

УДК 621.391.072

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-33-41>

EDN ELQHEK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией на фоне ретранслированной помехи

А.Е. Троицкая,
Ю.А. Полевода[@],
Г.В. Куликов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: polevoda@mirea.ru

Резюме

Цели. Радиотехнические системы передачи информации широко применяются в роботизированных комплексах для использования военными и гражданскими службами. При попадании такого комплекса в сложную окружающую среду, в которой возникает большое количество ретранслированных помех, например, при попадании комплекса под завал, в железобетонные трубы или различные коммунальные объекты, связь с командным пунктом может быть потеряна. Задача поддержания надежной связи в сложных условиях распространения радиоволн является весьма актуальной. В области телекоммуникаций широко используются многопозиционные виды модуляции, которые, несмотря на их хорошие спектральные характеристики, обеспечивают невысокую помехоустойчивость в условиях нефлуктуационных помех, особенно в случае ретранслированных помех. Представляется целесообразным исследовать возможность применения сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией (М-ЧМ) в радиосистемах со сложной помеховой обстановкой. Целью работы является анализ помехоустойчивости когерентного приема сигналов М-ЧМ на фоне ретранслированной помехи.

Методы. Используются методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и математического моделирования.

Результаты. Приведена модель сигнала М-ЧМ и ретранслированной помехи. Получены статистические параметры распределений случайных процессов в многоканальном когерентном приемнике сигналов М-ЧМ на фоне ретранслированной помехи. На этой основе рассчитана вероятность битовой ошибки при приеме сигналов М-ЧМ разной позиционности M на фоне ретранслированной помехи с различной интенсивностью.

Выводы. Показано, что воздействие ретранслированной помехи приводит к снижению помехоустойчивости приема сигналов М-ЧМ, которое тем больше, чем выше интенсивность помехи. С возрастанием позиционности сигналов М-ЧМ при небольшой интенсивности ретранслированной помехи помехоустойчивость приема значительно улучшается, но помеха большой интенсивности сильно увеличивает вероятность битовой ошибки. Наличие помехи с относительной интенсивностью 0.5 вызывает энергетические потери от 4 до 6 дБ в зависимости от позиционности. При $M > 4$ сигналы М-ЧМ значительно выигрывают в помехоустойчивости у сигналов с многопозиционной фазовой, квадратурной амплитудной и амплитудно-фазовой манипуляцией.

Ключевые слова: многопозиционная частотная манипуляция, ретранслированная помеха, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 12.03.2024 • Доработана: 03.04.2024 • Принята к опубликованию: 12.07.2024

Для цитирования: Троицкая А.Е., Полевода Ю.А., Куликов Г.В. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией на фоне ретранслированной помехи. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):33–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-33-41>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Noise immunity of signal reception with multiple frequency-shift keying against retransmitted interference

Alexandra E. Troitskaya,
Yuriy A. Polevoda[@],
Gennady V. Kulikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: polevoda@mirea.ru

Abstract

Objectives. Radio engineering information transmission systems are widely used in robotic systems employed in various military and civilian services. If such systems are used in a harsh environment, where a large amount of retransmitted interference occurs, for example, if a complex is buried under rubble or is located in reinforced concrete pipes or other utility facilities, communication with the command post may be lost. Thus, the task of maintaining reliable communications under difficult conditions of radio wave propagation is very urgent. In the field of telecommunications, multiposition types of modulation are widely used, which, despite their good spectral characteristics, provide low noise immunity under conditions of nonfluctuating interference, especially in cases of retransmitted interference. Therefore, it is relevant to explore the possibility of using multiple frequency-shift keying (M-FSK) signals in radio systems with complex interference environments. The paper sets out to analyze the noise immunity of coherent reception of M-FSK signals against the background of retransmitted interference.

Methods. Statistical radio engineering and mathematical modeling methods are used according to the theory of optimal signal reception.

Results. A model of the M-FSK signal and retransmitted interference is provided. The statistical parameters of the distributions of random processes occurring in a multichannel coherent receiver of M-FSK signals against retransmitted interference are obtained; based on this, the bit error rate is calculated when receiving M-FSK signals of different positionality M against retransmitted interference with different intensities.

Conclusions. The impact of retransmitted interference is shown to result in a decrease in the noise immunity of M-FSK signal reception, which is greater the higher its intensity. With increasing positionality of M-FSK signals at low intensity of retransmitted interference, the noise immunity of reception is significantly improved; however, high-intensity interference significantly increases the bit error rate. The presence of interference with a relative intensity of 0.5 causes energy losses from 4 to 6 dB depending on the positionality. When $M > 4$, M-FSK signals gain significantly in terms of noise immunity over signals with multiple phase-shift keying, quadrature amplitude modulation, and amplitude and phase-shift keying.

Keywords: multiple frequency-shift keying, retransmitted interference, noise immunity, bit error rate

• Submitted: 12.03.2024 • Revised: 03.04.2024 • Accepted: 12.07.2024

For citation: Troitskaya A.E., Polevoda Yu.A., Kulikov G.V. Noise immunity of signal reception with multiple frequency-shift keying against retransmitted interference. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):33–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-33-41>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехнические системы передачи информации широко применяются в роботизированных комплексах для использования военными и гражданскими службами, например, в целях гражданской обороны, при возникновении чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий¹ [1–4]. При попадании такого комплекса в сложную окружающую среду, в которой возникает большое количество ретранслированных помех² [5–7], например, при попадании комплекса под завал, в железобетонные трубы или различные коммунальные объекты, связь с командным пунктом может быть потеряна. Поэтому задача поддержания надежной связи с такими роботизированными комплексами в сложных условиях распространения радиоволн является весьма актуальной.

В настоящее время в области телекоммуникаций широко используются многопозиционные виды модуляции. Известно, что сигналы с многопозиционной фазовой (М-ФМ), сигналы с квадратурной амплитудной (КАМ) и амплитудно-фазовой (АФМ) манипуляциями, несмотря на их хорошие спектральные характеристики, обладают невысокой помехоустойчивостью в условиях нефлуктуационных помех, особенно в случае ретранслированных помех [8–12].

¹ Приказ от 26 декабря 2018 г. № 633. Об утверждении и введении в действие руководства по радиосвязи Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. <https://base.garant.ru/72152196/>. Дата обращения 25.11.2023. [Order No. 633 dated December 26, 2018. On Approval and Enactment of the Radio Communications Manual of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters. <https://base.garant.ru/72152196/> (in Russ.). Accessed November 25, 2023.]

² Рекомендация МСЭ-Р P.1238-6 (10/2009). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 900 МГц – 100 ГГц. Серия Р. Распространение радиоволн. [ITU-R Recommendation P.1238-6 (10/2009). *Radio wave propagation data and prediction methods for planning indoor radio communication systems and local area radio networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz*. Series R. Radio wave propagation (in Russ.).]

Поэтому представляется целесообразным исследовать возможность применения сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией (М-ЧМ, англ. M-FSK – multiple frequency-shift keying) [13–15] в радиосистемах со сложной помеховой обстановкой. Целью работы является анализ помехоустойчивости когерентного приема сигналов М-ЧМ на фоне ретранслированной помехи.

МОДЕЛЬ М-ЧМ СИГНАЛА И РЕТРАНСЛИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

Многопозиционная частотная манипуляция представляет собой один из методов передачи цифровой информации с использованием нескольких частот. В технике связи используются М-ЧМ сигналы разной позиционности M (от 4 до 64), которые имеют различную ширину спектра при заданной скорости передачи информации.

Для сигнала с многопозиционной частотной манипуляцией i -й вариант посылки канального символа длительностью T_s , несущего информацию о $k = \log_2 M$ информационных битах, можно записать следующим образом:

$$s_i(t) = A_0 \cos \left[\left(\omega_0 + \left(i - \frac{M+1}{2} \right) \Delta\omega \right) \Delta\omega t \right], \quad (1)$$

$$i = \overline{1, M}, \quad t \in (0, T_s],$$

где $A_0 = \sqrt{2E_s / T_s}$ – номинальная амплитуда сигнала, $E_s = kE_b$ – энергия канального символа, E_b – энергия, приходящаяся на один бит информации; ω_0 – центральная частота спектра сигнала (несущая частота); $\Delta\omega = 2\Delta\omega_d$, $\Delta\omega_d$ – девиация частоты (минимальная девиация, при которой выполняется условие ортогональности, равна $\pi/2T_s$); t – время.

Если ввести обозначения индекса модуляции $h = \Delta\omega_d T_s / \pi$ и многопозиционного канального символа $C_i = \pm 1, \pm 3, \dots, \pm (M-1)$, то выражение (1) можно представить в виде [15]:

$$s_i(t) = A_0 \cos \left(\omega_0 t + C_i h \frac{\pi}{T_s} t \right).$$

На рис. 1 показан пример распределения частот для сигнала 8-ЧМ. Сигнальные точки и соответствующие им каналные символы организованы согласно кодированию Грея.

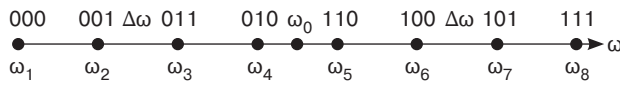


Рис. 1. Пример расстановки частот для сигнала 8-ЧМ

В качестве ретранслированной помехи, возникающей при отражении сигнала М-ЧМ от какого-либо препятствия, используем сигнал (1) с временной задержкой $\tau \leq T_s$ и случайной фазой φ_{int} :

$$s_{\text{int}}(t) = \begin{cases} \mu A_0 \cos \left[\left(\omega_0 + \left(j - \frac{M+1}{2} \right) \Delta\omega \right) (t - \tau) + \varphi_{\text{int}} \right], & 0 < t \leq \tau, \\ \mu A_0 \cos \left[\left(\omega_0 + \left(i - \frac{M+1}{2} \right) \Delta\omega \right) (t - \tau) + \varphi_{\text{int}} \right], & \tau < t \leq T_s, \end{cases} \quad (2)$$

где μ – относительная интенсивность ретранслированной помехи, i и j – текущие номера сигналов в передаваемой последовательности.

На рис. 2 представлены временные соотношения между полезным радиосигналом и ретранслированной помехой.

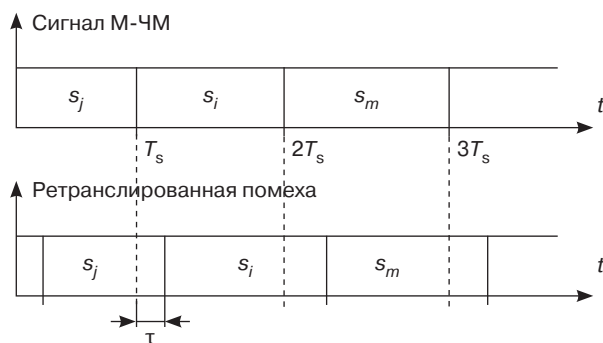


Рис. 2. Временные соотношения между полезным сигналом и ретранслированной помехой

Считаем, что на входе приемника системы передачи информации кроме полезного сигнала и ретранслированной помехи присутствует белый гауссовский шум $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 и δ -функцией корреляции:

$$R(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau).$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВОЙ ОШИБКИ

В качестве приемника сигналов М-ЧМ рассмотрим многоканальный когерентный демодулятор [14, 15]. Это демодулятор в присутствии белого гауссовского шума вычисляет M интегралов свертки I_i принимаемого колебания и M опорных сигналов и принимает решение о канальном символе по максимуму правдоподобия.

Вычисление вероятности битовой ошибки выполнено по методике, представленной в [10–12]. Для этого случайные параметры ретранслированной помехи (2), такие как интенсивность μ , фаза φ_{int} , задержка τ и информационный символ в задержанной копии вначале полагались фиксированными. Это позволило определить условную по ним вероятность ошибочного приема канального символа:

$$P_{\text{es}}^* = 1 - \prod_{i=1}^M p_i(I_m > I_i) \Big|_m, \quad m \neq i. \quad (3)$$

При таком условии и с учетом наличия на входе приемника белого гауссовского шума распределения случайных процессов – интегралов свертки в каналах приемника и их линейных комбинаций « mi » можно считать нормальными и для получения вероятностей $p_i(I_m > I_i)$, входящих в (3) и определяемых через стандартный интеграл вероятности (функцию ошибок), достаточно рассчитать их также условные статистические характеристики:

- математическое ожидание

$$m_{mi}^* = \frac{2E_s}{N_0} \left\{ 1 + \mu \frac{\sin x}{x} \times \right. \\ \times \frac{\tau}{T_s} \cos \left[\left(\frac{M+1}{2} - \frac{j+m}{2} \right) \Delta\omega T_s \frac{\tau}{T_s} + \eta \right] + \\ + \mu \left(1 - \frac{\tau}{T_s} \right) \cos \left[\left(\frac{M+1}{2} - m \right) \Delta\omega T_s \frac{\tau}{T_s} + \eta \right] - \frac{\sin y}{y} - \\ - \mu \frac{\tau}{T_s} \cdot \frac{\sin z}{z} \cos \left[\left(\frac{M+1}{2} - \frac{(j+i)}{2} \right) \Delta\omega T_s \frac{\tau}{T_s} + \eta \right] - \\ - \left(1 - \frac{\tau}{T_s} \right) \mu \frac{\sin g}{g} \cos \left[\frac{(m-i) \Delta\omega T_s}{2} - \right. \\ \left. - \left(\frac{m+i}{2} + \frac{M+1}{2} \right) \Delta\omega T_s \frac{\tau}{T_s} + \eta \right] \Big\},$$

- дисперсия

$$D_{mi}^* = \frac{4E_s}{N_0} \left(1 - \frac{\sin y}{y} \right),$$

где

$$\eta = \varphi_{\text{int}} - \omega_0 \tau, \quad x = (j - m) \frac{\Delta \omega T_s}{2} \cdot \frac{\tau}{T_s},$$

$$y = (m - i) \Delta \omega T_s, \quad z = (j - i) \frac{\Delta \omega T_s}{2} \cdot \frac{\tau}{T_s},$$

$$g = (m - i) \frac{\Delta \omega T_s \left(1 - \frac{\tau}{T_s}\right)}{2}.$$

Для получения безусловной вероятности ошибки P_{es} усреднение условной вероятности P_{es}^* для случайных параметров помехи, таких как, например, случайная фаза φ_{int} , было проведено численным методом. Параметры μ и τ полагались фиксированными. При этом вычисления выполнены с перебором всех возможных комбинаций канальных символов. При расчете вероятности битовой ошибки P_{eb} учтена рекомендация [14], описывающая соотношение между ее величиной и вероятностью ошибки при приеме канального символа P_{es} для многопозиционных ортогональных сигналов:

$$P_{\text{eb}} = P_{\text{es}} / ((M - 1) / (M/2)).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На основе выведенных формул проведены расчеты помехоустойчивости приема сигналов М-ЧМ с позиционностями $M = 2, 4, 8, 16, 32$. В ходе исследования изменялись параметры радиоканала: отношение сигнал/шум E_b/N_0 – в диапазоне от 1 до 13 дБ, относительная интенсивность ретранслированной помехи μ – в диапазоне $[0; 1]$, относительная задержка помехи $\tau/T_s = 0.5$. Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4.

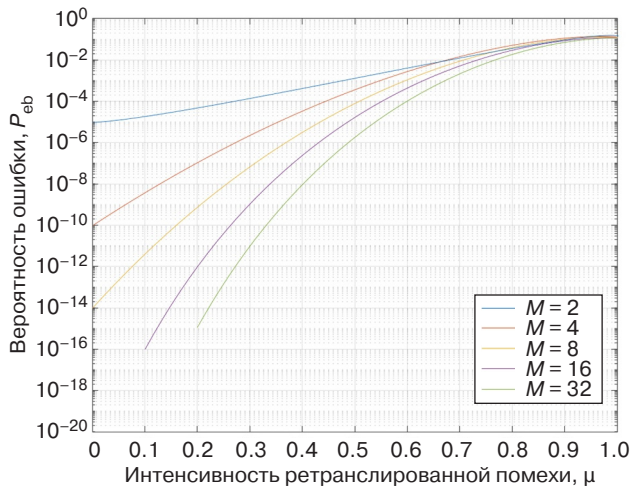


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от относительной интенсивности ретранслированной помехи μ при $E_b/N_0 = 13$ дБ

Воздействие ретранслированной помехи приводит к снижению помехоустойчивости. Снижение тем больше, чем выше интенсивность помехи. При этом сигналы с большей позиционностью ($M \geq 8$) с этой точки зрения являются предпочтительными и при небольшой относительной интенсивности помехи ($\mu < 0.3$) обеспечивают на несколько порядков меньшую вероятность битовой ошибки, чем малопозиционные сигналы 2-ЧМ и 4-ЧМ.

Стоит отметить, что даже при высоком значении относительной интенсивности ретранслированной помехи ($\mu \in [0.4; 0.5]$) использование сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией позволяет сохранить достаточно малый уровень вероятности битовой ошибки (10^{-5} – 10^{-4}), что недоступно при использовании других видов многопозиционных сигналов КАМ [10], М-ФМ [11], АФМ [12] при той же позиционности.

Оценить энергетические потери от воздействия ретранслированной помехи при приеме сигналов М-ЧМ позволяют графики зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при разной относительной интенсивности помехи μ (рис. 4).

Из графиков видно, что с увеличением позиционности М-ЧМ сигнала от 2 до 32 помехоустойчивость приема значительно возрастает. Так, например, при малой интенсивности ретранслированной помехи ($\mu \leq 0.1$) и высоком отношении сигнал/шум ($E_b/N_0 = 10$ дБ) вероятность битовой ошибки снижается на 7 порядков.

Наличие помехи с относительной интенсивностью $\mu = 0.5$ при $P_{\text{eb}} = 10^{-4}$ вызывает энергетические потери от 5 до 6 дБ в зависимости от позиционности. Тем не менее, в целом помехоустойчивость приема М-ЧМ сигналов высокой позиционности остается высокой.

СРАВНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ М-ЧМ И ДРУГИХ ВИДОВ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИИ

На рис. 5 для сравнения приведены графики зависимости вероятности битовой ошибки от относительной интенсивности ретранслированной помехи при приеме сигналов М-ЧМ и КАМ [10] одинаковой позиционности 4, 16 и 32.

Можно видеть, что при позиционности $M = 4$ помехоустойчивость приема этих сигналов примерно одинакова, но при возрастании величины M сигналы с многопозиционной частотной манипуляцией значительно (на несколько порядков по вероятности битовой ошибки) выигрывают у сигналов КАМ в широком диапазоне интенсивностей ретранслированной помехи ($\mu \in [0; 0.6]$).

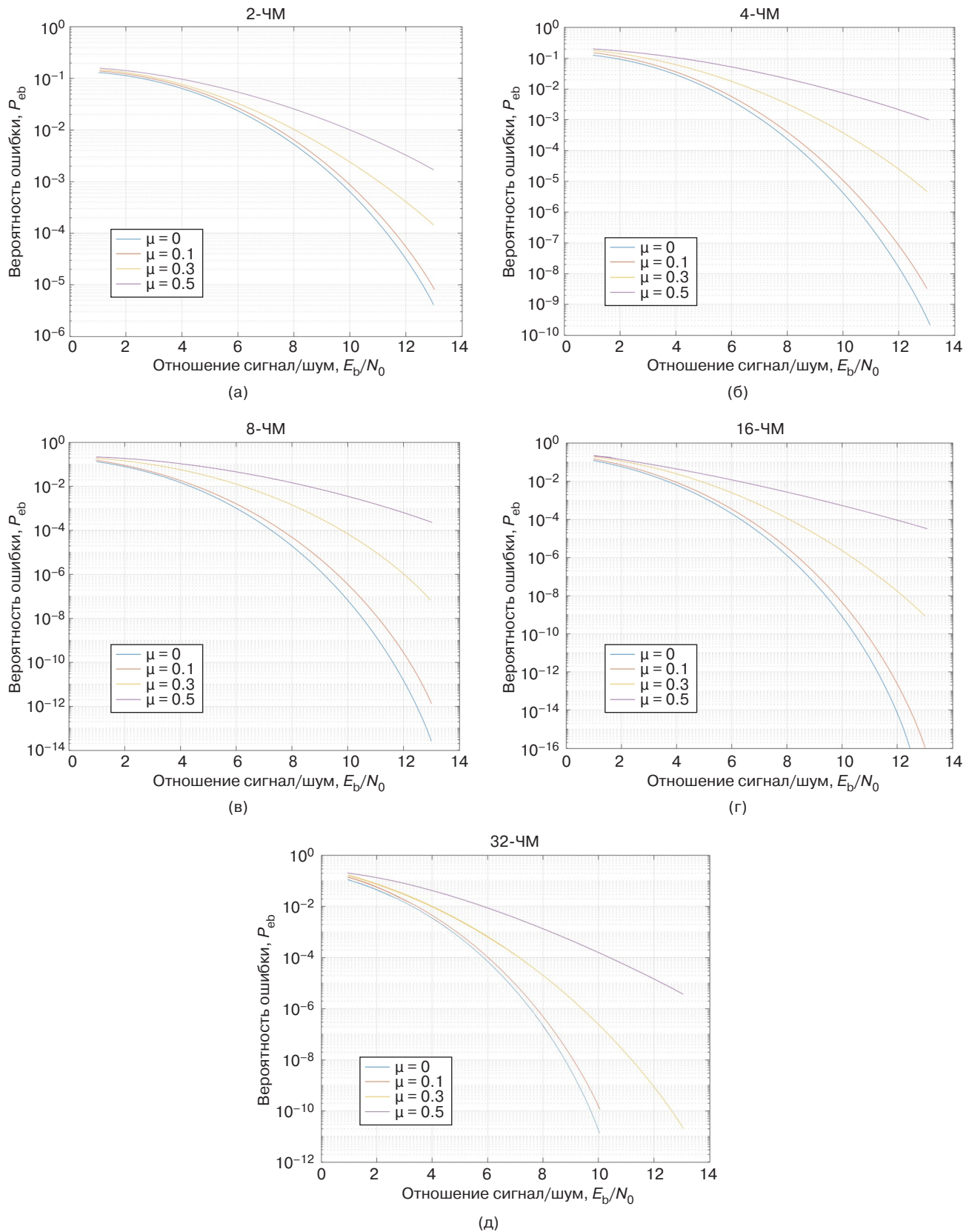


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки $P_{об}$ от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при воздействии ретранслированной помехи для сигналов: (а) 2-ЧМ, (б) 4-ЧМ, (в) 8-ЧМ, (г) 16-ЧМ, (д) 32-ЧМ

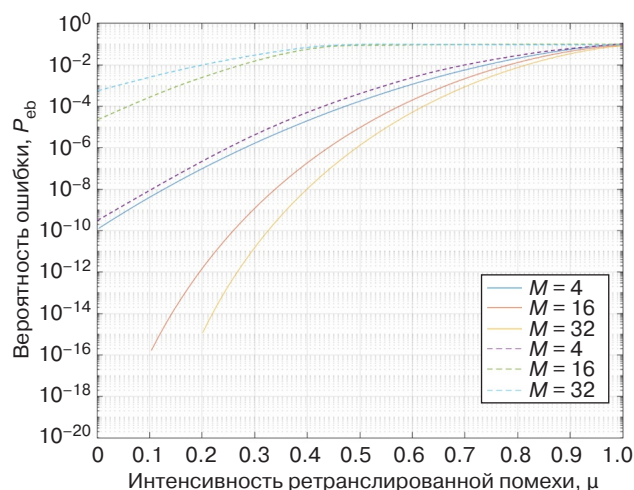


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки $P_{об}$ от относительной интенсивности μ ретранслированной помехи при приеме сигналов М-ЧМ (сплошные линии) и КАМ (штриховые линии) одинаковой позиционности

Подобный вывод можно сделать и в отношении сигналов АФМ [12], помехоустойчивость приема которых приблизительно соответствует КАМ, и, тем более, в отношении сигналов М-ФМ [11], проигрывающих КАМ. Но говоря об указанных достоинствах сигналов М-ЧМ, не следует забывать об их спектральных характеристиках, по которым они существенно проигрывают другим сигналам [13, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ помехоустойчивости приема сигналов с частотной манипуляцией позиционности M от 2 до 32 при наличии в канале связи ретранслированной помехи для разных значений

отношений сигнал/шум и значений относительной интенсивности помехи. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. С возрастанием позиционности помехоустойчивость приема сигналов М-ЧМ улучшается, и при малой интенсивности ретранслированной помехи вероятность битовой ошибки снижается на несколько порядков.
2. Воздействие ретранслированной помехи приводит к снижению помехоустойчивости приема сигналов М-ЧМ, которое тем больше, чем выше ее интенсивность. Например, наличие помехи с относительной интенсивностью $\mu = 0.5$ при $P_{об} = 10^{-4}$ вызывает энергетические потери от 4 до 6 дБ в зависимости от позиционности сигнала М-ЧМ.
3. При $M > 4$ сигналы М-ЧМ значительно выигрывают в помехоустойчивости у сигналов М-ФМ, КАМ и АФМ в широком диапазоне интенсивностей ретранслированной помехи.
4. Применение сигналов М-ЧМ, обладающих столь высокими энергетическими характеристиками, оправдано в радиоканалах без существенных частотных ограничений.

Вклад авторов

А.Е. Троицкая – проведение компьютерных расчетов.

Ю.А. Полевода – обработка результатов.

Г.В. Куликов – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Authors' contributions

A.E. Troitskaya – conducting computer calculations.

Yu.A. Polevoda – processing the results.

G.V. Kulikov – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асхадеев А.И., Павлов Е.В., Баранник А.Ю., Лагутина А.В., Козлов В.И., Пеньков И.А., Чирко О.В. Система робототехники МЧС России. Состояние и перспективы развития. *Технологии гражданской безопасности*. 2022;19(2–72): 41–47. URL: https://www.vniigochs.ru/upload/medialibrary/6b3/ufktj81owcrv39y864piuh8dtzmnw0njo/p_8_Emercom_Russia_Robotics_System_tgb_2_2022.pdf
2. Антохин Е.А., Панасенко Н.Н., Чернова А.Д. Основные требования к беспроводным каналам связи наземных робототехнических комплексов военного назначения. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2017;4(17):10–14.
3. Андреев В.П. Обеспечение безопасности работы кино- и тележурналистов средствами экстремальной робототехники. *Экстремальная робототехника. Труды 33-й Международной научно-технической конференции*. 2022;1(1):25–34. URL: https://er rtc.ru/images/docs/2022/Proceedings_ER-2022.pdf
4. Манько С.В., Лохин В.М., Диане С.К. Принципы построения и экспериментальные исследования прототипного образца многоагентной робототехнической системы для разбора завалов. *Russian Technological Journal*. 2022;10(6): 28–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>
5. Гуреев А.В., Гуреев И.А., Павлюк Ю.М., Тхурайн Т. Влияние многолучевости распространения радиоволн на характеристики широкополосных беспроводных систем внутри зданий. *Электронные информационные системы*. 2017;4(15):17–23.
6. Гуреев А.В. Энергетические характеристики распространения электромагнитных волн внутри зданий. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2015;20(4):421–430.

7. Гуреев А.В., Гуреев И.А., Павлюк Ю.М., Жмылев В.А., Качуренко Д.С. Исследование характеристик распространения электромагнитных волн внутри зданий. *Электронные информационные системы*. 2019;4(23):95–101.
8. Башкиров А.В., Крисилов А.В., Машин В.В., Муратов А.В., Хорошайлова М.В. Анализ вероятностей символьных ошибок для 16-QAM-сигналов в присутствии QPSK-сигналов и 16-QAM-сигналов. *Радиотехника*. 2020;84(6–12):5–9. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202006\(12\)-01](https://doi.org/10.18127/j00338486-202006(12)-01)
9. Сидельников Г.М. Сравнительный анализ эффективности разнесенного приема сигналов с квадратурной амплитудной и с фазовой модуляцией в канале с дискретной многолучевостью. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2020;2(46):18–30. <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.2.18>
10. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Помехоустойчивость когерентного приемника сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Радиотехника и электроника*. 2020;65(8):804–808. <https://doi.org/10.31857/S0033849420070074>
11. Нгуен В.З. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
12. Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в двухлучевом канале связи. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022;2:43–49.
13. Haykin S. *Communication Systems*. John Wiley & Sons, Inc.; 2001. 816 p.
14. Прокис Дж. *Цифровая связь*: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с.
15. Xiong F. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House, Inc.; 2006. 1039 p.

REFERENCES

1. Askhadeev A.I., Pavlov E.V., Barannik A.Y., Lagutina A.V., Kozlov V.I., Penkov I.A., Chirko O.V. Emercom of Russia Robotics System. State and Prospects of Development. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti = Civil Security Technologies*. 2022;19(2–72):41–47 (in Russ.). Available from URL: https://www.vniigochs.ru/upload/medialibrary/6b3/ufktj81owcrv39y864piuh8dtzmw0njo/p_8_Emercom_Russia_Robotics_System_tgb_2_2022.pdf
2. Antokhin E.A., Panasenko N.N., Chernova A.D. Main requirements to wireless communication channels of military ground robotic complexes. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2017;4(17):10–14 (in Russ.).
3. Andreev V.P. Ensuring the safety of the work of film and TV journalists by means of extreme robotics. In: *Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS*. 2022;1(1):25–34 (in Russ.). Available from URL: https://er.rtc.ru/images/docs/2022/Proceedings_ER-2022.pdf
4. Manko S.V., Lokhin V.M., Diane S.K. Prototype multi-agent robotic debris removal system: principles of development and experimental studies. *Russ. Technol. J*. 2022;10(6):28–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>
5. Gureev A.V., Gureev I.A., Pavlyuk Y.M., Thurain T. The effect of multipath propagation on characteristics of indoor broadband wireless systems. *Elektronnye informatsionnye sistemy = Electronic Information Systems*. 2017;4(15):17–23 (in Russ.).
6. Gureev A.V. Energetic characteristics of indoor wave propagation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2015;20(4):421–430 (in Russ.).
7. Gureev A.V., Gureev I.A., Pavlyuk Y.M., Zhmylev V.A., Kachurenko D.S. Investigation of characteristics of electromagnetic waves propagation in buildings. *Elektronnye informatsionnye sistemy = Electronic Information Systems*. 2019;4(23):95–101 (in Russ.).
8. Bashkirov A.V., Krisilov A.V., Mashin V.V., Muratov A.V., Khoroshailova M.V. Analysis of symbol error rate for 16-QAM signals in the presence of QPSK signals and 16-QAM signals. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2020;84(6–12):5–9 (in Russ.). [https://doi.org/10.18127/j00338486-202006\(12\)-01](https://doi.org/10.18127/j00338486-202006(12)-01)
9. Sidelnikov G.M. Comparative analysis of efficiency of spaced reception of signals with quadrature amplitude and with phase modulation in a channel with discrete multipath. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2020;2(46):18–30 (in Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.2.18>
10. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Noise immunity of coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference. *J. Commun. Technol. Electron*. 2020;65(8):934–938. <https://doi.org/10.1134/S1064226920070074>
[Original Russian Text: Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Noise immunity of coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference. *Radiotekhnika i Elektronika*. 2020;65(8):804–808 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033849420070074>]
11. Nguyen V.D. Noise immunity of correlation receiver of signal with multi-position phase shift keying in the presence of retransmitted interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2019;3 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
12. Kulikov G.V., Dang X.Kh. Noise immunity of reception of signal with amplitude-phase shift keying in a two-path communication channel. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2022;2:43–49 (in Russ.).

13. Haykin S. *Communication Systems*. John Wiley & Sons. Inc.; 2001. 816 p.
14. Proakis J. *Tsifrovaya svyaz' (Digital Communication)*: transl. from Engl. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. (in Russ.). [Proakis J. *Digital Communications*. N.Y.: McGraw-Hill; 1995. 928 p.]
15. Xiong F. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House, Inc.; 2006. 1039 p.

Об авторах

Троицкая Александра Евгеньевна, студент, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: troitskaya.a.e@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0002-9315-8829>

Полевода Юрий Александрович, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, SPIN-код РИНЦ 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

About the authors

Alexandra E. Troitskaya, Student, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: troitskaya.a.e@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0002-9315-8829>

Yuriy A. Polevoda, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, RSCI SPIN-code 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>