

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.5>

УДК: 621.396.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА СИСТЕМУ СВЯЗИ СТАНДАРТА IEEE 802.15.4-2020

Ю.Э. Корчагин, К.Д. Титов, Ю.Г. Петров

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

Статья поступила в редакцию 5 июня 2023 г.

**Аннотация.** Исследована помехоустойчивость систем связи, работающих в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4-2020 и IEEE 802.15.4z-2020 при воздействии импульсных помех переменной длительности. Разработана имитационная модель в среде MATLAB для оценки вероятности битовой ошибки для различных параметров помехи. Выполнена оценка помехоустойчивости различных режимов работы стандарта с учётом структуры передаваемых данных. Проведено сравнение характеристик помехоустойчивости различных режимов работы. Разработанная модель может быть модифицирована для исследования воздействия других типов помех. Полученные результаты оценки помехоустойчивости могут быть использованы при разработке перспективных систем сверхширокополосной связи и повышения эффективности существующих систем.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость; сверхширокополосный сигнал; UWB; IEEE 802.15.4; импульсные помехи; служебная информация; вероятность битовой ошибки.

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

**Автор для переписки:** Титов Константин Дмитриевич, [titovkd@gmail.com](mailto:titovkd@gmail.com)

## Введение

В настоящее время перспективным направлением развития беспроводных сетей является использование широкополосных и сверхширокополосных сигналов. Это обусловлено тем, что они обеспечивают высокую помехоустойчивость канала связи, позволяют повысить скрытность и скорость передачи данных, а также допускают одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот [1].

В современных и перспективных стандартах беспроводной передачи данных важную роль в оценке радиоканала и синхронизации приёмо-передающих устройств занимает служебная информация, содержащаяся в заголовке передаваемого пакета. Искажение служебной информации может привести к невозможности декодирования принимаемых данных с требуемой достоверностью. Таким образом, одной из важнейших проблем теории передачи сообщений является влияние различного рода помех на элементы служебной информации.

Одним из перспективных стандартов беспроводной связи, использующий сверхширокополосные 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 [3-5].

В работе [6] исследованы особенности стандарта IEEE 802.15.4-2020 и выявлены уязвимости, которые могут привести к значительному снижению помехоустойчивости при воздействии определённых типов помех. В связи с этим вызывает интерес задача оценки помехоустойчивости систем связи, работающих в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4-2020, при воздействии одного из типов помех, теоретически способных привести к значительному снижению

работоспособности или отказу системы связи – импульсных помех переменной длительности. Оптимальным решением этой задачи является имитационное моделирование. Для построения модели системы связи в данной работе использована среда MATLAB.

## 1. Описание имитационной модели

В стандарте IEEE 802.15.4-2020 реализовано большое количество вариантов физического уровня, использующих узкополосные и широкополосные сигналы. В рамках данной работы рассматривается сверхширокополосный 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 [6]. Физически сигнал представляет собой последовательность импульсов, каждый длительностью 2 нс. С учётом дополнения IEEE 802.15.4z-2020 [7] 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 [8], поэтому в рамках данной работы режим BPRF не рассматривается.

В работе [9] выполнена оценка помехоустойчивости системы связи стандарта IEEE 802.11n-2009 [10] при воздействии помех с учётом структуры пакета передаваемых данных. Полученные результаты показывают уязвимости рассматриваемого стандарта, однако приведённая методика применима лишь к системам связи, работающим с использованием технологии

мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов – orthogonal frequency division multiplexing (OFDM).

Ранее была разработана [11] имитационная модель воздействия помех на беспроводной канал связи стандарта IEEE 802.15.3-2016 [12], реализованная в среде MATLAB Simulink. Данная модель использует помехи, схожие с рассматриваемыми в данной работе, однако не применима к системам связи, работающим в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4-2020.

Для исследуемых в данной работе стандартов была разработана [8] имитационная модель воздействия шумовых помех на сверхширокополосный канал связи стандартов IEEE 802.15.4-2020 и IEEE 802.15.4z-2020, реализованная в среде MATLAB. Имитационная модель применима к рассматриваемым системам связи, однако в работе [8] не было исследовано воздействие различных видов помех на элементы служебной информации, поэтому в данной работе используется существенно модифицированная версия этой модели.

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

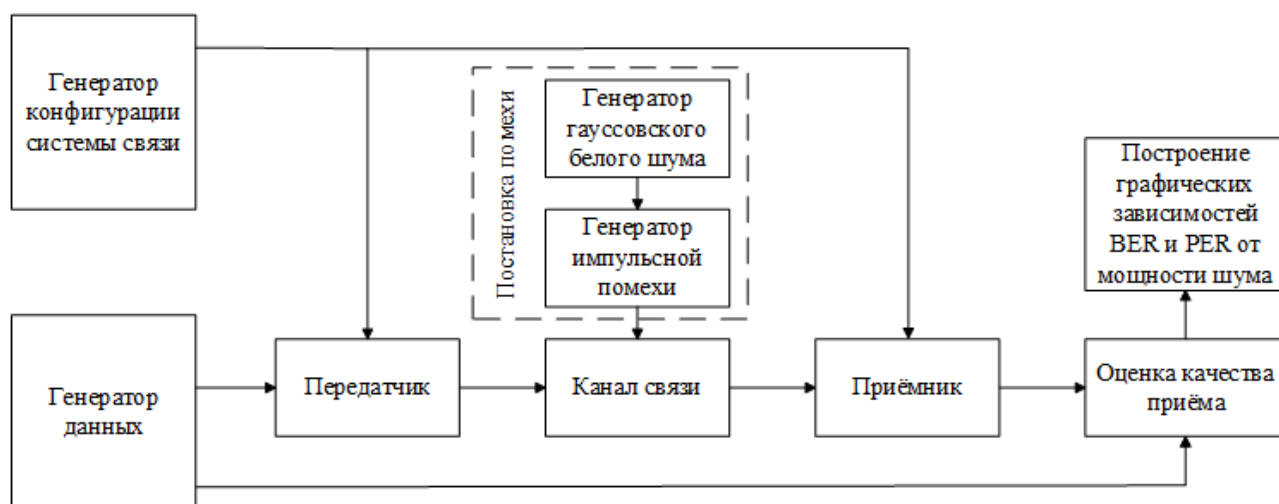


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели стандарта IEEE 802.15.4-2020

Генератор данных формирует битовую последовательность, имитирующую полезные данные для передачи системой связи. Генератор

конфигурации системы связи задаёт работу передатчика и приёмника в одном режиме. Передатчик формирует последовательность пакетов данных в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4-2020 или IEEE 802.15.4z-2020, которые поступают в блок имитации канала связи.

Блок постановки помехи состоит из генератора гауссовского (широкополосного) белого шума с заданной спектральной плотностью и генератора импульсной помехи переменной длительности, который вырезает отрезок реализации шума и может изменять относительную длительность и начальное положение полученного импульса. Сформированная аддитивная смесь сигнала и помехи поступает на вход приёмника. Так как в стандарте применяются коды с прямой коррекцией ошибок, часть искажённой вследствие воздействия помех информации восстанавливается при декодировании.

В блоке оценки качества приёма восстановленные данные сравниваются с изначальными путём подсчёта количества искажённых бит и расчёта значений вероятности битовой ошибки (BER) и вероятности потери пакета (PER) при большом количестве переданных сообщений. При этом потерей пакета считается наличие хотя бы одного неправильно декодированного бита после проведения помехоустойчивого декодирования. Для получения полного представления о работе системы BER и PER рассчитываются для различных значений мощности помехи. Выходными данными блока являются зависимости BER и PER от отношения мощности помехи к мощности сигнала. При этом мощность помехи рассчитывалась на канал с шириной полосы 500 МГц, используемый для передачи исследуемых сигналов.

Данная модель была использована для исследования помехоустойчивости базового режима и режима HPRF. На рисунке 2 представлены структурные схемы кадров для базового режима работы и режима HPRF. Основным различием в структуре кадров является расширенный заголовок синхронизации в режиме HPRF.

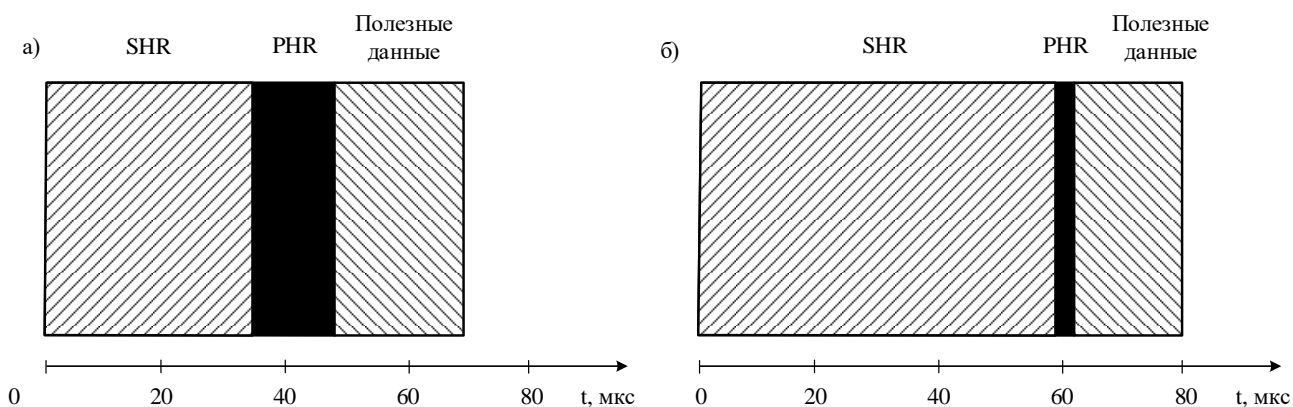


Рис. 2. Структурная схема кадра: а) базового режима; б) режима HPRF. SHR – заголовок синхронизации, PNR – заголовок физического уровня

## 2. Результаты моделирования для базового режима работы

Для оценки помехоустойчивости базового режима работы были использованы пакеты с максимальной скоростью передачи 27,24 Мбит/с, что соответствует скорости передачи режима HPRF. Согласно [8], значительное изменение BER наблюдается при росте отношения помеха/сигнал (ОПС)  $\gamma$  до 12 раз. Эта граница была выбрана для построения зависимостей. Объем полезных данных в пакете был установлен равным максимально возможному значению – 1 кбит. При таком объеме служебная информация занимает около 70% длительности пакета. Результаты моделирования представлены на рисунке 3, где показаны зависимости BER и PER от ОПС для различных значений относительной длительности помехового импульса. Моделирование производилось с синхронизацией моментов появления сигнала и помехи (прямой порядок) и с синхронизацией моментов окончания сигнала и помехи (обратный порядок), в интересах сравнения помехоустойчивости системы связи при воздействии помех малой длительности (меньше длительности одного кадра) на различные элементы кадра – полезные данные и служебную информацию (заголовки синхронизации и физического уровня). Для каждой комбинации значений мощности и длительности помехи вычисления производились для 100 пакетов данных.

На рисунке 4 представлены результаты зашумления помехой длительностью 10% от длительности сигнала с различными начальными положениями для выявления наиболее уязвимых элементов кадра.

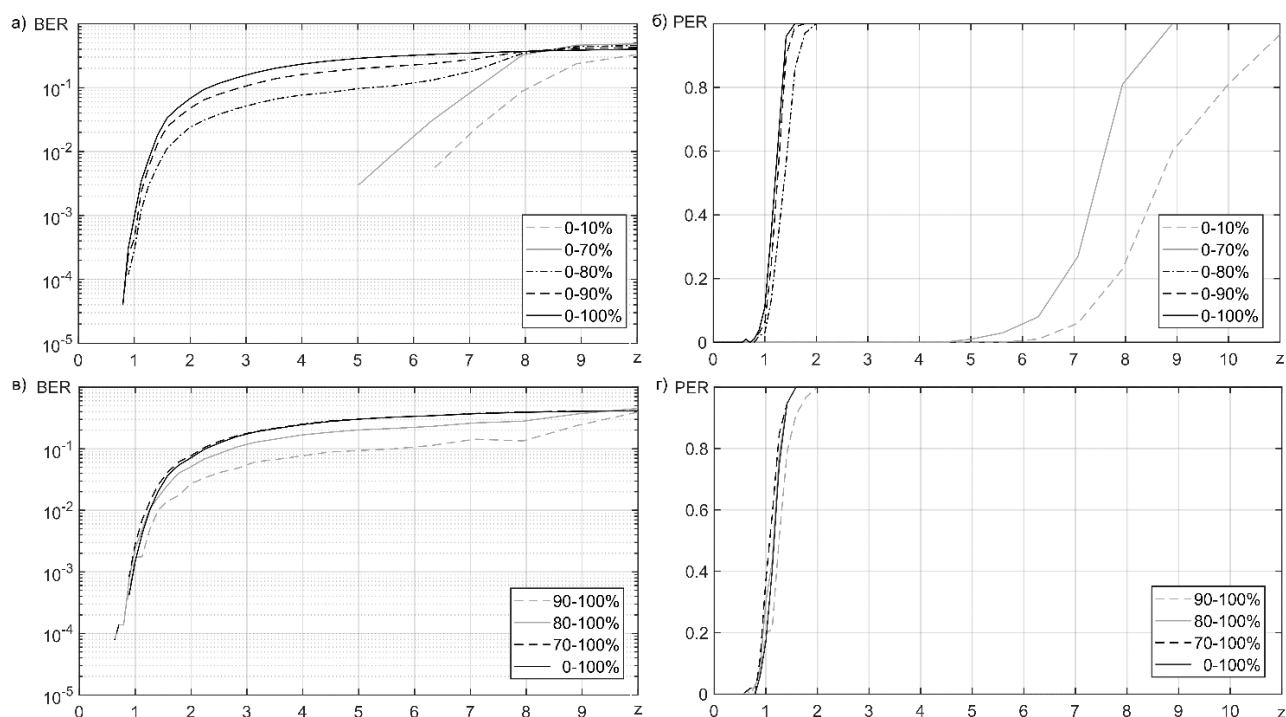


Рис. 3. Результаты моделирования для базового режима работы: BER (а) и PER (б) при постановке помехи в прямом порядке; BER (в) PER (г) при постановке помехи в обратном порядке

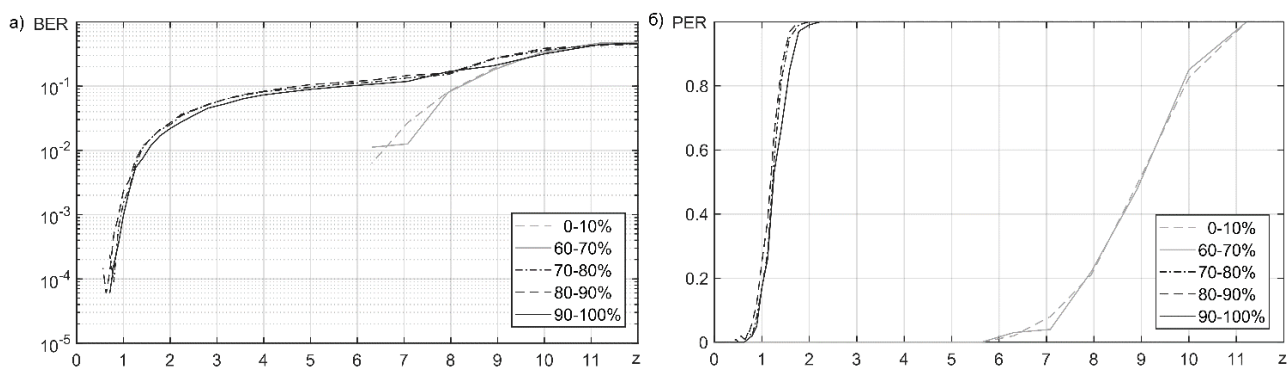


Рис. 4. Результаты моделирования для базового режима работы с помехой в 10% от длительности сигнала: а) BER; б) PER

Полученные результаты показывают, что зашумление служебной информации приводит к снижению BER и PER по сравнению с зашумлением полезных данных. Также при увеличении длительности помехи от 10% до 70% помехоустойчивость системы связи изменяется незначительно. В то же время при зашумлении полезных данных наблюдается значительный рост количества

ошибок. Это объясняется использованием для служебной информации более помехоустойчивой схемы модуляции и кодирования, а также избыточностью заголовка синхронизации (SHR), составляющего большую часть интервала передачи служебной информации. Однако при значительном искажении SHR приём всего пакета становится невозможным. Таким образом, помеха малой относительной длительности при высоком ОПС может вызвать срыв синхронизации приёмника.

Опираясь на анализ структуры пакета, можно сделать вывод о том, что зашумление заголовка физического уровня вносит больший вклад в увеличение BER, чем зашумление заголовка синхронизации. Поэтому для оценки помехоустойчивости служебных данных стандарта достаточно рассматривать воздействие помехи только на заголовок физического уровня, а также учитывать возможность срыва синхронизации. Также зашумление полезных данных в обратном порядке не даёт качественно отличного результата от зашумления в прямом порядке, что свидетельствует об однородности структуры выбранного участка.

### **3. Результаты моделирования для режима HPRF**

Для оценки помехоустойчивости режима HPRF были использованы пакеты со средней частотой повторения импульсов 249,6 МГц, обеспечивающие максимальную скорость передачи данных 27,24 Мбит/с. Согласно [8], значительное изменение BER наблюдается при росте ОПС  $z$  до 3 раз. Эти значения были выбраны для построения зависимостей.

Объём полезных данных был установлен в 1 кбит, аналогично базовому режиму. Результаты моделирования представлены на рисунке 5, где показаны зависимости BER и PER от ОПС для различных значений относительной длительности помехового импульса. Моделирование производилось в прямом и обратном порядке, аналогично базовому режиму. Для каждой комбинации значений мощности и длительности помехи вычисления производились для 100 пакетов данных. На рисунке 6 представлены результаты воздействия помехи



длительностью 10% от длительности сигнала с различными начальными положениями для выявления наиболее уязвимых элементов кадра.

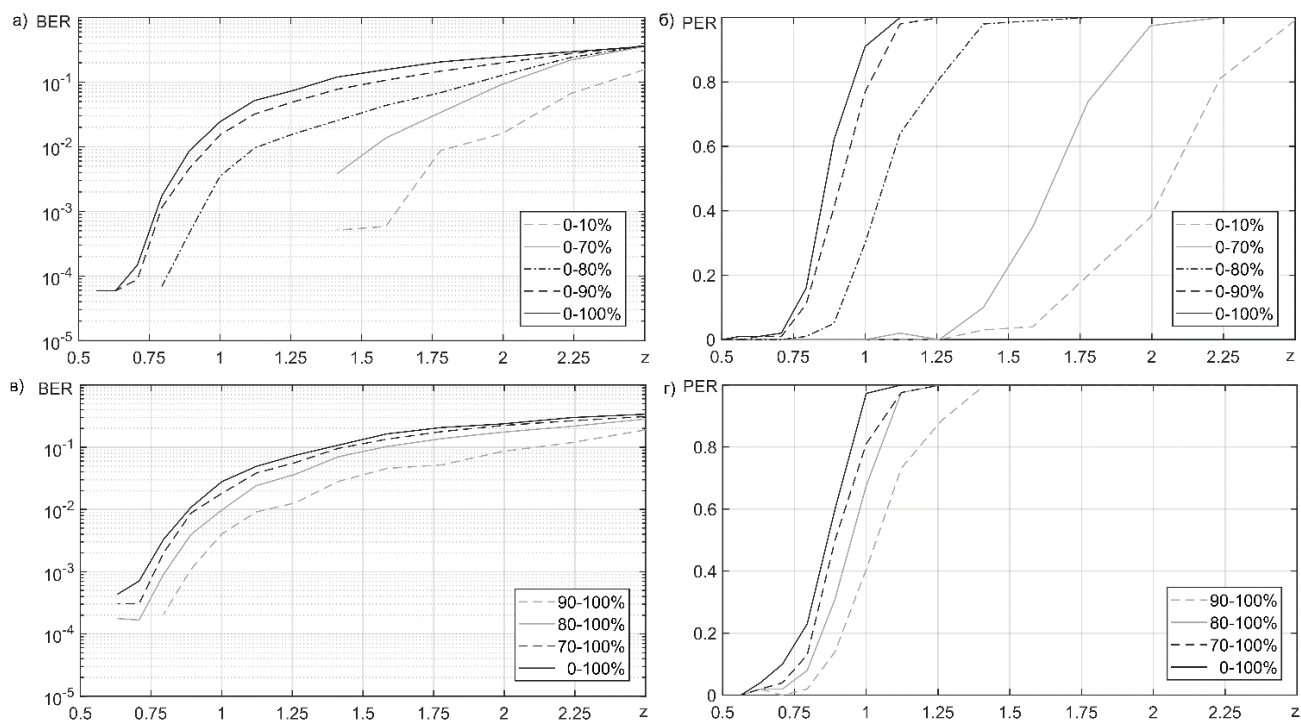


Рис. 5. Результаты моделирования для режима HPRF: BER (а) и PER (б) при постановке помехи в прямом порядке; BER (в) PER (г) при постановке помехи в обратном порядке

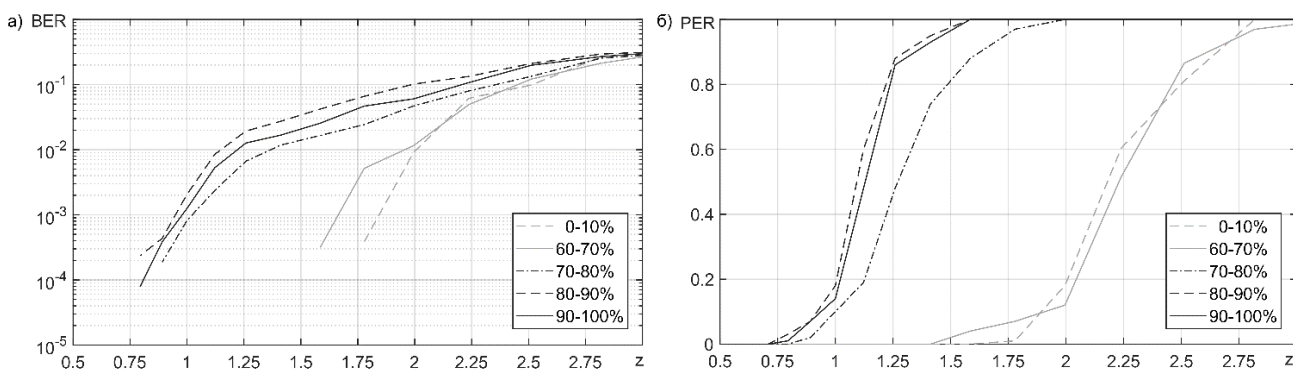


Рис. 6. Результаты моделирования для режима HPRF с помехой в 10% от длительности сигнала: а) BER; б) PER

Полученные результаты качественно совпадают с результатами для базового режима. Также наблюдается бóльшая помехоустойчивость служебной информации по сравнению с полезными данными, значительное увеличение BER при зашумлении заголовка и однородность полезных данных во временной области. Однако в полученных данных не наблюдается полной потери пакетов из-за срыва синхронизации. Это связано с использованием более совершенной

по сравнению с базовым режимом схемы синхронизации, включающей в себя четыре синхронизирующих последовательности, следующие друг за другом с точными интервалами.

Для оценки влияния длительности сигнала на помехоустойчивость системы связи было выполнено моделирование с различным объёмом полезных данных на один пакет для обоих режимов. При зашумлении участков данных наблюдались зависимости, аналогичные рис. 3-6 с поправкой на положение участка полезных данных. Результаты моделирования представлены на рисунке 7 для помехи длительностью 100% длительности сигнала.

Как показывают полученные зависимости, при одинаковом изменении объёма данных различия в помехоустойчивости режимов сохраняются – режим HPRF обладает меньшей помехоустойчивостью, чем базовый режим. Также при использовании сообщений с большим объёмом полезных данных помехоустойчивость системы снижается.

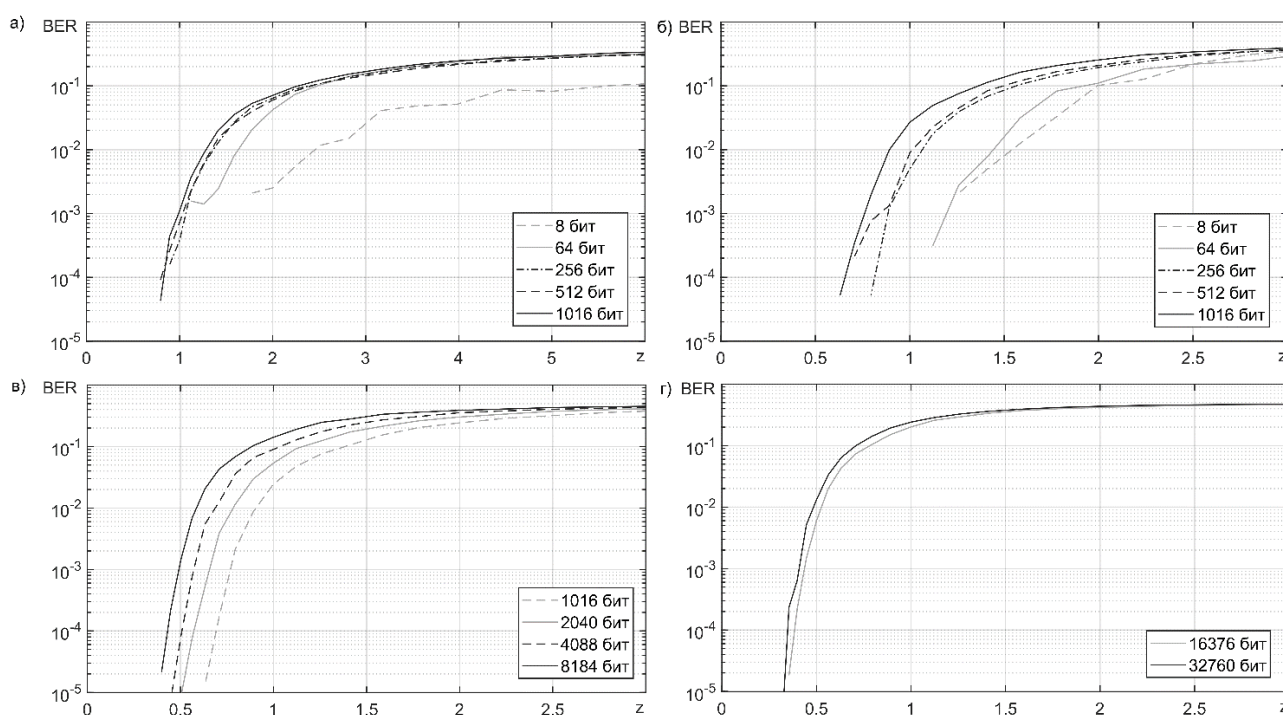


Рис. 7. Результаты моделирования с различным объёмом полезных данных:  
 а) базовый режим; б) режим HPRF для малого объёма полезных данных;  
 в) режим HPRF для среднего объёма полезных данных;  
 г) режим HPRF для большого объёма полезных данных

Результаты сравнения помехоустойчивости базового режима и режима HPRF для объёма данных 1016 бит и относительной длительности помехи в 10%, синхронизированной во времени с интервалом заголовка или полезных данных, приведены на рисунке 8.

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что помехоустойчивость полезных данных базового режима и режима HPRF имеет незначительные различия. При этом в режиме HPRF служебная информация обладает большей помехоустойчивостью, чем полезные данные. Для базового режима служебная информация обладает значительно большей устойчивостью к битовым ошибкам в сравнении с режимом HPRF, однако более уязвима к потере пакетов.

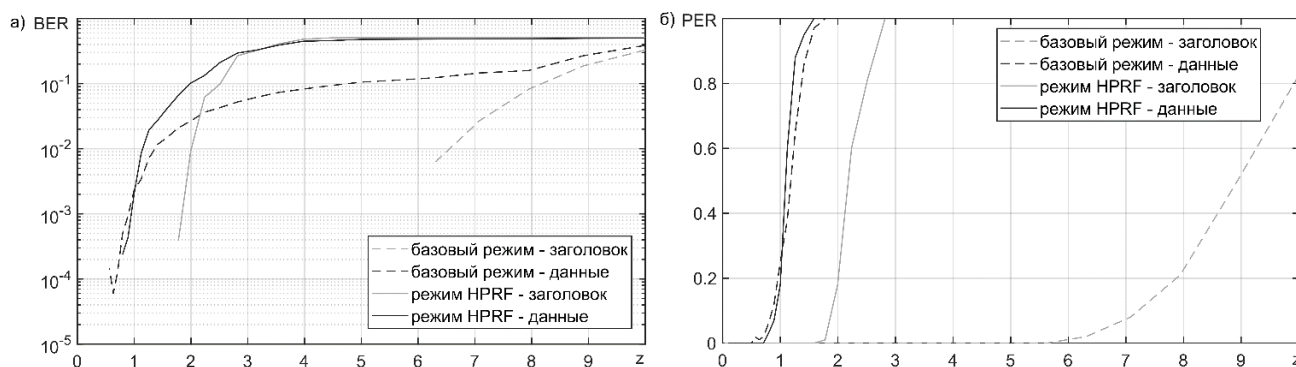


Рис. 8. Сравнение помехоустойчивости базового режима и режима HPRF с помехой в 10% от длительности сигнала: а) BER; б) PER

## Заключение

Разработана имитационная модель, предназначенная для оценки помехоустойчивости систем связи, работающих в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4-2020 и IEEE 802.15.4z-2020 с учётом структуры служебной информации. Анализируемая в работе импульсная помеха с переменной длительностью и изменяемым положением относительно начала сигнала позволяет оценить помехоустойчивость при влиянии помехи на уязвимые участки служебной информации, такие как заголовок синхронизации и заголовок физического уровня.

Показано, что базовый стандарт более уязвим к срыву синхронизации по сравнению с режимом HPRF, однако в обоих режимах при воздействии помехи

на элементы служебной информации наибольший рост BER наблюдался при искажении заголовка физического уровня. В связи с этим вызывает интерес исследование воздействия помех, согласованных по спектру с заголовком синхронизации и заголовком физического уровня. Полученные в данной работе результаты могут быть использованы для подбора параметров модели при изучении влияния данных помех, разработке перспективных систем сверхширокополосной связи и повышении эффективности существующих систем.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счёт 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: учебно-методическое пособие*. Ростов-на-Дону, изд-во ЮФУ. 2008. 36 с.
2. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015). 2020. 510 p.
3. DecaWave APR001 UWB Regulations, A Summary of Worldwide Telecommunications Regulations governing the use of Ultra-Wideband radio, Application Note v 1.2. 2015. 63 p.
4. FCC APR001 UWB Regulations governing the use of Ultra-Wideband radio [web]. *Searchable FCC ID Database: the information resource*. Дата обращения: 06.05.2023. URL: <https://www.fccid.io/blog/2018/05/06/ultra-wide-band-fcc-wireless-device-approval>
5. ETSI Regulations governing the use of Ultra-Wideband radio, Application Note v 1.1.1 [web]. *ETSI the Standards people*. Дата обращения: 06.05.2023. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102800\\_102899/10288702/01.01.01\\_60/ts\\_10288702v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/10288702/01.01.01_60/ts_10288702v010101p.pdf)
6. 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.

7. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks – Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. 2020. 173 p.
8. 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*. Севастополь. 2022. С.62.
9. Титов К.Д., Липатов А.О., Завалишина О.Н. Оценка помехоустойчивости системы связи стандарта IEEE 802.11n при воздействии помех с учётом структуры пакета передаваемых данных. *Теория и техника радиосвязи*. 2019. № 4. С.95-107.
10. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. 2009. 560 p.
11. Титов К.Д., Петров Ю.Г., Головацкая Е.Э. Имитационная модель воздействия помех на беспроводной канал связи стандарта IEEE 802.15.3. *Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Радиотехника и компьютерные технологии*. Москва. 2021. С.104-106.
12. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks. 2016. 510 p.

**Для цитирования:**

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* [электронный журнал]. 2023. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.5>