

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ системы беспроводной передачи данных стандарта IEEE 802.11ax

В.А.Коптев, магистрант МТУСИ / yyy.xxx.98@bk.ru,
А.С.Чечельницкий, магистрант МТУСИ / mr.vip64@yandex.ru,
Б.М.Халматов, магистрант МТУСИ / bogdanyegorov@gmail.com,
Д.А.Везарко, магистрант МТУСИ / vezarko00@mail.ru

УДК 621.396, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.112.4.48.54

Рассматривается стандарт беспроводной передачи данных IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6). Проведен анализ технических характеристик и технологий, определены параметры сигнала и системы рассматриваемого стандарта. Разработана имитационная компьютерная модель в программной среде Matlab в пакете Simulink и получена характеристика помехоустойчивости системы в условиях канала с аддитивным белым гауссовским шумом.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом растет число пользователей сетей беспроводной передачи данных, увеличивается объем потребляемого трафика. В связи с этим требуется улучшать сети, увеличивая пропускную способность каналов связи, для чего разрабатываются новые стандарты. Если говорить о технологии Wi-Fi, то показателей предыдущего стандарта – IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) – для некоторых применений перестало хватать.

В связи с этим был разработан новый стандарт IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), который утвердили в 2020 году. В Wi-Fi 6 были устранены недостатки предыдущего стандарта: улучшены показатели энергетической эффективности и пропускной

способности, а также интегрированы новые технологии. Это помогло обеспечить четырехкратное увеличение максимальной скорости передачи данных и повысить качество соединения.

Анализ системы стандарта Wi-Fi 6

Техническое описание стандарта IEEE 802.11ax в Российской Федерации дано в приказе Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ № 124 от 14 сентября 2010 года в редакции приказа № 321 от 6 июля 2020 года [1]. В нем определены: выделяемые диапазоны частот, ширина канала и метод формирования спектра (OFDMA), количество поднесущих частот, разнос между поднесущими, вид модуляции сигнала

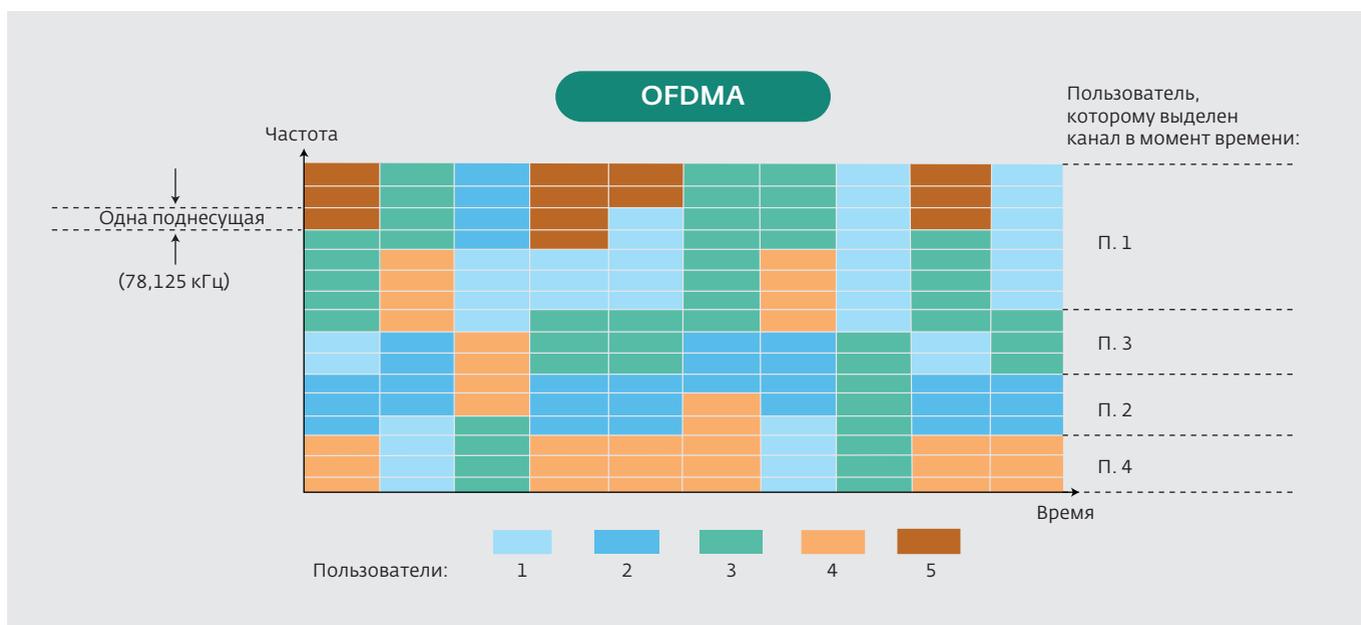


Рис.1. Структура сигнала OFDMA

на каждой поднесущей, методы и скорость кодирования, длительность символа и защитного интервала и др. В документе также указаны дополнительные технологии, которые могут применяться для формирования сети.

Технология OFDMA

Система Wi-Fi 6 поддерживает несколько диапазонов частот: 2,4; 5 и 6 ГГц. Диапазон 2,4 ГГц обеспечивает большую зону покрытия и совместимость с устаревшими устройствами. Диапазоны 5 и 6 ГГц способны обеспечивать увеличенную пропускную способность сети. Wi-Fi 6 также способна поддерживать разную ширину канала связи: 20, 40, 80 и 160 МГц [1]. Этот канал заполняется большим количеством ортогональных поднесущих частот, на каждой из них передается небольшая часть общего потока данных. Но за счет того, что поднесущих частот много, а канал широкий, скорость передачи данных выше, чем в случае передачи на одной несущей.

В системах Wi-Fi 6 разнос между поднесущими составляет 78,125 кГц, что в четыре раза меньше, чем было в прошлых поколениях (312,5 кГц). Это означает, что удалось уплотнить спектр большим количеством поднесущих и передавать больший объем данных за единицу времени. Кроме того, OFDMA дает возможность выделять поднесущие одного канала разным абонентам, что схематично показано на рис.1. Организована ортогональная многопользовательская передача в одном

частотном канале, что связано с особыми возможностями сигнала OFDMA по сравнению с сигналом OFDM, используемым в предыдущих поколениях стандартов.

Каждая поднесущая частота проходит независимую квадратурную модуляцию. Чтобы увеличить скорость передачи данных, следует увеличивать порядок QAM. Системы Wi-Fi 6 способны поддерживать модуляцию до 1024-QAM, по сравнению с 256-QAM в предыдущем стандарте. За один символ каждая поднесущая при 1024-QAM переносит 10 бит. Но, стоит оговориться, что чем выше порядок модуляции, тем ниже помехоустойчивость сигнала. Таким образом, высокая скорость передачи будет возможна только на небольшом расстоянии, при высоком соотношении сигнал/шум.

Поэтому базовые станции должны анализировать условия канала связи. Для этого в структуре OFDMA сигнала размещаются пилот-поднесущие – специальные сигналы, параметры которых известны на приемной и передающей сторонах. Анализируя их искажения, система Wi-Fi 6 способна подстраиваться под условия канала и при необходимости понижать порядок модуляции [2].

Технология MU-MIMO

Сигнал системы Wi-Fi 6 распространяется в многолучевом канале. Сигналы накладываются друг на друга и возникает сложность в их детектировании. Чтобы избежать этого, в системе применена технология MIMO с разнесенными

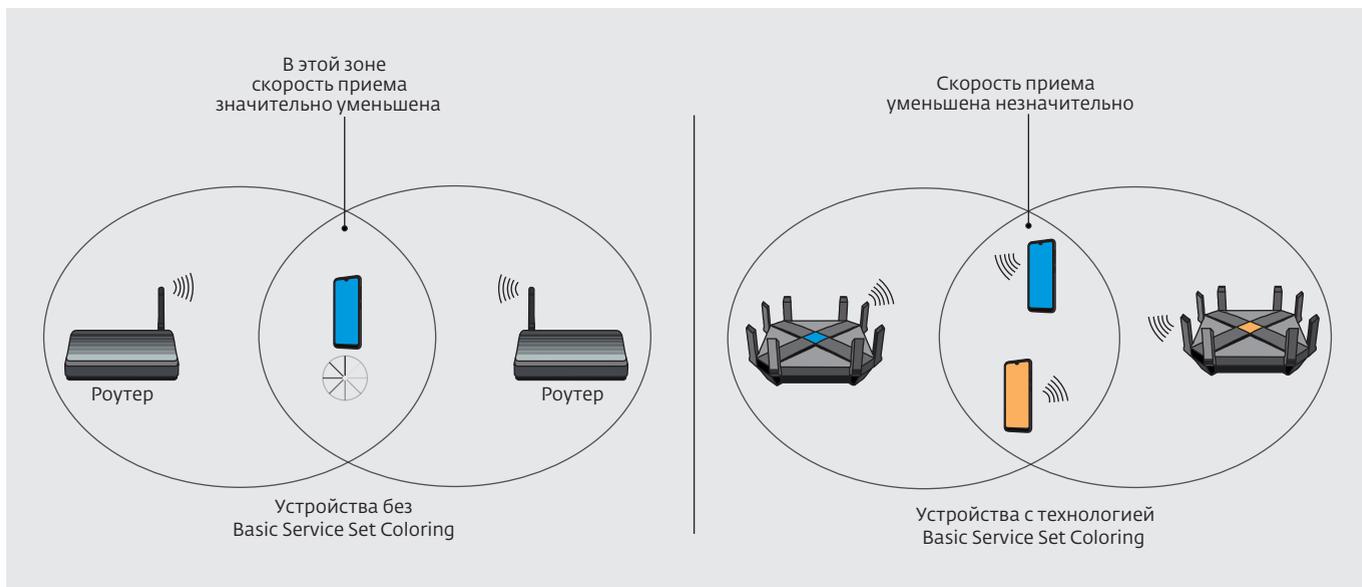


Рис.2. Принцип работы BSS Coloring

в пространстве антеннами. Суть MIMO заключается в том, что обеспечивается независимый прием копий сигнала с разным временем распространения, что обеспечивает лучшее качество [3, 4, 5].

Также можно организовать пространственное разделение потоков, то есть фокусироваться на пользователе, сделав канал связи избирательным (селективным) по одному из параметров сигнала. Тем самым происходит передача данных независимо сразу нескольким абонентам. В системах же предыдущих версий стандарта происходит временное разделение между абонентами, то есть в отдельный момент времени осуществляется передача только одному пользователю.

BEAMFORMING

Как было отмечено ранее, в системе Wi-Fi 6 используются несколько частотных диапазонов. Точка доступа Wi-Fi объединяет в себе их преимущества и недостатки: 2,4 ГГц обеспечивает большую зону покрытия с меньшей скоростью, а 5,2 ГГц дает увеличенную пропускную способность сети на меньшей площади. Технология Beamforming призвана сгладить различия и недостатки диапазонов.

Технология работает примерно так: точка доступа с помощью множества своих антенн фокусирует узкий луч радиосигнала в сторону абонента, за счет чего энергетика сигнала не рассеивается в других направлениях. Применение этой технологии влечет за собой увеличение зоны покрытия, стабильности соединения,

уменьшается постороннее излучение в разных областях пространства. [3, 4, 6].

BSS COLORING

Эта технология затрагивает канальный уровень системы (подуровень управления доступом к среде – MAC). А именно – решение проблемы передачи трафика. Сети Wi-Fi сегодня широко распространились и возникают такие ситуации, когда абонент находится в зоне действия нескольких точек доступа, но подключен только к одной. Пока пользователь обрабатывает все пришедшие сигналы и определит, какой из них был предназначен ему, пройдет много времени и будут задействованы значительные вычислительные ресурсы.

Все это приводит к увеличению времени ожидания и снижению пропускной способности сети. Чтобы сгладить подобные ситуации, в системы Wi-Fi 6 была внедрена технология BSS Coloring (Basic Service Set Coloring). Смысл ее заключается в том, чтобы помечать, "раскрашивать", сигналы от разных сетей. Осуществляется это путем внесения специальных меток в поток данных, по которым клиент определяет принадлежность сигнала к своей сети. Изначально, чтобы это сделать, приходилось полностью обрабатывать пришедший сигнал, а поскольку приходилось обрабатывать все, что пришло на прием, это приводило к снижению производительности сети. Работа технологии BSS Coloring заключается в том, чтобы обеспечивать пакеты данных простой цифровой маркировкой. Тем самым клиент определяет

принадлежность сигнала после обработки этой метки, без полной расшифровки сигнала, что значительно ускоряет работу сети передачи данных. Принцип работы BSS Coloring иллюстрирован на рис.2 [3].

Если организовать сеть Wi-Fi таким образом, то теряется надобность в поддержке высокого уровня мощности сигнала, поскольку каждая точка доступа будет "знать" своего абонента и формировать из них группы. Сети перестают конкурировать и мешать друг другу, поэтому удастся снизить излучаемую мощность, тем самым уменьшая общий уровень шума для других станций [7].

ТЕХНОЛОГИЯ TARGET WAKE TIME

В мире постоянно увеличивается число подключенных к сети устройств. Поэтому возникла необходимость более грамотного распределения ресурса сети в зависимости от режима работы абонентов. Изначально аппаратура подключалась к сети и постоянно происходило поддержание соединения, даже когда она находилась в пассивном состоянии. Так как в реальности подключенная к сети аппаратура работает с ней не постоянно, то с помощью технологии Target Wake Time [3, 4, 8] при окончании активной работы абонента в сети его уводят в "спящий режим" и канал "просыпается" только, когда вновь необходимо принять или передать сообщение. Также с помощью этой технологии можно оптимизировать временные промежутки активности того или иного абонента в сети. Благодаря Target Wake Time снижается возможность перегрузки сети и ее ресурс оптимально распределяется между абонентами.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛА И СИСТЕМЫ Wi-Fi 6

Для проектирования имитационной компьютерной модели системы передачи данных Wi-Fi 6 необходимы численные характеристики реальных систем. Так как их производители не раскрывают эту информацию, был проведен расчет параметров сигнала и системы. Результаты этого расчета приведены в табл.1 [1, 2, 9, 11].

Анализ полученных результатов показал, что при соблюдении ряда условий система может выдать скорость передачи данных свыше 1,1 Гбит/с. Эти условия состоят в том, что ширина канала должна быть 160 МГц (1960 информационных поднесущих) в диапазоне с центральной частотой 5,25 ГГц, с шириной защитного интервала 0,8 мкс, со скоростью сверхточного (например, 133₈, 171₈) помехоустойчивого

Таблица 1. Сводная таблица результатов расчета параметров системы

Название параметра, обозначение	Значение
Полоса частот, ΔF	160 МГц
Диапазон частот	5,15–5,35 ГГц
Центральная частота	5,250 ГГц
Длина волны на центральной частоте	0,057103325 м
Расстояние между поднесущими, Δf	78,125 кГц
Длительность защитного интервала, $T_{зщ}$	$0,8 \cdot 10^{-6}$ с
Длительность OFDM-символа, T_c	$1,36 \cdot 10^{-5}$ с
Интервал дискретизации, Δt	$6,25 \cdot 10^{-9}$ с
Количество поднесущих, $N_{исп}$	1960 шт.
Число пилот-поднесущих, $N_{пилот}$	33 шт.
Количество поднесущих для передачи данных, $N_{подн}$ код бит	1926 шт.
Число отсчетов для ОБПФ, $N_{одпф}$	2048 шт.
Число неиспользуемых поднесущих, N_0	88 шт.
Общее число отсчетов огибающей OFDMA-символа, $N_{отсч}$	2176 шт.
Скорость кодирования	5/6
Число кодовых бит на одной поднесущей, $N_{бит\text{ КАМ}}$	10 бит
Число информационных бит в одном OFDMA-символе, $N_{инф}$	16050 бит
Число кодовых бит на одной поднесущей, $N_{бит\text{ КАМ}}$	10 бит
Число символов, передаваемых за 1 с, $N_{симв}$	73 529 символ/с
Скорость передачи данных	1126 Мбит/с
Расчетная максимальная дальность, R_{max}	45,721 м

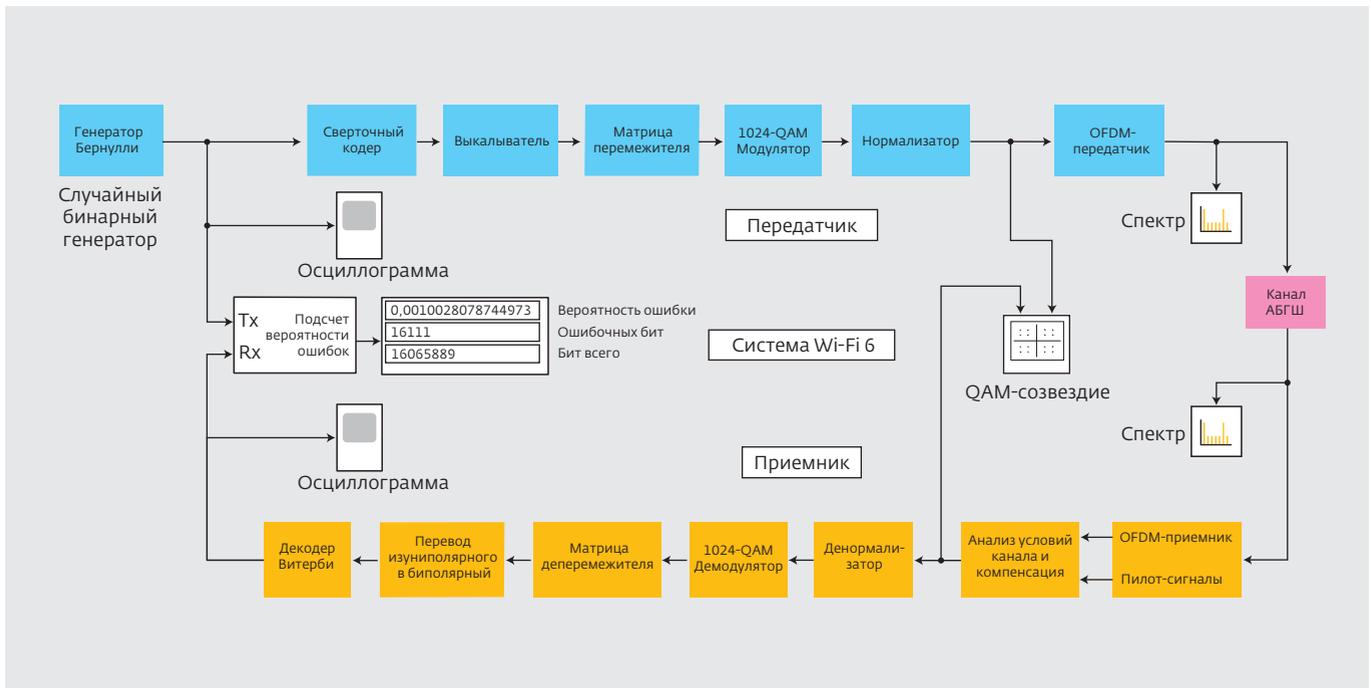


Рис.3. Компьютерная имитационная модель модема системы Wi-Fi 6

кодирования 5/6 и при использовании модуляции 1024-QAM. Расчетное значение дальности составляет 45,721 м.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В ходе работы была создана компьютерная имитационная модель системы Wi-Fi 6 в программной среде Matlab в пакете Simulink, которая настроена на рассчитанные ранее параметры [9]. Модель показана на рис.3.

Имитационная модель четко разделена на передающую, приемную части и канал связи. На передающей стороне присутствуют функциональные блоки:

- генератор Бернулли – выступает в качестве источника начальных данных;
- сверточный кодер – реализует метод непрерывного несистематического помехоустойчивого кодирования (в модели брался сверточный код 133₈, 171₈). Этот метод кодирования непрерывно совершает операции с битами, благодаря чему улучшает помехоустойчивость потока бит;
- выкальватель – блок, который поддерживает необходимую скорость кодирования, физически убирая часть бит из потока данных;
- матрица перемежителя – записывает поток бит в данных "строка за строкой", а считывается "столбец за столбцом", чтобы

по возможности максимально далеко рассредоточить соседние биты в исходном потоке, для увеличения помехоустойчивости. Это делается, дабы избежать негативных последствий от воздействия на сигнал сконцентрированной помехи, чтобы она не могла исказить длительный участок исходного потока бит;

- модулятор 1024-QAM – модулирует входящий поток бит;
- нормализатор – блок, который производит умножение сигнала на нормирующий коэффициент;
- OFDMA-модулятор – блок, который формирует сигнал OFDMA.

Затем сигнал поступает в канал связи с АБГШ, в блоке задается параметр отношения сигнал/шум (ОСШ). На приемной стороне происходит процесс детектирования сигнала. Процесс приема сигнала имеет зеркальный вид относительно передатчика: расформирование OFDMA, компенсация условий канала, денормирование, демодуляция, деперемежение, перевод сигнала из униполярного в биполярный и декодирование сверточного кода по алгоритму Витерби. Затем идет сравнение исходной последовательности с принятой и результат выдается на "дисплей".

По результатам моделирования построена характеристика помехоустойчивости – основная

характеристика, по которой можно судить о работе модели. Она получается при помощи проведения ряда экспериментов для накопления статистики при разных значениях ОСШ в канале связи при прочих разных условиях. Характеристика помехоустойчивости показана на рис.4. Для передачи двоичных данных достаточный уровень коэффициента битовых ошибок BER составляет 10^{-2} . В полученной характеристике он достигается при величине ОСШ 39 дБ.

Для проверки адекватности спроектированной модели было проведено сравнение полученных результатов с данными из альтернативных источников [12, 13]. Так, в [13] приведены характеристики помехоустойчивости модели аналогичной системы с шириной канала 40 МГц с модуляцией 1024-QAM, скоростью кодирования $R=5/6$ и 256-QAM, $R=5/6$. Величина коэффициента BER= 10^{-2} достигается, при ОСШ, соответственно, $\approx 42-45$ и $36-38$ дБ. В [12] приведена характеристика помехоустойчивости модели аналогичной системы с шириной канала 20 МГц и параметрами модуляции 256-QAM, $R=3/4$. В ней уровень коэффициента BER= 10^{-2} достигается, при ОСШ $\approx 34-36$ дБ.

Эти результаты приведены для качественной оценки адекватности разработанной модели. Параметры моделирования различаются, но для указанной цели (сравнения) не критично. В связи с отсутствием работ с полностью идентичными параметрами моделирования, подобное сравнение авторы считают достаточным, чтобы дать требуемую оценку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом данной работы является спроектированная компьютерная имитационная модель системы беспроводной передачи данных стандарта IEEE 802.11ax в условиях канала с аддитивным белым гауссовским шумом. В результате моделирования была получена характеристика помехоустойчивости системы. Полученная модель может быть использована как образец для дальнейшего изучения систем Wi-Fi разных стандартов. На ее основе также можно проводить исследование по влиянию разных условий канала связи на помехоустойчивость системы, например канала с Рэлеевскими замираниями либо изучать влияние, дополнительно включенных, функциональных блоков на работу модифицированной модели.

Организатор:



Партнер регистрации:



Партнер сессии:



IX Федеральный форум по ИТ и цифровым технологиям нефтегазовой отрасли России

SMART OIL & GAS

14.09 – 15.09. 2023

отель
«Хилтон Санкт-Петербург Экспофорум»
г. Санкт-Петербург,
Петербургское шоссе, д.62, стр.1

Smart Oil & Gas – уникальная независимая площадка для обсуждения и обмена опытом по ключевым вопросам и актуальным проблемам цифровой трансформации, развития ИТ-систем и промышленной автоматизации в нефтегазовой отрасли РФ, включая инновационные технологии и выработку подходов к реализации проектов цифровизации и ИТ.

2
дня

100
спикеров

700
участников



www.comconf.ru/smartoilgas2023

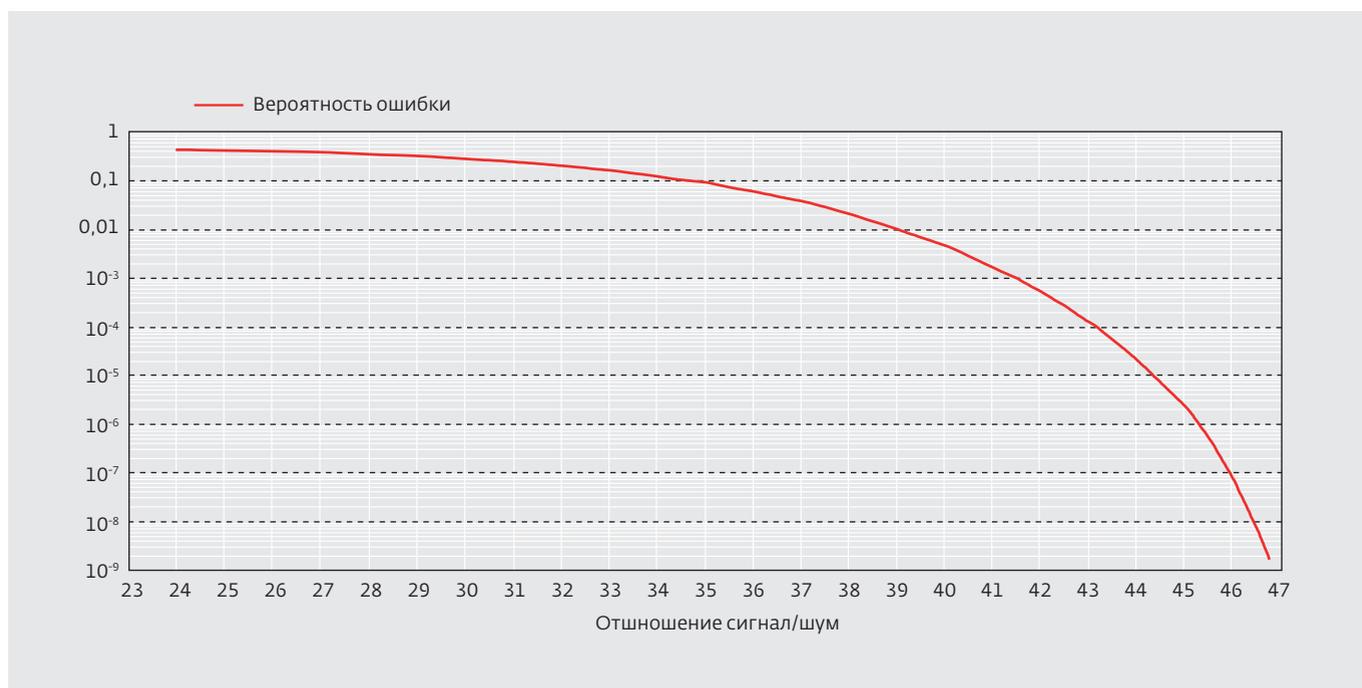


Рис.4. Характеристика помехоустойчивости моделируемой системы

ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации № 321 от 06.07.2020.
2. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия - Телеком, 2017. 352 с.
3. Что такое Wi-Fi 6 и какие у него преимущества. [Электронный ресурс]. URL: https://club.dns-shop.ru/blog/t-280-marshrutizatoryi/34858-cto-ta-koe-wi-fi-6-i-kakie-u-nego-preimuschestva/?utm_referrer. (дата обращения: 16.03.2023).
4. What is 802.11ax (Wi-Fi 6)? [Электронный ресурс]. URL: [https://www.extremenetworks.com/wifi6/what-is-80211ax/#:~:text=802.11ax%20is%20an%20IEEE,is%20High%20Efficiency%20\(HE\)](https://www.extremenetworks.com/wifi6/what-is-80211ax/#:~:text=802.11ax%20is%20an%20IEEE,is%20High%20Efficiency%20(HE)). (дата обращения: 17.03.2023).
5. Писаренко Н.С. Модельное исследование пространственно-временного кодирования сигналов // Электронные средства и системы управления: материалы докладов международной научно-практической конференции. 2014. С. 52-54.
6. Beamforming – что это в роутере. [Электронный ресурс]. URL: <https://wifigid.ru/poleznoe-i-interesnoe/beamforming> (дата обращения: 12.03.2023).
7. BSS Color на WiFi Роутере – Что Это Такое Простыми Словами? [Электронный ресурс]. URL: <https://wifika.ru/bss-color.html>. (дата обращения: 31.03.2023).
8. TargetWake-upTime(TWT). [Электронный ресурс] URL: <https://forum.huawei.com/enterprise/ru/target-wake-up-time-twt/thread/621250-100554>. (дата обращения: 03.04.2023).
9. Шинаков Ю.С. Лабораторный практикум по дисциплине "Теоретические основы систем мобильной связи". Лабораторная работа № 30 (б). Формирование и обработка сигнала в системах мобильной связи с технологией OFDM (Имитационное моделирование в системе MATLAB & SIMULINK). М.: МТУСИ, 2015.
10. Что нас ждет в Wi-Fi 7, IEEE 802.11be? [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/501266/>. (дата обращения: 12.05.2023).
11. Сперанский В.С. Радиолокация, радиолокационные системы и устройства. М.: Брис-М, 2011. 257 с.
12. Zhang Yi et al. Deep WiPHY: Deep Learning-based Receiver Design and Dataset for IEEE 802.11ax Systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2020. Vol. 20. No. 3. PP. 1596-1611.
13. Akbilek A. et al. Analysis of IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs for in-Vehicle Use // 15th Wireless Congress: Systems & Applications. Munich, 14-15 November 2018. PP. 1-9.

4-7 ИЮЛЯ 2023

ИНФОФОРУМ

10^й ЮЖНЫЙ ФОРУМ
ИНФОРМАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ

СОЧИ

