

УДК 621.396

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_66

**ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ
С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ
ДАННЫХ С OFDM МОДУЛЯЦИЕЙ**

**EVALUATION OF THE IMPACT OF UNINTENTIONAL PULSE INTERFERENCE
WITH LINEAR FREQUENCY MODULATION ON A DATA TRANSMISSION
CHANNEL WITH OFDM MODULATION**

Канд. техн. наук П.А. Маслаков, канд. техн. наук Д.И. Бучинский, Ю.Н. Копалов

Ph.D. P.A. Maslakov, Ph.D. D.I. Buchinskiy, Y.N. Kopalov

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье приведены результаты исследования помехоустойчивости приемника OFDM-сигнала на фоне воздействия непреднамеренных импульсных помех с линейной частотной модуляцией. Исследования проводились с помощью аналитико-имитационного моделирования. В ходе исследования учитывалась кадровая структура принимаемого сигнала, отличия в помехоустойчивости приемника во время приема различных элементов кадра. В качестве показателя помехоустойчивости использовалась вероятность кадровой ошибки. Исследования проводились для различных отношений средней мощности сигнала к средней мощности помехи, различных длительностей импульсов непреднамеренной помехи и различной скорости изменения частоты импульсов непреднамеренной помехи. Показано, что на помехоустойчивость приемника OFDM-сигналов оказывают влияние не только отношения мощностей сигнала и непреднамеренной помехи, длительность импульсов непреднамеренной помехи, но и скорость изменения частоты линейно-частотно-модулированного сигнала непреднамеренной помехи.

Ключевые слова: вероятность кадровой ошибки, OFDM-модуляция, помехоустойчивость, непреднамеренные импульсные помехи, линейная частотная модуляция.

The article presents the results of a study of the noise immunity of an OFDM-signal receiver against the background of unintended pulse interference with linear frequency modulation. The research was carried out using analytical and simulation modeling. The study took into account the frame structure of the received signal, differences in the receiver's noise immunity during reception of various frame elements. The probability of a personnel error was used as an indicator of noise immunity. Studies have been conducted for different ratios of the average signal power to the average interference power, different pulse durations of unintended interference, and different rates of change in the frequency of unintended interference pulses. It is shown that the noise immunity of the receiver of OFDM-signals is influenced not only by the ratio of signal power and unintended interference, the pulse duration of unintended interference, but also by the rate of frequency change of a linearly frequency modulated signal of unintended interference.

Keywords: probability of frame error, OFDM-modulation, noise immunity, unintended pulse interference, linear frequency modulation.

Бурное развитие информационных технологий и мобильных устройств приводит к потребности в передаче больших объемов информации по радиоканалам. Необходимость обеспечения большого числа абонентов высокоскоростными каналами передачи данных привела к использованию современными системами связи высокочастотных диапазонов электромагнитного спектра и широкополосных радиоканалов. Расширение полосы радиоканала приводит к сокращению длительности передаваемых символов. Многолучевое распространение сигнала, обусловленное городской застройкой, при условии сокращения длительности символа приводит к появлению межсимвольной интерференции и замираниям сигнала [1–4]. Применение широко распространенных видов модуляции, таких как M-PSK, APSK, M-QAM, M-FSK для организации широкополосных радиоканалов в условиях городской застройки потребует использования для борьбы с замираниями кодов коррекции ошибок с высокой избыточностью, что приведет к снижению скорости передачи информации.

Поэтому в современных системах связи широкое применение получает мультиплексирование с ортогональным частотным разделением OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) — вид цифровой модуляции, использующий большое количество поднесущих с ортогональными сигналами. Модуляция OFDM применяется в таких стандартах связи, как IEEE 802.16 и низкоорбитальной многоспутниковой системе связи Starlink. Ввиду того, что каждый ортогональный сигнал является относительно узкополосным, длительность символов в таком сигнале будет достаточно большой для того чтобы избежать появления межсимвольной интерференции и замираний сигнала [5, 6]. Другим важным достоинством OFDM-модуляции является ее устойчивость к узкополосным помехам, что также актуально в условиях сложной городской электромагнитной обстановки [7]. В настоящее время подробно исследован вопрос помехоустойчивости приемников OFDM-сигналов при воздействии широкополосных шумовых и узкополосных помех [8–10].

Современная городская среда насыщена различными источниками непреднамеренных помех. Одним из таких источников могут являться беспилотные транспортные средства,

получающие бурное развитие на фоне успехов применения искусственного интеллекта в различных сферах человеческой деятельности. В качестве одного из источников информации об окружающей обстановке беспилотные транспортные средства используют данные, получаемые от радаров, которые могут являться источником непреднамеренных помех. В [11] были проведены исследования помехоустойчивости приемников сигналов с OFDM-модуляцией при воздействии импульсных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Однако в исследовании не учитывалось, что сигналы, применяемые в современных системах связи, имеют сложную кадровую структуру и включают элементы с различной обработкой. Кроме того, при воздействии непреднамеренных импульсных помех с ЛЧМ не исследован вопрос влияния скорости перестройки частоты на помехоустойчивость приемников сигналов с OFDM-модуляцией. Поэтому исследование помехоустойчивости приемников OFDM-сигналов на фоне импульсных сигналов с линейной частотной модуляцией с учетом их кадровой структуры является актуальным.

Частотно-временная структура сигнала системы связи, использующей OFDM-модуляцию, на примере низкоорбитальной многоспутниковой системы связи Starlink, представлена на рис. 1. Частотный ресурс линии космический аппарат — абонентский терминал поделен на 8 отдельных каналов. Ширина полосы отдельного канала ΔF_c составляет 240 МГц. Сигнал, передаваемый во временной области, в каждом канале представляет собой последовательность кадров. Каждый кадр начинается с первичной последовательности синхронизации (ППС). Первичная последовательность синхронизации представляет собой BPSK (Binary Phase Shift Keying) сигнал, модулированный повторяющейся восемь раз псевдослучайной последовательностью. После ППС передается 301 OFDM-символ. При формировании OFDM-символов используются 1024 поднесущих разнесенных с интервалом Δf в 0,23 МГц. Первый и последний символы называются — вторичная последовательность синхронизации (ВПС) и последовательность синхронизации кода (ПСК) соответственно. Эти OFDM-символы содержат служебную информацию, необходимую для корректного приема.

В интервале между ВПС и ПСК передаются OFDM-символы, содержащие информационную часть кадра. Завершается передача кадра межкадровым защитным интервалом, во время которого ничего не излучается. Первичная последовательность синхронизации, ВПС, ПСК, информационные OFDM-символы и межкадровый защитный интервал имеют одинаковую длительность T_c , определяемую числом поднесущих и расстоянием между ними.

Частотно-временная структура сигналов, описываемых семейством стандартов IEEE 802.16, схожа с описанной выше. За исключением того, что вся служебная информация передается в первом OFDM-символе после ППС. Алгоритм обработки подобных сигналов предполагает обнаружение кадра за счет корреляционного приема ППС, прием и демодуляцию специальных OFDM-символов, содержащих служебную информацию. В специальных символах на поднесущих всегда используется BPSK модуляция и постоянная схема кодирования. Служебная информация содержит сведения об используемых видах модуляции на поднесущих в остальных OFDM-символах и схеме помехоустойчивого кодирования. После успешного приема специальных символов с использованием полученной служебной ин-

формации осуществляется прием и демодуляция остальных OFDM-символов, а также декодирование информационной части кадра.

Исходя из этого можно утверждать, что для корректного приема кадра необходимо, чтобы все три операции были выполнены успешно. Тогда, пренебрегая крайевыми эффектами и вероятностью ошибки во время приема какой-либо части кадра в отсутствие непреднамеренной помехи, вероятность кадровой ошибки P_{fer} можно записать:

$$P_{fer} = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P_i), \quad (1)$$

где P_1 — вероятность ошибки во время ППС;

P_2 — вероятность ошибки во время приема ВПС или ПСК;

P_3 — вероятность ошибки во время приема информационной части кадра.

Вероятности ошибки во время приема той или иной части кадра могут быть записаны:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{ferппс} P_{ппс}; P_2 = P_{fersи} P_{си}; \\ P_3 &= P_{ferич} P_{ич}, \end{aligned} \quad (2)$$

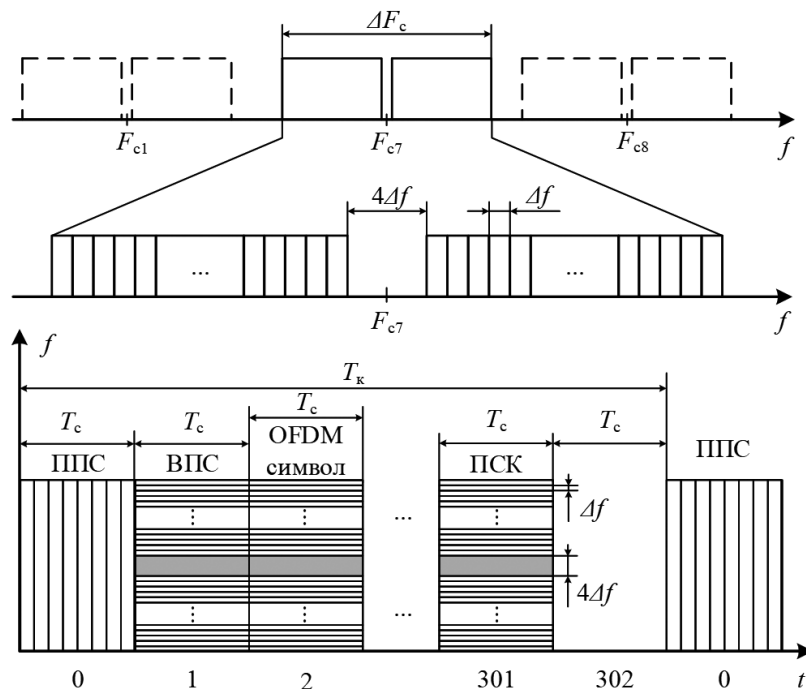


Рис. 1. Частотно-временная структура сигнала многоспутниковой низкоорбитальной системы связи Starlink

где $P_{\text{фермс}}$ — вероятность ошибки во время ППС, при условии воздействия помехи во время приема ППС;

$P_{\text{ппс}}$ — вероятность воздействия помехи во время приема ППС;

$P_{\text{ферси}}$ — вероятность ошибки во время приема ВПС или ПСК, при условии воздействия помехи во время приема ВПС или ПСК;

$P_{\text{си}}$ — вероятность воздействия помехи во время приема служебной информации, то есть во время приема ВПС или ПСК;

$P_{\text{ферич}}$ — вероятность ошибки во время приема информационной части кадра, при условии воздействия помехи во время приема информационной части кадра;

$P_{\text{ич}}$ — вероятность воздействия помехи во время приема информационной части кадра.

Вероятности воздействия импульса помехи во время приема различных частей кадра:

$$P_{\text{ферич}} = \sum_{i=0}^{\min(U_{\text{и}}, N_{\text{и}} - N_{\text{и}})} \left(C_{N_{\text{и}} - N_{\text{и}}}^i P_{\text{берн}}^i (1 - P_{\text{берн}})^{N_{\text{и}} - N_{\text{и}} - i} \sum_{j=0}^{\min(U_{\text{и}} - i, N_{\text{и}})} \left(C_{N_{\text{и}}}^j P_{\text{берн}}^j (1 - P_{\text{берн}})^{N_{\text{и}} - j} \right) \right), \quad (5)$$

где $N_{\text{и}}$ — число двоичных символов, во время приема которых не было воздействия непреднамеренной помехи;

$N_{\text{и}}^i$ — число информационных двоичных символов, во время приема которых воздействовала непреднамеренная помеха;

$U_{\text{и}}$ — исправляющая способность помехоустойчивого кода;

$$P_{\text{ферич}} = \sum_{i=0}^{\min(U_{\text{и}}, N_{\text{и}} - N_{\text{и}})} \left(C_{N_{\text{и}} - N_{\text{и}}}^i P_{\text{берн}}^i (1 - P_{\text{берн}})^{N_{\text{и}} - N_{\text{и}} - i} \sum_{j=0}^{\min(U_{\text{и}} - i, N_{\text{и}})} \left(C_{N_{\text{и}}}^j P_{\text{берн}}^j (1 - P_{\text{берн}})^{N_{\text{и}} - j} \right) \right), \quad (6)$$

где $N_{\text{з}}$ — число служебных двоичных символов, во время которых не было воздействия помехи;

$N_{\text{з}}^i$ — число служебных двоичных символов, во время приема которых воздействовала непреднамеренная помеха;

$U_{\text{з}}$ — исправляющая способность помехоустойчивого кода.

Вероятность ошибочного приема двоичного символа при воздействии шума можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{берн}} = \Phi \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right), \quad (7)$$

$$P_{\text{ппс}} = P_{\text{к}} \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{к}}}; P_{\text{си}} = P_{\text{к}} \frac{2T_{\text{с}}}{T_{\text{к}}}; P_{\text{ич}} = P_{\text{к}} \frac{N_{\text{исим}} T_{\text{с}}}{T_{\text{к}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{исим}}$ — количество информационных OFDM-символов;

$P_{\text{к}}$ — вероятность воздействия помехи во время приема кадра.

При условии, что период импульсных непреднамеренных помех $T_{\text{п}}$ больше длительности кадра, вероятность $P_{\text{к}}$:

$$P_{\text{к}} = \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{п}}}. \quad (4)$$

Вероятность ошибочного приема информационной части кадра при условии воздействия помехи во время приема информационных OFDM-символов [12]:

$P_{\text{берн}}$ — вероятность битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне шума;

$P_{\text{берн}}$ — вероятность битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи.

Так как служебная информация передается так же как и информационная часть кадра, то вероятность ошибки во время приема служебной информации при условии воздействия помехи:

где E_b — энергия двоичного символа.

Вероятность ошибочного приема двоичного символа при воздействии шума и непреднамеренной помехи вычислялась с помощью имитационного моделирования. Структура имитационной модели представлена на рис. 2. Программная реализация такой модели разработана в среде MATLAB. Из случайной последовательности двоичных символов имитационная модель формирует кадры, структура которых описана выше. Сигнал, формируемый моделью передатчика $s(t)$, представляет собой последовательность таких кадров. Затем к сигналу $s(t)$ адди-

тивно добавляется шум $n(t)$ и импульсы непреднамеренной помехи $i(t)$. Формирование импульсов непреднамеренной помехи производится с различными длительностями импульсов помехи и различной скоростью изменения частоты. Длительность импульсов непреднамеренной помехи задается значением скважности помехи Q . Период следования помеховых импульсов совпадает с длительностью кадра. Скорость перестройки частоты задается периодом пилообразного модулирующего напряжения $\tau_{лчм}$. Полученная аддитивная смесь поступает на вход модели приемника. После обработки аддитивной смеси сигнала, шума и непреднамеренной помехи, полученная последовательность принятых двоичных символов поступает в блок вычисления вероятности ошибки на бит, где происходит сравнение принятой последовательности и последовательности, использованной для формирования сигнала. При формировании помехи, действующей во время приема ППС, происходит набор статистики для вычисления вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема ППС. На выходе модели формируется зависимость вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи и шума, и зависимость вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема ППС от отношения средней мощности сигнала P_c к средней мощности помехи P_n , и длительности импульса помехи Q и скорости изменения частоты $\tau_{лчм}$.

При моделировании использовались следующие исходные данные:

– число поднесущих — 1024;

– интервал дискретизации — $17 \cdot 10^{-9}$;
 – несущая частота — 250 МГц;
 – отношение сигнал / шум — 20 дБ;
 – число передаваемых двоичных символов — 3051520 (соответствует 10 кадрам в канале передачи данных низкоорбитальной много-спутниковой системе связи Starlink);
 – вид модуляции поднесущих — BPSK, в OFDM-символе циклический префикс составляет 32 отсчета.

Первичная последовательность синхронизации представляет собой 8 раз повторяемую M -последовательность. В модели используется M -последовательность длиной 127 отсчетов с порождающим полиномом 8 степени {100011101}, дополненная нулем. Длительность импульсов непреднамеренной помехи выбиралась равной трети или четверти длительности кадра, то есть $Q = 3$ и $Q = 4$.

Полученная в результате имитационного моделирования зависимость вероятности ошибочного приема ППС от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи представлена на рис. 3.

Полученная в результате имитационного моделирования зависимость вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи и шума от отношения средней мощности сигнала к средней мощности помехи и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи $P_{beri}(P_c/P_n, \tau_{лчм})$ для различных значений длительности помехи представлена на рис. 4.

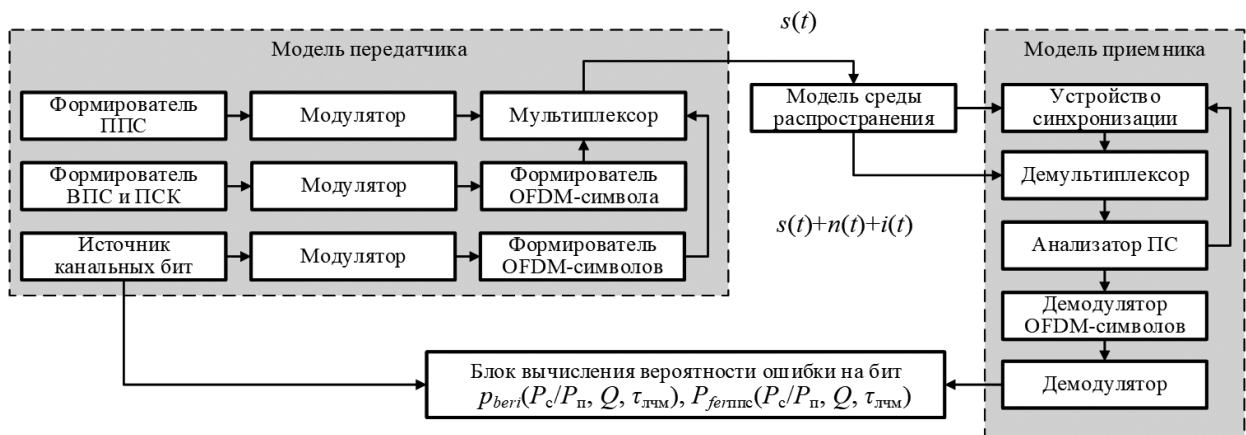


Рис. 2. Структура имитационной модели

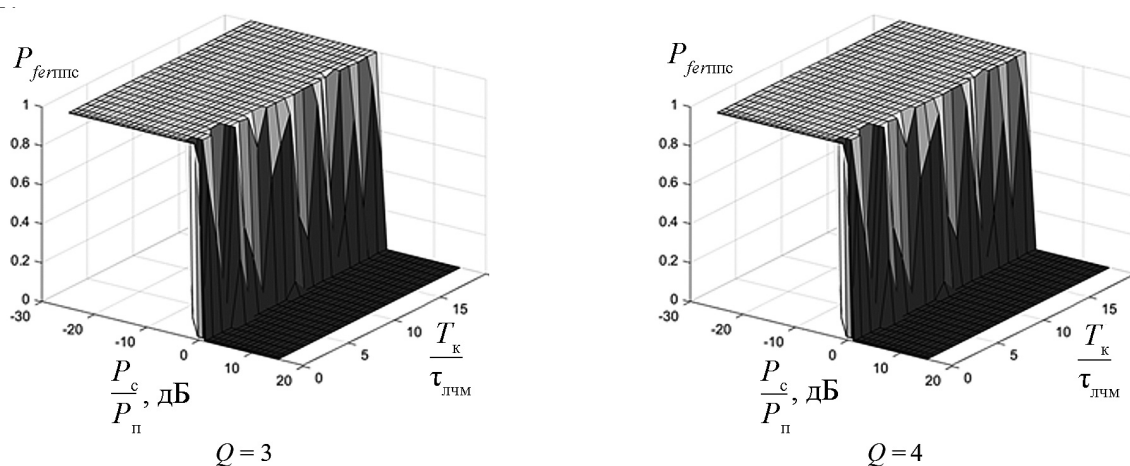


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибочного приема ППС от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи

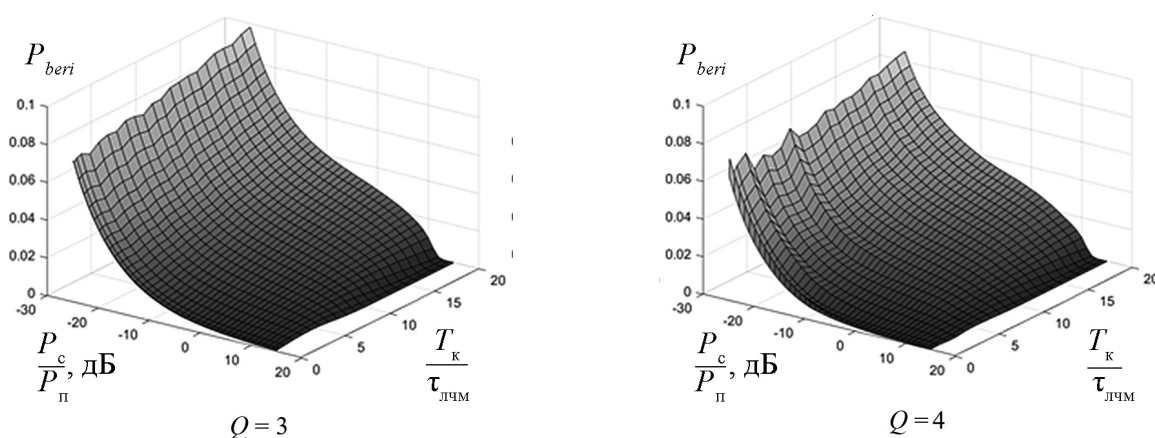


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи и шума от отношения средней мощности сигнала к средней мощности помехи и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи для различных значений длительности помехи

Из полученной в результате имитационного моделирования зависимости вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи и шума, используя формулы (5)–(7), были получены зависимости вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема ВПС или ПСК и вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема информационных OFDM-символов. Зависимости представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

Используя формулы (1)–(4) и полученные зависимости, были рассчитаны зависимости вероятности кадровой ошибки от отношения средней

мощности сигнала к средней мощности помехи и отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи для различных значений длительности помехи. Полученные зависимости представлены на рис. 7.

По результатам проведенного имитационного моделирования и аналитических расчетов можно сделать следующие выводы:

– скорость изменения частоты импульса ЛЧМ практически не влияет на вероятность ошибки во время приема ППС, так как прием ППС осуществляется корреляционным приемником и на вероятность главное влияние оказывает энергетика помехи;

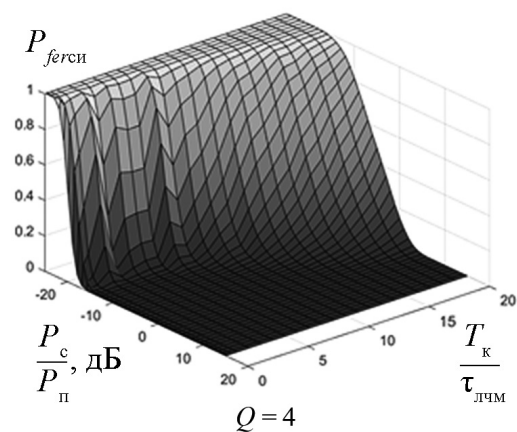
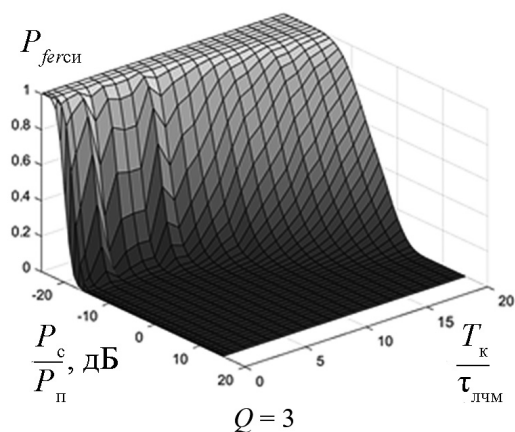


Рис. 5. Зависимости вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема служебной информации от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи для различных значений длительности помехи

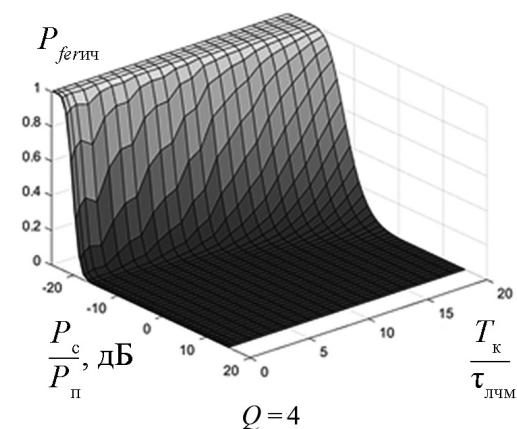
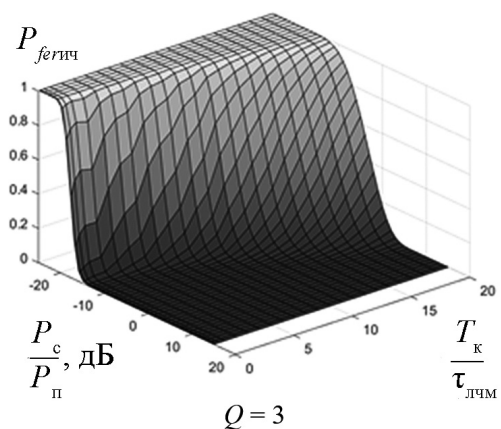


Рис. 6. Зависимости вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема информационных OFDM символов от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи для различных значений длительности помехи

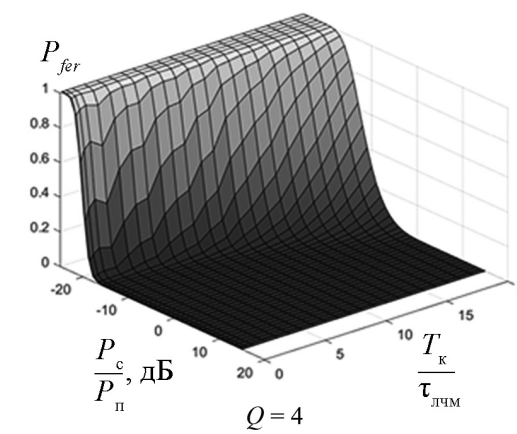
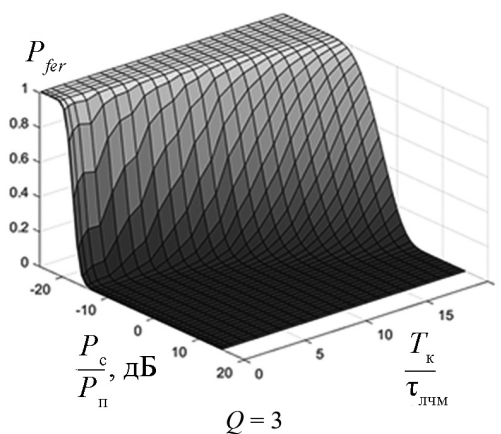


Рис. 7. Зависимости вероятности кадровой ошибки от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи при различных значениях длительности помехи

– на вероятность битовой ошибки при приеме OFDM-символов оказывает влияние не только длительность импульсов непреднамеренной помехи, то есть концентрация энергии помехи во временной области, но и скорость перестройки частоты ЛЧМ сигнала;

– влияние скорости перестройки частоты ЛЧМ сигнала в импульсе непреднамеренной помехи на вероятность искажения передаваемых OFDM-символов приводит к зависимости вероятности кадровой ошибки при условии воздействия непреднамеренной помехи во время приема как служебной информации так и информационной части кадра;

– для непреднамеренных импульсных помех, длительность которых составляет от четверти до трети принимаемого кадра, помехоустойчивость приемника в основном определяется помехоустойчивостью информационной части кадра, помехоустойчивость приема информационных OFDM-символов в свою очередь существенно зависит от скорости изменения частоты ЛЧМ импульса непреднамеренной помехи.

Таким образом, полученные зависимости показывают, что на помехоустойчивость приемника OFDM-сигнала оказывает влияние не только отношение средних мощностей сигнала и помехи, длительность импульса непреднамеренной помехи, но и скорость изменения частоты внутри ЛЧМ импульса непреднамеренной помехи. Из результатов моделирования и аналитических расчетов следует, что при низких отношениях сигнал / помеха, качество приема сигнала с OFDM-модуляцией может ухудшиться до неприемлемого при возрастании скорости изменения частоты ЛЧМ помеховых импульсов.

Список источников

1. Кондрашов Ю.В., Бирюков М.А., Сазонов В.В., Ротенбергер А.А. Влияние корреляционных функций широкополосных сигналов на помехоустойчивость их приема в многолучевых каналах связи // *Электросвязь*. 2022. № 3. С. 10–15.
2. 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.
3. R. Martinek et al. Modelling of wireless fading channels with RF impairments using virtual instruments, 2016 IEEE 17th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Clearwater, FL, USA, 2016. Pp. 1–6.
4. Паршуткин А.В., Галандзовский А.В., Левин Д.В. и др. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем и комплексов: учеб. пособие. СПб.: Типография ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 148 с.
5. Волчков В.П., Ермолаев Д.А., Кирсанов В.А. Исследование помехоустойчивости OFDM-системы при нарушении синхронизации в разных моделях многолучевого канала // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2018. Т. 18. № 4. С. 1018–1024.
6. J. Jose and A.K. Kuriakose. Pilot Assisted Channel Assessment for MIMO-OFDM over Dispersive Fading Channels, 2020 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR), Malappuram, India, 2020. Pp. 1–5.
7. Вознюк В.В., Копалов Ю.Н. Исследование помехоустойчивости приема OFDM-сигналов в условиях непреднамеренных узкополосных шумовых помех // *Труды Московского авиационного института*. 2023. № 130. 23 с.
8. Карасева Т.С. Проблемы помехоустойчивости в OFDM-системах // *Перспективы развития информационных технологий*. 2015. № 24. С. 85–89.
9. Ложкин К.Ю., Миронов В.А., Прохеторко С.С. Помехоустойчивость приема OFDM-сигнала с фазовой манипуляцией поднесущих на фоне импульсной полигармонической помехи // *Радиотехника*. 2018. № 11. С. 58–63.
10. Y. Sun, J. Kang, W. Sui, S. Zhang et al. Semi-Blind Multi-cell Interference Detection and Cancellation in 5G Uplink OFDM-Systems, 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), Dubrovnik, Croatia, 2022. Pp. 167–171.
11. Зайцев С.А., Копалов Ю.Н. Исследование помехоустойчивости канала спутниковой связи с OFDM в условиях непреднамеренных импульсных помех с линейной частотной модуляцией // *Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму*. 2023. № 11–12 (185–186). С. 40–45.

12. Паршуткин А.В., Бучинский Д.И., Копалов Ю.Н. Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях эпизодической синхронизации с потоками импульсных помех // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23, № 1. С. 194–225.

References

1. Kondrashov Yu.V., Biryukov M.A., Sazonov V.V., Rotenberger A.A. The influence of correlation functions of broadband signals on the noise immunity of their reception in multipath communication channels // Telecommunications. 2022. No 3. Pp. 10–15.

2. 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.

3. Martinek R. et al. Modelling of wireless fading channels with RF impairments using virtual instruments, 2016 IEEE 17th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Clearwater, FL, USA, 2016. Pp. 1–6.

4. Parshutkin A.V., Galandzovsky A.V., Levin D.V. et al. Electromagnetic compatibility of radio-electronic systems and complexes textbook. SPb: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2016. 148 p.

5. Volchikov V.P., Ermolaev D.A., Kirsanov V.A. Investigation of the noise immunity of an OFDM-system in case of synchronization failure in different models of a multipath channel // Fundamental problems of radioelectronic instrumentation. 2018. Vol. 18. No 4. Pp. 1018–1024.

6. Jose J. and Kuriakose A.K. Pilot Assisted Channel Assessment for MIMO-OFDM over Dis-

persive Fading Channels, 2020 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR), Malappuram, India, 2020. Pp. 1–5.

7. Voznyuk V.V., Kopalov Yu.N. Investigation of the noise immunity of receiving OFDM-signals in conditions of unintended narrowband noise interference // Proceedings of MAI. 2023. No 130. 28 p.

8. Karaseva T.S. Problems of noise immunity in OFDM-systems // Prospects for the development of information technology. 2015. No 24. Pp. 85–89.

9. Lozhkin K.Yu., Mironov V.A., Prozheterko S.S. Noise immunity of receiving OFDM-signal with phase manipulation of subcarriers against the background of pulsed polyharmonic interference // Radio Engineering. 2018. No 11. Pp. 58–63.

10. Sun Y., Kang J., Sui W., Zhang S. et al. Semi-Blind Multi-cell Interference Detection and Cancellation in 5G Uplink OFDM-Systems, 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), Dubrovnik, Croatia, 2022. Pp. 167–171.

11. Zaitsev S.A., Kopalov Yu.N. Investigation of the noise immunity of a satellite communication channel with OFDM in the conditions of unintended pulse interference with linear frequency modulation // Questions of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 11–12 (185–186). Pp. 40–45.

12. Parshutkin A.V., Buchinsky D.I., Kopalov Yu.N. The model of functioning of a satellite communication channel in conditions of episodic synchronization with streams of pulse interference // Informatics and Automation. 2024. Vol. 23, No 1. Pp. 194–225.