

На правах рукописи



ЛЕВШУНОВ ВЛАДИСЛАВ ВИТАЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ
СЕТИ ТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Специальность: 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ))

Научный руководитель:	Журавлева Любовь Михайловна д.т.н., доцент, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (РУТ(МИИТ))
Официальные оппоненты:	Рыжков Анатолий Васильевич д.т.н., профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской части Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ) Самойлов Сергей Александрович к.т.н., доцент кафедры «Радиотехника и радиосистемы» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)
Ведущая организация:	АО Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС)

Защита диссертации состоится «14» декабря 2022 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.01 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, пр-т Строителей, 3/7, ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета по адресу 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, корпус 1 и на сайте ВлГУ <http://dis.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 14 октября 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01 Самойлову А.Г. Тел. (4922) 534-238, e-mail: ags@vlsu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.281.01
доктор технических наук, профессор

А.Г. Самойлов

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из ключевых задач в обеспечении безопасности на железнодорожном (ж/д) транспорте является оперативное оповещение всех участников движения о чрезвычайных ситуациях. Для своевременного информирования всех участников движения необходима система мониторинга для контроля за техническим состоянием подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта. Использование существующих сетей передачи информации (поездной радиосвязи ПРС, мобильной связи МС, спутниковой связи СС) затруднительно. Каждый из этих видов связи имеет существенные недостатки. В системах СС нужно учитывать возможные сбои в работе и недостаточное качество сигнала из-за атмосферных помех, солнечной интерференции, рельефа местности. Для сетей МС слабым местом является перегруженность телетрафика. Каналы ПРС имеют ограниченную полосу частот, которая не позволяет передавать широкополосные сигналы, например, видеоизображения с переездов. Таким образом, для организации мониторинга на ж/д транспорте необходимо создать отдельную сеть на основе беспроводных технологий. Сети мониторинга могут быть использованы также для реализации проектов «автомашинист» и «виртуальная автосцепка». Такую задачу можно решить с помощью единой системы мониторинга линейных и станционных сооружений (мостов, тоннелей, переездов, платформ, сортировочных горок и парков и т.д.), а также грузовых и пассажирских поездов на основе современных технологий Wi-Fi, Mesh, атмосферных каналов.

В основе решения указанных задач лежат теоретические и прикладные исследования Фомина А.Ф., Ратынского М.В., Шахновича И.В., Громакова А.Ю., Левжинского А.С., Розенберга Е.Н., Лисенкова В.М., Bouaziz M., Alawad H, Gao M., Feng X.J., Paudel R. и др.

Целью диссертации является разработка методических основ и принципов исследования каналов сети технического мониторинга подвижного состава с помощью беспроводных технологий.

Для достижения поставленной цели решаются **основные задачи**:

- 1) выбор и обоснование критериев эффективности беспроводных технологий для мониторинга технического состояния подвижного состава;
- 2) разработка методик расчёта оценок эффективности беспроводных каналов связи для мониторинга технического состояния подвижного состава;
- 3) сбор и обработка статистического материала работы канала Wi-Fi для оценки возможностей технического мониторинга на ж/д транспорте;
- 4) разработка предложений по повышению эффективности канала Wi-Fi для технического мониторинга подвижного состава.

Объектом исследования являются каналы передачи данных мониторинга технического состояния подвижного состава.

Предметом исследований являются научные принципы разработки системы мониторинга технического состояния подвижного состава.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методические основы и принципы разработки и проектирования беспроводных каналов передачи данных мониторинга на ж/д транспорте для контроля за техническим состоянием подвижного состава.

2. Методики расчета критериев эффективности канала Wi-Fi технического мониторинга, позволяющие оценить возможности беспроводной технологии по доступности, оперативности и качеству.

3. Требования к показателям эффективности канала Wi-Fi технического мониторинга на ж/д транспорте, учитывающие безопасность движения поездов на нерегулируемых переездах.

4. Результаты анализа экспериментальных исследований работы канала Wi-Fi поезда, статистические характеристики длительности хэндоверов, опасных флуктуаций и провалов канальной скорости, вероятностные оценки доступности, оперативности и качества.

5. Рекомендации по повышению эффективности технологии Wi-Fi для технического мониторинга подвижного состава, которые позволяют:

- а) увеличить коэффициент доступности не менее, чем в 1,022 раза;

- б) снизить временные задержки передачи данных более, чем в 7,2 раз;
- в) улучшить качество (уменьшить вероятность ошибки) на три порядка.

Научная новизна.

В рамках диссертационного исследования получены новые научные результаты, имеющие значение для разработок систем технического мониторинга на ж/д транспорте на основе беспроводных технологий:

- а) разработана структура трехуровневой системы технического мониторинга подвижного состава на основе технологий Wi-Fi, Mesh, БОКС;
- б) предложены критерии эффективности канала Wi-Fi и методики расчета их оценок для технического мониторинга на ж/д транспорте;
- в) рассчитано допустимое значение оценки качества канала Wi-Fi для мониторинга поездов с учетом безопасности движения поездов на нерегулируемых переездах: вероятность ошибки должна быть $P_{oui} \leq 10^{-5}$;
- г) проведены исследования статистических характеристик оценок достоверности, оперативности и качества канала Wi-Fi на основании собранного экспериментального материала;
- в) предложены рекомендации по совершенствованию алгоритма базовых станций и элементной базы для повышения эффективности канала Wi-Fi.

Методы исследований основаны на теории передачи сигналов и оптимального приема, теорий вероятностей и математической статистики.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обусловлены корректной постановкой задачи, принятыми допущениями и ограничениями, подтверждена использованием апробированного математического аппарата теорий передачи сигналов, вероятностей и математической статистики, сравнением прогнозируемых результатов с расчетами вычислительных и натурных экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы заключается в принципиальном вкладе автора в решении технических задач организации и проектирования сетей технического мониторинга, в выводах и рекомендациях, полученных на основании исследования эффективности

технологии Wi-Fi. Разработанные методические основы проектирования каналов мониторинга на ж/д транспорте позволяют дать техническое обоснование возможностей Wi-Fi для контроля подвижного состава.

С помощью методик расчета доступности, оперативности и качества канала Wi-Fi поезда, их допустимых значений и на основании экспериментальных данных получены оценки работы канала Wi-Fi в сравнении с системой MC (4G):

- 1) коэффициент доступности (0,978) выше показателя MC в 1,075раз;
- 2) среднее время задержки (2,87с) ниже показателя MC в 3,5 раза;
- 3) вероятность потери пакета (0,021) меньше показателя MC в 2,4 раза.

На основании полученных оценок доступности, оперативности, качества и их допустимых значений сделаны выводы о возможности использования технологии Wi-Fi для технического мониторинга подвижного состава, также предложены рекомендации по повышению эффективности технологии Wi-Fi, а именно: совершенствование алгоритма работы сети Wi-Fi поезда и переход на элементную базу нанoeлектроники.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации согласно паспорта специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» соответствует следующим областям исследований:

1. Исследование процессов передачи и отображения цифровой информации, позволяющих повысить эффективность сети.
2. Разработка методов эффективного использования сетей, систем и устройств телекоммуникаций в различных областях народного хозяйства.
3. Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

Апробация.

Основные положения и результаты диссертационной работы апробированы на следующих конференциях:

1. I International Conference ASE-I - 2021: «Applied Science and Engineering – AIP Conference Proceedings 2442» (2021) (Scopus).
2. Международная научно-практическая конференция «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление» (TLC2M) – Российская Федерация, г. Екатеринбург – 2022г (Scopus).
3. XI Международная научно–практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте» (2021) г. Гомель.
4. XIV Международная научная конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ–2021» г. Владимир;
5. Международная научно–практическая конференция «Железнодорожный транспорт и технологии (Railway transPort and technologies, RTT–2021) г. Екатеринбург.
6. Сборник научных статей по материалам VII Международной научно–практической конференции. – г. Уфа, 2021.
7. XXXXIV Всероссийская научно–практическая конференция (НПК): «Совершенствование науки в наши дни: междисциплинарные аспекты» (2022) г. Ростов- на -Дону.
8. Труды Всероссийской НПК Неделя науки-2019, МИИТ.
9. Труды Всероссийской НПК «Неделя науки-2020», МИИТ.
10. Труды Всероссийской НПК «Неделя науки-2021», МИИТ.
11. Труды Всероссийской НПК «Неделя науки-2022», МИИТ.

Публикации. Основные научные результаты отражены в 18 публикациях, том числе в 7 научно–технических рецензируемых журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ для защиты кандидатских диссертаций.

Реализация. Результаты внедрены в новые проекты ООО «СетьТрансПроект», ООО «Связьпроект групп», ООО «НПО Инжиниринг», АО «МаксимаТелеком».

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из основной части и приложения.

Основная часть содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы. Объем основной части составляет 170 страниц машинописного текста, иллюстрируется таблицами и рисунками. В приложении приведены компьютерные программы и результаты вычислений.

Личное участие. Основные теоретические результаты получены лично автором в период с 2018 по 2022 год.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект, предмет и цель исследования, изложены научные результаты, представленные к защите, дана оценка новизны, достоверности, практической ценности результатов и теоретической значимости, приведены структура и содержание работы, данные по ее апробации, практическому применению и реализации.

В первой главе рассмотрены особенности беспроводных технологий Wi-Fi, Mesh, беспроводных оптических каналов БОКС для организации каналов сети мониторинга технического состояния подвижного состава и инфраструктуры на ж/д транспорте. Особое внимание уделено технологии Wi-Fi как наиболее распространенной на ж/д транспорте. Предложены критерии эффективности каналов мониторинга (доступность канала сети мониторинга, оперативность и качество связи), а также способы оценки критериев и их допустимых значений. Разработаны задачи и пути решения вопроса соответствия беспроводных технологий требованиям технического мониторинга и обеспечения безопасности движения поездов [1–5].

Во второй главе предложена структурная схема сети мониторинга, которая решает две основные задачи: контроль технического состояния подвижного состава, линейных и станционных объектов и формирование данных для беспилотного управления поездов.

Система представляет трехуровневую структуру [9], организованную на основе технологий Wi-Fi, сенсорных сетей MESH и БОКС (рис. 1). Система состоит: из верхнего уровня 1 (базовых станций БС 2, объединенных с коммутатором ядра 3 и диспетчерским центром управления ДЦУ 4 с помощью

волоконно-оптических линий); среднего уровня 5 (локальных сетей Wi-Fi подвижного состава с поездной базовой станцией ПБС 6, контроллером 7, точками доступа 8, узлами-датчиками 9 сети MESH, приемниками GPS 10) и нижнего уровня стационарных сетей Wi-Fi 11 (точкой доступа 12, узлами-датчиками 13 сети MESH нижнего уровня). В результате технический контроль за температурой букс вагонов, состоянием автосцепки и осевых подшипников, давлением в тормозной магистрали и т.д. осуществляется с помощью узлов-датчиков 9 сети MESH, определение координат последнего вагона поезда - приемниками GPS 10 (рис.1). Собранные данные через 8,7,6 сети 5 передаются в ДЦУ. Технический мониторинг линейных и станционных устройств (стрелочных переводов, пешеходных мостов, путепроводов, тоннелей, переездов и т.д.) осуществляется с помощью узлов-датчиков 13 сети MESH 11(рис.1) и передается с помощью сети 5 в ДЦУ.

Предлагается объединить в системе мониторинга, осуществляемого из ДЦУ, наблюдение за состоянием мостов, тоннелей, переездов и т.д., объектов станционной инфраструктуры с контролем за подвижным составом. Для этого расширяются функции локальных сетей Wi-Fi поездов. Сети Wi-Fi поездов (рис.1) собирают не только информацию технического состояния вагонов подвижного состава, но и инфраструктуры ж/д транспорта (11) и передают ее в ДЦУ через сеть стационарных базовых станций СБС.

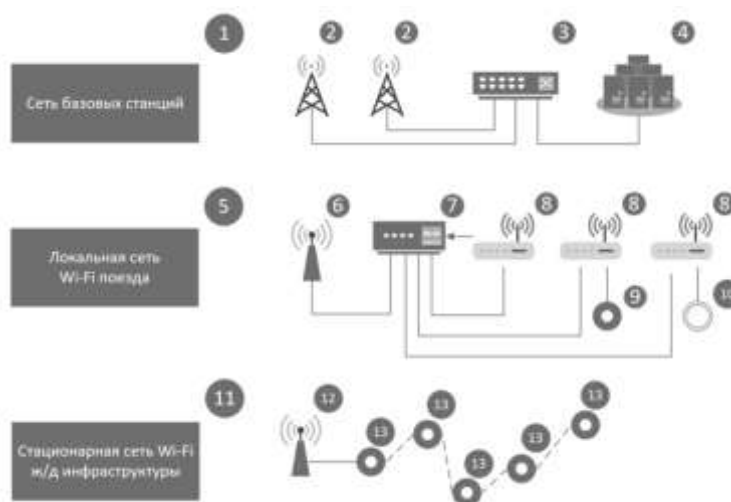


Рисунок 1 – Трехуровневая система мониторинга на ж/д транспорте

Информация с объектов поступает в кабину машиниста (бортовой компьютер) для принятия экстренных мер, например, торможения или остановки, а также в обратном направлении формируются и посылаются управляющие команды для корректировки работы датчиков, например, изменение угла поворота видеокамеры на переезде (перегоне). Установленная на переезде видеокамера с Wi-Fi модулем в зоне действия сети поезда идентифицируется в точке доступа. Затем передает данные, которые транслируются с помощью ПБС в ДЦУ или хранятся в локальной сети Wi-Fi до момента вхождения поезда в зону действия СБС. Периодичность мониторинга объектов ж/д транспорта (мостов, тоннелей, виадуков, эстакад и т.д.) определяется графиком движения поездов, имеющих сеть Wi-Fi.

Для повышения защищенности канала между СБС и ПБС из-за электромагнитных помех предлагается использовать технологию БОКС.

Проведенный анализ возможностей технологий Wi-Fi, сенсорных сетей Mesh и БОКС для мониторинга подвижного состава показал техническую реализуемость предлагаемой системы.

В третьей главе проведен анализ экспериментальных данных работы канала Wi-Fi. Разработаны методики расчета вероятностных характеристик хэндовера (переключения БС), провалов и флуктуаций канальной скорости к/с между стационарной СБС и поездной ПБС (рис.2), а также оценок критериев эффективности. В результате получены значения коэффициента доступности, временной задержки и вероятности потери пакета в канале Wi-Fi [3,7,10–14].



Рисунок 2 – Схема локальной сети Wi-Fi поезда

На рис.3 представлены характеристики канала Wi-Fi стандарта IEEE 802.11ах, полученные в результате эксперимента, а именно изменения уровня сигнала на входе ПБС в результате медленных замираний м/з и быстрых замираний б/з, а также флуктуации и провалы канальной скорости к/с, возникающих при движении поезда.

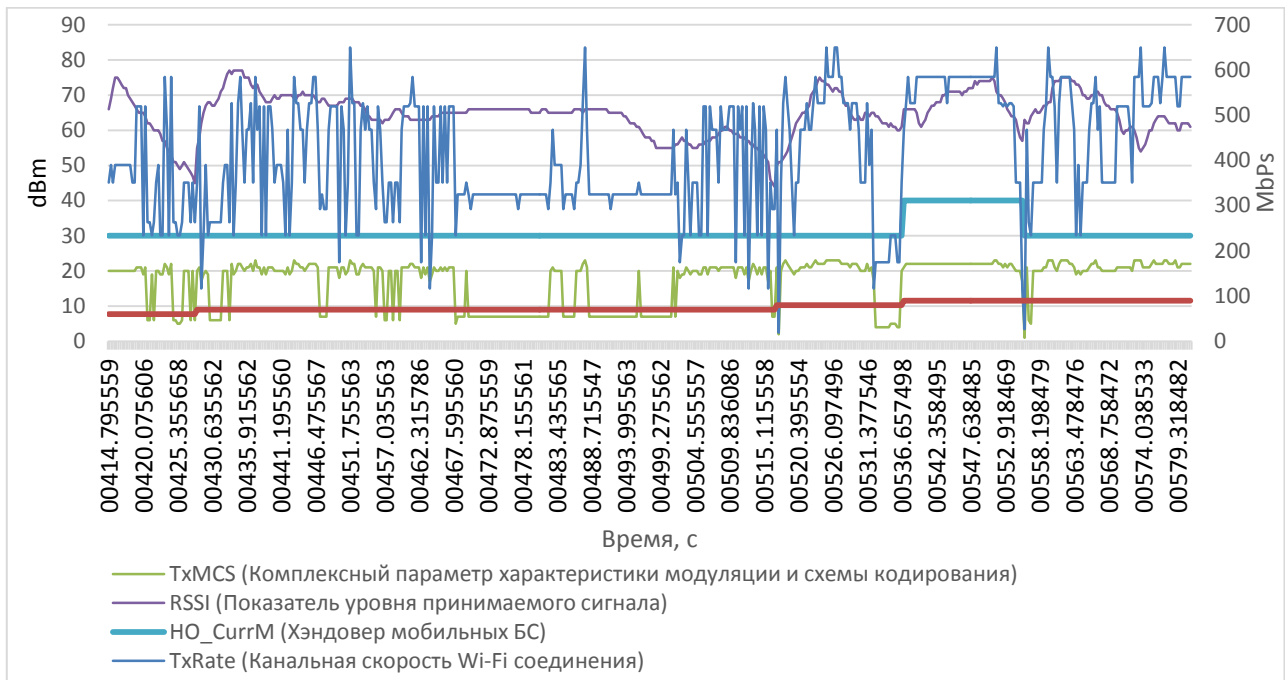


Рисунок 3 – Изменения уровня сигнала и провалы канальной скорости на входе приемника ПБС Wi-Fi для скорости движения поезда не более 50км/ч

Для оценки вероятностных характеристик доступности, оперативности и качества связи построены гистограммы распределений длительности хэндовера (рис. 4), опасных флуктуаций (рис. 5) и провалов канальной скорости (рис. 6).

Хэндовер является результатом медленных замираний (м/з) сигнала и влияет на доступность канала Wi-Fi.

Гистограмма распределения длительности хэндовера τ_x (рис.4) позволяет определить коэффициент доступности K_∂ с учетом допустимого времени t_∂ :

Коэффициент доступности оценивается по формулам:

$$K_\partial = 1 - P_{н/\partial}, \quad ; \quad P_{н/\partial} = P_x \cdot P_x(\tau_x > t_\partial), \quad (1)$$

где $P_{н/\partial}$ – вероятность наступления хэндовера, длительностью более t_∂ ;

P_x – вероятность наступления хэндовера;

$P_x(\tau_x > t_\delta)$ – вероятность того, что длительность τ_x больше времени t_δ .

Вероятность P_x рассчитывается как дробь: в числителе - общее время, затраченное на хэндовер $\sum \tau_x$, в знаменателе T – продолжительность эксперимента 1000с. На основании экспериментальных данных вероятность P_x равна:

$$P_x = (\sum \tau_x) / T = 0,028 \quad (2)$$

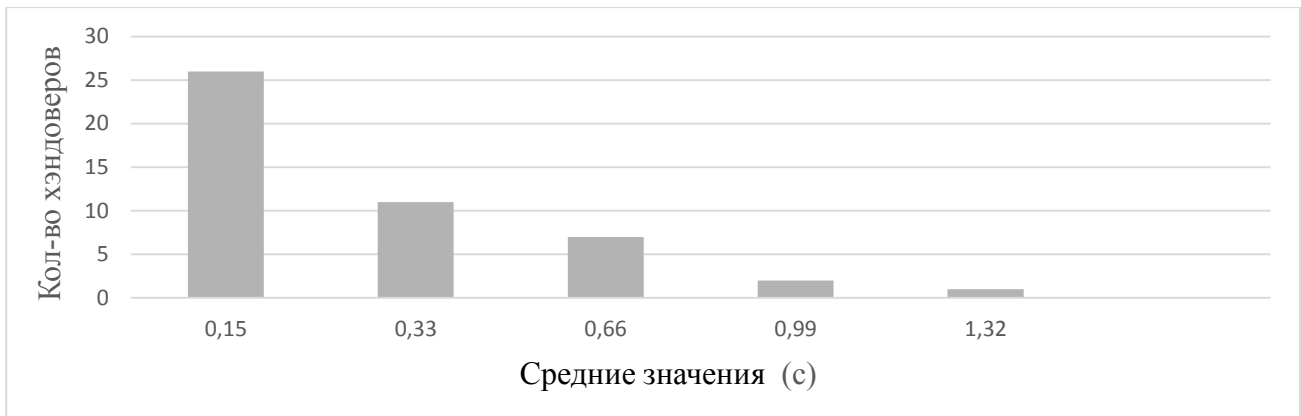


Рисунок 4 – Гистограмма распределения длительности хэндовера τ_x

На величину K_δ оказывают влияние только те хэндоверы, которые длятся более $t_\delta = 40\text{мс}$. В качестве величины t_δ принята длительность кадра от видеокамеры с модулем Wi-Fi, установленной на нерегулируемом переезде и передающей изображение машинисту поезда. Для расчета вероятности $P_x(\tau_x > t_\delta)$ требуется закон распределения плотности вероятностей ПРВ времени τ_x . Представленная на рис. 4 гистограмма распределения τ_x свидетельствует об экспоненциальном законе ПРВ с параметром $\lambda_I = 1/M[\tau_x]$.

Таким образом вероятность $P_x(\tau_x > t_\delta)$ рассчитывается по формуле:

$$P_x(\tau_x > t_\delta) = \int_{t_\delta}^{\infty} \lambda_I \exp(-\lambda_I t) dt = \exp(-t_\delta / M[\tau_x]). \quad (3)$$

После подстановки в формулу (3) величины $M[\tau_x] = 160\text{мс}$ получим, что вероятность $P_x(\tau_x > t_\delta) = 0,779$. Коэффициент K_δ на основании формул (1), (2), (3) равен $K_\delta = 0,978$. Значение K_δ меньше допустимого (0,999) [5] Уменьшить

количество и длительность хэндоверов возможно путем повышения быстродействия элементной базы и совершенствования алгоритма переключений БС.

Возможными причинами ухудшения оперативности связи в канале Wi-Fi являются относительно продолжительные флуктуации к/с с глубокими провалами к/с (до 50Мбит/с), которые вызывают временные задержки и повторные сеансы передачи данных мониторинга.

Для оценки оперативности канала Wi-Fi требуется расчет вероятности $P(t_3 < t_d)$ того, что временная задержка t_3 из-за продолжительных и глубоких флуктуаций к/с не будет превышать допустимую величину t_d , например, 40мс. Эта вероятность равна:

$$P(t_3 < t_d) = P_{o/\phi_l} P(\tau_{o/\phi_l} < t_d), \quad (4)$$

где P_{o/ϕ_l} – вероятность наступления опасных флуктуаций,

$P(\tau_{o/\phi_l} < t_d)$ – вероятность того, что длительность τ_{o/ϕ_l} будет меньше t_d .

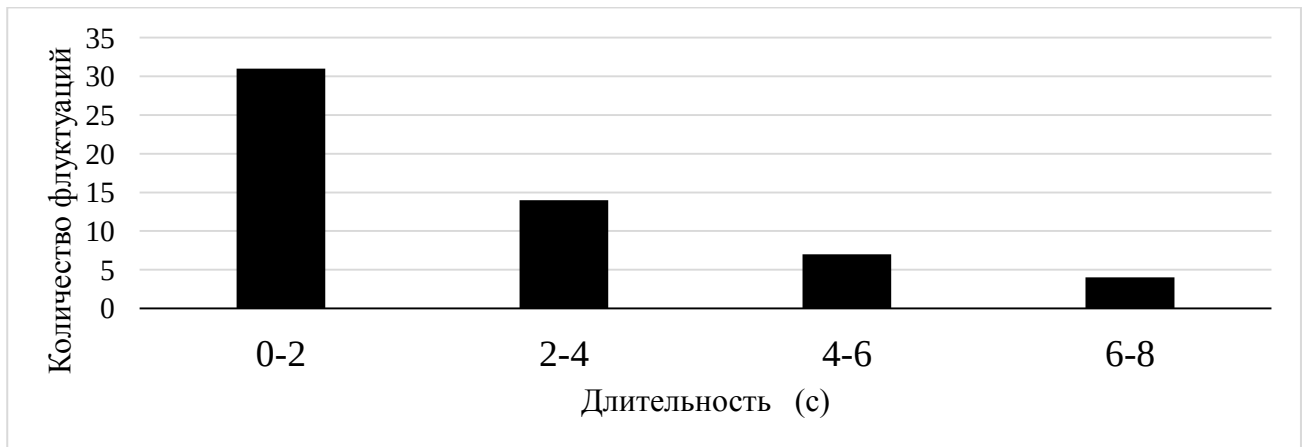


Рисунок 5– Гистограмма распределения длительности флуктуаций к/с τ_{o/ϕ_l}

На основании анализа гистограммы (рис.5) получена вероятность наступления опасных флуктуаций к/с P_{o/ϕ_l} , которая рассчитывается по аналогии с выражением (2):

$$P_{o/\phi_l} = (\sum \tau_{o/\phi_l}) / T = 0,172. \quad (5)$$

Для вычисления вероятности $P(\tau_{o/\phi л} < t_0)$ требуется закон ПРВ времени $\tau_{o/\phi л}$. Гистограмма (рис.5) имеет вид экспоненциального закона с параметром $\lambda_2 = 1/M[\tau_{o/\phi л}]$. Отсюда получим:

$$P(\tau_{o/\phi л} > t_0) = \int_{t_0}^{\infty} \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t) dt = \exp(-\tau_{o/\phi л}/M[\tau_{o/\phi л}]). \quad (6)$$

После подстановки в (6) величин $M[\tau_{o/\phi л}] = 2,87\text{с}$, $t_d = 40\text{мс}$ имеем $P(\tau_{o/\phi л} > t_0) = 0,986$. Таким образом, вероятность того, что длительность опасных флуктуаций к/с не превысит 40мс, рассчитанная на основании результатов эксперимента (рис.5) с учетом формулы (6), равна $P(\tau_{o/\phi л} < t_0) = 0,014$. Вероятность отсутствия временной задержки, рассчитанная по формулам (4), (5), (6), равна $P(t_3 < t_0) = 0,00241$. Эта цифра свидетельствует о том, что с вероятностью, близкой к единице (0,998) будут временные задержки при передаче информации технического мониторинга.

Для повышения оперативности в канале Wi-Fi, как и в случае хэндовера, требуется совершенствование алгоритмов работы БС и переход на элементную базу нанoeлектроники, обладающую более высоким быстродействием по сравнению с микroeлектроникой.

Наиболее сложной задачей является оценка качества связи в канале Wi-Fi с помощью вероятности ошибки при приеме символа $P_{ош}$ и потери цифрового пакета $P_{n/пак}$. Средняя продолжительность быстрых замираний б/з, вызывающих провалы канальной скорости к/с, соизмерима с длительностью цифрового пакета. Поэтому глубокий провал к/с влечет за собой потерю всего пакета с вероятностью $P_{n/пак}$. Вероятность $P_{n/пак}$ можно оценить по формуле:

$$P_{n/пак} = P_{np/к/с} \cdot P_{o/np}, \quad (7)$$

где $P_{np/к/с}$ - вероятность наступления провала к/с,

$P_{o/np}$ - вероятность наступления опасного провала к/с (ниже 50Мбит/с).

Вероятность $P_{np/к/с}$ рассчитывается по формуле, которая аналогична выражениям (2) и (5):

$$P_{np/к/с} = (\sum \tau_{np/к/с})/T = 0,344. \quad (8)$$

На основании гистограммы распределения провалов к/с (рис. 6), имеющей экспоненциальный характер, рассчитана вероятность опасного провала к/с $P_{o/np} = 0,061$. Отсюда, вероятность потери пакета с учетом формул (7), (8) равна: $P_{n/пак} = 0,021$.

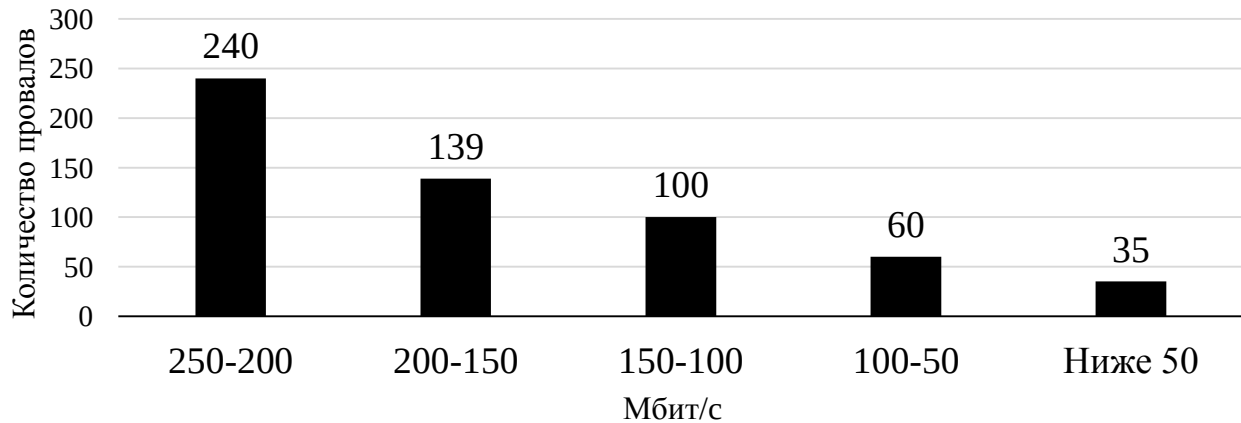


Рисунок 6 – Гистограмма распределения провалов к/с по величине

Полученная в результате эксперимента вероятность потери цифрового пакета свидетельствует о том, что более 2% пакетов будет потеряно.

В четвертой главе сделаны выводы об эффективности канала Wi-Fi на основании разработанной методики расчета качества связи и предложенного алгоритма оценки допустимых значений вероятности ошибки.

Причинами ошибок и потерь пакетов в приемнике ПБС являются провалы и выбросы сигнала (б/з), обусловленные эффектом интерференции сигналов дециметрового диапазона на входе ПБС при движении поезда. Флуктуации огибающей вызывают ошибки пропуска символа (импульса) и ложного срабатывания порогового устройства ПУ на выходе демодулятора приемника БС. Для оценки качества канала Wi-Fi через вероятность $P_{n/пак}$ необходимо найти расчетную формулу вероятности ошибки $P_{ош}$ приема символа. Согласно алгоритму работы декодера приемника БС после проверки пакета на ошибки нечетной кратности при наличии даже одиночной ошибки отбрасывается весь пакет. Поэтому величины $P_{ош}$ и $P_{n/пак}$ имеют одинаковый порядок. Ошибки пропуска наступают при снижении уровня сигнала (провала

огибающей), ошибки ложного срабатывания происходят из-за расширения импульса под действием роста амплитуды (выброса огибающей) и, как следствие этого, временного сдвига момента срабатывания ПУ за пределы защитного интервала $\tau_{ц/нр}$.

Вероятность ошибки при приеме элементарного импульса рассчитывается по формуле [9,10]:

$$P_{ош} = P_{пров} \cdot P_{нр} + P_{выбр} \cdot P_{л/ср}, \quad (9),$$

где $P_{пров}$ – вероятность провала огибающей несущего сигнала из-за б/з;

$P_{выбр}$ – вероятность выброса огибающей несущего сигнала из-за б/з;

$P_{нр}$ – вероятность пропуска сигнала из-за провала огибающей;

$P_{л/ср}$ – вероятность ложного срабатывания ПУ из-за выброса огибающей.

Вероятности $P_{пров}$, $P_{выбр}$, рассчитаны на основании экспериментальных данных по формулам, аналогичным (2), (5), (8). В результате получены следующие цифры для провалов и выбросов в пределах $\pm 2,5$ дБм: $P_{пров} = 0,022$, $P_{выбр} = 0,031$. Как показали исследования, наиболее заметные ошибки происходят при провалах и выбросах огибающей, начиная с величины $\pm 1,5$ дБм.

Ложное срабатывание ПУ приемника БС происходит от первого выброса сигнала на интервале предполагаемого импульса. Поэтому временной сдвиг Δt предыдущего импульса за защитный интервал $\tau_{ц/нр}$ может привести к ложному срабатыванию на следующем временном интервале. Отсюда вероятность $P_{л/ср}$ есть вероятность временного сдвига импульса из-за выброса огибающей сигнала $P(\Delta t > \tau_{ц/нр})$. Вероятность $P(\Delta t > \tau_{ц/нр})$ рассчитывается, исходя из гауссовского закона ПРВ случайной величины Δt после интегрирования в пределах от $\tau_{ц/нр}$ до ∞ с учетом следующих параметров:

а) $\sigma_{\Delta t}^2 = \sigma_h^2 / D_s^2$ – дисперсия временного сдвига; б) σ_h^2 – дисперсия выбросов огибающей сигнала; в) D_s – крутизна импульса на уровне порога срабатывания (середины амплитуды импульса); г) $\tau_{ц/нр}$ – значение величины защитного интервала или циклического префикса (400пс или 800пс).

Следует отметить, что на величину $P_{л/ср}$ значительное влияние оказывает крутизна импульса и защитный интервал. Так, для максимально возможной крутизны $D_s = tg89,99$ в тоннелях вероятность $P_{л/ср}$ для $\tau_{ц/нр} = 400$ пс равна 0,47, для $\tau_{ц/нр} = 800$ пс $P_{л/ср} = 0,09$ (вероятность уменьшается более, чем в 5 раз).

Дисперсия σ_h^2 зависит от величины выброса и значения уровня сигнала, который отличается на открытых участках $p_{с/от}$ и в тоннелях $p_{с/т}$. На открытых участках отношение мощностей сигнал/шум с/ш не должно превышать 30 дБм. Уровень $p_{с/от}$ с учетом порога приемника (−95 дБм) имеет порядок (−65 дБм). Поэтому на открытых участках при расчете ошибок сигнала следует учитывать шум приемника.

В тоннелях больше отражающих поверхностей (стенки тоннеля и внутреннее оборудование), чем на открытых участках. Влияние интерференции отраженных лучей на входе приемника сильнее. Поэтому отношение с/ш имеет порядок 60 дБм, средний уровень сигнала $p_{с/т}$ равен (−35 дБм). Шумом приемника можно пренебречь. Величины σ_h^2 при $\pm 2,5$ дБм имеют порядок: для открытых участков $\sigma_h^2 = 1,314 \cdot 10^{-8}$ Вт, для тоннелей $\sigma_h^2 = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Вт.

На открытых участках амплитуда импульса падает по сравнению с тоннелем, а длительность импульса не меняется. Поэтому импульс растягивается, и крутизна D_s падает в число раз, соответствующее отношению амплитуд на открытых участках и тоннелях. Расчеты показывают, что для открытого участка с учетом шума приемника вероятность $P_{л/ср} = 0,49$. Увеличение защитного интервала $\tau_{ц/нр}$ влияет на вероятность $P_{л/ср}$ не существенно (в третьем знаке после запятой).

Величину порога устанавливают на середине амплитуды импульса, где крутизна максимальна. Однако, амплитуда постоянно изменяется под действием медленных замираний сигнала (удаления и приближение к СБС). Поэтому важно отслеживать изменение амплитуды и адаптивно подстраивать порог ПУ согласно характеру колебаний огибающей сигнала.

Для расчета вероятности P_{np} из-за провалов огибающей нужно знать закон ПРВ амплитуды сигнала, изменяющейся под действием б/з. Распределение плотности вероятностей флуктуаций огибающей импульса на выходе демодулятора за счет искажений h от б/з подчиняется закону Рэлея.

Пропуск сигнала наступает, когда глубина провала h амплитуды импульса превышает порог U_{nop} . Вероятность рассчитывается по формуле:

$$P_{np} = \int_{U_{nop}}^{\infty} (h/\sigma_h^2) \exp(-h^2/2\sigma_h^2) dh = \exp(-U_{nop}^2/2\sigma_h^2). \quad (10)$$

После подстановки в (10) величин σ_h^2 , U_{nop} (с учетом средних уровней сигнала) имеем: для открытых участков с учетом шума приемника вероятность пропуска равна $P_{np} = 0,04$; для тоннелей вероятность пропуска имеет такой же порядок.

Отсюда, вероятность $P_{ош}$, характеризующая потерю цифрового пакета, рассчитанная по формуле (9) для $\tau_{ц/np} = 400$ пс, имеет следующие значения: 0,0152 (открытые участки), 0,0146 (тоннели). Эти цифры, полученные аналитическим путем, имеют тот же порядок, что вероятность потери пакета (0,021), полученная выше экспериментально [4,7,12,13,15,16–19].

Таким образом, рассчитанная оценка качества связи через $P_{ош}$ не позволяет ответить на вопрос соответствия канала Wi-Fi техническим требованиям мониторинга на ж/д транспорте. Необходимо определить допустимые значения $P_{ош}$. Эту задачу можно решить, рассмотрев конкретный пример мониторинга, а именно: обнаружения опасного объекта на переезде с помощью системы интеллектуального видеонаблюдения СИВ. Известно, что для обеспечения безопасности движения система СИВ должна обеспечить определенные вероятности правильного $P_{прав/обн}$ и ложного $P_{лож/обн}$ обнаружений опасных объектов: $P_{лож/обн} \leq 10^{-4}$, $P_{прав/обн} \geq 0,9994$ [1].

Оценки вероятностей $P_{прав/обн}$, $P_{лож/обн}$ для системы СИВ получены с помощью критерия Неймана–Пирсона. Расчет вероятностей $P_{прав/обн}$, $P_{лож/обн}$ предполагает вычисление порога решающего устройства на основании

величины с/ш на входе устройства обнаружения СИБ (на выходе канала Wi-Fi). Это символическое отношение мощностей сигнал/шум $\alpha_{\text{сим}}^2$ можно найти из выражения для $P_{\text{ош}}$, характеризующего качество канала Wi-Fi. Таким образом, зная допустимые значения вероятностей $P_{\text{прав/обн}}$, $P_{\text{лож/обн}}$, можно оценить величину $\alpha_{\text{сим}}^2$ и требуемую вероятность $P_{\text{ош}}$.

На основании расчетной формулы $P_{\text{ош}}$ для приемника с флуктуирующей несущей и разной позиционностью кода a получим величину $\alpha_{\text{сим}}^2$:

$$\alpha_{\text{сим}}^2 = -2 \ln 2 P_{\text{ош}} / (a - 1). \quad (11)$$

Отсюда, задавшись значением вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ и позиционностью кода a , можно оценить величину $\alpha_{\text{сим}}^2$. Как видно из выражения (11), чем выше позиционность a , тем хуже качество, а следовательно, и меньше значение $\alpha_{\text{сим}}^2$ на входе СИБ. Для оценки допустимого значения вероятности $P_{\text{ош}}$ построены графики (рис.7) зависимости $P_{\text{прав/обн}} = f(P_{\text{лож/обн}})$ для разных a и $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$.

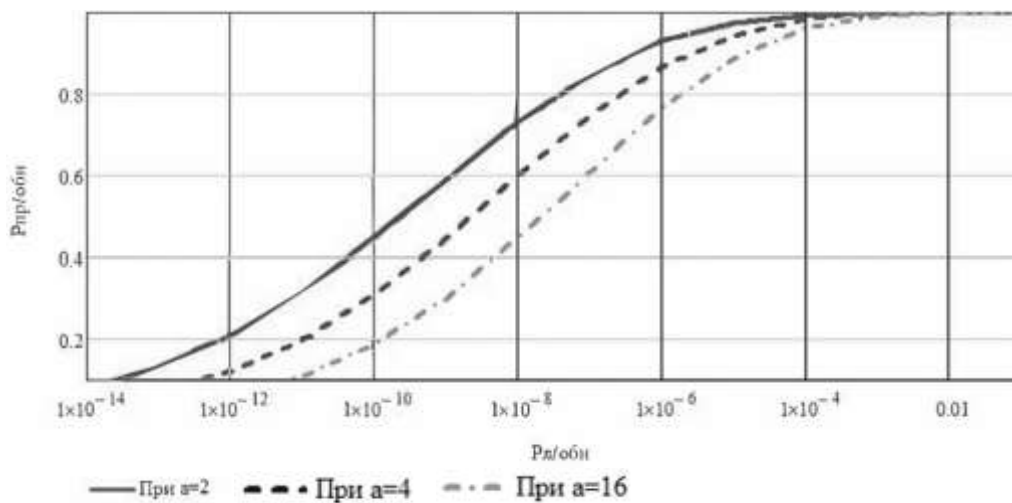


Рисунок 7 – Графики зависимости $P_{\text{прав/обн}} = f(P_{\text{лож/обн}})$

Графики рассчитаны для фиксированных значений $\alpha_{\text{сим}}^2 = f(P_{\text{ош}}; a)$ с учетом блочного и сверточного кодирования в канале Wi-Fi, которое повышает минимум в два раза отношение с/ш на входе приемника обнаружения СИБ (рис.7, табл.1-3) [7].

Как видно из графиков на рис.7 и табл.1-3, качество канала Wi-Fi способно обеспечить требуемые значения вероятностей $P_{\text{прав/обн}}$, $P_{\text{лож/обн}}$

обнаружения опасных объектов только для $P_{ош} < 10^{-5}$. С ростом позиционности кода требования к качеству связи повышаются (табл.1-3).

Таблица 1 – Значения $P_{прав/обн}$ для микроэлектроники ($P_{ош} = 10^{-3}$)

Позиционность кода $P_{лож/обн}$	2	4	16
10^{-4}	0.9940325562	0.9842386493	0.9610199887
10^{-5}	0.9752386656	0.9452463074	0.887367624
10^{-6}	0.9297683306	0.8665890751	0.7650516483

Таблица 2 – Значения $P_{прав/обн}$ для микроэлектроники ($P_{ош} = 10^{-5}$)

Позиционность кода $P_{лож/обн}$	2	4	16
10^{-4}	0.999997083	0.999898367	0.999656416
10^{-5}	0.9999658763	0.9998968904	0.999698971
10^{-6}	0.9997605731	0.999361888	0.9983625655

Таблица 3 – Значения $P_{прав/обн}$ для наноэлектроники ($P_{ош} = 10^{-7}$)

Позиционность кода $P_{лож/обн}$	2	4	16
10^{-4}	0.9999999996	0.9999999984	0.9999999936
10^{-5}	0.999999989	0.9999999606	0.999999862
10^{-6}	0.999998351	0.999994697	0.999983332

Отсюда следует вывод о необходимости значительного снижения вероятности ошибки в канале Wi-Fi. Такая задача может быть решена за счет перехода на элементную базу наноэлектроники, которая позволит уменьшить вероятность ошибки на несколько порядков [1] и гарантировать требуемое качество канала Wi-Fi.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дана оценка возможностей современных беспроводных технологий для организации сетей технического мониторинга на ж/д транспорте. На основании анализа экспериментальных данных проведены исследования качественных показателей функционирования канала Wi-Fi.

Собранный статистический материал позволил оценить эффективность технологии Wi-Fi, разработать методики расчета коэффициента доступности, временных задержек и качества связи. В результате получены выводы о возможностях использования технологии Wi-Fi для технического мониторинга в целях проведения профилактического ремонта подвижного состава. Для мониторинга поездов в целях обеспечения безопасности движения необходимо повышение эффективности технологии Wi-Fi (доступности, оперативности и качества) за счет перехода на нанoeлектронику и совершенствования алгоритмов работы базовых станций.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Левшунов, В. В. Оценка влияния радиоканала на качество видеосигнала систем видеонаблюдения на железнодорожном транспорте / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев, В.В. Левшунов, – Проектирование и технология электронных средств. – 2019. – №3. – С.51–58.
2. Левшунов, В. В. Влияние сети мобильной связи на качество сигналов видеоизображения / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев, В.В. Левшунов – Телекоммуникации. – 2019. – №12. – С.25–30.
3. Левшунов, В. В. Эффективность беспроводных технологий для технического мониторинга на железнодорожном транспорте/ Л.М. Журавлева, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков, М.А. Нилов – Проектирование и технология электронных средств. – 2022. – №1. – С.3–8.
4. Левшунов, В. В. Оценка влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи в условиях высокоскоростного движения / Л.М. Журавлева, М.А. Нилов, В.А. Лошкарев, В.В. Левшунов – Мир транспорта – 2020. – №4. – С.54-71.
5. Левшунов, В. В. Беспроводной оптический канал связи с подвижными объектами / В.В. Левшунов, Л.М. Журавлёва, Д.А. Рыжков, Д.Х. Чыонг – Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 1. – С.13–16.

6. Левшунов, В. В. Перспективы применения беспроводных технологий / А.А. Антонов, Л.М. Журавлёва, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков – Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 3. – С.7–10.

7. Левшунов, В. В. Каналы технического мониторинга подвижного состава и железнодорожной инфраструктуры с помощью технологии Wi-Fi / Л.М. Журавлёва, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков, И.Г. Александрин, Ю.А. Железников – Телекоммуникации. – 2022. – №11. – С.22–31.

Публикации из базы данных научного цитирования Scopus

8. Levshunov, V. V. Optical wireless mobile communication / L. M. Zhuravleva, V. A. Loshkarev, V. V. Levshunov, M. A. Nilov – I International Conference ASE-I – 2021: APPLIED Science and Engineering – AIP Conference Proceedings 2442 – 2021. – Volume 2442, Issue 1 – P. 040023–1–040023–7.

9. Левшунов, В. В. Оценка качества канала Wi-Fi сети подвижного состава / А.А. Антонов, Л.М. Журавлёва, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков, М.А. Нилов – Международная научно-практическая конференция «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление» (TLC2M) – Российская Федерация, г. Екатеринбург – 2022г.

Патент на изобретение РФ

10. Левшунов, В. В. Система двусторонней беспроводной оптической связи / Л.М. Журавлева, М. Р. Ивашевский, В.Л. Лошкарёв, В.В. Левшунов, М.А. Нилов – Патент Российской Федерации Рег. №2020130839–2021–Бюл. №18.

Прочие публикации:

11. Левшунов, В. В. Система мониторинга технического состояния подвижного состава и железнодорожного полотна с помощью технологии беспроводной связи Wi-Fi / Л.М. Журавлева, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков – XI Международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте» – Республика Беларусь, г. Гомель – 2021. – Часть 2. – С.275–278.

12. Левшунов, В. В. Мониторинг технического состояния подвижного состава и объектов железнодорожной инфраструктуры с помощью технологий на базе стандарта Wi-Fi – XXXXIV Всероссийская научно-практическая

конференция: «Совершенствование науки в наши дни: междисциплинарные аспекты» – г. Ростов–на–Дону – 2022. – Часть 1. – С.336–342.

13. Левшунов, В. В. Система мониторинга технического состояния подвижного состава и железнодорожного полотна с помощью технологии беспроводной связи Wi-Fi / Л.М. Журавлёва, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков – XIV Международная научная конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ–2021» – Российская Федерация, г. Владимир – 2021. – С.97–100.

14. Левшунов, В. В. Вопросы повышения безопасности в беспроводных технологиях передачи информации / Л.М. Журавлёва, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков, Д.Х. Чыонг – Сборник научных статей по материалам VII Международной научно–практической конференции.– г. Уфа, 2021 –С.43–48.

15. Левшунов, В. В. Система видеонаблюдения на базе технологии Wi-Fi / Труды Всероссийской научно–практической конференции Неделя науки–2019, в двух частях. – М.: РУТ(МИИТ), 2019. – 1 часть. – С.82.

16. Левшунов, В. В. Сеть передачи данных телеметрии с подвижного состава / Труды Всероссийской научно–практической конференции Неделя науки–2020, в двух частях. – М.: РУТ(МИИТ), 2020. – 1 часть. – С.22–23.

17. Левшунов, В. В. Мониторинг состояния подвижного состава с помощью системы Wi-Fi / Труды Всероссийской научно–практической конференции Неделя науки–2021, в двух частях. – М.: РУТ(МИИТ), 2021– 2 часть. – С.105.

18. Левшунов, В. В. Мониторинг состояния подвижного состава / Труды Всероссийской научно–практической конференции. Неделя науки–2022, в двух частях. – М.: РУТ(МИИТ), 2022. – 1 часть. – С.55–56.