

Научная статья
УДК 621.391
DOI: [10.34759/trd-2023-130-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-14)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА OFDM-СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ УЗКОПОЛОСНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

Валерий Васильевич Вознюк¹, Юрий Николаевич Копалов²✉

^{1,2}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
Санкт-Петербург, Россия

¹vka@mil.ru ✉

Аннотация. Рассмотрена задача оценивания помехоустойчивости приема OFDM-сигналов в условиях непреднамеренных узкополосных шумовых помех при различных отношениях ширины спектра помехи к ширине спектра сигнала. При этом под узкополосной шумовой помехой понимается гауссовская шумовая помеха с равномерным ограниченным по полосе частот спектром, не превышающим полосу частот сигнала. Для решения данной задачи разработана имитационная модель канала связи с OFDM. Приведены результаты моделирования, показывающие изменение средней вероятности канальной битовой и информационной битовой ошибки в зависимости от значений ширины спектра и центральной частоты в спектре помехи при различных отношениях сигнал/шум.

Ключевые слова: помехоустойчивость, OFDM-сигнал, узкополосная шумовая помеха

Для цитирования: Вознюк В.В., Копалов Ю.Н. Исследование помехоустойчивости приема OFDM-сигналов в условиях непреднамеренных узкополосных шумовых помех // Труды МАИ. 2023. № 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-14)

Original article

INVESTIGATION OF THE NOISE IMMUNITY OF RECEIVING OFDM-SIGNALS IN THE CONDITIONS OF UNINTENTIONAL NARROWBAND NOISE INTERFERENCE

Valery V. Voznyuk¹, Yury N. Kopalov²✉

^{1,2}Military space Academy named after A.F.Mozhaisky,
Saint Petersburg, Russia

¹vka@mil.ru✉

Abstract. The problem of estimating the noise immunity of OFDM-signal reception in the conditions of unintentional narrowband noise interference with different ratios of the width of the signal spectrum is considered. At the same time, narrowband noise interference is understood as Gaussian noise interference with a uniform frequency band-limited spectrum, not exceeding the band signal frequencies. To solve this problem, a simulation model of the communication channel with OFDM has been developed. The simulation results are presented showing the change in the average probability of the

channel bit and information bit errors depending on the spectrum width and the central frequency in the interference spectrum at different signal-to-noise ratios. In the course of the study, the dependences of the average probability of a channel and information bit error on the signal-to-noise ratio with a fixed signal-to-noise ratio for OFDM-QPSK type signals under the influence of a noise interference signal aimed at the width of the spectrum with different values of the central frequency in the interference spectrum were obtained. The dependences of the average probability of the channel and information bit error on the signal-to-noise ratio with a fixed signal-to-noise ratio for OFDM-QPSK type signals under conditions of exposure to narrowband noise interference with different values of the spectrum width and a fixed central frequency in the interference spectrum were obtained. When developing the model, the theoretical foundations of OFDM signal generation technology were used, the proposed model implements cascade coding and interleaving similar to the IEEE 802.16 family of standards. It is shown that not only noise interference aimed at the width of the spectrum, but also interference with a spectrum width less than the width of the signal spectrum can have a negative impact on the noise immunity of receiving OFDM signals.

Keywords: noise immunity, OFDM-signal, narrowband noise interference

For citation: Voznyuk V.V., Kopalov Y.N. Investigation of the noise immunity of receiving OFDM-signals in the conditions of unintentional narrowband noise interference.

Trudy MAI, 2023, no. 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-14)

Введение

В современных системах связи широко используется технология OFDM, позволяющая формировать сигнал с высокой эффективностью использования спектра.

Вопросам исследования и повышения помехоустойчивости приема сигналов с OFDM в условиях воздействия помех типа аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) посвящено множество публикаций, например, [1-10]. Однако постоянное усложнение радиоэлектронной обстановки обуславливает необходимость исследований помехоустойчивости приема сигналов с OFDM в условиях воздействия в том числе и узкополосных шумовых помех (УШП) различной интенсивности и ширины спектра.

Целью статьи является исследование помехоустойчивости приема сигналов с OFDM на фоне действующих внутренних шумов и внешних УШП с различными значениями ширины и центральной частоты спектра помехи. В статье предложена имитационная модель канала связи с OFDM, а также приведены полученные с помощью данной модели результаты оценки помехоустойчивости OFDM-сигналов на фоне УШП с различными параметрами.

Постановка задачи исследования

Известно [11], что помехоустойчивость приема OFDM-сигналов в условиях воздействия только внутренних шумов приемника или помех типа АБГШ

определяется используемым на каждой отдельной поднесущей видом модуляции и отношением энергии сигнала к сумме спектральных плотностей мощности внутреннего шума и помехи. В случае воздействия на OFDM-сигнал не только шумов, но и непреднамеренной УШП, действующей в пределах K поднесущих этого сигнала, без учета краевых эффектов и эффектов частотной избирательности воздействия на спектр сигнала поднесущей, для M -кратной фазовой манипуляции средняя вероятность канальной битовой ошибки может быть записана в виде [12,13]:

$$P_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\log_2(M_i)} \sum_{j=1}^{M_i-1} (\overline{d_{ij}} \cdot P_{ij}) \quad (1)$$

где N – число информационных поднесущих, M_i – количество символов в алфавите для i -ой поднесущей, $\overline{d_{ij}}$ – среднее расстояние Хэмминга между символами сигнального созвездия, полученного с использования кодирования Грэя, P_{ij} – вероятность канальной битовой ошибки на i -ой поднесущей, которая определяется в соответствии с выражением:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi(1-(2j-1)/M_i)} e^{\left(\frac{\log_2(M_i) E_b \sin^2[(2j-1)\pi/M_i]}{N_0 + \eta_i D_0 \sin^2 \theta} \right)} d\theta - \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi(1-(2j+1)/M_i)} e^{\left(\frac{\log_2(M_i) E_b \sin^2[(2j+1)\pi/M_i]}{N_0 + \eta_i D_0 \sin^2 \theta} \right)} d\theta \quad (2)$$

где E_b – энергия информационного бита, N_0 – спектральная плотность мощности АБГШ, D_0 – средняя спектральная плотность мощности УШП на поднесущей, η_i – индикатор наличия воздействия на поднесущую УШП, определяемый как:

$$\eta_i = \begin{cases} 0, & i \notin K; \\ 1, & i \in K. \end{cases} \quad (3)$$

Выражение (2) также можно записать как функцию от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi(1-(2j-1)/M_i)} e^{\left(\frac{\log_2(M_i) \sin^2[(2j-1)\pi/M_i]}{\frac{1}{E_b} + \frac{\eta_i}{E_b} \sin^2 \theta} \frac{1}{N_0} \frac{1}{D_0} \right)} d\theta -$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi(1-(2j+1)/M_i)} e^{\left(\frac{\log_2(M_i) \sin^2[(2j+1)\pi/M_i]}{\frac{1}{E_b} + \frac{\eta_i}{E_b} \sin^2 \theta} \frac{1}{N_0} \frac{1}{D_0} \right)} d\theta \quad (4)$$

Например, для прицельной по ширине спектра и центральной частоте в спектре сигнала помехи в условиях, когда на всех поднесущих используется модуляция вида BPSK, средняя вероятность канальной битовой ошибки, на основе выражений (1) и (4), может быть определена следующим образом:

$$P_b = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{\left(\frac{1}{\frac{1}{E_b} + \frac{1}{E_b} \sin^2 \theta} \frac{1}{N_0} \frac{1}{D_0} \right)} d\theta \quad (5)$$

Однако выражение (1) не учитывает ни помехоустойчивого кодирования, ни перемежения, которые часто используются на практике и оказывают существенное влияние на помехоустойчивость процесса передачи и приема информации.

Совместное аналитическое описание всех вышеназванных действующих факторов оказывается чрезвычайно сложным, поэтому в качестве рационального способа оценивания помехоустойчивости приема OFDM-сигналов предлагается использовать имитационное моделирование. В этом случае для достижения поставленной цели необходимо решить следующие частные задачи:

1. Получение зависимостей средней вероятности информационной битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум для различных видов модуляции поднесущих (BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64) в условиях воздействия прицельной по ширине спектра и центральной частоте в спектре сигнала шумовой помехи.

Дополнительно необходимо получить зависимости средней вероятности канальной битовой ошибки (определяемой на выходе демодулятора) от отношения сигнал/широкополосная помеха при фиксированном отношении сигнал/шум, что позволит оценить адекватность предлагаемой модели путем сравнения полученных результатов с аналитической зависимостью, построенной на основе выражения (5);

2. Получение зависимостей средней вероятности канальной и информационной битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум для сигналов типа OFDM-QPSK в условиях воздействия прицельной по ширине спектра сигнала шумовой помехи с различными значениями центральной частоты в спектре помехи;

3. Получение зависимостей средней вероятности канальной и информационной битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум для сигналов типа OFDM-QPSK в условиях воздействия

УШП с различными значениями ширины спектра и фиксированной центральной частотой в спектре помехи.

Средняя вероятность канальной битовой ошибки P_{bk} определяется как отношение числа искаженных канальных двоичных символов к их общему числу без учета помехоустойчивого кодирования и перемежения (т.е. на выходе демодулятора), получаемое для каждого опыта, состоящего в имитации процесса передачи и приема 10^6 информационных двоичных символов сигналом при воздействии помех для заданного значения отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум по методу Монте-Карло.

Средняя вероятность информационной битовой ошибки $P_{би}$ определяется как отношение числа искаженных информационных двоичных символов с учетом операций перемежения-деперемежения и помехоустойчивого кодирования-декодирования (т.е. на выходе помехоустойчивого декодера) к их общему числу, получаемое для каждого опыта, состоящего в имитации процесса передачи и приема 10^6 информационных двоичных символов сигналом при воздействии помех для заданного значения отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум по методу Монте-Карло.

Описание имитационной модели канала связи с OFDM

Предлагаемая модель канала связи с OFDM представлена на рисунке 1. Программная реализация имитационной модели разработана в среде Matlab.

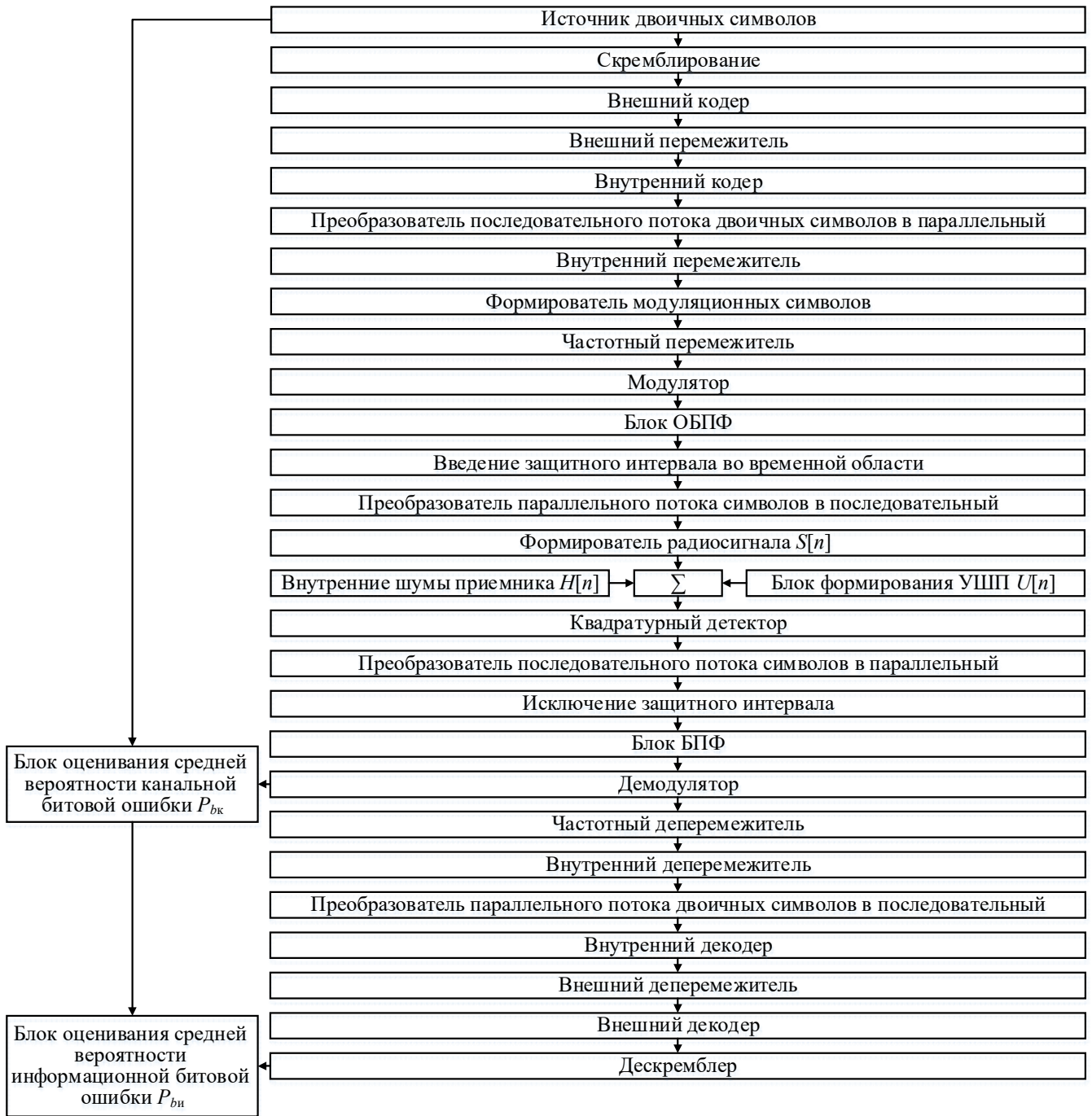


Рисунок 1 – Схема модели канала связи с OFDM

Необходимыми исходными данными для моделирования являются:

- 1) число информационных поднесущих OFDM-сигнала N ;
- 2) длительность OFDM-символа τ_c ;
- 3) мощность помехи $P_{\text{п}}$;

- 4) ширина спектра помехи $\Delta f_{п}$;
- 5) отношение сигнал/шум $P_c/P_{ш}$;

При разработке модели были использованы теоретические основы технологии формирования OFDM сигналов, достаточно подробно изложенные в работах [8, 14-17]. В предлагаемой модели реализовано каскадное кодирование и перемежение аналогично семейству стандартов IEEE 802.16 [18]. Помехоустойчивое кодирование реализовано с использованием кодов Рида-Соломона и сверточных кодов, а внешнее, внутреннее и частотное перемежение осуществляется с помощью блочных перемежителей.

В статье приведены частные результаты моделирования, полученные при следующих настройках модели:

– при скремблировании в качестве генератора псевдослучайной последовательности (ПСП) используется пятнадцатиразрядный регистр сдвига с обратными связями и образующим полиномом $G(X) = X^{15} + X^{14} + 1$. Вектор инициализации генератора ПСП передается с началом кадра посредством кодового слова 100101010000000 в двоичном коде;

– алгоритм кодирования Рида-Соломона строится над полем Галуа GF(256). Он оперирует блоками исходных данных по 239 байт, формируя из них кодированный блок размером 255 байт, способный исправить до 8 поврежденных байт или обнаружить до 15 поврежденных или стертых внутренним кодом байт;

– сверточный кодер реализует базовую скорость кодирования 1/2 и кодовое ограничение 9. Используемые блочные перемежители имеют глубину перемежения 12 бит.

При решении первой частной задачи исследования были рассмотрены четыре вида модуляции: BPSK, QPSK, QAM-16 и QAM-64. При решении второй и третьей частных задач исследования рассмотрены только сигналы с модуляцией OFDM-QPSK, так как подобная схема модуляции наиболее распространена в современных системах связи.

Дискретный сигнал на интервале одного OFDM-символа τ_c представляет собой сумму всех отсчетов информационных поднесущих колебаний и защитного интервала. С учетом вещественной I_k и мнимой Q_k частей комплексного символа квадратурной модуляции модель сигнала можно записать в виде:

$$S[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \left[I_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - Q_k \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] \quad (6)$$

где $n = \tau_c F_\delta$, F_δ – частота дискретизации.

Правило формирования внутренних шумов приемника и УШП записывается в виде [19]:

$$U_Z[n] = \sum_{k=1}^M \hat{A}_{kZ} \cos\left(2\pi\left(f_0(2-Z) + \Delta F_Z \frac{kn}{M}\right) + \hat{\beta}_{kZ}\right) \quad (7)$$

где индекс $Z = 1$ указывает на УШП, а индекс $Z = 2$ – на внутренние шумы приемника;

\hat{A}_{kZ} – случайные коэффициенты с релейевским распределением;

$\hat{\beta}_{kZ}$ – случайные величины, распределенные равномерно в интервале $[0, 2\pi]$;

f_0 – центральная частота в спектре помехи;

ΔF_Z – ширина полосы частот;

$$M = \Delta F_Z / F_0.$$

Для \hat{A}_{kZ} параметр релеевского распределения $\sigma = \begin{cases} \sqrt{2P_{\text{п}}} & \text{для } Z = 1; \\ \sqrt{N_0 \Delta F} & \text{для } Z = 2, \end{cases}$

$$\text{а } \Delta F_Z = \begin{cases} f_{\text{п2}} - f_{\text{п1}} & \text{для } Z = 1; \\ \Delta f_{\text{ш}} & \text{для } Z = 2, \end{cases}$$

где $f_{\text{п1}}$ – нижняя частота в спектре помехи;

$f_{\text{п2}}$ – верхняя частота в спектре помехи;

$\Delta f_{\text{ш}}$ – ширина полосы внутренних шумов.

По результатам моделирования формируются зависимости $P_{\text{би}}(P_c / P_{\text{п}})$ и $P_{\text{бк}}(P_c / P_{\text{п}})$ при $P_c / P_{\text{ш}} = \text{const}$.

Результаты исследования помехоустойчивости приема OFDM-сигналов в условиях воздействия узкополосных шумовых помех

При моделировании были использованы следующие исходные данные: $N = 216$ и $\tau_c = 4,4$ мкс. Зависимости средней вероятности канальной и информационной битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум $P_c/P_{\text{ш}} = 30$ дБВт в условиях воздействия прицельной по ширине спектра и центральной частоте в спектре сигнала шумовой помехи представлены на рисунке 2.

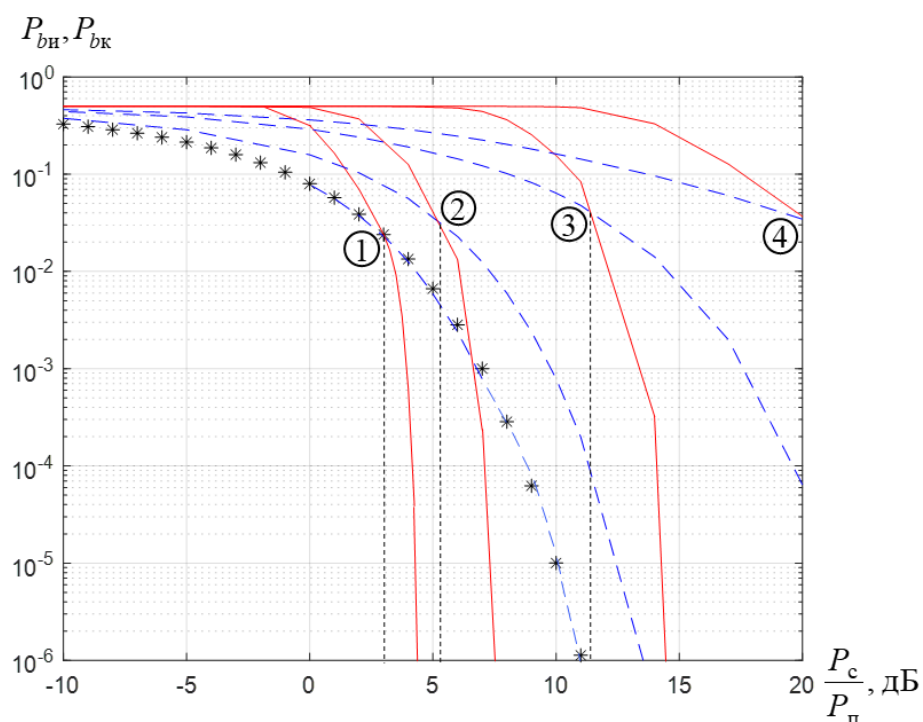


Рисунок 2 – Зависимости средней вероятности канальной и информационной битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум в условиях воздействия прицельной по ширине спектра и центральной частоте в спектре сигнала шумовой помехи

На рисунке 2 сплошной линией обозначены зависимости средней вероятности информационной битовой ошибки $P_{би}(P_c / P_n)$, штриховой линией – средней вероятности канальной битовой ошибки $P_{бк}(P_c / P_n)$, * – теоретическая зависимость вероятности канальной битовой ошибки $P_{бк}(P_c / P_n)$ для OFDM-BPSK. Цифрами обозначены пары зависимостей для различных видов модуляции: 1 – для BPSK, 2 – для QPSK, 3 – для QAM-16, 4 – для QAM-64 соответственно.

Представленные на рисунке 2 зависимости совпадают с аналогичными зависимостями, полученными другими авторами [1,2,18,20], а также полученной на

основании выражения (5), что подтверждает адекватность модели и достоверность полученных результатов.

На рисунке 3 представлены зависимости средней вероятности информационной (а) и канальной (б) битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум для сигналов типа OFDM-QPSK в условиях воздействия УШП с $\Delta f_{\text{п}} / \Delta f_{\text{с}} = 0,5$, где $\Delta f_{\text{с}}$ – ширина спектра сигнала, и различными значениями центральной частоты в спектре помехи.

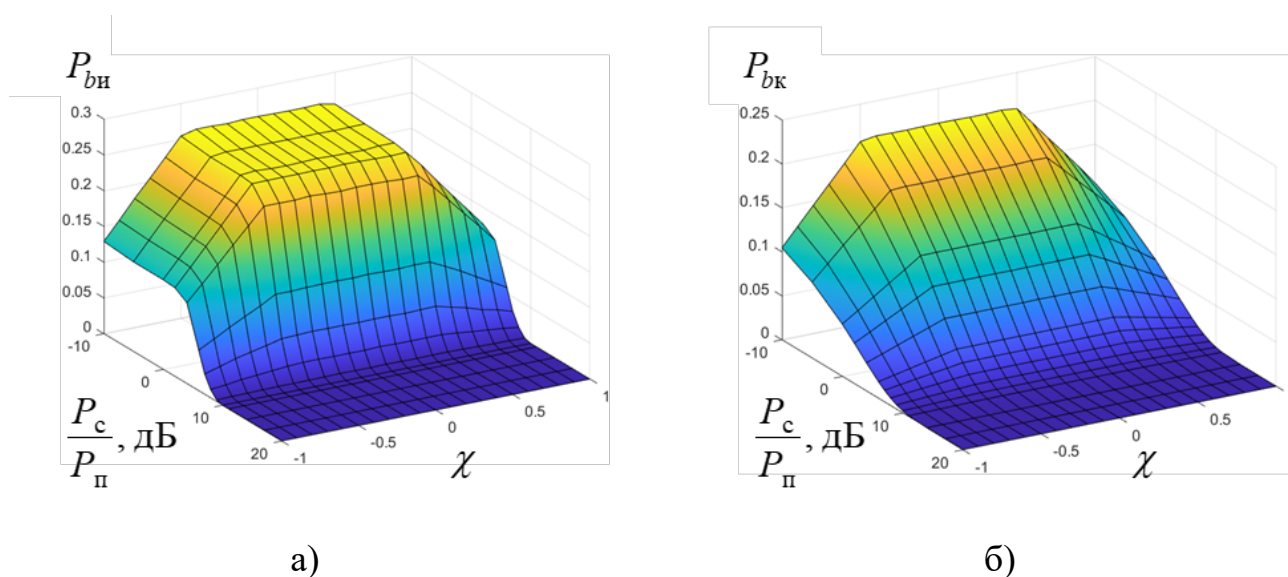


Рисунок 3 – Зависимости средней вероятности информационной (а) и канальной (б) битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум в условиях воздействия прицельной по ширине спектра шумовой помехи с различными значениями центральной частоты в спектре помехи

На рисунке 3 ось χ определяет рассогласование между центральной частотой в спектре сигнала $f_{\text{с}}$ и центральной частотой в спектре помехи $f_{\text{п}}$:

$$\chi = \frac{2(f_{\text{п}} - f_{\text{с}})}{\Delta f_{\text{с}}} \quad (8)$$

Полученные зависимости согласуются с выражением (1) и показывают, что при применении одного вида модуляции на всех поднесущих средняя вероятность как канальной, так и информационной битовой ошибки пропорциональна числу поднесущих K , подвергшихся воздействию помехи.

На рисунках 4 и 5 представлены зависимости средней вероятности информационной (рисунок 4(а)) и канальной (рисунок 4(б), рисунок 5) битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум для сигналов типа OFDM-QPSK в условиях воздействия УШП с различными значениями ширины спектра и фиксированной центральной частотой в спектре помехи.

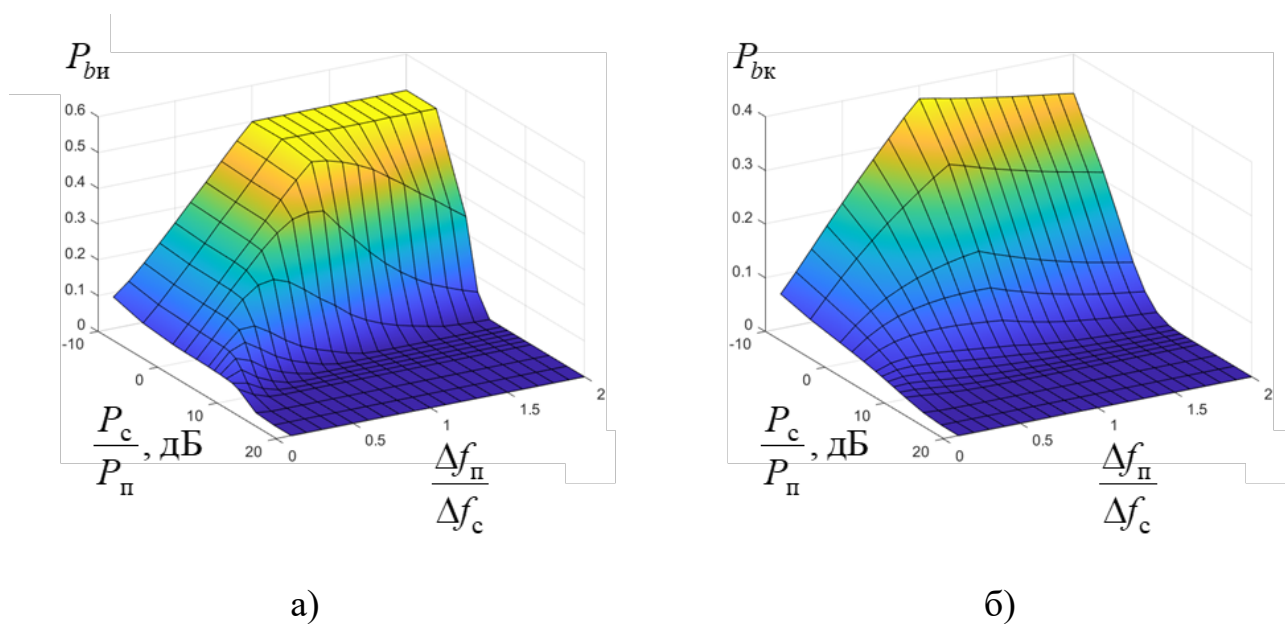


Рисунок 4 – Зависимости средней вероятности информационной (а) и канальной (б) битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум в условиях воздействия УШП с различными значениями ширины спектра и фиксированной центральной частотой в спектре помехи

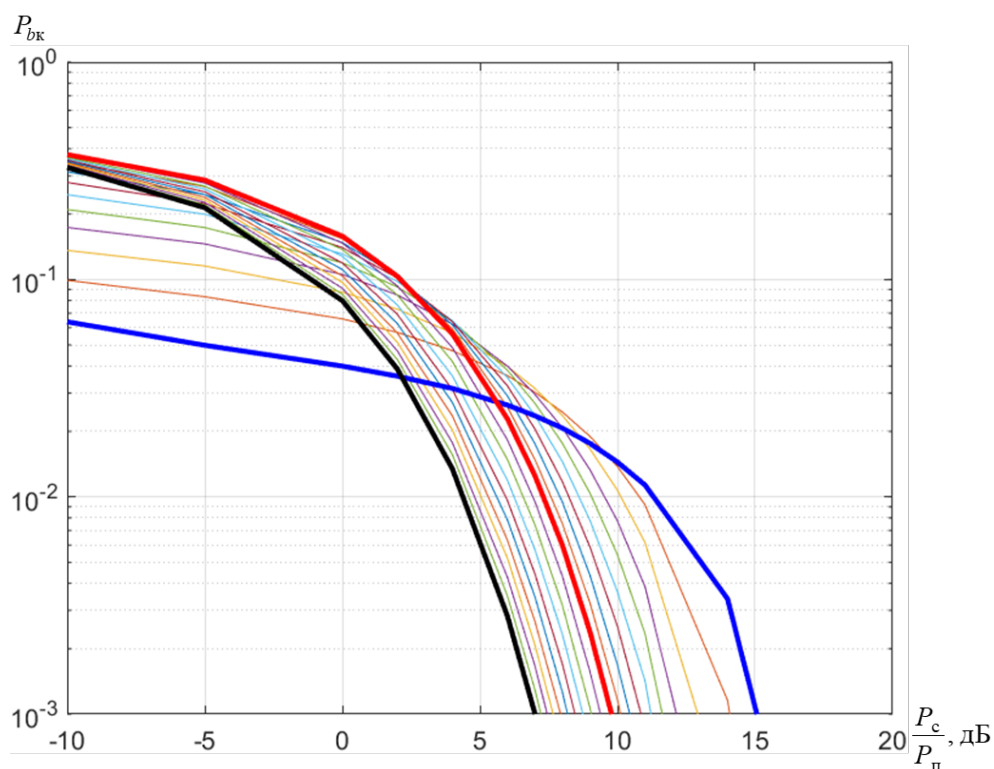


Рисунок 5 – Зависимости средней вероятности канальной битовой ошибки от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум в условиях воздействия УШП с различными значениями ширины спектра и фиксированной центральной частотой в спектре помехи

На рисунке 5 черной линией обозначена зависимость средней вероятности канальной битовой ошибки $P_{bk}(P_c / P_n)$ при $\Delta f_n / \Delta f_c = 2$, красной линией – при $\Delta f_n / \Delta f_c = 1$, синей линией – при $\Delta f_n / \Delta f_c = 0,1$.

Полученные зависимости показывают, что не только прицельная по ширине спектра шумовая помеха, но и помеха с шириной спектра меньше ширины спектра сигнала может оказывать негативное влияние на помехоустойчивость приема OFDM-сигналов.

Заключение

В статье предложена имитационная модель канала связи с OFDM и приведены частные результаты оценки помехоустойчивости приема OFDM-сигналов на фоне узкополосных шумовых помех:

– существует предельное значение отношения сигнал/шум, ниже которого кодер лишь размножает ошибки. Для предложенной модели этот предел соответствует следующим отношениям сигнал/помеха для различных видов модуляции: 3 дБ для BPSK, 6 дБ для QPSK, 12 дБ для QAM-16 и 20 дБ для QAM-64;

– для прицельной по ширине спектра помехи рассогласование по частоте между помехой и сигналом в пределах $0 \leq \Delta f \leq 0,2\Delta f_c$ незначительно влияет на помехоустойчивость приема OFDM-сигналов. При этом отстройка частоты помехи на половину ширины спектра сигнала приводит к снижению вероятности как канальной, так и информационной битовой ошибки более чем в 2 раза;

– в условиях, когда на всех поднесущих используется один вид модуляции, воздействие УШП на OFDM-сигнал не зависит от положения центральной частоты помехи в спектре сигнала и определяется только шириной спектра и мощностью помехи;

– не только прицельная по ширине спектра шумовая помеха, но и помеха с шириной спектра меньше ширины спектра сигнала может оказывать негативное влияние на помехоустойчивость приема OFDM-сигналов. Изменение ширины спектра шумовой помехи в пределах $0,8 \leq \Delta f_{\text{п}} / \Delta f_c \leq 1$ не существенно сказывается на помехоустойчивости приема OFDM-сигналов. Применение помехоустойчивого кодирования, в целом, значительно повышает помехоустойчивость приема OFDM-

сигналов в условиях воздействия УШП, когда $\Delta f_{\Pi} \ll \Delta f_c$. Однако воздействие УШП с $0 \leq \Delta f \leq 0,1\Delta f_c$ при высоких отношениях сигнал-помеха ($P_c / P_{\Pi} > 7$ дБ) оказывает более негативное влияние на помехоустойчивость приема OFDM-сигналов по сравнению с прицельной по ширине спектра сигнала помехой.

Список источников

1. Ложкин К.Ю. Помехоустойчивость приема OFDM-сигнала с однократной фазовой манипуляцией и корректирующим кодированием на фоне полигармонической помехи // Информация и космос. 2018. № 2. С. 37-43.
2. Хоанг В.З. Парамонов А.А. Помехоустойчивость передачи сигналов OFDM в системах радиосвязи с ППРЧ в условиях деструктивного воздействия преднамеренных помех // Системы компьютерной математики и их приложения. 2021. № 22. С. 84-89.
3. Воронин Д.А. Анализ помехоустойчивости систем связи с OFDM с оценкой параметров канала // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2017. № 5. С. 167-169.
4. Карасева Т.С. Проблемы помехоустойчивости в OFDM системах // Перспективы развития информационных технологий. 2015. № 24. С. 85-89.
5. Anurag Pandey, Sandeep Sharma. BER Performance of OFDM System in AWGN and Rayleigh Fading Channel // International Journal of Engineering Trends and Technology, 2014, vol. 13, no. 3. pp. 126-128. DOI:[10.14445/22315381/IJETT-V13P227](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V13P227)

6. Siddhaling V., Moholkar. BER Performance for FFT and Wavelet Based OFDM Systems over AWGN Channel // International Journal of Research and Scientific Innovation, 2015, vol. 2, no 8, pp. 52-54.
7. Старицин С.С., Абакумов А.Н., Передрий А.В., Павлов А.В. Методика оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 6. С. 1-16.
8. Бахтин А.А., Волков А.С., Солодков А.В., Елецких Е.В. Исследование влияния клиппирования на помехоустойчивость приема OFDM-символов // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169000>. DOI: 10.34759/trd-2022-126-14.
9. Витязев В.В., Никишев П.Б. Исследование технологий OFDM, f-OFDM и sub-OFDM при работе в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом // 24 Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение», DSPA-2022, (Москва, 30 марта - 1 апреля 2022): сборник трудов. – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2022. С. 101-103.
10. Яценко С.Ю. Анализ влияния искажений и шумов на помехоустойчивость приема сигналов квадратурной амплитудной модуляции // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 5. С. 3.
11. Лузин В.И. Никитин Н.П., Гадзиковский В.И. Основы формирования, передачи и приема цифровой информации. – М.: СОЛОН-Пресс, 2014. – 316 с.

12. Simon M.K., Alouini M.S. Digital Communication over Fading Channels – A Unified Approach to Performance Analysis, 1st Ed., Wiley, 2000. DOI:[10.1002/0471200697](https://doi.org/10.1002/0471200697)
13. Звонарев В.В., Попов А.С., Худик М.Ю. Методика расчета вероятности ошибки посимвольного приема дискретных сообщений при наличии помех // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104213>.
14. Носов В.И. Методы повышения помехоустойчивости систем радиосвязи с использованием технологии ММО и пространственно-временной обработки сигнала: монография. - Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2014. – 316 с.
15. Казак П.Г., Шевцов В.А. Принципы построения энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет для Арктики // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158239>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-06
16. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Миронов Ю.Б. Схемы модуляции для систем сотовой связи 5G/IMT-2020 и 6G // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 3. С. 11-17.
17. Wang L., Jezek B. OFDM modulation schemes for military satellite communications // Military Communications Conference, MILCOM 2008, IEEE, December 2008. DOI: 10.1109/MILCOM.2008.4753506
18. Вишнеvский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G: монография. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.

19. Вознюк В.В., Копалов Ю.Н., Фомин А.В. Способ повышения помехоустойчивости приемников фазоманипулированных сигналов с расширением спектра псевдослучайной последовательностью на основе применения фильтра-компенсатора помех // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № 682. С. 38-47.
20. Паршуткин А.В., Бучинский Д.И. Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях искажений служебной части кадров нестационарными // Информатика и автоматизация. 2020. Т. 19. № 5. С. 967-990. DOI: 10.15622/ia.2020.19.5.3

References

1. Lozhkin K.Yu. *Informatsiya i kosmos*, 2018, no. 2, pp. 37-43.
2. Khoang V.Z. Paramonov A.A. *Sistemy komp'yuternoї matematiki i ikh prilozheniya*, 2021, no. 22, pp. 84-89.
3. Voronin D.A. *Sovremennye problemy proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh system*, 2017, no. 5, pp. 167-169.
4. Karaseva T.S. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii*, 2015, no. 24, pp. 85-89.
5. Anurag Pandey, Sandeep Sharma. BER Performance of OFDM System in AWGN and Rayleigh Fading Channel, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2014, vol. 13, no. 3. pp. 126-128. DOI:10.14445/22315381/IJETT-V13P227

6. Siddhaling V., Moholkar. BER Performance for FFT and Wavelet Based OFDM Systems over AWGN Channel, *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 2015, vol. 2, no 8, pp. 52-54.
7. Staritsin S.S., Abakumov A.N., Peredrii A.V., Pavlov A.V. *Zhurnal radioelektroniki*. 2020, no. 6, pp. 1-16.
8. Bakhtin A.A., Volkov A.S., Solodkov A.V., Eletsikh E.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169000>. DOI: 10.34759/trd-2022-126-14.
9. Vityazev V.V., Nikishev P.B. *24 Mezhdunarodnaya konferentsiya «Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye», DSPA-2022*. – Moscow, Rossiiskoe nauchno-tekhnicheskoe obshchestvo radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A.S. Popova, 2022, pp. 101-103.
10. Yatsenko S.Yu. *Zhurnal radioelektroniki*, 2016, no. 5, pp. 3.
11. Luzin V.I. Nikitin N.P., Gadzikovskii V.I. *Osnovy formirovaniya, peredachi i priema tsifrovoi informatsii* (Fundamentals of Formation, Transmission and Reception of Digital Information), Moscow, SOLON-Press, 2014, 316 p.
12. Simon M.K., Alouini M.S. *Digital Communication over Fading Channels – A Unified Approach to Performance Analysis*, 1st Ed., Wiley, 2000. DOI:10.1002/0471200697
13. Zvonarev V.V., Popov A.S., Khudik M.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104213>.
14. Nosov V.I. *Metody povysheniya pomekhustoichivosti sistem radiosvyazi s ispol'zovaniem tekhnologii MIMO i prostranstvenno-vremennoi obrabotki signala* (Methods of Increasing the Noise Immunity of Radio Communication systems using

MIMO-technology and Spatio-Temporal Signal Processing), Novosibirsk, Sibirskii gosudarstvennyi universitet telekommunikatsii i informatiki, 2014, 316 p.

15. Kazak P.G., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158239>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-06

16. Bakulin M.G., Ben Rezheb T.B.K., Kreindelin V.B., Mironov Yu.B. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 11-17.

17. Wang L., Jezek B. OFDM modulation schemes for military satellite communications, *Military Communications Conference, MILCOM 2008*, IEEE, December 2008. DOI: 10.1109/MILCOM.2008.4753506

18. Vishnevskii V.M., Portnoi S.L., Shakhnovich I.V. *Entsiklopediya WiMAX. Put' k 4G* (The WiMAX Encyclopedia. The Path to 4G), Moscow, Tekhnosfera, 2009, 472 p.

19. Voznyuk V.V., Kopalov Yu.N., Fomin A.V. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2022, no. 682, pp. 38-47.

20. Parshutkin A.V., Buchinskii D.I. *Informatika i avtomatizatsiya*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 967-990. DOI: 10.15622/ia.2020.19.5.3

Статья поступила в редакцию 02.04.2023

Одобрена после рецензирования 07.04.2023

Принята к публикации 27.06.2023

The article was submitted on 02.04.2023; approved after reviewing on 07.04.2023; accepted for publication on 27.06.2023