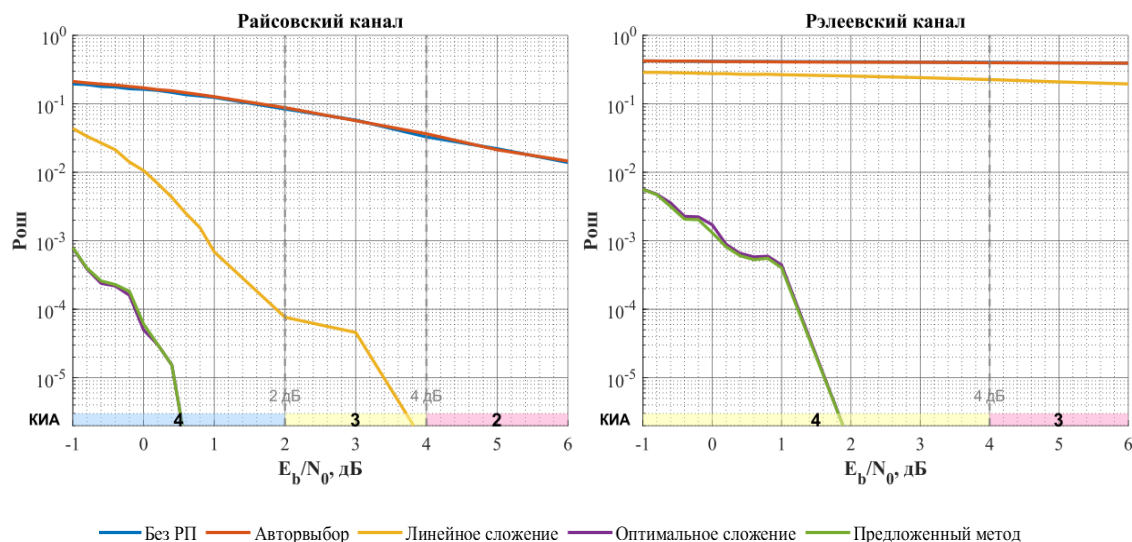


Рисунок 5 – Характеристики ТК в канале с замираниями
Figure 5 – Characteristics of TC in a channel with fading

Из приведенных рисунков можно сделать следующие выводы:

Во-первых, влияние канала Рэлея на качество принимаемого сигнала является более сильным по сравнению с каналом Райса, принимаемый сигнал подвергается особенно сильному воздействию в случае, когда не применяются эффективные методы суммирования сигналов при разнесенном приеме;

Во-вторых, методы *MRC* и предлагаемый метод демонстрируют значительную эффективность в противодействии замираниям в канале Рэлея по сравнению с остальными методами. Хотя, как было отмечено выше, эти методы обладают более высокой сложностью реализации;

В-третьих, эффективность противодействия замираниям методов *MRC* и предлагаемого метода не имеет значительных различий, однако предлагаемое решение обладает преимуществом, поскольку использует только количество приемных антенн, выбранное на основе результатов оценки качества принимаемого сигнала;

В-четвертых, предлагаемый метод может быть применен в адаптивной системе с ОС, поскольку в основе принципа работы этой системы также лежат результаты оценки качества канала;

В-пятых, при высоком качестве канала связи допустимо использование методов *SC* и *EGC* с целью уменьшения сложности системы. В противоположном случае целесообразно применять метод *MRC* и предлагаемый метод для выполнения требований к качеству передаваемой информации.

На основе полученных результатов разработана адаптивная система с обратной связью, в которой методы кодирования и модуляции, применяемые при передаче сигнала по прямому каналу связи, представлены на Рисунках 6 и 7. Для предлагаемого метода дополнительно представлены числа, отражающие количество использованных приемных антенн.

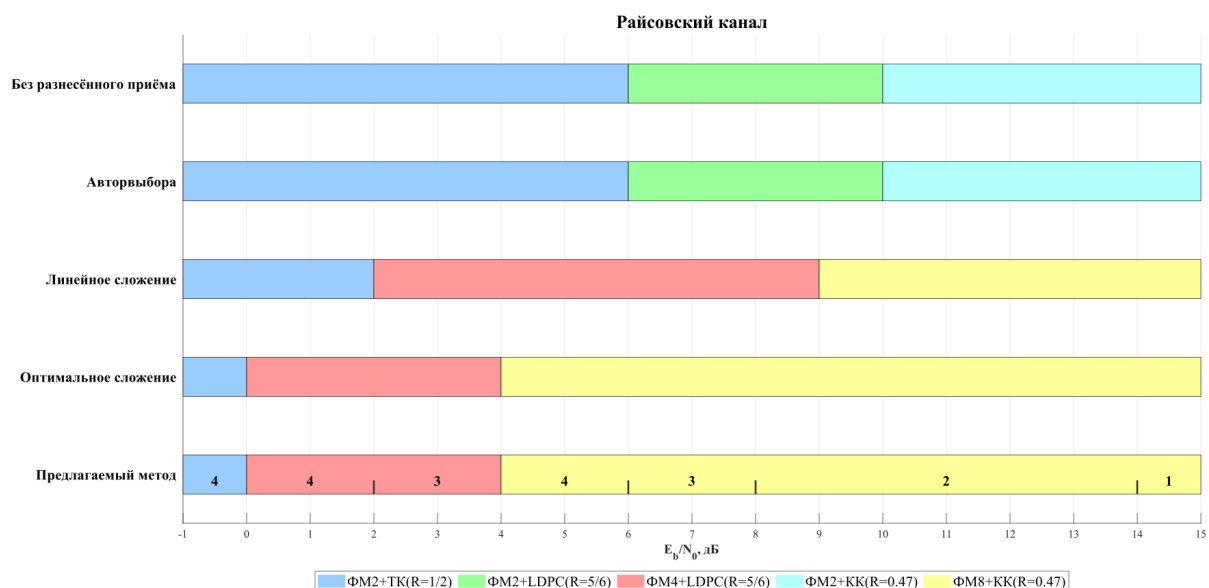


Рисунок 6 – Примененные в прямом канале методы кодирования и модуляции в райсовском канале
Figure 6 – Coding and modulation techniques applied in the forward channel of a Rician channel

В рассматриваемой системе необходимо также учитывать подверженность обратного канала ошибкам. Однако информация о состоянии прямого канала, передаваемая по обратному каналу, имеет не больший объем и не требует высокой скорости передачи. В связи с этим в обратном канале допустимо использование более простых методов кодирования, а также отсутствует необходимость применения методов разнесения сигналов на приемной стороне, что способствует снижению вычислительной сложности системы [21]. Результаты анализа изменений методов кодирования и модуляции в обратном канале связи представлены на Рисунке 8.

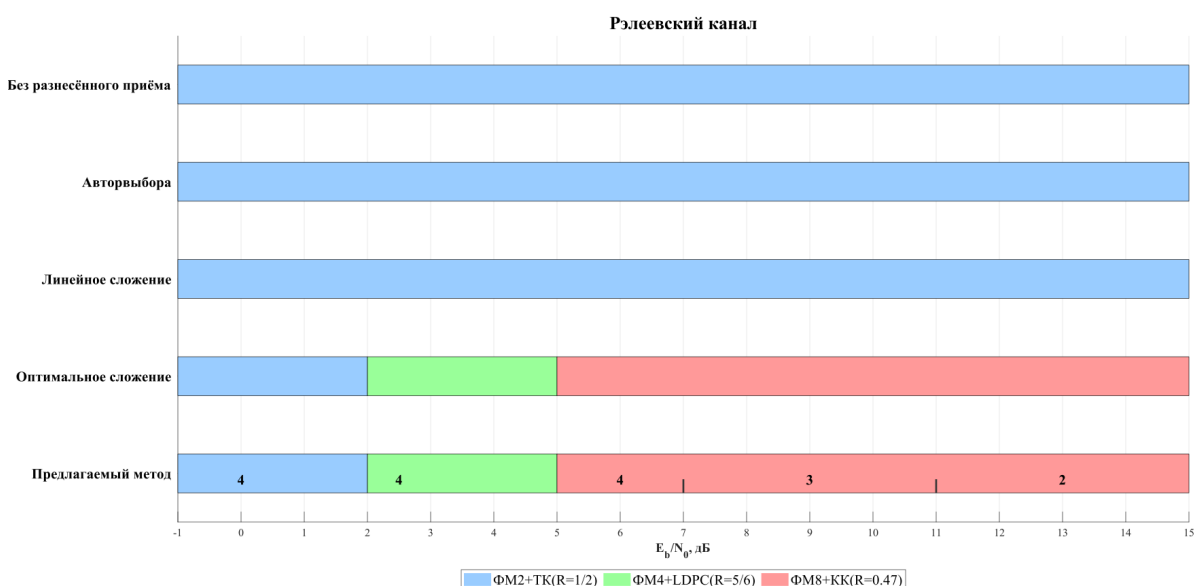


Рисунок 7 – Примененные в прямом канале методы кодирования и модуляции в рэлеевском канале
Figure 7 – Coding and modulation techniques applied in the forward channel of a Rayleigh channel

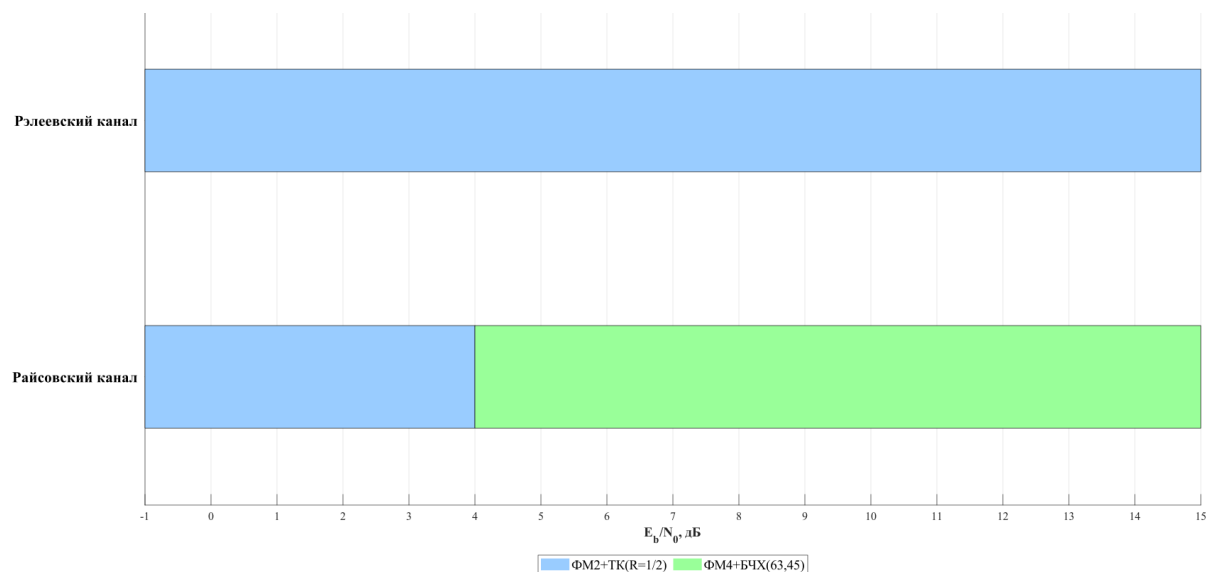


Рисунок 8 – Примененные в обратном канале методы кодирования и модуляции
Figure 8 – Coding and modulation techniques employed in the reverse channel

Заключение

В настоящем исследовании проведен анализ и сравнительное сопоставление методов пространственного разнесенного приема сигналов в условиях замираний по законам Райса и Рэля. Анализ известных методов представлен в данной работе, наряду с предлагаемым решением, которое продемонстрировало эффективность при сравнительном анализе.

В дальнейшем планируется развитие в направлении применения методов разнесения не только на стороне приема, но и на стороне передачи (с использованием числа передающих антенн больше одной по типу *MIMO*). Возможно заменить использование метода разнесения по пространству другими методами, такими как разнесение по частоте, времени, поляризации и т. д.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Тедеев Ю.Р. Методы повышения помехоустойчивости цифровых систем радиосвязи. В сборнике: *Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2021: материалы 14-ой международной научно-технической конференции, 06–07 октября 2021 года, Владимир, Россия*. Владимир: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; 2021. С. 366–370.
Tedeev Y.R. Methods of Increasing the Noise Immunity of Digital Radio Communication Systems. In: *Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii – PTSPi'2021: materialy 14-oi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 06–07 October 2021, Vladimir, Russia*. Vladimir: Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; 2021. P. 366–370. (In Russ.).
2. Аль Тахар И.А., Насир С.А.Х. Алгоритм моделирования быстрых интерференционных замираний. *Проектирование и технология электронных средств*. 2021;(2):52–54.
Al Tahar I.A., Nasir S.A.X. Algorithm for Modeling Fast Interference Fading. *Proektirovanie i tekhnologiya ehlektronnykh sredstv*. 2021;(2):52–54. (In Russ.).

3. Самойлов А.Г. Имитатор интерференционных замираний сигналов в многолучевых радиоканалах. *Проектирование и технология электронных средств*. 2023;(2):21–24.
Samoylov A.G. Simulator of Interference Fading of Signals in Multipath Radio Channels. *Proektirovanie i tekhnologiya ehlektronnykh sredstv*. 2023;(2):21–24. (In Russ.).
4. Новиков М.А., Скороходов Е.А., Вишняков Д.Ю., Брянцев Е.А. Анализ алгоритмов пространственного разнесения сигналов в условиях некоррелированных многолучевых замираний. В сборнике: *Радиотехнические системы: материалы международной молодёжной научно-практической конференции, 26 апреля 2019 года, Ярославль, Россия*. Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова; 2020. С. 126–135.
Novikov M.A., Skorohodov E.A., Vishnyakov D.Y., Bryncev E.A. Analysis of Algorithms for Spatial Separation of Signals Under Uncorrelated Multipath Fading. In: *Radiotekhnicheskie sistemy: materialy mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 26 April 2019, Yaroslavl, Russia*. Yaroslavl: P.G. Demidov Yaroslavl State University; 2020. P. 126–135. (In Russ.).
5. Ketfi F. Diversity Techniques in Wireless Communication Systems: A Review. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*. 2023;1(6):431–440. [https://doi.org/10.59324/ejtas.2023.1\(6\).42](https://doi.org/10.59324/ejtas.2023.1(6).42)
6. Hawaibam S., Singh A.D. Performance Comparison of L-SC and L-MRC over Various Fading Channels. In: *ICDEC 2022: Proceedings of International Conference on Data, Electronics and Computing, 07–09 September 2022, Shillong, Meghalaya, India*. Singapore: Springer; 2023. P. 467–477. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1509-5_43
7. Saleh H.H., Hasson S.T. Improving Communication Reliability in Vehicular Networks Using Diversity Techniques. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2019;16(3):838–844. <https://doi.org/10.1166/jctn.2019.7963>
8. Самойлов С.А., Аль Тахар И.А., Цапалова А.С. Моделирование алгоритмов обработки разнесенных сигналов. В сборнике: *Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022: сборник трудов V Международного научно-технического форума: Том 1, 02–04 марта 2022 года, Рязань, Россия*. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина; 2022. С. 177–182.
Samoylov S.A., Al Tahar I.A., Tsapalova A.S. Modeling Algorithms for Processing Diverse Signals. In: *Sovremennyye tekhnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2022: sbornik trudov V Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma: Volume 1, 02–04 March 2022, Ryazan, Russia*. Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University; 2022. P. 177–182. (In Russ.).
9. Alcaraz López O.L., Alves H., Latva-aho M. Joint Power Control and Rate Allocation Enabling Ultra-Reliability and Energy Efficiency in SIMO Wireless Networks. *IEEE Transactions on Communications*. 2019;67(8):5768–5782. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2914682>
10. Feng X., Tian F., Wang J., et al. A Survey on Maximum Ratio Combination: Applications, Evaluation and Future Directions. *Electronics*. 2024;13(15). <https://doi.org/10.3390/electronics13153087>
11. Чуднов А.М., Макаров С.Б., Кирик Д.И. Оценка эффективности управления параметрами кода и режимом декодирования при передаче сообщений по нестационарному каналу. *Радиотехника*. 2020;84(12):102–111. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202012\(24\)-10](https://doi.org/10.18127/j00338486-202012(24)-10)
Chudnov A.M., Makarov S.B., Kirik D.I. Estimation of the Efficiency of Control of the Correcting Ability of the Code When Transmitting Messages over a Non-Stationary

- Channel. *Radioengineering*. 2020;84(12):102–111. (In Russ.). [https://doi.org/10.18127/j00338486-202012\(24\)-10](https://doi.org/10.18127/j00338486-202012(24)-10)
12. Бродский М.С., Звонарев В.В., Попов А.С. Методика расчета числа повторений в радиоканале систем передачи сообщений с обратной связью, функционирующих в условиях воздействия мультипликативной помехи. *Известия Института инженерной физики*. 2022;(2):40–42.
Brotsky M.S., Zvonarev V.V., Popov A.S. Methodology for Calculating the Number of Repetitions in the Radio Channel of Feedback Message Transmission Systems Operating Under the Influence of Multiplicative Interference. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki*. 2022;(2):40–42. (In Russ.).
 13. Кочетова И.В., Левенец А.В. Имитационное моделирование системы передачи данных с адаптивным выбором помехоустойчивого кода по оценке состояния канала связи. *Информатика и системы управления*. 2020;(4):17–24.
Kochetova I.V., Levenets A.V. Simulation of Data Transmission System with Adaptive Selection of an Error-Correcting Code Based on Communication Channel State Assessment. *Information Science and Control Systems*. 2020;(4):17–24. (In Russ.).
 14. Владимиров С.С., Остапчук Р.Л., Скакунов И.Р. Методы организации адаптивного помехоустойчивого кодирования. *Вестник СПбГУТ*. 2024;2(1). URL: <https://vestnik-sut.ru/2024-1/C02.pdf>
Vladimirov S., Ostapchuk R., Skakunov I. Methods of Organizing of Adaptive Error Correcting Coding. *Herald of SPbSUT*. 2024;2(1). (In Russ.). URL: <https://vestnik-sut.ru/2024-1/C02.pdf>
 15. Genga Yu., Oyerinde O., Versfeld J. Symbol-Level Iterative Information Set Decoding of RS Codes. *Alexandria Engineering Journal*. 2023;73:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.034>
 16. Raviv T., Schwartz A., Be'ery Ya. Deep Ensemble of Weighted Viterbi Decoders for Tail-Biting Convolutional Codes. *Entropy*. 2021;23(1). <https://doi.org/10.3390/e23010093>
 17. Kumar D.D., Selvakumari R.Sh. Performance Analysis of Min-Sum Based LDPC Decoder Architecture for 5G New Radio Standards. *Materials Today: Proceedings*. 2022;62:4965–4972. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.693>
 18. Healy C.T., Al Rawi A., Tsimenidis Ch.C. LDPC-Coded Modulation Performance Analysis and System Design. *IEEE Access*. 2020;8:212166–212176. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038082>
 19. Hebbar S.A., Mishra R.K., Ankireddy S.K., Makkuva A.V., Kim H., Viswanath P. TinyTurbo: Efficient Turbo Decoders on Edge. In: *2022 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 26 June – 01 July 2022, Espoo, Finland*. IEEE; 2022. P. 2797–2802. <https://doi.org/10.1109/ISIT50566.2022.9834589>
 20. Xu J., Yuan Yi. *Channel Coding in 5G New Radio*. Boca Raton: CRC Press; 2022. 330 p. <https://doi.org/10.1201/9781003336174>
 21. Фам К.К., Глушанков Е.И., Ву Т.З. Исследование адаптивных цифровых линий радиосвязи с обратной связью. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2024;12(3):52–67. <https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-52-67>
Fam K.K., Glushankov E., Vu T.D. Research on Adaptive Digital Communication Lines with Decision Feedback. *Telecom IT*. 2024;12(3):52–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-52-67>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фам Конг Куен, аспирант, Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: fam.kk@sut.ru

Kuen K. Fam, Postgraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, the Russian Federation.

Глушанков Евгений Иванович, доктор технический наук, профессор, 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)

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

Статья поступила в редакцию 06.05.2025; одобрена после рецензирования 06.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.

The article was submitted 06.05.2025; approved after reviewing 06.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.