

УДК 621.396.2

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.043](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.043)

Анализ эффективности применения неортогонального разделения каналов (NOMA) в широкополосных сетях радиосвязи

С.Г. Егоров✉

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

Резюме. В настоящее время известно, что применение методов неортогонального разделения каналов (NOMA) позволяет повысить спектральную эффективность и абонентскую емкость сетей связи. При наличии нелинейных искажений или нарушения синхронизации ортогональность сигналов абонентов внутри CDMA-группы нарушается, что приводит к возникновению межканальной интерференции и снижению помехоустойчивости с ростом числа абонентов. Это необходимо учитывать при анализе помехоустойчивости в широкополосных сетях радиосвязи. В работе приведены результаты моделирования, показывающие возможность использования ортогонального синхронного кодового разделения каналов совместно с неортогональным методом разделения каналов, а помехоустойчивость системы определяется исключительно характеристиками NOMA. Показано влияние распределения мощностей абонентов на помехоустойчивость сети связи в зависимости от удаленности абонентов. Для анализа использованы математические модели и программные реализации в Matlab, которые позволяют исследовать ключевые параметры системы, включая вероятность ошибки (BER), пропускную способность и стратегии распределения мощности. Результаты работы демонстрируют, что предложенный подход позволяет эффективно анализировать и оптимизировать NOMA-системы, учитывая влияние нелинейных искажений и распределения мощности. Приведены примеры расчетов, подтверждающие целесообразность применения NOMA в широкополосных сетях радиосвязи.

Ключевые слова: неортогональное разделение каналов, спектральная эффективность, помехоустойчивость, нелинейные искажения, распределение мощности, сети радиосвязи.

Для цитирования: Егоров С.Г. Анализ эффективности применения неортогонального разделения каналов (NOMA) в широкополосных сетях радиосвязи. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2002> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.043

Analysis of the efficiency of using non-orthogonal multiple access (NOMA) methods in broadband radio communication networks

S.G. Egorov✉

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

Abstract. It is known that the use of Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) methods can improve the spectral efficiency and capacity of communication networks. However, in the presence of nonlinear distortions or synchronization issues, the orthogonality of user signals within a CDMA group is disrupted, leading to inter-channel interference and a reduction in interference immunity as the number of users increases. This must be taken into account when analyzing the interference immunity in broadband radio communication networks. The paper presents simulation results demonstrating the possibility of using orthogonal synchronous code division multiple access in combination with non-orthogonal multiple access, where the system's interference immunity is determined solely by the

characteristics of NOMA. The influence of power distribution among users on the network's interference immunity, depending on their distance, is shown. For the analysis, mathematical models and MATLAB implementations were used, enabling the study of key system parameters, including bit error rate (BER), capacity, and power allocation strategies. The results demonstrate that the proposed approach allows for effective analysis and optimization of NOMA systems, taking into account the impact of nonlinear distortions and power distribution. Examples of calculations are provided, confirming the feasibility of using NOMA in broadband radio communication networks.

Keywords: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), spectral efficiency, interference immunity, nonlinear distortions, power allocation, radio networks.

For citation: Egorov S.G. Analysis of the efficiency of using non-orthogonal multiple access (NOMA) methods in broadband radio communication networks. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2002> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.043

Введение

Один из перспективных методов повышения качественных показателей существующих систем связи – применение методов неортогонального множественного доступа (NOMA) [1, 2]. На данный момент выделяют два основных метода неортогонального множественного доступа: PD-NOMA (с разделением по мощности, Power Division) и CD-NOMA (с разделением по коду, Code Division) [2, 3].

На малых расстояниях и при небольшом количестве абонентов, когда эффект ближний–дальний не играет значительной роли, системы с ортогональным доступом предпочтительнее методов неортогонального доступа [4]. Аналитические выражения для расчета вероятности битовой ошибки для систем NOMA при использовании алгоритма последовательного подавления помех (SIC) в канале с рэлеевскими замираниями получены в [5]. Актуальными вопросами исследований остаются разработка алгоритмов группировки абонентов в группы (кластеры) [1], разработка методов объединения и распределения абонентов по ортогональным группам, а также исследование совместного использования методов неортогонального доступа с другими технологиями. Поэтому в данной работе рассматривается совместная гибридная система NOMA-DS-CDMA. Целью данной работы является анализ и повышение помехоустойчивости гибридной системы NOM-DS-CDMA при учете влияния нелинейных искажений и различных правил распределения мощности абонентов.

Материалы и методы

Проблема справедливого распределения мощности абонентов. Отметим, что термин «справедливость» пока не до конца устоялся в отечественной литературе. В данной работе, под справедливостью (следуя [1]) будем понимать такой способ распределения мощности абонентов в NOMA, при котором каждому пользователю назначается мощность, соответствующая состоянию его канала.

Оптимальное количество абонентов NOMA показано на Рисунке 1 выше, при ограниченной мощности с ростом количества абонентов выше 4 начинает снижаться характеристика γ называемая удельной скоростью передачи информации¹. Поэтому для систем NOMA есть смысл рассматривать именно небольшое количество абонентов (имеется ввиду в одной группе) [6]. Решением этой проблемы снижения эффективности с ростом количества пользователей в NOMA может быть использование гибридных систем NOMA-OMA, т.е. совместное использование методов ортогонального и неортогонального разделения каналов, но при этом возникает отмеченная ранее

¹ Варгаузин В.А., Цикин И.А. *Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2013. 352 с.

проблема разделения абонентов на группы [7, 8]. В совместных NOMA-OMA системах ортогональный частотный/временной или кодовый ресурс делится между несколькими абонентами объединенными в общую NOMA-группу (кластер) и объединение абонентов в группу с другими абонентами.

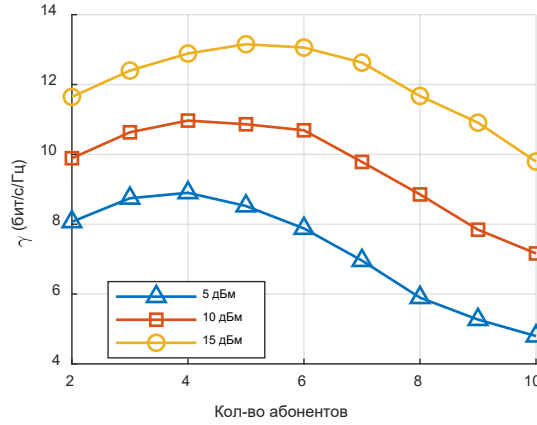


Рисунок 1 – Оптимальное кол-во абонентов в NOMA с точки зрения спектральной эффективности (для 10 и 5 дБм)
Figure 1 – Optimal number of users in NOMA for optimal spectral efficiency (for 10 and 5 dBm)

Каждой мощностной группе выделяется свой коэффициент α , причем

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_N \text{ и } \sum \alpha_n = 1. \quad (1)$$

Переданный сигнал $x(t)$ NOMA и принятый $y(t)$ выражаются [1] как

$$x(t) = \sum_{n=1}^N x_n(t) = \sqrt{\alpha_n} s_n(t),$$

используя алгоритм последовательного подавления помех (SIC), на приемной стороне декодированный сигнал x_k от k -го абонента:

$$\hat{x}_n(t) = y_n(t) - \sum_{i=0}^{N-1} x_i(t).$$

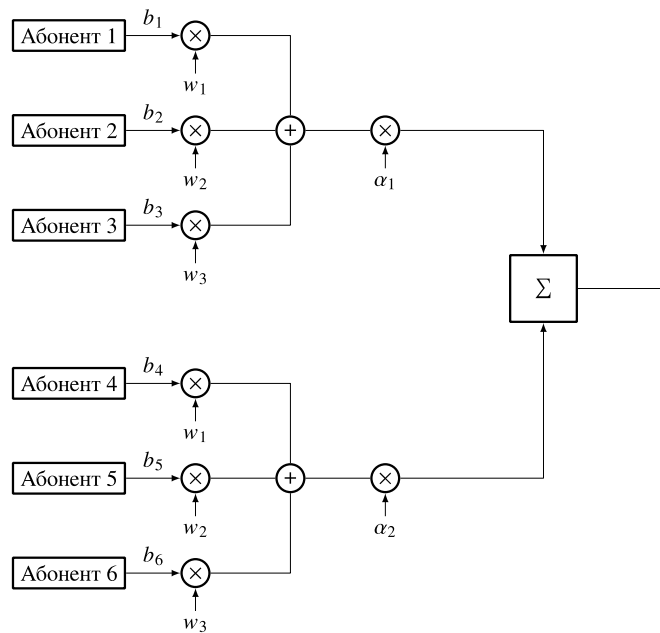


Рисунок 2 – Структурная схема системы NOMA-DS-CDMA
Figure 2 – Block scheme of NOMA-DS-CDMA system

Совмещение технологий NOMA и ОМА (на примере CDMA), предполагает объединение пользователей в неортогональные (мощностные) и ортогональные (кодовые) группы (Рисунок 2). После модуляции сигналов абонентов каналными переносчиками:

$$x(t) = \sum_{m=1}^M x_m(t) = \sum_{m=1}^M c_m(t)w_m = \sum_{m=1}^M w_m \sum_{n=1}^M \sqrt{\alpha_n} s_n(t).$$

Абонентам кодовых и мощностных групп назначаются, соответственно, общий код w_k (напр., Уолша, Голда, ПСП) и коэффициент мощности α_k . На Рисунке 3 показаны зависимости вероятности ошибки от С/Ш при разном количестве абонентов для ортогональных (а) и неортогональных (б) кодов w_M .

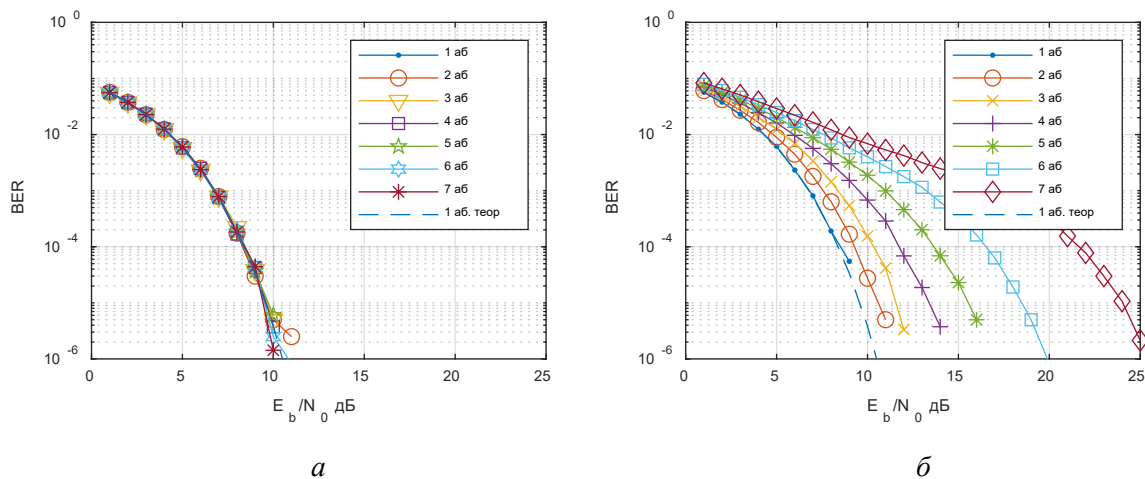


Рисунок 3 – Зависимость вероятности ошибки от отношения С/Ш для систем DS-CDMA:

a – ортогональных кодов Уолша и Голда; *б* – неортогональных кодов

Figure 3 – Measured BER for DS-CDMA systems: *a* – orthogonal Walsh and Gold codes;
b – non-orthogonal codes

Полученные графики с расчетом помехоустойчивости совмещенной NOMA-DS-CDMA и PD-NOMA для трех абонентов при постоянном распределении мощностей показаны на Рисунке 4а,б. Моделирование выполнено для BPSK и трех абонентов с декодированием по итерационному алгоритму последовательного подавления помех (SIC): первый абонент декодируется напрямую из группового сигнала, а второй и третий с учетом полученных оценок на предыдущем шаге.

Помехоустойчивость будет определяться в первую очередь NOMA-группами и распределением мощности между группами. Увеличение емкости системы можно обеспечить увеличением абонентов в кодовой группе (за счет использования кодов с большим базисом, т. е. большим количеством чипов) без ухудшения помехоустойчивости. Таким образом задача справедливого распределения мощности сводится к такому выбору мощностей, при котором обеспечивается равная помехоустойчивость для всех абонентов при различном качестве их каналов. Для решения этой задачи необходимо выбрать критерий справедливости и провести оптимизацию как по мощности, так и по распределению кодов в пределах ортогональных (кодовых) групп.

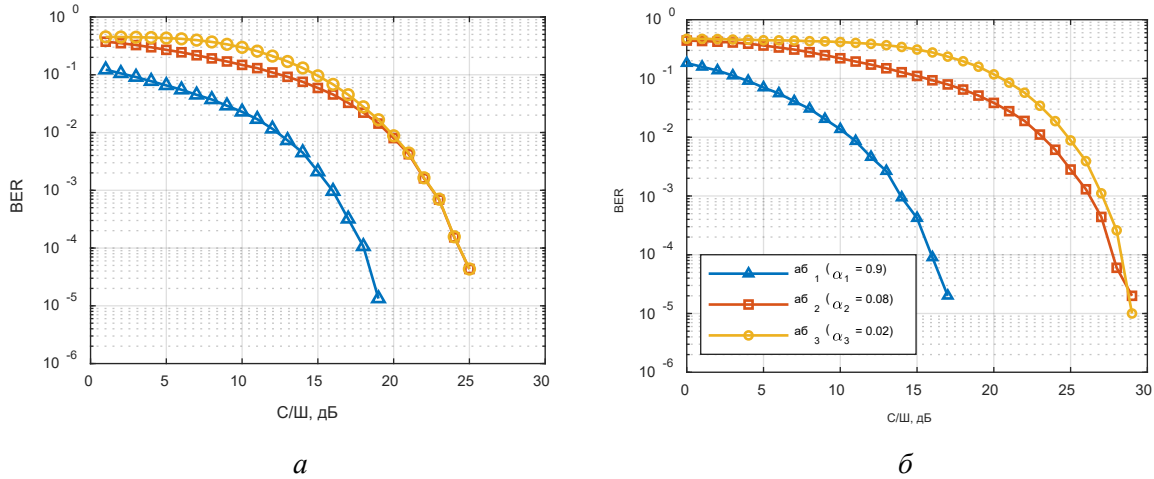


Рисунок 4 – Зависимость вероятности ошибки от отношения С/Ш при 3-х абонентах:
а – NOMA-DS-CDMA; б – PD-NOMA

Figure 4 – Measured BER vs SNR for 3 PD user groups: а – PD-NOMA; б – NOMA-DS-CDMA

Выбор канальных переносчиков в кодовой группе. Рассмотрим процедуру выбора канальных переносчиков для NOMA-кластеров с учетом оценки межканальных помех, возникающих из-за нелинейности тракта. Для этого рассмотрим вначале влияние нелинейности группового тракта на систему CDMA.

$$y(x) = \sum_{i=1}^n a_i x^i = a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n, \quad (2)$$

при подаче на входе одного канального переносчика одной функции Уолша $x_i(t) = \text{wal}(1, t)$ и, учитывая одно из известных и очевидных свойств $\text{wal}(i, t)^2 = \text{wal}(1, t) = 1^2$ [9]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n/2} a_{2i-1} \text{wal}(i, t) + \sum_{i=1}^{n/2} a_{2i} = \text{wal}(i, t) \underbrace{\sum_{i=1}^{n/2} a_{2i-1}}_{\text{ослабленный сигнал}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n/2} a_{2i}}_{\text{постоянная составляющая}},$$

то есть сигнал $y(t)$ на выходе нелинейного устройства будет состоять из постоянной составляющей, равной сумме коэффициентов при четных членах ряда, описывающего амплитудную характеристику (АХ) нелинейного усилителя (НУ), и ослабленную копию входного кода с амплитудой, равной сумме нечетных коэффициентов ряда (2).

Рассмотрим прохождение сигналов от трех абонентов.

$$x(t) = \text{wal}(w_1, t) + \text{wal}(w_2, t) + \text{wal}(w_3, t), \quad (3)$$

где $w \in \{w_1, w_2, w_3\}$ – номера используемых функций Уолша, и пусть суммарный сигнал проходит через НУ с АХ, аппроксимируемой полиномом 3-й степени:

$$y(x) = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3, \quad (4)$$

подставим (3) в (4) и получим

$$y(t) = (a_1 + 7a_3)[w_1 + w_2 + w_3] + 3a_2 + 2a_2[w_1 w_2 + w_1 w_3 + w_2 w_3] + 6a_3[w_1 w_2 w_3].$$

Как известно², функции обладают свойством мультипликативности $\text{wal}(m, t) \times \text{wal}(n, t) = \text{wal}(k, t)$, где индекс $k \oplus m$ является суммой индексов по модулю два. То есть надо представить номера функций в двоичной форме и сложить по модулю два:

² Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Дрофа; 2006. 720 с.

$$\begin{aligned} 1 \oplus 0 &= 0 \oplus 1 = 1, \\ 0 \oplus 0 &= 1 \oplus 1 = 0. \end{aligned}$$

Из свойства мультипликативности также следует, что $wal^2(m, t) = wal(m, t)$ для нечетных степеней r и $wal^r(m, t) = 1$ для четных степеней r . Учитывая эти свойства, выражение упростится. 1, 2, 3 – это номера функций Уолша. Другими словами, здесь w_1 – это 1-я функция из группы (она может быть любой из функций Уолша из базиса).

$$y = (a_1 + 7a_3) \underbrace{[w_1 + w_2 + w_3]}_{\text{полезный сигнал}} + 3a_2 + 2a_2 \underbrace{[w_{1 \oplus 2} + w_{1 \oplus 3} + w_{2 \oplus 3}]}_{\text{1, 2 и 3 ИМК}} + 6a_3 \underbrace{w_{1 \oplus 2 \oplus 3}}_{\text{4 ИМК}}.$$

Получается, что выходной сигнал НУ состоит из полезного сигнала, постоянной составляющей и четырех интермодуляционных компонент (ИМК). При этом, так как по определению функции Уолша из набора взаимно ортогональны, то интермодуляционные компоненты не приведут к возникновению межканальных помех, если номера функций в интермодуляционных компонентах будут отличаться от используемых функций из множества $w \in \{w_1, w_2, w_3\}$. Могут быть использованы разные стратегии выбора набора канальных переносчиков (Рисунок 5), например, для 4 кодов: 1 – равномерное ($w_1 = 1, w_2 = 6, w_3 = 10, w_4 = 15$); 2 – прореженное ($w_1 = 1, w_2 = 4, w_3 = 7, w_4 = 10$); 3 – последовательное ($w_1 = 1, w_2 = 2, w_3 = 3, w_4 = 4$).

Если функции модулированы информационными битами d_1, d_2, d_3 , тогда выражение примет вид:

$$y = (a_1 + (3L - 2)a_3) + La_2 + a_2 \sum_{k \in (\kappa_1, \kappa_2)} d_k w_k + 6a_3 \sum_{k \in (\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3)} d_k w_k.$$

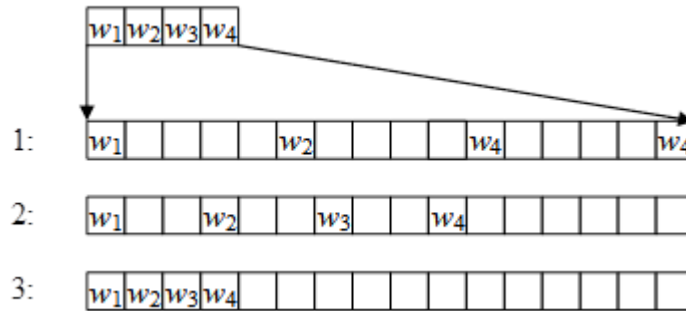


Рисунок 5 – К выбору канальных переносчиков
Figure 5 – Channel codes selection rule

Итого, при заданном виде нелинейности и группе из трех кодов оптимальными для обеспечения наименьшего уровня межканальных помех будут следующие группы «наборы/множества» номеров кодов Уолша: $\kappa = \{\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3\} = \{2, 4, 7\}, \{2, 5, 6\}, \{3, 4, 6\}, \{3, 5, 7\}$. При малом числе каналов можно подобрать такое множество функций Уолша, что возникающие из-за нелинейных искажений интермодуляционные компоненты не будут совпадать с полезными сигналами. Именно эти группы следует использовать в схеме NOMA-CDMA. Аналогичным образом можно выбирать коды и для большего числа активных абонентов.

Квазиортогональные коды на основе кодов Радемахера-Уолша. Для примера рассмотрим набор кодов Радемахера-Уолша (далее Уолша) с базисом $N = 4$:

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix},$$

естественно, такой набор кодов является ортогональным, то есть для него выполняется условие:

$$\sum_i W_{i,n_1} \cdot W_{i,n_2} = 4, \quad n_1 = n_2,$$

$$\sum_i W_{i,n_1} \cdot W_{i,n_2} = 0, \quad n_1 \neq n_2.$$

Определим дополнительные M -коды $W \cdot e^{\frac{j\pi}{2}} = W \cdot j = M$, где $j = \sqrt{-1}$:

$$M = \begin{pmatrix} -1j & -1j & -1j & -1j \\ -1j & -1j & +1j & +1j \\ -1j & +1j & +1j & -1j \\ -1j & +1j & -1j & +1j \end{pmatrix},$$

В матрице M коды также ортогональные:

$$\sum_i M_{i,n_1} \cdot M_{i,n_2} = 4, \quad n_1 = n_2,$$

$$\sum_i M_{i,n_1} \cdot M_{i,n_2} = 0, \quad n_1 \neq n_2.$$

Объединяя W и M , определим новый набор квазиортогональных кодов Уолша:

$$U = \begin{pmatrix} 1+0i & 1+0i & 1+0i & 1+0i \\ 1+0i & 1+0i & -1+0i & -1+0i \\ 1+0i & -1+0i & -1+0i & 1+0i \\ 1+0i & -1+0i & 1+0i & -1+0i \\ 0-1i & 0-1i & 0-1i & 0-1i \\ 0-1i & 0-1i & 0+1i & 0+1i \\ 0-1i & 0+1i & 0+1i & 0-1i \\ 0-1i & 0+1i & 0-1i & 0+1i \end{pmatrix}.$$

В этом наборе U уже не все пары взаимно ортогональны, но для этого набора квазиортогональных кодов выполняется условие:

$$\sum_i U_{i,n_1} \cdot U_{i,n_2} = 4, \quad n_1 = n_2,$$

$$\operatorname{Re}\{\sum_i U_{i,n_1} \cdot U_{i,n_2}\} = 0, \quad n_1 \neq n_2,$$

$$\sum_i U_{i,n_1} \cdot U_{i,n_2} = 4i, \quad n_1 + N = n_2,$$

$$\sum_i U_{i,n_1} \cdot U_{i,n_2} = 0, \quad n_1 \neq n_2.$$

Таким образом, в матрице U все пары сигналов $\{n_1, n_2\}$ будут взаимно ортогональны, за исключением пар $\{1,5\}$, $\{2,6\}$, $\{3,6\}$, а перечисленные пары будут противофазные и для них $u_{n_1} \cdot u_{n_2} = 4j$.

Результаты и обсуждение

Потенциальная помехоустойчивость системы с совмещением NOMA и DS-CDMA. Так как для приёмника с алгоритмом последовательного подавления помех (от англ. Successive Interference Cancellation, SIC) проблематично найти простое аналитическое выражение для оценки вероятности ошибки, был выбран метод статистического имитационного моделирования. Путем статистического имитационного моделирования выполнено исследование помехоустойчивости системы NOMA-DS-CDMA, со следующим набором параметров: 1) $\alpha = 0,7$, с мощностью 0–40 дБм (дальний) (больше дальность – больше мощность); 2) $\alpha = 0,2$ мощностью 0–40 дБм; 3) $\alpha = 0,1$ и с мощностью 0–40 дБм (ближний).

Схема проведения статистического имитационного моделирования, выполненного в среде matlab [10] показана на Рисунке 6.



Рисунок 6 – Структурная схема статистической имитационной модели
Figure 6 – Simulation Model Block Scheme

Результаты моделирования для условия использования различного числа абонентов, а также графики для выбора коэффициентов распределения мощности абонентов представлены на Рисунке 7.

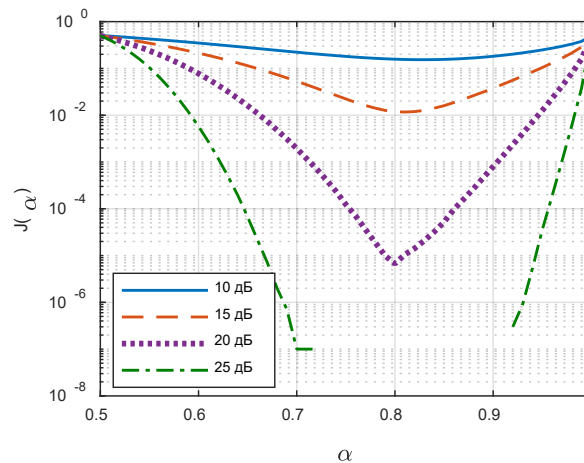


Рисунок 7 – Зависимость суммарной взвешенной ошибки от коэффициента распределения мощности при C/Ш = 10, 15, 20, 25.

Figure 7 – Dependence of the total weighted error on the power distribution coefficient at S/N = 10, 15, 20, 25.

На Рисунке 8 представлены результаты оптимизации коэффициентов распределения мощности для групп абонентов в целях обеспечения отказоустойчивости связи согласно выражениям $J(\alpha) = \omega_1 \Delta BER + \omega_2 BER_1 + \omega_3 BER_2$ (где ω – подбираемый вектор весов), а оптимальный коэффициент находится численно из условия $\alpha_{\text{опт}} = \arg \min_{\alpha \in [0,5;1]} J(\alpha)$, т. е. для обеспечения равной помехоустойчивости двух абонентов.

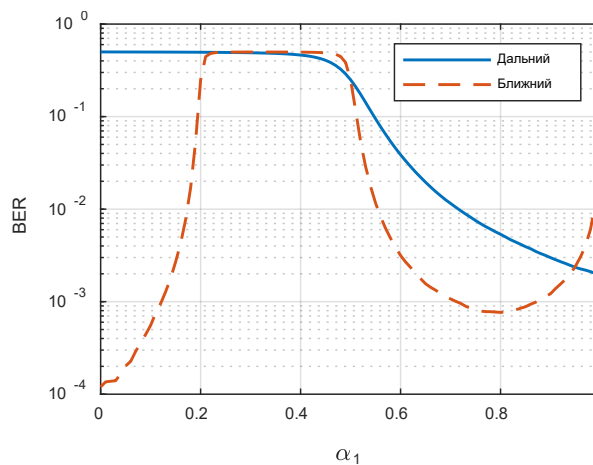


Рисунок 8 – К выбору коэффициента α : ближний = 1 км, дальний = 0,5 км
Figure 8 – On the choice of the coefficient α : Far user = 1 km, near user = 0.5 km

Пример расчета приведен на Рисунке 9, выполнен анализ помехоустойчивости гибридной системы NOMA-DS-CDMA. Одна из основных задач системы связи – обеспечение доступности связи во всей зоне покрытия базовой станции. Обычно дистанция от базовой станции до абонента не превышает 10 км (на Рисунке 9 расчет выполнен для 1000 м «дальний», 400 м и 200 м «ближний»), выходная мощность – до 27 дБм, тип модуляции QPSK.

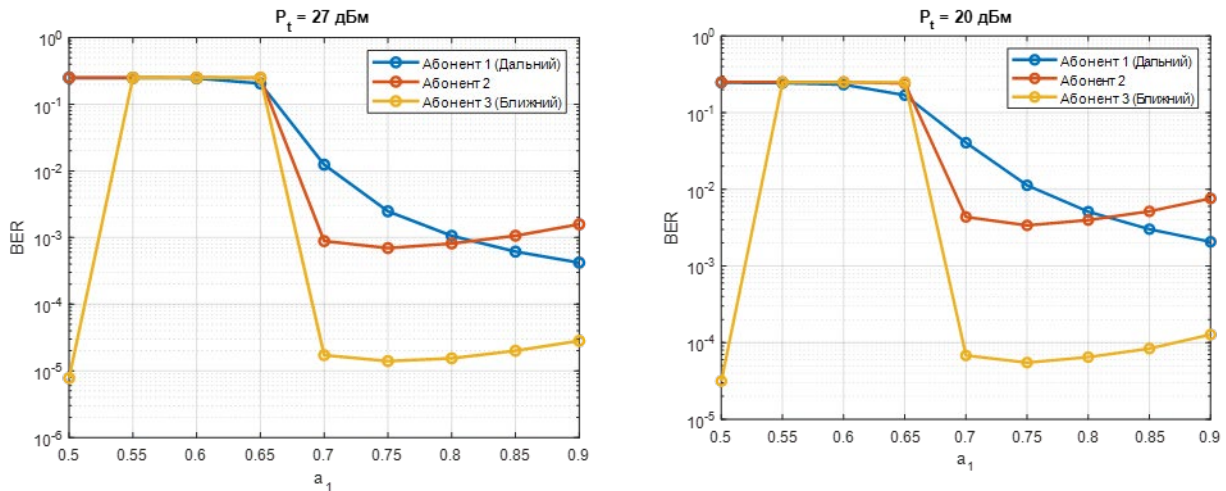


Рисунок 9 – К выбору коэффициента a ; Дальности до абонентов: 1 км, 0,4 км и 0,2 км
Figure 9 – Selecting channel coefficients. User distances: 1 km, 0.4 km and 0.2 km

Анализ результатов, представленных на Рисунках 7–9, показывает границы допустимых значений при разном коэффициенте распределения мощности для двух неравноудалённых групп абонентов. Расчет показал, что абсолютная ошибка не превышает 10^{-2} и составляет от 10^{-3} до 10^{-5} . Ошибка в 10^{-5} (Рисунок 8) соответствует выходной мощности в 20 дБм и С/Ш в 20 дБ. Равенство в показателях отказоустойчивости для двух групп абонентов обеспечивается в точке пересечения кривых помехоустойчивости (Рисунок 9).

Заключение

В работе рассмотрена методика определения помехоустойчивости совместной системы NOMA-DS-CDMA для организации систем связи. Показано, что возможно совместное использование методики неортогонального множественного доступа и существующих синхронных систем с кодовым разделением каналов, и что помехоустойчивость такой системы зависит в первую очередь от распределения мощностей абонентов в NOMA-группах. Приведены примеры расчетов, показывающие влияние зависимости помехоустойчивости от точности определения местоположения при «справедливом распределении мощностей» абонентов. Показано, что в пределах одной NOMA-группы при сохранении ортогональности канальных сигналов (идеальная синхронизация и отсутствие межканальной интерференции) помехоустойчивость не ухудшается с увеличением количества абонентов.

Установлена возможность синтеза простых квазиортогональных последовательностей, полученных из ортогональных кодов Уолша. Рассмотрена методика выбора канальных переносчиков в пределах одной NOMA-группы на основе алгоритма, основанного на рекурсивном подборе используемых кодов с учетом влияния межканальных помех, вызванных нелинейностью группового тракта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б. и др. *Неортогональный множественный доступ (NOMA) как основа систем связи 5G и 6G*. Москва: Горячая линия – Телеком; 2024. 263 с.
2. Liu Yu., Qin Zh., El Kashlan M., Ding Zh., Nallanathan A., Hanzo L. Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. *Proceedings of the IEEE*. 2017;105(12):2347–2381. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2721395>
3. Vaezi M., Ding Zh., Poor H.V. *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*. Cham: Springer; 2019. 685 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92090-0>
4. Islam S.M.R., Avazov N., Dobre O.A., Kwak K.-S. Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017;19(2):721–742. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2621116>
5. Kara F., Kaya H. BER Performances of Downlink and Uplink NOMA in the Presence of SIC Errors over Fading Channels. *IET Communications*. 2018;12(15):1834–1844. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.5278>
6. Oviedo J.A., Sadjadpour H.R. Fundamentals of Power Allocation Strategies for Downlink Multi-User NOMA with Target Rates. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020;19(3):1906–1917. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2959763>
7. Aldababsa M., Toka M., Gökceli S., Kurt G.K., Kucur O. A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9713450>
8. Ding Zh., Fan P., Poor H.V. Impact of User Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple-Access Downlink Transmissions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016;65(8):6010–6023. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2480766>
9. Jain P.C. Problems of Synchronization and Non-Linear Distortion and Their Effect on the Detection of Walsh Functions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1971;13(3):192–198. <https://doi.org/10.1109/TEC.1971.5217711>
10. Harada H., Prasad R. *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*. London: Artech House; 2002. 467 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Егоров Станислав Геннадьевич, старший преподаватель кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: sgegorov@gmail.com

ORCID: [0000-0003-4191-0396](https://orcid.org/0000-0003-4191-0396)

Stanislav G. Egorov, Senior Lecturer at the Department of Radiotechnics, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 04.08.2025; принята к публикации 27.08.2025.

The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 04.08.2025; accepted for publication 27.08.2025.