

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.14>

УДК: 621.396.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ СТАНДАРТА IEEE 802.15.4 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

Ю.Э. Корчагин, К.Д. Титов, Ю.Г. Петров, П.А. Кондратович

Воронежский государственный университет
394018, г. Воронеж, ул. Университетская площадь, д. 1

Статья поступила в редакцию 24 июня 2024 г.

Аннотация. Разработана имитационная модель канала радиосвязи стандартов IEEE 802.15.4-2020 и IEEE 802.15.4z-2020 в среде MATLAB для оценки вероятности битовой ошибки при воздействии помех с различными шириной полосы и положением центральной частоты помехового сигнала относительно центральной частоты полезного сигнала. Исследована помехоустойчивость средств связи, работающих в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4-2020 и IEEE 802.15.4z-2020, при воздействии широкополосных помех с различной долей перекрытия полезного сигнала. Проведено сравнение помехоустойчивости различных режимов работы средств связи. Полученные результаты оценки помехоустойчивости могут быть использованы при разработке перспективных систем сверхширокополосной связи и повышения эффективности существующих систем.

Ключевые слова: беспроводные сети, WPAN, сверхширокополосный сигнал, UWB, IEEE 802.15.4, помехоустойчивость.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00452, <https://rscf.ru/project/23-21-00452/>.

Автор для переписки: Титов Константин Дмитриевич, titovkd@gmail.com

Введение

В настоящее время перспективным направлением развития беспроводных сетей является использование широкополосных и сверхширокополосных (СШП) сигналов, обеспечивающих большую скорость передачи данных, скрытность и электромагнитную совместимость с узкополосными системами [1]. В практических приложениях активно внедряются системы связи, работающие в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4-2020 [2] и его дополнением IEEE 802.15.4z-2020 [3]. В связи с этим возникает необходимость повышения эффективности функционирования и помехоустойчивости подобных систем.

Одним из наиболее распространённых стандартов беспроводной связи, использующим СШП сигналы, является IEEE 802.15.4-2020 [2], в котором реализована технология сверхширокой полосы пропускания – ultra-wideband (UWB). Особенностью этой технологии является использование импульсных сигналов для достижения полосы частот более 500 МГц при низком уровне спектральной плотности мощности – не более $-41,3$ дБм/МГц, что соответствует ограничениям FCC и ETSI [4-6].

В настоящее время широкое распространение получили устройства широкополосного беспроводного доступа, функционирующие в локальных сетях Wi-Fi. Частотный диапазон 2,4 ГГц в настоящее время сильно перегружен большим числом беспроводных систем, поэтому активно осваиваются диапазоны 5 ГГц (5150-5850 МГц) и 6 ГГц (5955-7115 МГц), при этом ширина полосы сигналов составляет от 20 до 160 и 320 МГц соответственно. При этом допустимый уровень сигналов в сетях Wi-Fi для использования внутри помещений в Российской Федерации составляет до 200 мВт со спектральной плотностью мощности до 10 дБм/МГц [7], что в 105 раз превышает максимально возможный уровень СШП сигналов. В указанных диапазонах также функционируют СШП устройства на 5, 7, 11 частотных каналах [8].

Широкополосные сигналы Wi-Fi 7-го поколения в диапазоне 6 ГГц будут являться помехами для СШП устройств, при этом их ширина полосы одного канала будет адаптивно изменяться в зависимости от требуемой

пропускной способности, что составит от 4 до 64% от ширины полосы СШП сигнала (500 МГц). При одновременном функционировании нескольких частотных каналов от одного или нескольких устройств полоса помехи может достигать 100% относительно полосы сигнала. В зависимости от того, какой частотный канал Wi-Fi функционирует в диапазоне работы систем с СШП сигналами, помеха будет иметь некоторое смещение относительно центральной частоты полезного СШП сигнала. Таким образом, активное развитие и внедрение беспроводных систем широкополосного беспроводного доступа будет оказывать существенное воздействие на СШП системы, оценка которого является целью настоящей работы.

В работе [8] исследованы особенности стандарта IEEE 802.15.4-2020 и выявлены потенциальные уязвимости, которые могут привести к значительному снижению помехоустойчивости при воздействии определённых типов помех. В связи с этим вызывает интерес задача оценки помехоустойчивости средств связи, работающих в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4-2020, при воздействии широкополосных помех, теоретически способных привести к значительному снижению пропускной способности вплоть до полной невозможности приёма сообщений с требуемой достоверностью.

Для исследуемых в данной работе стандартов в среде MATLAB была разработана [9] имитационная модель воздействия согласованных по спектру шумовых помех на СШП канал связи стандартов IEEE 802.15.4-2020 и IEEE 802.15.4z-2020. Имитационная модель была модифицирована для возможности постановки шумовых помех с изменяемой шириной спектра и положением центральной частоты помехи, а также для возможности поиска отношения помеха/сигнал (noise-to-signal ratio – NSR), при котором достигается заданное значение вероятности битовой ошибки (bit error ratio – BER).

1. Описание имитационной модели

В стандарте IEEE 802.15.4-2020 реализовано большое количество вариантов физического уровня, использующих сигналы с различной шириной полосы, от узкополосных до СШП. В рамках данной работы рассматривается СШП физический уровень с высокой частотой повторения импульсов (HRP UWB PHY), в котором используется модуляция BPM-BPSK и свёрточное кодирование в сочетании с кодированием Рида-Соломона [8]. Физически сигнал представляет собой последовательность импульсов, каждый длительностью 2 нс. С учётом дополнения IEEE 802.15.4z-2020 [10] данный физический уровень поддерживает 3 режима работы – базовый режим, режим с повышенной частотой повторения импульсов (HPRF) и режим с базовой частотой повторения импульсов (BPRF). В режиме HPRF за счёт изменённой схемы модуляции повышается средняя частота повторения импульсов с 62,4 МГц до 124,8-249,6 МГц. Режим BPRF предназначен для обеспечения совместимости между устройствами, работающими в соответствии с дополнением к стандарту, и устройствами, работающими в соответствии с базовым стандартом. Характеристики и помехоустойчивость режима BPRF аналогичны базовому режиму [11], поэтому в рамках данной работы режим BPRF не рассматривается.

Имитационная модель включает в себя генератор данных, блок управления конфигурацией системы связи, передатчик, блок генерации помехи, канал связи, приёмник, блок оценки качества приёма и блок построения графических зависимостей. Схема имитационной модели приведена на рисунке 1.

Генератор данных формирует битовую последовательность, имитирующую полезные данные для передачи системой связи. Блок управления конфигурацией системы связи задаёт конфигурацию передатчика и приёмника – определяет скорость передачи данных, длину сообщения, схему модуляции и кодирования, частотный канал, частоту дискретизации. Передатчик и приёмник могут работать в базовом режиме (соответствующем стандарту IEEE 802.15.4-2020) и режиме HPRF (соответствующем стандарту IEEE 802.15.4z-2020), структура

и принцип работы которых подробно описаны в [8]. Передатчик в соответствии с заданной конфигурацией формирует последовательность пакетов данных, которые поступают в блок имитации канала связи. Блок генерации помехи состоит из генератора гауссовского (широкополосного) белого шума с заданной спектральной плотностью и полосового фильтра, который обеспечивает формирование помехи с различной шириной полосы и центральной частотой (положением спектра помехи относительно полезного сигнала). Полезный сигнал с выхода передатчика суммируется с помехой, после чего сформированная аддитивная смесь поступает на вход приёмника. Так как в стандарте применяются коды с прямой коррекцией ошибок, часть искажённой вследствие воздействия помех информации восстанавливается при декодировании.

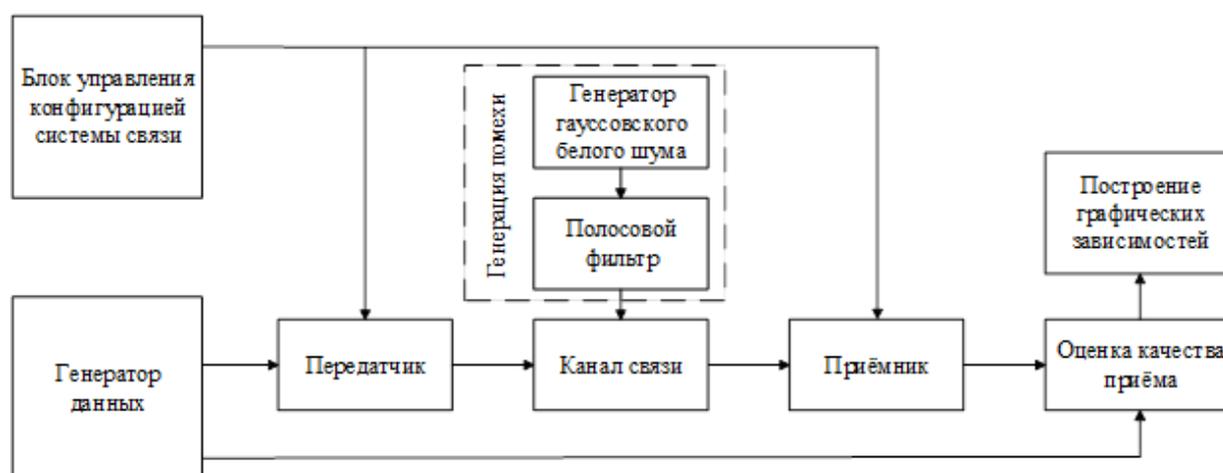


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели.

В блоке оценки качества приёма восстановленные данные сравниваются с изначальными путём подсчёта количества искажённых бит и расчёта значений BER. Для получения полного представления о работе системы при моделировании BER рассчитывается для различных значений мощности и положения спектра помехи. Выходными данными блока являются зависимости BER от отношения спектральных плотностей мощности помехи и сигнала (NSR) для набора помех с различной шириной или положением спектра относительно спектра сигнала.

Для анализа помехоустойчивости СШП средств связи были использованы помехи двух видов:

- помеха с различной шириной спектра Δf_n , совпадающая с центральной частотой сигнала f_0 с шириной спектра Δf_c (рис. 2а);
- помеха с фиксированной шириной спектра Δf_n , с изменяющимся сдвигом центральной частоты помехи $f_\Delta = |f_{1,2} - f_0|$ относительно центральной частоты полезного сигнала f_0 (рис. 2б).

В случае, когда сигнал и помеха согласованы по центральной частоте f_0 , ширина полосы помехи определяется величиной Δf_{n1} . Из-за особенностей построения фильтров в среде MATLAB, второй вид помехи построен симметрично относительно центральной частоты спектра сигнала, т.е. когда помеха имеет некоторое смещение f_Δ центральной частоты относительно полезного сигнала $f_{1,2} \neq f_0$, ширина полосы помехи определяется выражением $\Delta f_{n2} = \Delta f_{n2-} + \Delta f_{n2+}$. При анализе в дальнейшем будем оперировать относительной величиной смещения центральной частоты помехи $f_{1,2}$ относительно сигнала f_0 , которая будет определяться как $\tilde{f} = \frac{2(f_1 - f_0)}{\Delta f_c} = \frac{2(f_0 - f_2)}{\Delta f_c}$. Схематический вид спектров полезного сигнала и помех приведён на рисунке 2.

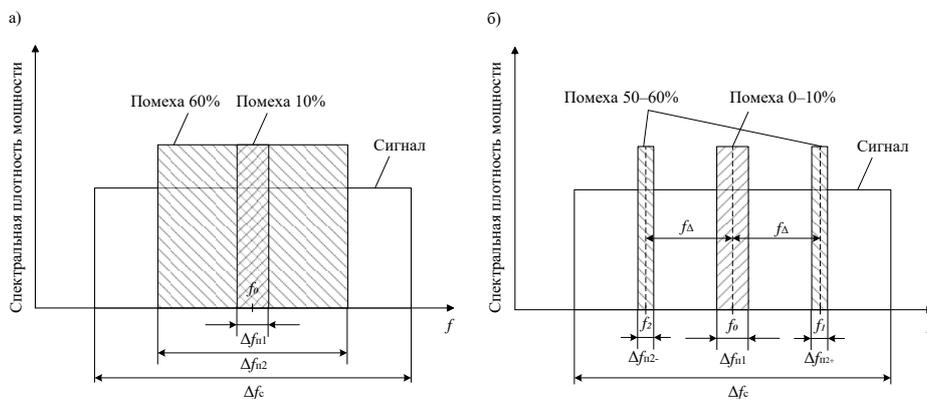


Рис. 2. Вид спектров помехи и сигнала: а) для согласованных по центральной частоте помех; б) для помех, имеющих смещение центральной частоты относительно центральной частоты полезного сигнала.

Оценка помехоустойчивости СШП средств связи, функционирующих в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4-2020 и IEEE 802.15.4z-2020, производилась исходя из измерения BER при заданном наборе значений доли перекрытия сигнала помехой ($\Delta = \Delta f_n / \Delta f_c$) и NSR, которое определялось как отношение спектральных плотностей мощности помехи и сигнала. Уровень мощности помехи при изменении ширины спектра устанавливался таким образом, чтобы спектральная плотность мощности оставалась постоянной.

2. Оценка помехоустойчивости СШП средств связи при воздействии согласованных по центральной частоте помех с различной шириной полосы

Для оценки помехоустойчивости СШП средств связи, функционирующих в базовом режиме стандарта IEEE 802.15.4-2020, моделировался процесс передачи пакетов данных со средней частотой повторения импульсов 62,4 МГц и максимальной скоростью передачи 27,24 Мбит/с, что соответствует скорости передачи режима HPRF. Для режима HPRF передавались пакеты данных со средней частотой повторения импульсов 249,6 МГц и максимальной скоростью передачи данных 27,24 Мбит/с. Объем полезных данных в пакете был выбран равным 1 кбит для обоих режимов.

Для каждой комбинации значений спектральной плотности мощности и доли перекрытия помехи вычисления производились для 2000 пакетов данных. Для расчёта значений BER менее 10^{-3} количество пакетов повышалось до 10000.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты моделирования для базового режима и режима HPRF соответственно. Зависимости BER построены для различных значений доли перекрытия сигнала помехой и для различных значений NSR. Центральная частота помехи совпадает с центральной частотой сигнала, т.е. $\tilde{f} = 0$ (рис. 2а).

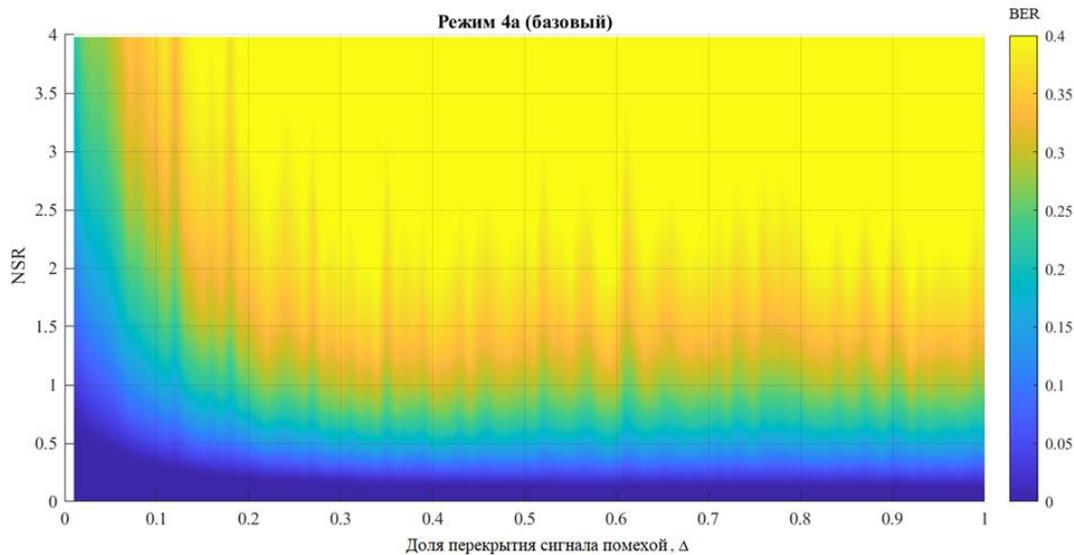


Рис. 3. Зависимость BER от доли перекрытия сигнала помехой и NSR для базового режима.

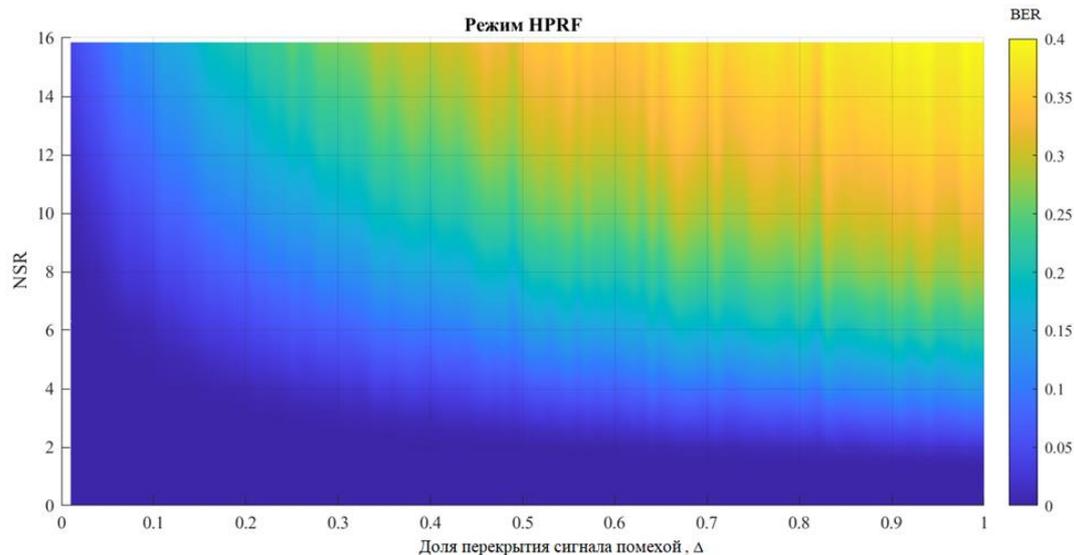


Рис. 4. Зависимость BER от доли перекрытия сигнала помехой и NSR для режима HPRF.

Полученные результаты показывают, что режим HPRF имеет лучшую помехоустойчивость по сравнению с базовым режимом работы, что согласуется с результатами [9]. Это связано с тем, что в режиме HPRF используются более высокая частота повторения импульсов (выше в четыре раза), а также применяются более помехоустойчивые схемы модуляции и кодирования. Для обоих режимов значение NSR, требуемое для достижения заданного BER, изменяется по закону $1/\sqrt{\Delta}$. Также для базового режима увеличение BER наблюдается с ростом доли перекрытия сигнала помехой от 0 до 0,4, и при доле

перекрытия от 0,4 до 1 BER не изменяется и равна BER при полном перекрытии сигнала помехой. Для режима HPRF при увеличении доли перекрытия сигнала помехой рост BER наблюдается вплоть до полного перекрытия сигнала помехой. Узкополосные выбросы с низким BER имеют случайный характер и обусловлены особенностями имитационного моделирования.

3. Оценка помехоустойчивости СШП средств связи при воздействии помех с фиксированной шириной полосы и различным положением спектра помехи относительно спектра сигнала

Так как используемые сигналы являются СШП, при воздействии помехи с меньшей шириной спектра на определённые участки спектра сигнала, отличные от центра, будет наблюдаться неравномерное изменение BER. В связи с этим в работе было выполнено моделирование воздействия помехи с суммарной долей перекрытия сигнала помехой $\Delta = 0,025 \times 2; 0,05 \times 2$ и $0,1 \times 2$. Для помех с долей перекрытия сигнала больше 0,2 зависимость носит такой же характер и не приводит к увеличению BER. Полученные результаты представлены на рисунке 5а и 5б для доли перекрытия 0,2; на рисунках 5в и 5г для доли перекрытия 0,1; на рисунках 5д и 5е для доли перекрытия 0,05 для базового режима и режима HPRF соответственно.

Полученные результаты показывают, что режим HPRF обладает высокой помехоустойчивостью к помехам, не согласованным по центральной частоте с сигналом. При любом изменении положения центральной частоты помехи относительно центральной частоты полезного сигнала наблюдается значительное уменьшение BER. Для базового режима при значительном удалении помехи от центральной частоты сигнала также наблюдается снижение BER, однако данная зависимость имеет менее выраженный характер – при изменении положения помехи до 0,35 наблюдается незначительное уменьшение BER. Также при положении помехи 0,65-0,75 наблюдается резкое увеличение BER. Данные закономерности наблюдаются при любых значениях BER.

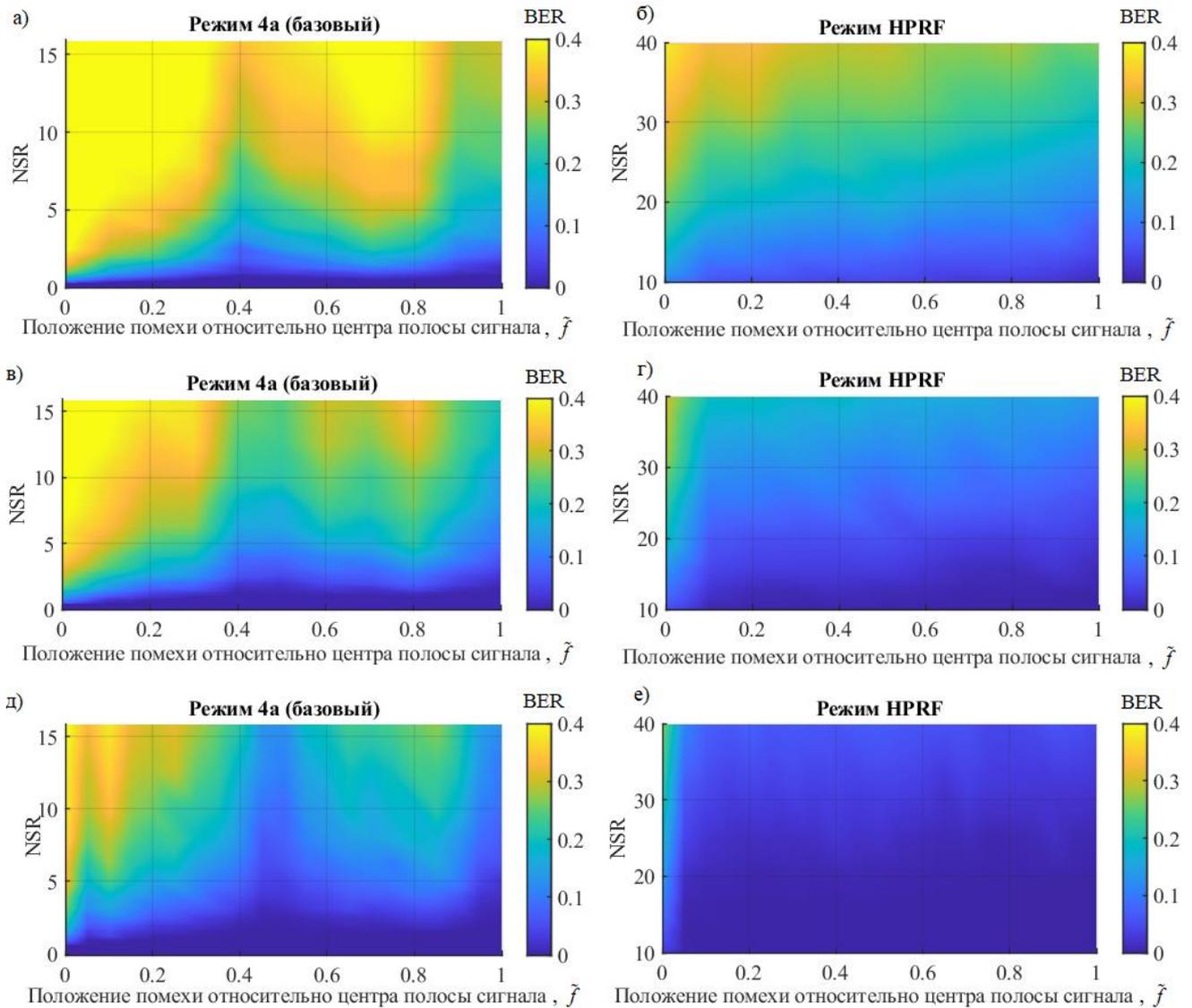


Рис. 5. Зависимость BER от положения \tilde{f} и NSR:

- а) для базового режима при $\Delta = 0,2$; б) для режима HPRF при $\Delta = 0,2$;
- в) для базового режима при $\Delta = 0,1$; г) для режима HPRF при $\Delta = 0,1$;
- д) для базового режима при $\Delta = 0,05$; е) для режима HPRF при $\Delta = 0,05$.

Заключение

Разработана имитационная модель средств связи, работающих в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4-2020 и IEEE 802.15.4z-2020, позволяющая выполнить оценку вероятности битовой ошибки при воздействии помех с различными шириной полосы и смещением центральной частоты помехового сигнала относительно полезного. Проведено сравнение характеристик помехоустойчивости различных режимов работы средств связи.

Показано, что для базового режима работы при фиксированном BER значение NSR значительно уменьшается при увеличении доли перекрытия сигнала (в 3 раза на интервале $\Delta = 0,01 \dots 0,1$ и в 2 раза на интервале $\Delta = 0,1 \dots 0,4$). При увеличении доли перекрытия от 0,4 до 1 влияние помехи практически не изменяется. В случае смещения помехи относительно центральной частоты сигнала при фиксированном BER значение NSR увеличивается в 3 раза при значении $\tilde{f} \leq 0,4$. На интервале $\tilde{f} = 0,4 \dots 1$ значение NSR изменяется случайным образом в пределах от 0,7 до 1,2 раз.

Для режима HPRF при фиксированном BER значение NSR также значительно уменьшается при увеличении доли перекрытия сигнала (в 2 раза на интервале $\Delta = 0,01 \dots 0,1$ и в 3 раза на интервале $\Delta = 0,1 \dots 1$). В отличие от базового режима, изменение NSR происходит на всём интервале значений доли перекрытия сигнала помехой. В случае смещения помехи относительно центральной частоты сигнала при фиксированном BER значение NSR увеличивается в 2 раза при значении $\tilde{f} \leq 0,25$. На интервале $\tilde{f} = 0,25 \dots 1$ значение NSR изменяется случайным образом в пределах от 7,5 до 11,5 раз.

Итак, установлено, что режим HPRF имеет приблизительно в 10 раз лучшую помехоустойчивость при воздействии узкополосных и широкополосных помех, чем базовый режим стандарта. Также в режиме HPRF при повышении доли перекрытия сигнала помехой увеличение BER происходит более плавно. При сдвиге помехи относительно центральной частоты сигнала в режиме HPRF наблюдается более резкое снижение BER, чем в базовом режиме.

Соответственно, узкополосные помехи, даже значительно превышающие по мощности сигнал стандарта IEEE 802.15.4, не способны привести к нарушению работы системы связи. При этом широкополосные помехи, например сигнал Wi-Fi с шириной полосы 160 МГц, способны нарушить работу системы связи при уровнях мощности одного порядка с СШП сигналом стандарта IEEE 802.15.4.

Полученные в данной работе результаты могут быть использованы для подбора параметров модели при изучении влияния данных помех,

разработке перспективных систем СШП связи и повышении эффективности существующих систем.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00452, <https://rscf.ru/project/23-21-00452/>.

Литература

1. Барабашов Б.Г., Анишин М.М. Широкополосные системы связи и сигналы. – 2008.
2. Layers S. U. N. S. U. N. P. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks.
3. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks – Amendment 1: Enhanced Ultra-Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. – 2020.
4. DecaWave APR001 UWB Regulations, A Summary of Worldwide Telecommunications Regulations governing the use of Ultra-Wideband radio, Application Note v 1.2. – 2015.
5. FCC APR001 UWB Regulations governing the use of Ultra-Wideband radio [web]. Searchable FCC ID Database: the information resource. Date of access: 23.06.2024. URL: <https://www.fccid.io/blog/2018/05/06/ultra-wide-band-fcc-wireless-device-approval>
6. ETSI Regulations governing the use of Ultra-Wideband radio, Application Note v 1.1.1 [web]. ETSI the Standards people. Date of access: 23.06.2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/10288702/01.01.01_60/ts_10288702v010101p.pdf
7. Решение ГКРЧ от 29 февраля 2016 года №16-36-03 «О внесении изменений в решение ГКРЧ от 7 мая 2007 г. №07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия», Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ), Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Дата обращения: 23.06.2024. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/4910/>

8. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Петров Ю.Г. Исследование особенностей беспроводных персональных сетей передачи данных стандарта IEEE 802.15. 4-2020 //Теория и техника радиосвязи. – 2022. – №. 3. – С. 30-44.
9. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Петров Ю.Г. Моделирование процессов воздействия импульсных помех переменной длительности на систему связи стандарта IEEE 802.15. 4-2020 //ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ. – 2023. – №. 8.
10. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks – Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. – 2020.
11. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Петров Ю.Г. Имитационная модель канала связи стандарта IEEE 802.15. 4z при наличии случайных искажений //Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ-2022»: материалы 18-й Международной научно-технической конференции. – 2022. – С. 62.

Для цитирования:

Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Петров Ю.Г., Кондратович П.А. Исследование помехоустойчивости сверхширокополосных средств связи стандарта IEEE 802.15.4 при воздействии широкополосных помех. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.14>