

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (РУТ(МИИТ))»

На правах рукописи



Левшунов Владислав Витальевич

**Разработка и исследование беспроводных каналов сети технического
мониторинга подвижного состава**

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
проф. каф. «АТС на ЖТ»
Журавлёва Любовь Михайловна

Москва – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА Ж/Д ТРАНСПОРТЕ.....	11
1.1 Особенности использования беспроводных технологий на ж/д транспорте....	11
1.2 Применение технологии Wi-Fi для организации системы технического мониторинга на ж/д транспорте.....	14
1.3 Применение технологии сенсорных сетей для мониторинга технического состояния подвижного состава	17
1.4 Применение беспроводных оптических каналов для связи с подвижными объектами	20
1.5 Разработка критериев эффективности беспроводных технологий для систем мониторинга.....	23
1.6 Выводы по главе.....	25
2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА Ж/Д ТРАНСПОРТЕ.....	26
2.1 Обзор способов организации мониторинга технического состояния подвижного состава	26
2.2 Разработка структурной схемы системы технического мониторинга подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта	28
2.3 Техническое обоснование использования беспроводной технологии	35
2.3.1 Техническое обоснование использования технологии Wi-Fi.....	35
2.3.2 Техническое обоснование использования беспроводной технологии сенсорных сетей MESH	38
2.3.3 Техническое обоснование использования беспроводной технологии БОКС	42
2.4 Влияние эффекта Доплера на качество связи в локальных сетях Wi-Fi поезда	58

2.5 Выводы по главе	67
3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ WI-FI	70
3.1 Разработка методики оценки статистических характеристик параметров эффективности технологии Wi-Fi	70
3.2 Описание эксперимента для оценки параметров эффективности функционирования сети Wi-Fi поезда	74
3.3 Анализ экспериментальных данных работы канала сети Wi-Fi поезда	77
3.4 Исследование статистических характеристик параметров эффективности канала Wi-Fi	82
3.4.1 Цели и задачи разработки методики оценки эффективности технологии Wi- Fi.....	82
3.4.2 Оценка статистических характеристик длительности хэндовера.....	85
3.4.3 Оценка статистических характеристик флуктуаций канальной скорости.....	90
3.4.4 Оценка статистических характеристик провалов канальной скорости.....	93
3.5 Выводы по главе	97
4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ WI-FI.....	100
4.1. Методики оценки доступности, оперативности и качества канала Wi-Fi	100
4.2 Разработка методики оценки коэффициента доступности канала Wi-Fi.....	102
4.3 Разработка методики оценки оперативности канала Wi-Fi.....	105
4.4. Разработка методики оценки качества канала Wi-Fi.....	108
4.5 Оценка допустимого значения вероятности ошибки для технологии Wi-Fi..	119
4.6 Выводы по главе	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	129

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА СТАНДАРТОВ WI-FI	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ТАБЛИЦА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПРОГРАММА МАТНСАД С РАСЧЁТАМИ ГРАФИКОВ ЗАВИСИМОСТИ $R_{прав/обн}=f(R_{лож/обн})$	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КАНДИДАТСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ	170

ВВЕДЕНИЕ

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 машинистов и диспетчеров в центре управления (ДЦУ) о возникшей угрозе на переездах, мостах, участках со сложным рельефом необходима система мониторинга для контроля за техническим состоянием подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта. Такой подход к обеспечению безопасности движения соответствует требованиям, прописанным в долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 года; утвержденной правительством РФ, предусматривающей переход на «цифровую железную дорогу». В настоящее время для реализации системы мониторинга можно было бы использовать существующие сети передачи информации (поездную радиосвязь, мобильную связь, спутниковую связь). Однако, каждый из этих видов связи имеет существенные недостатки. В системах спутниковой связи нужно учитывать возможные сбои в работе и недостаточное качество сигнала из-за атмосферных помех, солнечной интерференции, сложного рельефа местности. Для мобильной связи слабым местом является перегруженность телетрафика, а также влияние замираний несущей за счет отражений сигнала во время движения поезда, существенно ухудшающих качество. Для поездной радиосвязи ограниченность выделенной полосы частот не позволяет передавать широкополосные сигналы, например, видеоизображения с переездов. Таким образом, для организации системы технического мониторинга необходимо создать отдельную сеть на основе беспроводных технологий (IEEE 802.11ax, 802.15.4), а также с использованием аппаратуры беспроводных оптических каналов связи (БОКС). Такая сеть позволит реализовать мониторинг технического состояния устройств на подвижных и стационарных объектах. Используемые каналы могут быть применены также для организации двусторонней системы связи между центрами принятия решений (ДЦУ, вагонные депо, центр радиоблокировки) и объектами управления

(мониторинга) для реализации проектов «автомашинист» и «виртуальная автосцепка». Необходимость создания единой системы мониторинга наиболее важных линейных и станционных сооружений (мостов, тоннелей, переездов, платформ, сортировочных горок и парков и т.д.), а также грузовых и пассажирских поездов обусловлена выбором стратегического направления развития ж/д транспорта, а именно – реализации проекта высокоскоростных магистралей с использованием беспилотных технологий. Постоянный контроль за техническим состоянием подвижного состава, обстановкой на станциях и перегонах возможен только с помощью беспроводных каналов связи.

В основе решения указанных проблем 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 мониторинга технического состояния 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 возможности использования для 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 и проектирования системы мониторинга технического состояния подвижного состава.

Основные положения и результаты диссертации, выносимые на защиту:

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

2. Методики расчета критериев эффективности каналов передачи данных технического мониторинга на основе технологии Wi-Fi, позволяющие оценить возможности беспроводной технологии по доступности, оперативности и качеству.

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

4. Результаты анализа экспериментальных исследований работы канала Wi-Fi поезда, позволившие определить статистические характеристики длительности хэндоверов, опасных флуктуаций и провалов канальной скорости и разработать методики расчета критериев эффективности.

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 большое значение для разработок систем технического мониторинга на основе беспроводных каналов, обеспечивающих повышение безопасности движения поездов на железнодорожном транспорте:

1. Разработана структура трехуровневой системы технического мониторинга подвижного состава на основе беспроводных технологий Wi-Fi, Mesh, БОКС.

2. Предложены критерии эффективности канала Wi-Fi и разработаны методики расчета их оценок для технического мониторинга на ж/д транспорте.

3. Получено допустимое значение оценки качества канала Wi-Fi для мониторинга подвижного состава с учетом требований безопасности движения поездов на нерегулируемых переездах: вероятность ошибки должна быть $P_{\text{ош}} \leq 10^{-5}$.

4. Проведены исследования статистических характеристик показателей достоверности, оперативности и качества канала Wi-Fi на основании собранного экспериментального материала.

5. Предложены рекомендации по совершенствованию алгоритмов работы базовых станций Wi-Fi для уменьшения количества и длительности хэндоверов, а также вероятности потери цифрового пакета.

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

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обусловлена 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 влияния особенностей распространения сигналов дециметрового диапазона на эффективность технологии Wi-Fi.

Разработанные методические основы проектирования каналов мониторинга на ж/д транспорте позволяют дать техническое обоснование возможности использования беспроводных технологий для контроля подвижного состава.

Так, с помощью методик расчета доступности, оперативности и качества канала Wi-Fi поезда, а также их допустимых значений и на основании экспериментальных данных получены следующие показатели работы канала Wi-Fi:

- 1) коэффициент доступности (0,978), что выше показателя для сети мобильной связи (4G) в 1,075раз;
- 2) среднее время временной задержки (2,87с), что ниже показателя сети (4G) в 3,5 раза;
- 3) вероятность потери цифрового пакета (0,021), что меньше показателя сети (4G) 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.

Исходя из требований по доступности, оперативности и качеству канала мониторинга, предложены рекомендации по повышению эффективности технологии Wi-Fi, а именно: совершенствование алгоритма работы сети Wi-Fi поезда и переход на элементную базу нанoeлектроники.

Соответствие паспорта специальности.

Согласно паспорту специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», рассмотренные в диссертации задачи соответствуют 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: «Совершенствование науки в наши дни: междисциплинарные аспекты» (2022) г. Ростов- на -Дону.
8. Труды Всероссийской научно-практической конференции Неделя науки-2019, МИИТ.
9. Труды Всероссийской научно-практической конференции Неделя науки-2020, МИИТ.
10. Труды Всероссийской научно-практической конференции Неделя науки-2021, МИИТ.
11. Труды Всероссийской научно-практической конференции 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 в виде выводов и список литературы. Объем основной части составляет 169 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.

1 ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА Ж/Д ТРАНСПОРТЕ

1.1 Особенности использования беспроводных технологий на ж/д транспорте

На железнодорожном транспорте в настоящее время широкое применение получили беспроводные технологии передачи информации, на основе которых функционирует технологическая радиосвязь, локальные сети поездов стандарта Wi-Fi, спутниковая и мобильная связь. На основе таких технологий организуются системы беспилотного управления движением поездов; мониторинга технического состояния поездов и инфраструктуры; интеллектуального видеонаблюдения на переездах; обеспечения безопасности пассажиров на вокзалах, платформах, переходах через железнодорожные (ж/д) пути; контроля за сохранностью грузов и т.д. Основное достоинство беспилотных технологий – возможность

двухстороннего обмена информацией с подвижными объектами, в том числе с машинистами подвижного состава.

Беспроводные технологии на ж/д транспорте активно используются для повышения безопасности движения поездов в качестве каналов для передачи данных мониторинга технического состояния подвижного состава и инфраструктуры. Подходящими для этой цели являются беспроводные технологии стандартов GSM, IEEE 802.11ах, 802.15.4, БОКС и др. [1,2]. Так, технологии Wi-Fi уже успешно используются на ж/д транспорте (скоростных поездах), в вагонах метро [3]; самоорганизующиеся сенсорные сети на базе датчиков-«маячков» (MESH) широко используются за рубежом [4,5,6] для мониторинга состояния подвижного состава; технология атмосферной оптической связи на базе беспроводных оптических каналов (БОКС) применяется для организации каналов в труднодоступных местах и связи между базовыми станциями сотовой связи [7-10]. Наиболее перспективными для технического мониторинга являются технологии Wi-Fi, самоорганизующихся сенсорных сетей на базе датчиков-«маячков» (MESH), а также беспроводных оптических каналов связи в инфракрасном диапазоне, позволяющих обеспечить высокую защищенность сигналов от воздействия преднамеренных электромагнитных помех.

Основные преимущества перечисленных выше технологий: из-за малого радиуса действия не оказывают вредного электромагнитного воздействия и не ухудшают электромагнитную обстановку на ж/д транспорте; позволяют достаточно просто организовать контроль за инфраструктурой и состоянием вагонов. Затем с помощью развернутой вдоль ж/д полотна сети базовых станций (БС) передать данные мониторинга в депо, на сортировочные станции, в диспетчерский пункт управления движением поездов, центр радиоблокировки (РБЦ) для осуществления интервального регулирования движения поездов [10].

В основе структуры сети системы технического мониторинга подвижного состава, линейных и станционных устройств должна лежать технология локальных сетей Wi-Fi (рис.1.1). С помощью сети базовых станций Wi-Fi информация передается в коммутатор ядра, связанный с центром принятия решений.

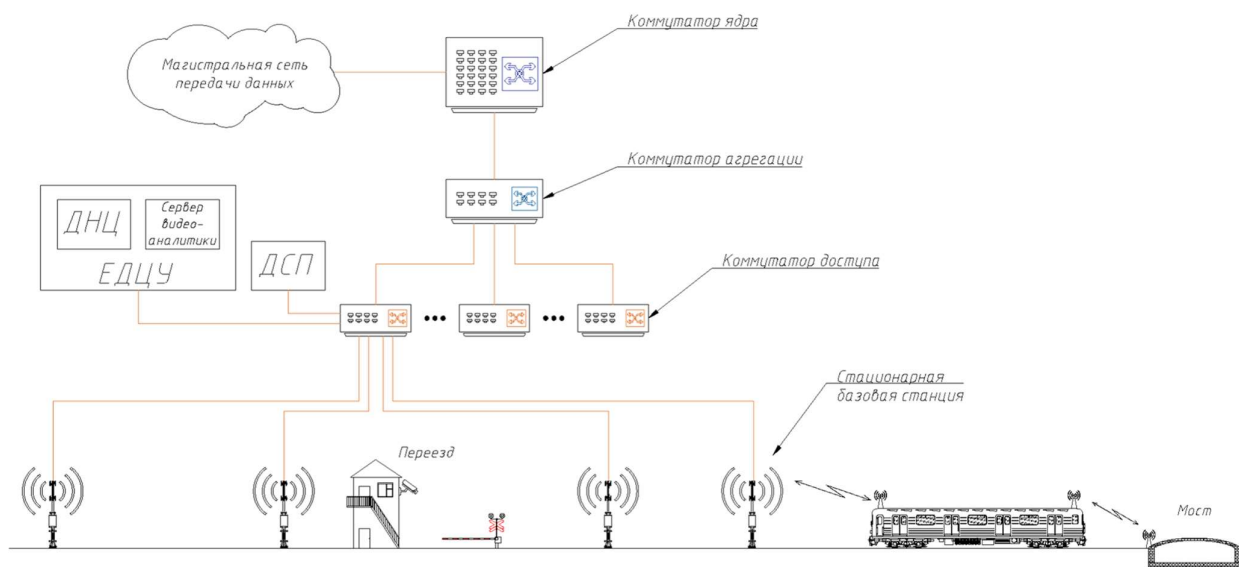


Рисунок 1.1 – Вариант системы мониторинга на базе технологии Wi-Fi

Точки доступа локальных сетей Wi-Fi поезда могут собирать данные с датчиков-маячков сенсорных сетей грузовых вагонов, а также информацию с датчиков, установленных на переездах, мостах, тоннелях и других объектах ж/д транспорта. Универсальность технологии Wi-Fi заключается в том, что на ее основе можно организовать технический мониторинг подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта, обмен информацией для реализации беспилотных технологий, оказание телекоммуникационных услуг пассажирам, а также с помощью видеокамер осуществлять контроль за безопасностью на вокзалах, платформах и поездах. Выполнение каждой из перечисленных выше задач возможно при условии соответствия технических характеристик каналов Wi-Fi требованиям по эффективности мониторинга, безопасности движения поездов, качеству обслуживания пассажиров и т.д. Поэтому главным в определении возможностей беспроводной технологии, применяемой на ж/д транспорте, является разработка критериев соответствия требованиям поставленной задачи и их оценок.

1.2 Применение технологии Wi-Fi для организации системы технического мониторинга на ж/д транспорте

В настоящее время на ж/д транспорте эксплуатируются в скоростных пассажирских поездах (Сапсан, Стриж, Ласточка) сети связи по технологии Wi-Fi, организованные по стандарту IEEE 802/11ax в диапазонах 2,4ГГц и 5ГГц [3]. В каждом вагоне имеется коммутатор и точки доступа. В головном и хвостовом вагонах установлены (помимо коммутатора и точек доступа) также контроллер (управляет работой сети поезда), маршрутизатор локальной сети Wi-Fi и поездные базовые станции (ПБС) для связи со стационарными базовыми станциями (СБС) (рис.1.2). Базовые станции СБС, установленные вдоль ж/д полотна (специфика работы технологии Wi-Fi), с помощью волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) связаны по радиально-узловой структуре с коммутатором ядра сети. Точки доступа в вагонах поезда могут связываться с контроллером и ПБС посредством витой пары или радиоканала.

Предполагается, что для грузового состава в качестве головного вагона может выступать локомотив, на котором оборудование размещается на постоянной основе. Установка оборудования сети Wi-Fi для хвостового вагона каждый раз должна возобновляться (после сортировки вагонов и формирования поезда). Не все вагоны пригодны для установки оборудования, что в случае необходимости требуется учитывать на сортировочных станциях. Для организации сети мониторинга может быть принят вариант с одним комплектом контроллера и ПБС. Связь точек доступа и контроллера сети в грузовом составе возможна только по радиоканалу.

В грузовом составе возможен вариант размещения контроллеров и ПБС сети Wi-Fi пассажирского поезда в случае использования двойной тяги с дополнительным локомотивом в хвосте состава (рис.1.3).

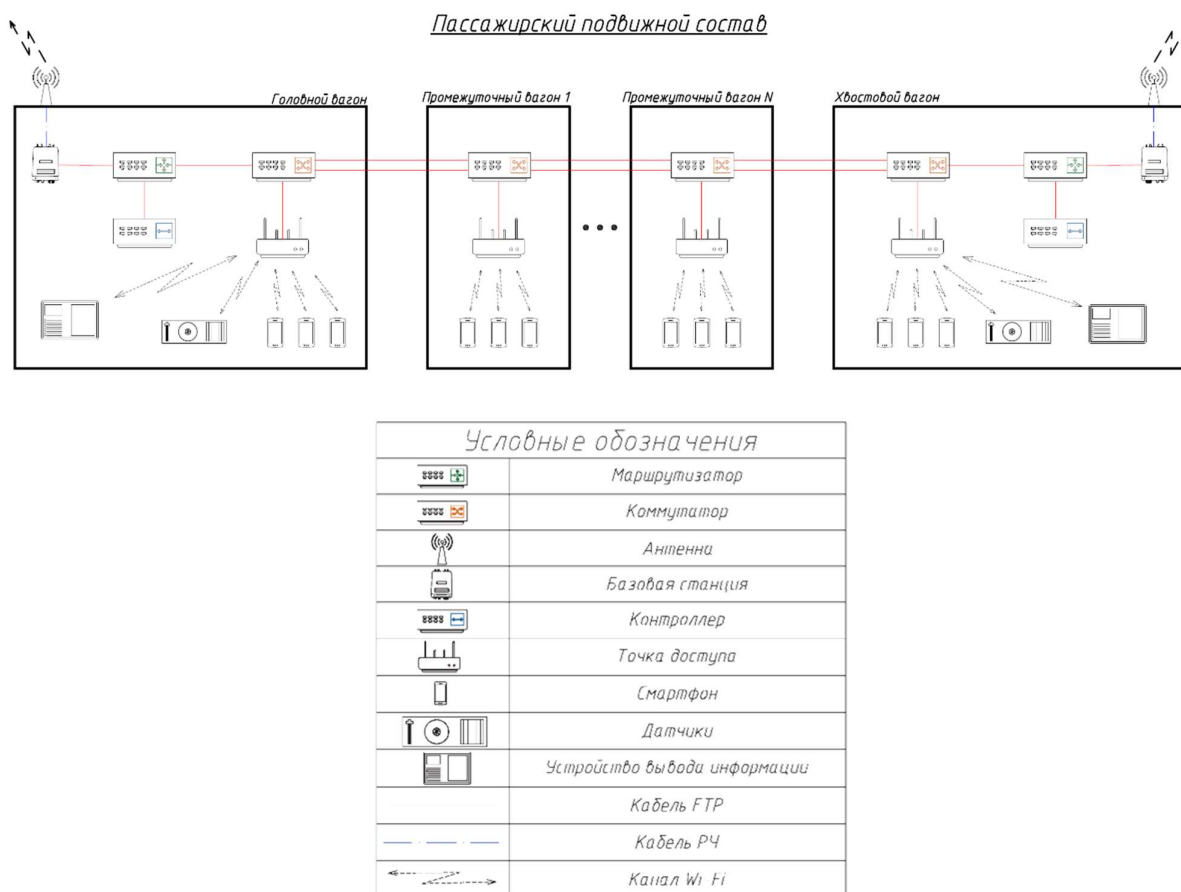


Рисунок 1.2 – Локальная сеть Wi-Fi пассажирского поезда

Мониторинг внутри вагона может быть организован с помощью технологии сенсорных сетей, организованных по принципу MESH, с выходом на точки доступа локальной сети поезда Wi-Fi. Саморганизующиеся сети MESH позволяют осуществлять постоянный технический контроль за состоянием грузового вагона и организовать связь в подвижном составе при любом формировании поезда на сортировочных станциях. Выход на точку доступа сети Wi-Fi поезда (локомотива) позволит передать информацию через сеть СБС в диспетчерский центр управления (ДЦУ), вагонное депо или специальный центр принятия решений. Связь стационарных базовых станций с коммутатором ядра сети мониторинга можно реализовать с помощью беспроводных оптических каналов для повышения безопасности связи с точки зрения электромагнитных помех, преднамеренно создаваемых с целью нарушения работы ж/д транспорта.

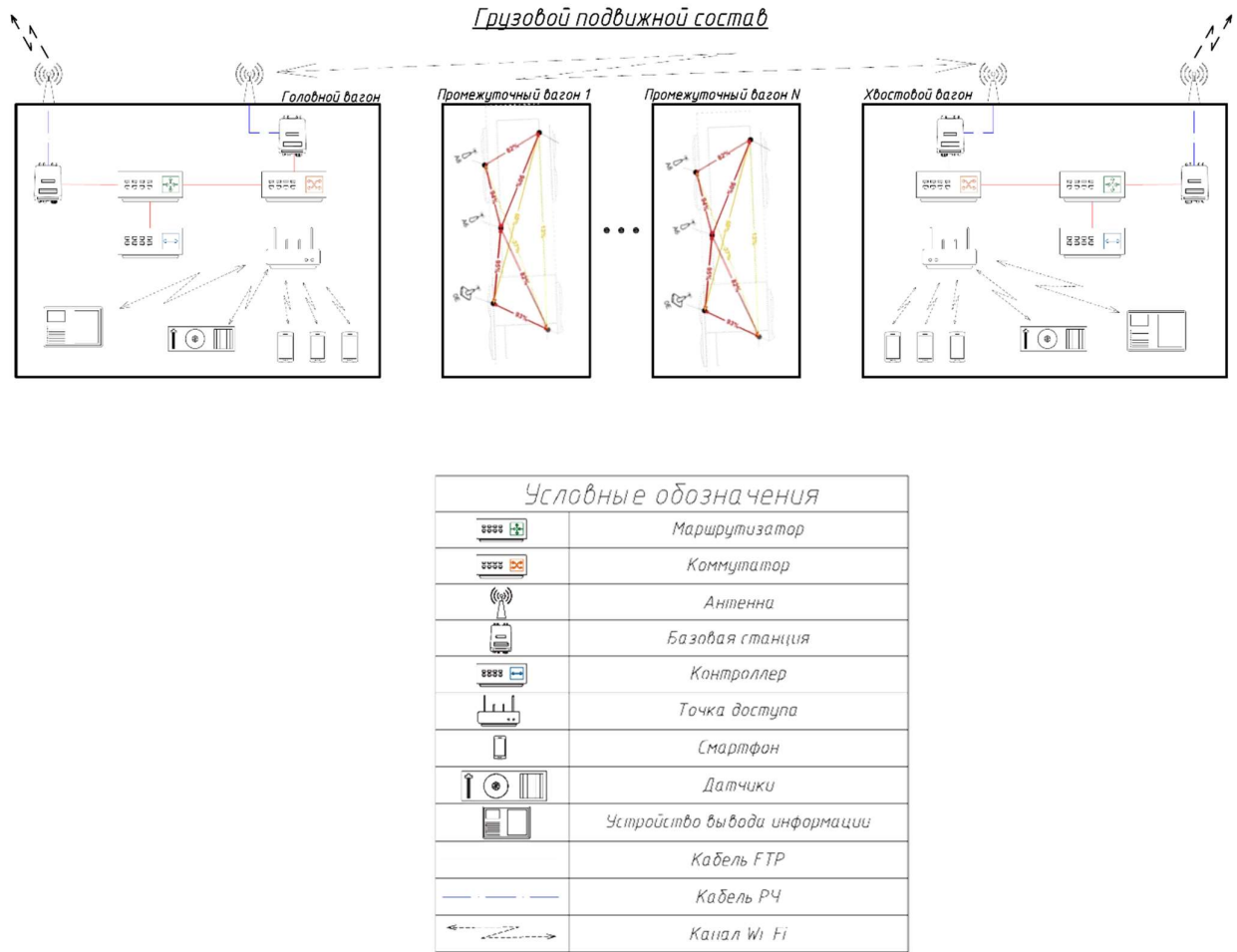


Рисунок 1.3 – Локальная сеть Wi-Fi грузового вагона

Сенсорные датчики-маячки (с автономным питанием) предполагается устанавливать в грузовых составах для постоянного контроля за температурой брукс, состоянием боковин вагонов, подшипников, давлением в тормозной магистрали и т.д. Особое значение для реализации технологии «виртуальная сцепка» имеет GPS навигация. Координаты последнего вагона определяются с помощью приемника GPS и непрерывно передаются с помощью сети MESH вагона, точки доступа, контроллера, ПБС и сети Wi-Fi в ДЦУ, вагонное депо, а главное, машинисту (бортовому компьютеру) вслед идущему поезду. В случае отцепки последнего вагона такая схема контроля целостности состава позволит вовремя затормозить и предотвратить аварии (столкновения двух поездов). Сочетания перечисленных выше беспроводных технологий (Wi-Fi, MESH, БОКС) позволит

построить гибкую, надежную и многофункциональную систему мониторинга на ж/д транспорте.

1.3 Применение технологии сенсорных сетей для мониторинга технического состояния подвижного состава

Беспроводные ячеистые сети построены на стандартах беспроводной связи IEEE 802.15.4. Стандарт представляет собой «низкоскоростную персональную сеть» для обмена информацией, работающую в диапазоне 2,4 ГГц ISM («ISM - это части радиочастотного спектра, зарезервированные на международном уровне для промышленных, научных и медицинских целей, за исключением приложений в электросвязи»), которая освобождена от лицензирования [4]. Этот стандарт предусматривает, что узлы сети должны разворачиваться произвольно. Узлы «ищут соседей» и формируют многозвенную ячеистую сеть MESH, имеющую несколько резервных направлений передачи (транслирования) информации, повышающих надежность связи. Таким образом обеспечивается маршрут «движения» данных мониторинга к стратегически важным узлам (шлюзам), имеющим возможности загрузки информации в магистральную сеть оперативно-технологической связи. Специальные протоколы обеспечивают переключение беспроводных каналов для надежного функционирования сети. Это важно потому, что при использовании алгоритма переприемов от одного узла к другому необходимо подтверждение приема. При отсутствии подтверждения от узла требуется повторная передача цифровых пакетов для обеспечения необходимого уровня надежности передачи данных. Наличие нескольких альтернативных путей связи гарантируют беспроводным ячеистым сетям более высокую надежность по сравнению с другими беспроводными технологиями. Следует также отметить свойство технологии адаптироваться к новым маршрутам. Это важное преимущество перед традиционными сетевыми топологиями, которые «полагаются на единые пути связи» [4]. Эта надежность жизненно важна в такой среде, как мониторинг железнодорожных транспортных средств, где реализация

сети сталкивается с трудностями, связанными с мобильностью объектов и сложной помеховой обстановкой (потерей сигнала). Поэтому способ организации сетей мониторинга подвижного состава по типу MESH (наличие альтернативных путей передачи информации) является весомым достоинством в пользу выбора ячеистых сетей. На рис.1.3 представлен вариант организации технического мониторинга грузового поезда с расположением узлов-датчиков для контроля колесных пар в грузовых вагонах. Эффективность захвата и отклика сигнала датчика в процентах в режиме ретрансляции данных при расположении их в виде треугольных фигур проставлена на рис.1.4 (согласно источникам [5,6]).

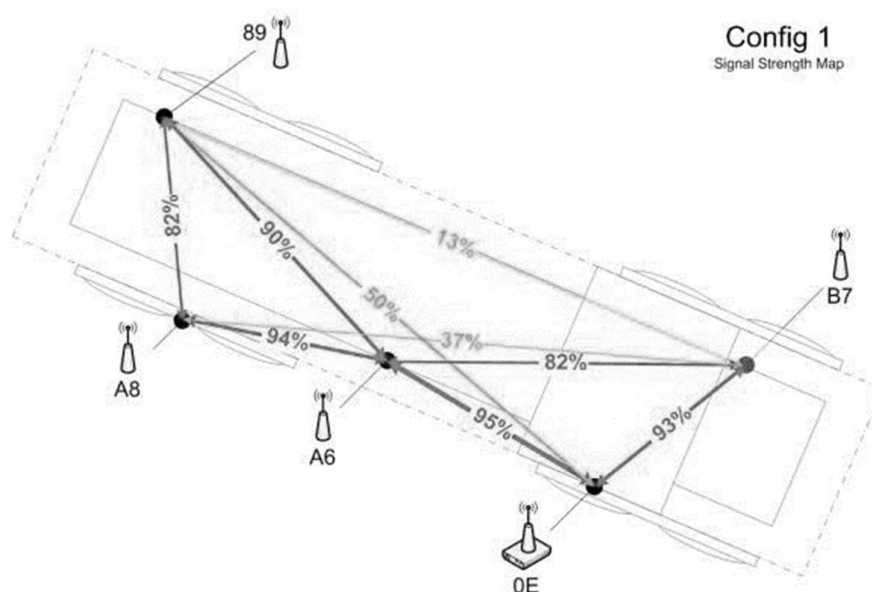


Рисунок 1.4 – Ячеистая сеть грузового вагона

Сетевой шлюз поддерживает множество различных интерфейсов для сбора и обработки данных локально, например, на локомотиве. В другом варианте обеспечивается обратная передача данных на объект контроля от централизованного центра (веб-мониторинг). Применение технологии MESH актуально также для систем централизованного обслуживания и управления операциями, ориентированных на базы данных. Сети MESH могут быть интегрированы с бортовыми системами отслеживания подвижного состава, что

обеспечивает дополнительную ценность с точки зрения управления движением поездов [4]. Название сети MESH определяет структуру расположения датчиков-маячков в виде ячеек, позволяющих построить обходные каналы передачи данных в случае занятости более прямого маршрута. Принципы работы датчиков на основе сенсорных технологий контроля параметров вагона позволяют назвать такие сети сенсорными.

Для реализации текущего контроля за состоянием грузовых вагонов за рубежом активно исследуется технология сенсорных сетей [5-8]. Аппаратурные особенности узлов-сенсоров представлены на рис. 1.5. Узел состоит из блока сбора данных, блока обработки, передатчика и блока приемника. Наличие дополнительных узлов зависит от объекта применения сетей [6]. Дополнительно могут появиться модули определения местонахождения, силовой генератор, мобилизатор (МАС). Модуль сбора данных состоит из датчика и АЦП. Аналоговый сигнал на выходе датчика преобразуется в цифровой и подается в блок обработки. Модуль обработки, используя интегрированную память с другими узлами, выполняет общую задачу контроля объекта. Блок передатчика (трансивер) соединяет узел с сетью мониторинга (MESH). Блок питания может иметь возможность подзарядки с помощью солнечной батареи или других источников.

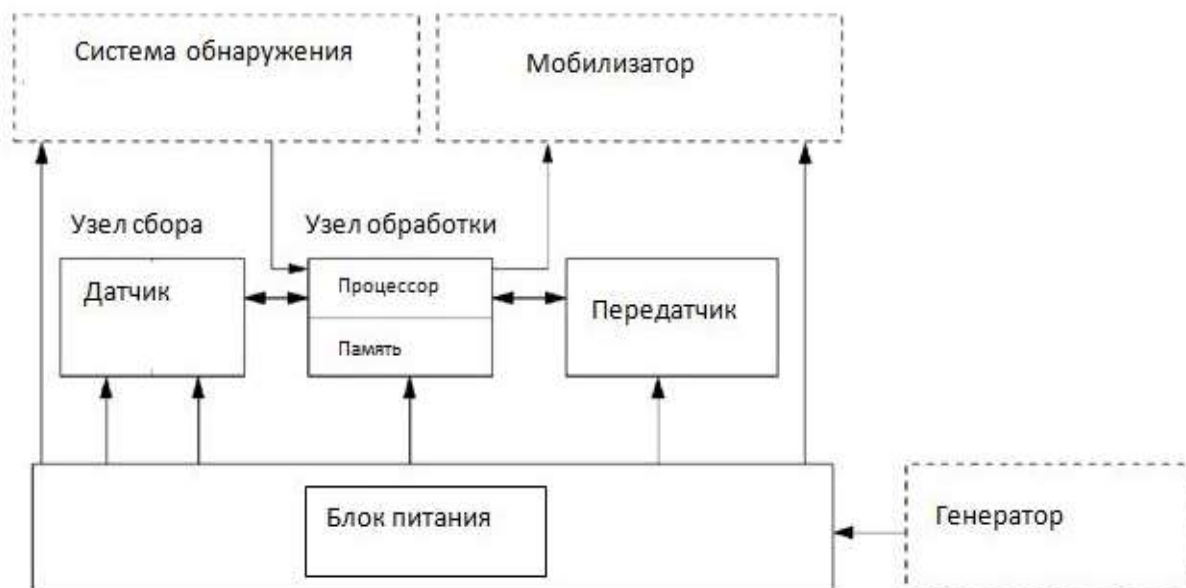


Рисунок 1.5 – Блок-схема сенсорного узла

Большинству узлов для выполнения своей задачи нужно знать с высокой точностью свое местонахождение. Для этого имеется соответствующий модуль (приемник GPS). Для перемещения узла в пространстве имеется мобилизатор. Все блоки размещаются в корпус, размеры которого соизмеримы со спичечным коробком. Для узлов-сенсоров имеются жесткие ограничения, например по размерам и весу. Автономность датчиков-узлов и особенности организации сенсорной сети грузового вагона, реализованной по принципу MESH, позволяет осуществлять расформирование поездов и формирование новых составов без дополнительной настройки или замены оборудования.

1.4 Применение беспроводных оптических каналов для связи с подвижными объектами

Для осуществления технического мониторинга и реализации беспилотных технологий требуется создание широкополосной телекоммуникационной системы с использованием волоконно-оптических и беспроводных линий связи. Существующие каналы связи с подвижными объектами имеют недостаточную пропускную способность. Так, ограниченность полосы частот поездной радиосвязи в гектометровом и метровом диапазонах не позволяет передавать видеоизображения на подвижной состав. Для передачи требуемого объема информации на поезд необходимо повысить скорость передачи сигналов. Увеличение скорости передачи сигналов возможно за счет перехода в более высокую часть радиодиапазона, а именно дециметровых и сантиметровых длин волн. Однако эти диапазоны имеют ограниченные возможности предоставления несущих частот. Дальнейшее повышение пропускной способности подвижной связи возможно за счет использования частот за пределами радиодиапазона (400ГГц), а именно на основе технологий беспроводных оптических (атмосферных) каналов. Беспроводные оптические каналы связи (БОКС) в инфракрасном диапазоне способны передавать высокоскоростные

(широкополосные) сигналы на такие же расстояния, как и мобильная сотовая связь. Атмосферные каналы (БОКС) не чувствительны к электромагнитным излучениям и не создают электромагнитных помех для других средств связи. Перспективность использования БОКС для связи с подвижными объектами заключается в возможности значительно повысить пропускную способность (десятки Гбит/с) за счет оптических технологий. Главный недостаток БОКС – зависимость качества связи от погодных условий, дрожания и турбулентности атмосферы. Однако, при правильно рассчитанном оптическом бюджете атмосферного канала БОКС обеспечивает лучшее качество связи, чем радиосистемы, работающие в условиях высокого уровня помех на ж/д транспорте [1,2,3].

Как уже отмечалось выше, работа радиосистем предусматривает непрерывный двухсторонний обмен широкополосной информацией между пунктом управления и подвижными объектами, который происходит во время движения поездов. Требуемое повышение скорости передачи данных по радиосвязи сопряжено с увеличением диапазона частот, ухудшением условий распространения радиосигналов и сокращением дальности связи [2,3]. Смягчение таких негативных последствий за счет увеличения мощности несущего сигнала приводит к усложнению электромагнитной обстановки и уменьшению количества работающих радиосредств в одном районе. Кроме того, при повышении несущей частоты снижается способность к дифракции и усиливается влияние эффекта интерференции радиоволн за счет отражении от металлических сооружений и других объектов, расположенных вдоль железнодорожного полотна. Поэтому переход на оптический диапазон (БОКС) в системах подвижной связи является оптимальным решением в сложившейся ситуации.

Беспроводные оптические каналы связи с достаточно большим оптическим бюджетом могут обеспечить требуемые: дальность связи (не менее 2км); скорость передачи информации (не менее 10 Гбит/с) и коэффициент готовности (не менее 0,999) даже при неблагоприятных погодных условиях. Для обеспечения таких параметров при расчете оптического бюджета необходимо гарантировать соответствующий энергетический запас, позволяющий исключить возможные

риски потери связи из-за ухудшения погоды, турбулентности атмосферы, вибраций и т.д. [9-14]. Повысить оптический бюджет БОКС возможно за счет улучшения чувствительности приемника (P_{np}) и выбора оптимальной длины волны, обеспечивающей минимального поглощение сигнала атмосферой ($P_{амм}$).

Возможный вариант применения БОКС на ж/д транспорте представлен на рис.1.6 [11,12]. На рис.1.6 изображено ж/д полотно, вдоль которого на опорах контактной сети установлены лазерные излучатели оптического сигнала, который принимается фотоприемником на локомотиве.

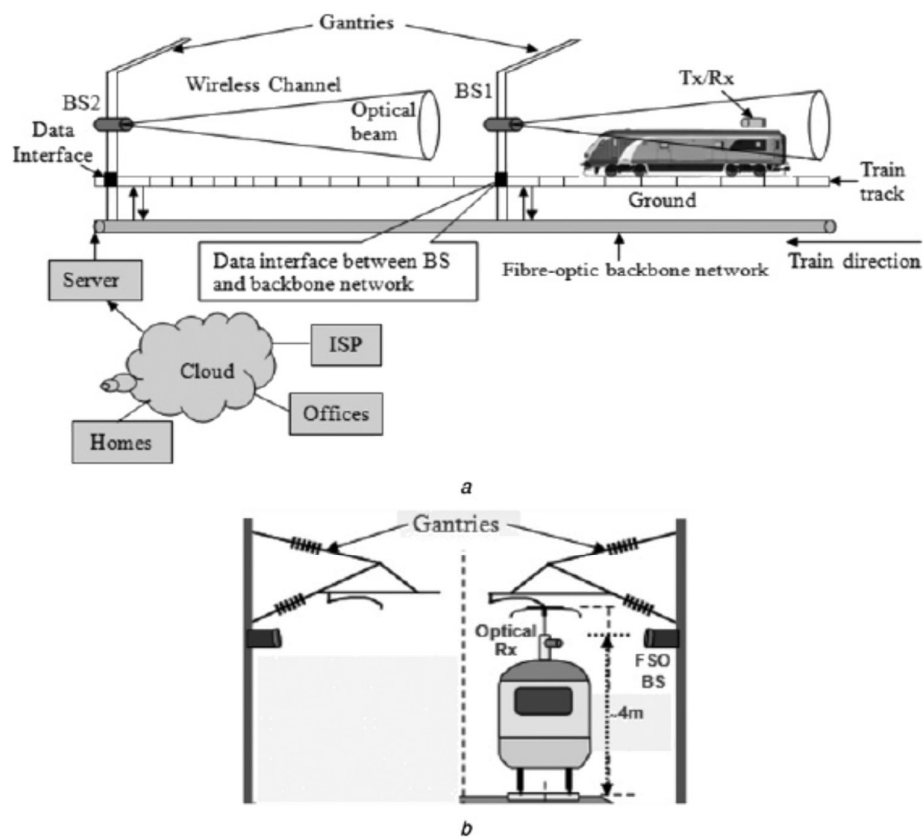


Рисунок 1.6 – Вариант организации подвижной связи между стационарным пунктом управления и поездом по технологии БОКС [11]

Используемая длина волны в БОКС соответствует окнам прозрачности волоконно-оптическим системам, что облегчает задачу производства оптических модемов для атмосферной связи. Для устранения влияния вибраций от опор и во время движения поезда предусмотрены специальные системы стабилизации и захвата и сопровождения лазерного луча. Кроме того, в устройствах БОКС

имеются системы автоматической подстройки мощности оптического сигнала в случае ухудшения условий распространения [12].

Таким образом, технология беспроводных оптических каналов может быть использована для организации связи как между стационарными объектами, например, базовыми станциями БС, так и с подвижными объектами, например для связи БС с локальной сетью Wi-Fi поезда.

1.5 Разработка критериев эффективности беспроводных технологий для систем мониторинга

Одной из главных задач в проектировании систем технического мониторинга является получения ответа на вопрос о возможностях беспроводных технологий и соответствия их требованиям, предъявляемым на ж/д транспорте. Для этого необходимо разработать критерии соответствия, прежде всего требованиям по безопасности движения поездов. Исходя из условий по безопасности, главными требованиями следует считать доступность канала, оперативность доставки информации и качество связи. Для оценки критериев и ответа на вопрос о возможности использования той или иной технологии в системах технического мониторинга на ж/д транспорте требуется обоснование соответствующих параметров и разработки методик расчета с учетом специфики конкретной беспроводной технологии. Так, оценкой критерия доступности является коэффициент доступности K_d который равен отношению времени канала, находившегося в доступном для пользователей состоянии, к общему времени функционирования [14]. В качестве критерия оперативности доставки информации следует принять канальную скорость (к/с) в бит/с, которая определяет возможные временные задержки передачи сигналов.

В качестве оценки качества связи следует принять отношение мощностей сигнал/шум (с/ш) на входе приемника БС. От величины с/ш зависят вероятности ошибки $P_{ош}$ и потери цифровых пакетов $P_{n/пак}$, а также другие параметры функционирования сети. Так, для технологии Wi-Fi стандарта IEEE 802.11ax - это

тип модуляции, позиционность кода, скорость кодирования, циклический префикс и канальная скорость [3].

Важной задачей при оценке возможностей беспроводных технологий для технического мониторинга является определение допустимых значений коэффициента доступности, временной задержки, вероятности ошибки. Эти значения могут быть получены с помощью функции потерь [15]. Как правило, это экономические потери, которые могут возникнуть в результате сбоев в системе мониторинга на ж/д транспорте. Допустимые значения определяются с помощью расчетов, которые производятся на основе специально разработанной методики и результатах обработки экспериментального материала применительно к объекту мониторинга. Таким образом, допустимые значения критериев зависят от конкретной задачи мониторинга. Если эта задача связана с безопасностью движения поездов, например, видеонаблюдение на нерегулируемых переездах, то допустимые значения должны рассчитываться с учетом рекомендованных значений вероятностей правильного и ложного обнаружения опасных объектов.

Эти вероятности, в свою очередь, определяются качеством канала (P_{ou}) и отношением с/ш на входе устройства распознавания системы интеллектуального видеонаблюдения (СИВ) в кабине машиниста (бортовом компьютере). Длительность видеокadra (40мс) в этом примере также влияет на вероятности обнаружения. Известно, что потеря одного кадра влияет на эффективность работы системы видеонаблюдения СИВ [16].

Основное внимание в работе уделяется беспроводной технологии Wi-Fi. Поэтому оценки критериев и методики их расчета, рассмотренные в главах 4 и 5, основываются на особенностях распространения сигнала дециметрового диапазона и алгоритма работы Wi-Fi стандарта IEEE 802.11ах.

Основное влияние на отмеченные выше оценки критериев технологии Wi-Fi оказывает диапазон радиосигнала 2,4 ГГц, 5ГГц, а именно: распространение в пределах прямой видимости, многочисленные отражения от окружающих объектов и поглощения в них. Это приводит к интерференции электромагнитных волн в точке приема. В результате имеет место «многолучевость» и наложение

многочисленных сигналов с различными амплитудами, фазами, временем распространения, плоскостями поляризации и пр. Вследствие этого возникают замирания несущего сигнала, когда амплитуда огибающей изменяется в значительных пределах при передвижении приемной станции. В результате флуктуирует параметр с/ш на входе приемника, возникают ошибки, ухудшается качество связи [17].

Для анализа влияния замираний на эффективность функционирования системы Wi-Fi требуется обработка статистических данных. На основании экспериментально материала производится оценка числовых характеристик и законов распределения вероятностей величин с/ш и сопутствующих параметров.

1.6 Выводы по главе

1. Сети передачи данных технического мониторинга подвижного состава должны строиться на основе цифровых каналов беспроводных технологий.
2. В качестве беспроводных технологий целесообразно применять стандарты Wi-Fi, сенсорных сетей, беспроводных оптических каналов связи.
3. Оценка эффективности беспроводных технологий для технического мониторинга на ж/д транспорте должна основываться на критериях доступности, оперативности и качества связи.
4. Оценка допустимых значений критериев эффективности беспроводных технологий для технического мониторинга определяется конкретной задачей и функцией потерь, которая описывает экономические потери из-за сбоев и ошибок при передаче информации по каналам связи.
5. Для оценки эффективности беспроводных технологий требуется разработка методик расчета параметров доступности, оперативности и качества связи на основе собранного и обработанного статистического материала.

2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА Ж/Д ТРАНСПОРТЕ

2.1 Обзор способов организации мониторинга технического состояния подвижного состава

Система мониторинга технического состояния подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта предназначена для контроля целостности поезда, параметров основных узлов вагонов, агрегации данных стационарных объектов, обеспечении безопасности на переездах и т.д.

Внедрение беспилотных технологий управления поездами невозможно без организации сети передачи данных на локомотив и диспетчерский пункт управления о состоянии подвижного состава и участков ж/д полотна с учетом длины тормозного пути поезда. Для этого создаются системы интеллектуального видеонаблюдения (СИБ) на переездах и локальные сети Wi-Fi сбора информации о техническом состоянии вагонов, например, давлении в тормозной магистрали и координатах последнего вагона.

Известны следующие варианты технических решений мониторинга, рассмотренные в [18-26].

В них предложены локальные схемы мониторинга вагонов, расстановка датчиков, определяющих работоспособность деталей и узлов вагонов [18,21]; рассмотрены особенности построения сенсорных сетей для технического контроля вагонов [19,25,26]: алгоритм взаимодействия датчиков-модемов в пределах вагона или одного подвижного состава на основе сенсорных сетей [19], анализ возможностей сенсорных сетей [26], структура беспроводные сенсорных узлов с автономным питанием Zig Bee [25]. В источниках [20,23,24] рассматриваются вопросы мониторинга метрополитена: предлагаются алгоритмы контроля за работой машиниста [20], аппаратные решения мониторинга на основе специальных высокоскоростных чипов Insineon SMARTi [23], схемы реализации контроля за

чистотой воздуха [24]. В источнике [22] изложены основные принципы имитационного моделирования проверки качества каналов на основе Wi-Fi и LTE для использования в беспроводных технологиях мониторинга и управления движением поездов.

Основным недостатком материалов, перечисленных выше источников [18-26], является отсутствие сетевых решений для мониторинга подвижного состава и стационарных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Наиболее комплексной и полной по объему данных является система мониторинга, описанная в источнике [18]. В ней представлена комплексная система мониторинга подвижного состава, состоящая из мобильной и стационарной частей, позволяющих отслеживать местоположение, направление и скорость движения, работоспособность деталей и узлов вагонов, измерять вес груза, следить за процессами погрузки-выгрузки с учетом температуры окружающей среды и груза. В качестве характеристик каналов указаны названия технологий организации сети связи: Wi-Fi и GSM. Недостатком системы является отсутствие структуры сети связи, соединяющей центр принятия решений (ДЦУ, вагонное или локомотивное депо) с датчиками контроля за техническим состоянием поездов и объектов инфраструктуры ж/д транспорта. Основное внимание в [18] уделено функциональным возможностям датчиков технического состояния вагонов. На основании представленного выше обзора можно сделать вывод, что отсутствуют примеры системы мониторинга на ж/д транспорте, где были бы решены вопросы не только качества датчиков контроля, но и каналов связи, отвечающих требованиям доступности, оперативности и качества.

При создании системы мониторинга подвижного состава, информацию которой предполагается использовать в ДЦУ для управления движением поездов и повышения безопасности на ж/д транспорте, необходимо предусмотреть передачу видеоданных на локомотив с нерегулируемых переездов, мостов, тоннелей и других проблемных участков дороги. Это необходимо с целью предупреждения экстренных торможений, наездов или других аварий особенно на нерегулируемых переездах. Таким образом, реализация задачи мониторинга подвижного состава

связана с контролем технического состояния инфраструктуры ж/д транспорта. Такая система мониторинга (состоящая из устройств контроля и каналов связи) помимо соответствующих датчиков в вагонах локальных сетей поездов должна включать сети передачи данных со стационарных объектов (например, видеокамер), установленных на линии или станциях. Общая сеть мониторинга технического состояния подвижных объектов и инфраструктуры ж/д транспорта должна объединить с помощью магистральных линий (например, волоконно-оптических ВОСП) локальные сети подвижных и стационарных объектов для соединения с центром принятия решений. Главное, такая сеть позволит получить полную и достоверную информацию о состоянии процесса движения поездов в пределах железной дороги.

2.2 Разработка структурной схемы системы технического мониторинга подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта

В работе предложена структура системы технического мониторинга поездов и стационарных объектов, расположенных вдоль ж/д полотна (рис.2.1). Каналы связи с подвижными объектами (поездами) построены по стандартам беспроводных технологий (IEEE 802.11n, IEEE 802.11ax, IEEE 802.15.4, АОСП), позволяющим передавать в цифровой форме не только показания датчиков, но и широкополосные сигналы от видеокамер. Такая информация, например, от видеокамер, установленных на ж/д переездах, необходима для повышения безопасности и реализации беспилотных технологий управления движением поездов. Создание единой системы мониторинга технического состояния поездов и инфраструктуры в пределах дороги является необходимым условием для управления движением поездов и повышения пропускной способности ж/д транспорта.

Предлагается объединить в одну систему мониторинга из диспетчерского центра управления ДЦУ контроль за состоянием мостов, тоннелей, переездов и т.д., объектов станционной инфраструктуры (стрелочные переводы, пешеходные

мосты, путепроводы и т.д.) и подвижными составами (рис.2.2). Для реализации этой цели расширяются функции и возможности локальных сетей Wi-Fi поездов. Локальные сети Wi-Fi поездов собирают информацию технического мониторинга вагонов подвижного состава и инфраструктуры и передают ее в ДЦУ через сеть стационарных базовых станций СБС. Данные мониторинга также поступают в кабину машиниста (бортовой компьютер) для принятия экстренных мер, например, торможения или остановки, а также формирования управляющих сигналов для корректировки работы датчиков, например, изменение угла поворота видеокамеры на переезде (перегоне). Стационарный датчик (видеокамера) с Wi-Fi модулем в зоне действия сети поезда инициализируется и идентифицируется в точке доступа поездной сети Wi-Fi, передает данные, которые транслируются в ДЦУ через сеть СБС 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 устройства локальной сети Wi-Fi.

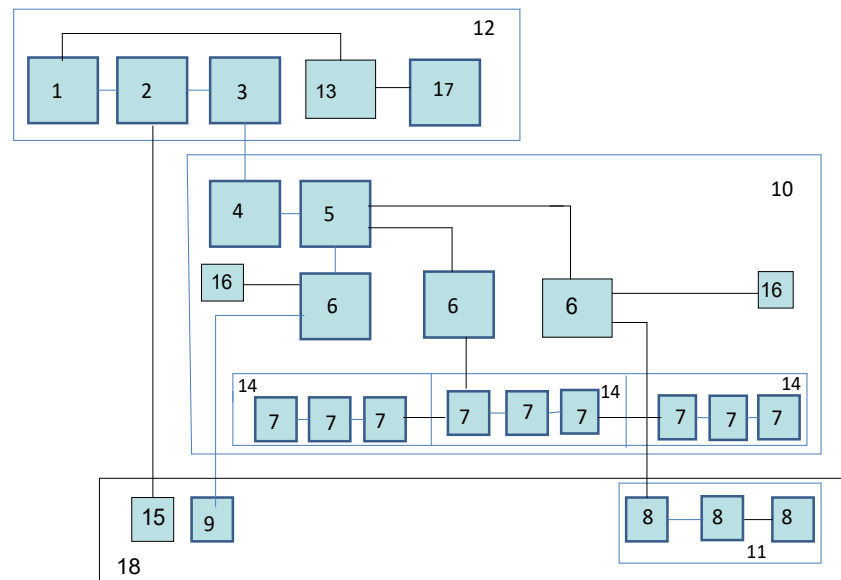


Рисунок 2.1 – Структурная схема технического мониторинга на ж/д транспорте

На рис.2.1 изображена система мониторинга подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта на основе беспроводных технологий, состоящая из:

- 1 – мультиплексор волоконно-оптической системы передачи (MUX ВОСП);
- 2 – маршрутизатор;
- 3 – стационарная базовая станция СБС;
- 4 – поездная базовая станция ПБС;
- 5 – контроллер (коммутатор/маршрутизатор);
- 6 – точка доступа локальной сети Wi-Fi поезда;
- 7 – узел-датчик сенсорной сети поезда;
- 8 – узел-датчик стационарной сенсорной сети;
- 9 – стационарная точка доступа или видеокамера с модулем Wi-Fi;
- 10 – локальная сеть Wi-Fi поезда;
- 11 – стационарная сенсорная сеть;
- 12 – сеть стационарных базовых станций СБС;
- 13 – коммутатор ядра системы мониторинга;
- 14 – сенсорная сеть вагона;
- 15 – точка доступа или видеокамера с выходом на маршрутизатор ВОСП;
- 16 – приемник GPS;
- 17 – центр принятия решений;
- 18 – сеть стационарных датчиков мониторинга инфраструктуры ж/д транспорта.

Наличие возможности взаимодействия стационарных датчиков (видеокамер) с локальной сетью Wi-Fi поезда в случае обнаружения опасного объекта на переезде позволит передать видеоизображение машинисту, своевременно затормозить и предотвратить аварию.

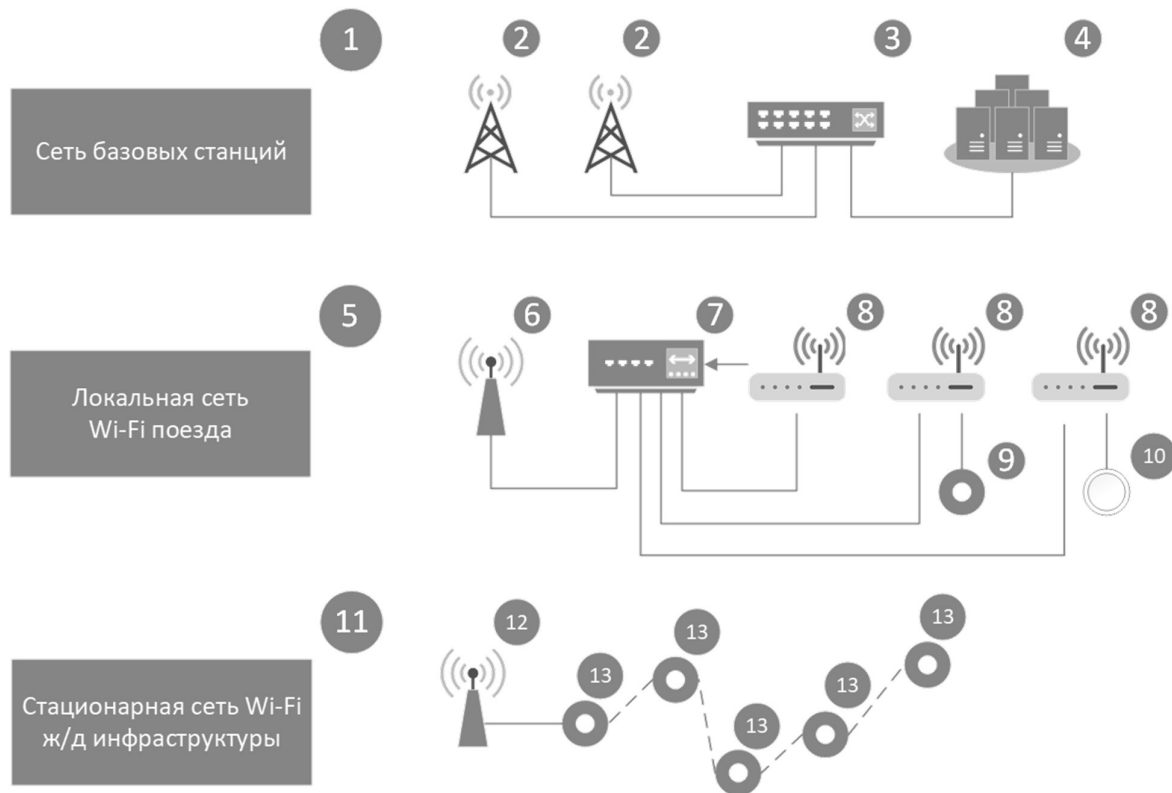


Рисунок 2.2 – Трехуровневая схема технического мониторинга на ж/д транспорте

На рис.2.2 представлена трехуровневая схема мониторинга подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта (рис.2.1), состоящая из верхнего уровня 12 (базовых станций 3, объединенных коммутатором ядра 13 с центром принятия решений 17); среднего уровня 10 (локальных сетей Wi-Fi поездов с ПБС 4, контроллером 5, точками доступа 6, узлами-датчиками 7 сети 14, приемниками GPS 16) и нижнего уровня стационарных сетей Wi-Fi 18 (точками доступа 9, узлами-датчиками 8 сенсорных сетей 11).

Таким образом, предлагаемая система мониторинга отличается от рассмотренной в [18] тем, что разработана сеть каналов передачи данных. В основе сети лежит трехуровневая архитектура системы мониторинга. Кроме того, расширены функции локальной сети Wi-Fi поезда, которые могут собирать информацию о техническом состоянии мостов и других объектов, удаленных от основной инфраструктуры.

Предложенная структура сети мониторинга предназначена для создания надежной и широкополосной системы передачи данных о техническом состоянии поездов, линейных и станционных объектов в центры принятия решений. Для этого используются сети связи стандарта IEEE 802.11ax и 802.15.4 для подвижного состава. Соединение ПБС с сетью стационарных базовых станций предполагается осуществить с помощью беспроводных модемов атмосферой оптической системы передачи АОСП (БОКС), установленных вдоль ж/д полотна, с целью повышения защищенности от преднамеренных электромагнитных помех. Объединение сети СБС с коммутатором ядра возможно на основе волоконно-оптической системы передачи информации (ВОСП).

Как отмечено выше, мониторинг подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта решает две основные задачи: контроль технического состояния поезда, линейных и станционных объектов и формирование данных для беспилотного управления поездами. Задачи решаются за счет создания трехуровневой сети, использующей преимущества трех беспроводных технологий. Технический мониторинг подвижного состава (температуры букс вагонов, состояния автосцепки и осевых подшипников, давления в тормозной магистрали, координат последнего вагона поезда и т.д.) реализуется с помощью каналов стандарта IEEE 802.11ax, IEEE 802.15.4, АОСП, легко устанавливаемых на ограниченной территории, не ухудшающих электромагнитную обстановку для других радиосредств, не требующих значительных экономических затрат на установку и обслуживание. По такому же принципу предлагается осуществить контроль за линейными и станционными устройствами (стрелочных переводов, пешеходных мостов, путепроводов, тоннелей, переездов и т.д.). Для соединения подвижной и стационарной частями мониторинга с коммутатором ядра сети целесообразно использовать ВОСП.

Отдельно следует отметить, что модемы АОСП (беспроводных оптической каналов связи БОКС) для реализации канала между ПБС и СБС в инфракрасном диапазоне длин волн, предлагается устанавливать на поездах и вдоль железнодорожного полотна [13]. Расстояние от места установки стационарной

базовой станции СБС (опора контактной сети) до зоны действия подвижной базовой станции ПБС (крыша поезда) не превысит 30м, что позволит гарантировать необходимый оптический баланс и высокую скорость передачи информации (свыше 600Мб/с) [9-12].

Объединенная структура каналов мониторинга необходима также для реализации внедрения новой системы управления движением поездов с помощью устройств радиоблокировки, проекта «автомашинист» и «виртуальной сцепки». Необходимость создания единой системы мониторинга наиболее важных линейных и станционных сооружений (мостов, тоннелей, переездов, платформ, сортировочных горок и парков и т.д.), а также грузовых и пассажирских поездов обусловлена выбором стратегического направления развития железнодорожного транспорта, а именно создания высокоскоростных магистралей и увеличение пропускной способности ж/д транспорта. Для постоянного контроля за техническим состоянием подвижного состава, обстановкой на станциях и перегонах требуется установка на объектах видеокамер с модулями Wi-Fi. С помощью беспроводных каналов связи возможно создание единой системы интеллектуального видеонаблюдения СИВ как составной части объединенной системы технического мониторинга на ж/д транспорте.

Преимущества предлагаемой системы мониторинга:

1. Достаточно простая реализация контроля за техническим состоянием вагонов с помощью технологий Wi-Fi и быстро развертываемых самоорганизующихся сенсорных сетей по стандарту IEEE 802.15.4.
2. Использование существующей инфраструктуры магистральных волоконно-оптических каналов ВОСП для соединения стационарных базовых станций (СБС) с коммутатором сети мониторинга.
3. Защищенность от преднамеренных электромагнитных помех каналов связи стационарных и поездных базовых станций, использующих инфракрасный диапазон длин волн.
4. Отсутствие электромагнитного влияния на другие радиосредства от предлагаемых беспроводных технологий.

5. Оперативная доставка информации о техническом состоянии инфраструктуры и подвижного состава диспетчерскому персоналу в ДЦУ, а также машинистам локомотивов для принятия решения в случае возникновения непредвиденных обстоятельств.

6. Возможность осуществить технический контроль за объектами (мостами, тоннелями и т.д.) в труднодоступных местах за счет считывания показаний датчиков с помощью локальных сетей Wi-Fi поездов и передачи этой информации через сеть СБС в центр принятия решений.

К недостаткам заявляемой системы мониторинга можно отнести следующее:

1. Дополнительные экономические затраты на сооружение сети СБС, размещение оборудования беспроводных сетей Wi-Fi и узлов-датчиков в грузовых и пассажирских вагонах, настройку беспроводных оптических модемов базовых станций.

2. Необходимость разработки алгоритма взаимодействия трех уровней мониторинга для принятия оперативных решений с учетом приоритетов в управлении движением поездов.

3. Применение специальных видеокамер с модулем Wi-Fi, способных передавать изображение в кабину машиниста (или бортовой компьютер), дальностью действия не менее 2,5 км для своевременного торможения поезда.

Достоинством разработанной системы мониторинга является:

1) применение современных беспроводных технологий передачи данных IEEE 802.11ax, IEEE 802.15.4, БОКС, позволяющих обеспечить требуемую скорость и качество передачи данных;

2) максимальное использование существующей инфраструктуры в виде проложенных вдоль железнодорожного полотна волоконно-оптических линий связи ВОЛС и опор контактной сети, вышек поездной радиосвязи, функционирующей сети стационарных базовых станций и локальных сетей Wi-Fi пассажирских поездов, оборудованных контроллерами, коммутаторами-маршрутизаторами, точками доступа и модемами.

2.3 Техническое обоснование использования беспроводной технологии

2.3.1 Техническое обоснование использования технологии Wi-Fi

Для реализации постоянного контроля за техническим состоянием подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта предлагается система мониторинга (рис.2.1). Трехуровневая структура системы (рис.2.1,2.2) состоит из верхнего уровня 12 с центром принятия решений 17, коммутатора ядра 13, объединяющего стационарные базовые станции СБС 3 с помощью мультиплексоров 1 и маршрутизаторов 2 ВОСП; среднего уровня с локальными Wi-Fi и сенсорными 14 сетями, входящих в сеть поезда 10; нижнего уровня со стационарными сенсорными сетями (11) и отдельными датчиками 9, 15, которые могут выполнять функции точек доступа для мониторинга стационарных устройств. Локальная сеть Wi-Fi поезда 10 состоит из поездной базовой станции ПБС 4 (рис.2.1); контроллера/маршрутизатора 5; точек доступа 6, к которым подключаются самоорганизующиеся сенсорные сети 14 с узлами-датчиками 7 технического контроля вагона, а также приемниками GPS навигации 16, установленными в «голове» и «хвосте» поезда для определения целостности подвижного состава.

Стационарные сенсорные сети 11, состоящие из узлов-датчиков 8, предусмотренных для технического мониторинга объектов инфраструктуры ж/д транспорта (например, опор моста или верхнего строения пути), периодически передают данные через сеть поезда 10, СБС 3, ВОСП (1,2) и коммутатор 13 в центр принятия решений 17.

Двусторонние каналы связи позволяют управлять объектами (изменять режимы работы датчиков). Процесс установления связи между датчиком 9 (например, видеокамерой с модулем Wi-Fi) или 8 сети 11 с локальной сетью поезда 10 включает следующие этапы:

- 1) нахождение приемного устройства датчика 9 (главного узла-датчика 8 сенсорной сети 11) в режиме дежурного приема (рис.2.1);

2) активизация приемо-передатчика 9 (главного узла 8 сети 11) при попадании в зону действия локальной сети Wi-Fi поезда 10 (передатчик точки доступа 6 транслирует сигнал-вызов) и переход приемника 9 (8) в основной режим;

3) посылка сигнала от передатчика 9 (8) в приемник точки доступа 6 для установления связи с локальной сетью Wi-Fi 10;

4) передача данных мониторинга от датчика 9 (8) в локальную сеть 10, в которой информация мониторинга может быть сохранена до момента передачи ее в центр принятия решений 17;

Предусматривается также передача координат последнего вагона поезда от приемника спутниковой навигации 16 через точку доступа 6 на бортовой компьютер для определения целостности подвижного состава, а также в центр принятия решений 17 и далее в локальную сеть Wi-Fi позади идущего поезда.

На территории ж/д станции через коммутатор 13 могут быть организованы каналы связи с вагонным депо, центром радиоблокировки (РБЦ) и другими техническими службами с помощью беспроводных модемов атмосферной оптической системы передачи БОКС, установленных на крышах помещений, что актуально в случае, когда прокладка кабеля через станционные сооружения и пути затруднительна или невозможна.

Технический результат разработанной системы достигается в результате использования научных исследований в области интервального регулирования движения поездов с помощью центра радиоблокировки (РБЦ). Сформулированные требования к результатам измерений межпоездного интервала и целостности поезда позволяют разработать единую систему технического контроля. Предлагаемая система контроля (мониторинга) на основе беспроводных технологий позволяет также организовать обмен информацией между поездом, РБЦ и ДЦУ, а также между сдвоенными поездами. Для осуществления функций определения целостности подвижного состава и расчета межпоездного расстояния в локальную сеть Wi-Fi поездов включены приемники GPS-навигации, которые с помощью спутниковой навигации определяют координаты первого и последнего вагонов поезда. Целостность поезда и межпоездное расстояние вычисляется

бортовыми устройствами поездов на основании координат, полученных от приемников GPS. Координаты поезда передаются по каналу «борт-борт» вслед идущему поезду. Эта же информация передается в центр радиоблокировки РБЦ, в котором рассчитывается рекомендуемый скоростной режим для поездов. Обмен данными между поездом и РБЦ осуществляется по каналу «станция-борт». Каналы «борт-борт» и «станция-борт» предлагается реализовать с помощью разработанной системы мониторинга на основе беспроводных технологий. Для передачи данных приемника GPS последнего вагона и вычисления бортовым компьютером целостности подвижного состава путем сравнения координат «головы и хвоста» поезда используется локальная сеть Wi-Fi.

В случае расцепки вагонов информация передается в РБЦ для формирования команды торможения сдвоенным поездам и в устройство автоблокировки АБЦ-МШ для переключения сигналов управления и трансляции их в кабину машиниста.

Возможность реализовать функции каналов «борт-борт» и «станция-борт» с помощью Wi-Fi стационарных и подвижных сетей делает предлагаемую систему мониторинга универсальной, повышающей функциональную надежность существующих сетей связи оперативно-технологического назначения, в том числе поездной радиосвязи.

Для подтверждения возможности сбора данных мониторинга стационарных объектов с помощью локальной сети поезда необходимы следующие расчеты. Время нахождения датчика в зоне действия точки доступа сети Wi-Fi поезда (более 30с) определяется как результат деления протяженности зоны (500м) на скорость движения поезда в районе объекта мониторинга (моста или тоннеля) 60км/ч (16,5 м/с). За это время радиомодем датчика осуществляет частотную и временную синхронизацию с сетью Wi-Fi поезда с помощью мультикадра управления, длительностью 235мс, регистрацию в сети поезда за время $235 \times 3 = 705$ мс и получение канала управления для идентификации ($235 \times 2 = 470$ мс). Затем происходит операция аутентификации, на которую уходит 6 мультикадров управления ($235 \times 6 = 1410$ мс) [3,27-29].

Таким образом, общее время установления соединения между стационарным датчиком и сетью поезда с учетом распространения радиосигнала не превысит 3 с. Отсюда, на передачу данных мониторинга отводится 27с (вполне достаточно для передачи видеоизображения от видеокамеры с модулем Wi-Fi).

Приведенные выше цифры свидетельствуют о технической реализуемости системы мониторинга технического состояния инфраструктуры ж/д транспорта с помощью беспроводных технологий.

2.3.2 Техническое обоснование использования беспроводной технологии сенсорных сетей MESH

Сенсорные технологии на основе узлов-маячков имеет большую перспективу использования в системах технического мониторинга подвижного состава ж/д транспорта (рис.2.1,2.2). Предлагаемая схема размещения узлов-датчиков 7 сенсорной сети 14 грузового вагона для технического мониторинга подвижного состава показана на рис.2.3. Схема содержит датчики-узлы 7 сенсорной сети 14 (рис.1.5), включенные по принципу ячеистой сети MESH [4] и размещенные таким образом, чтобы эстафета передачи данных двигалась в направлении к главному узлу 7 и затем точке доступа 6 сети Wi-Fi поезда. Для этого требуется выполнение алгоритма связи, представленного на рис.2.4.



Рисунок 2.3 – Схема размещения узлов-датчиков в грузовом вагоне

Расстояние между узлами-датчиками выбрано таким образом, что чем ближе главный узел, тем меньше расстояние между соседними узлами. Это условие позволит направить процесс переприема к центральному узлу сенсорной сети, который примыкает к точке доступа локальной сети Wi-Fi поезда.

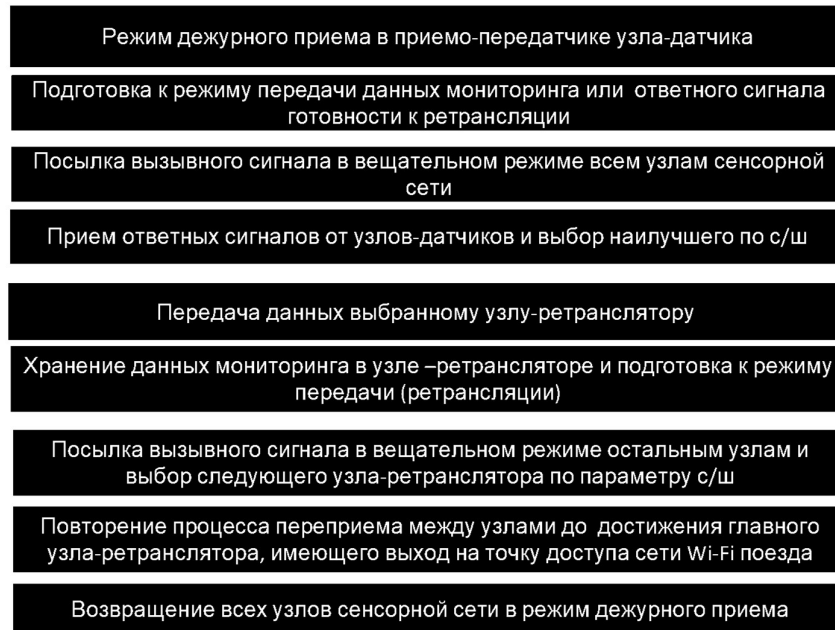


Рисунок 2.4 – Алгоритм переприема данных в сенсорных сетях

Представленный на рис.2.4 алгоритм процесса ретрансляции данных узлами-датчиками 7 в сенсорной сети вагона 14 включает для каждого узла следующие операции: переход из исходного состояния в режим передачи данных мониторинга, посылка вызывного сигнала и выбор наилучшего узла ретрансляции по наибольшему уровню ответного сигнала, передачи данных и возвращение в состояние «дежурного приема». Промежуточные узлы 7, задействованные в передаче информации, после приема вызывного сигнала, ответа на вызов, приема и ретрансляции данных мониторинга переходят в режим «дежурного приема». Узлы-датчики сенсорной сети, не участвовавшие в ретрансляции данных мониторинга, после активизации (перехода из режима дежурного приема в основной и посылки ответного сигнала) опять возвращаются в исходное состояние.

Мониторинг технического состояния вагонов предлагается реализовать с помощью сенсорных сетей 14 (11) с архитектурой multi-hop (рис.2.3). Сенсорная сеть состоит из «датчиков-маячков» 7 (8) с автономным питанием по технологии Zig Bee [25,26], работающих по принципу ретрансляторов. Эффективность передачи данных с помощью алгоритма (рис.2.4), предусматривающего режим ретрансляции от одного узла-датчика (маячка) 7 (8) к другому узлу до момента передачи в центральный (главный) узел сети и далее в точку доступа 6 и центр 17, можно доказать следующими расчетами. Так, для подтверждения работоспособности сенсорной сети мониторинга вагона требуется подсчитать среднее число датчиков-узлов $M[r]$, ожидающих передачи данных мониторинга. Сенсорную сеть можно представить в виде одноканальной (одночастотной сети, работающей в симплексном режиме) системы массового обслуживания (СМО) с неограниченной очередью с простейшим потоком заявок на входе системы и произвольным законом распределения выходного потока. На основании формулы Полячика-Хинчина [30] математическое ожидание числа заявок в очереди $M[r]$ для наихудшего случая, когда все датчики-узлы построены в линейку (или зигзаг) и ретранслируют в направлении к главному узлу, вычисляется следующим образом:

$$M[r] = \rho^2(1 + \nu_T)^2 / [2(1 - \rho)], \quad (2.1)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$;

$\lambda = \frac{1}{\Delta t}$ - интенсивность входного потока;

Δt - среднее время между поступлениями заявок на обслуживание (занятие частоты) от датчиков;

$\mu = \frac{1}{M[T]}$ - интенсивность выходного потока обслуженных заявок (датчиков);

$M[T] = m_T$ - среднее время обслуживания заявки (от момента поступления в СМО до окончания процесса ретрансляции узлами 7 сети 14 в точке доступа 6 локальной сети Wi-Fi поезда 10);

$v_T = \frac{\sigma_T}{m_T}$ (2.2) - коэффициент вариации (отношение среднеквадратичного отклонения σ_T к среднему значению длительности занятия частоты m_T , зависящей от количества переприемов узлами 7);

$$m_T = \frac{T_1}{N} \sum_{i=1}^N i; \quad (2.3)$$

T_1 - среднее время одного переприема узлом (датчиком) сенсорной сети;

N - количество узлов переприема в сенсорной сети;

$D[T] = M[T^2] - m_T^2$ (2.4) - дисперсия времени обслуживания заявки;

$M[T^2] = \frac{T_1^2}{N} \sum_{i=1}^N i \cdot (i + 1)$ (2.5) - среднее значение квадрата времени обслуживания заявки.

После подстановки в формулу (2.3) выражений (2.4) и (2.5) получим: $D[T] = \frac{T_1^2}{N} \sum_{i=1}^N i \cdot (i + 1)$ для $N \gg 1$ (условие выполняется для сенсорных сетей).

Отсюда, на основании (2.2) имеем: $v_T = \sqrt{N}$.

Для $N = 20$ коэффициент вариации равен $v_T = 4,48$. Значение v_T (2.2) соответствует гиперэкспоненциальному распределению выходного потока обслуженных заявок от узлов-датчиков.

Время одного переприема равно $T_1 = 5c$. Эта цифра соответствует числу шагов, согласно алгоритму на рис.2.4, необходимых сделать для осуществления переприема. Продолжительность каждого шага равна длительности трем мультикадров (705мс) [3,27-29].

После подстановки значений $\mu = 0,02(1/c)$, $\lambda = 2,8 \cdot 10^{-4}(1/c)$ (что соответствует одному вызову в час), $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 1,4 \cdot 10^{-2}$, согласно формуле (2.1) рассчитаем величину средней длины очереди $M[r] \approx 0,003$.

Полученный результат означает, что очередь на обслуживание практически отсутствует. В случае возникновения очереди данные мониторинга, переданные соседнему узлу, хранятся в буфере узла и после освобождения канала (частоты) передаются по сети.

Время передачи данных от «хвостового» вагона в «головной», где находится центральный (главный) узел 7, соединенный с точкой доступа 6 локальной сети Wi-Fi поезда 10, для $N=20$ переключений составляет 1,67 мин. Это время не является критичным для данных мониторинга технического состояния вагонов, предназначенных для профилактического деповского ремонта (осмотра). Однако это время критично для передачи информации от приемника GPS, определяющего координаты последнего вагона. Поэтому приемник спутниковой навигации 16 подключен к точке доступа 6 отдельно (с помощью витой пары или выделенной частоты, рис.2.1).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что современный уровень техники позволяет реализовать мониторинг вагонов с помощью сенсорных сетей.

2.3.3 Техническое обоснование использования беспроводной технологии БОКС

Для создания двусторонней связи между ПБС и СБС в сети технического мониторинга подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта необходимы устройства беспроводной двусторонней оптической связи (БОКС) двух типов: стационарные (СУБОКС) и подвижные (ПУБОКС). Атмосферный канал повысит защищенность от несанкционированных проникновений и не создаст электромагнитных помех. Принцип атмосферной связи (БОКС) может быть применен также для организации поездной и станционной радиосвязи. Стационарные СУБОКС закрепляются на опорах контактной сети на удалении друг от друга таким образом, чтобы диаграмма направленности оптического пучка охватывала участок, соответствующий максимально возможной длине подвижного состава. Подвижные устройства ПУБОКС устанавливаются на крышах локомотивов или вагонов таким образом, чтобы минимизировать влияние аэродинамического «ветра», а именно, в середине вагона. Количество подвижных ПУБОКС зависит от типа локомотива, вагона и длины поезда. Для организации передачи данных мониторинга вагонов поезда все подвижные ПУБОКС объединяются с помощью коммутатора, который выбирает и подключает к каналу

БОКС (между поездом и опорой контактной сети с модемом СУБОКС) одну из ПУБОКС с помощью микропроцессора по принципу детектора максимального значения.

Для повышения надежности канала БОКС целесообразно предусмотреть использование радиоканала на случай резкого ухудшения условий распространения оптического сигнала. В этом случае радиомодемы устанавливаются на опорах контактной сети и локомотиве и работают в гигагерцовом диапазоне частот (2,4ГГц).

Предлагаемая ниже система передачи сигналов на основе беспроводной оптической связи БОКС может быть использована также при проектировании систем передачи данных по информационным сетям (например, мониторинга) с подвижными объектами. Цель применения БОКС заключается в повышении пропускной способности каналов связи и использования огромных преимуществ перед другими видами связи, а именно:

- 1) возможность использования диапазона частот, не требующего лицензирования;
- 2) нечувствительность БОКС к электромагнитным помехам и неподверженность к средствам борьбы с радиосвязью;
- 3) отсутствие электромагнитных помех от БОКС для других средств связи;
- 4) высокая скорость передачи и безопасность информации;
- 5) простота установки и небольшие габариты оборудования;
- 6) возможность организации связи с помощью имеющейся инфраструктуры.

Недостатки оптического беспроводного канала:

- 1) зависимость от погодных условий;
- 2) ограниченная дальность связи;
- 3) повышенная прочность крепления оборудования;
- 4) относительная дороговизна оборудования.

Обзор вариантов организации систем передачи данных на подвижные объекты с помощью устройств атмосферной связи представлен в литературе: [31-38].

В указанных выше источниках рассмотрены схемы организации связи между стационарным пунктом и движущимся объектом и приведены графики зависимости уровней сигнала и вероятности ошибки от дальности связи, полученные экспериментально и путем математического моделирования. На основании исследований характеристик БОКС, проведенные в работах [31,32], можно сделать следующие выводы: 1) канал атмосферной связи сохраняется при вибрациях во время движения поезда; 2) в условиях железнодорожного транспорта возможна высокоскоростная передача информации с помощью БОКС. Однако в материалах [31,32] отсутствуют схемы включения устройств БОКС в общую сеть связи железнодорожного транспорта и других конструктивных особенностей модемов, учитывающих специфику работы канала в условиях движущегося поезда.

В источниках [33-38] рассматриваются отдельные устройства, повышающие качество атмосферной связи БОКС: 1) борьбы с изменениями положения светового пучка из-за изменений турбулентности атмосферы и вибраций с помощью системы автоматической подстройки оптической оси [33]; 2) устранения вибраций на стационарных СУБОКС и подвижного ПУБОКС при движении поезда [34]; 3) автоматической регулировки усиления приемника при флуктуациях уровня оптического сигнала при движении поезда [35]; 4) резервирования канала БОКС с помощью радиостанций [36]; 5) регулирования мощности лазеров и глубины амплитудной модуляции в зависимости от погоды [37]; 6) стабилизации луча при движении объекта [38]. Общим недостатком материала [33-38] является отсутствие мер по обеспечению надежной работоспособности БОКС во время движения подвижного состава, которые необходимы для адаптации БОКС к условиям эксплуатации на железнодорожном транспорте.

При движении поезда уровень сигнала в приемных устройствах беспроводной оптической связи (УБОС) будет изменяться при удалении подвижного ПУБОКС от одного стационарного устройства СУБОКС и

приближения к другому СУБОКС. Следовательно, в приемниках УБОКС необходимо устройство автоматической регулировки усиления АРУ для стабилизации амплитуды электрического импульса на выходе фотоприемника в определенном рабочем диапазоне значений. Кроме того, длина поезда и кривизна пути может привести к потере «прямой видимости» в канале БОКС. Это требует установки на поезде нескольких ПУБОКС, количество которых зависит от типа вагонов (габаритов и установленного оборудования на крыше), а также наличия локальной сети Wi-Fi и длины поезда. Следовательно, для создания беспроводной оптической связи на ж/д транспорте канал БОКС должен состоять как минимум из одного стационарного СУБОКС на опоре контактной сети и нескольких ПУБОКС в движущемся поезде. ПУБОКС по очереди подключаются к каналу БОКС с помощью коммутатора после измерения и сравнения уровней сигнала по принципу детектора максимального значения.

С помощью БОКС можно создать устойчивые и надежные широкополосные каналы связи, адаптированные к условиям эксплуатации на железнодорожном транспорте. Такие каналы соединяют мобильные устройства пассажиров, машиниста и членов поезда бригады подвижного состава с коммутаторами сетей оперативно-технологической, мобильной, спутниковой связи с помощью волоконно-оптической системы передачи информации (ВОСП).

Техническая реализация БОКС возможна за счет применения комплексных мер, учитывающих факторы, ухудшающие качество оптической связи: перекрытие «прямой видимости», солнечная засветка, атмосферное поглощение, рассеивание и турбулентность (сцинтилляция), движение «опоры» и т.д., а также специфику эксплуатации устройств беспроводной оптической связи в условиях ж/д транспорта. К этим специфическим условиям относятся: изменение уровня сигнала при движении поезда, вибрация, дополнительные источники света от прожекторов матч освещения, встречных поездов, сигналов семафоров, электромагнитные помехи от контактной сети в линиях связи, аэродинамический «ветер» от движущегося поезда, электромагнитное влияние на электрический сигнал от контактной сети, других средств связи и т.д.

Для устранения воздействия перечисленных выше вредных факторов в работе БОКС следует предусмотреть защитные меры, изложенные ниже.

Система беспроводной оптической связи БОКС помещается в термостабилизированный, экранированный от электромагнитных помех корпус, и оснащается устройством автоматической подстройки оптической оси (АПОО) в передатчике, оптическими концентратором и полосовым фильтром в приемнике, автоматической регулировкой усиления приемника (АРУ), адаптивной системой подстройки мощности лазера (АСПМЛ).

Положительный результат от БОКС достигается в результате того, что максимально используется существующая инфраструктура, а именно: проложенные вдоль железнодорожного полотна волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) и опоры контактной сети, высота которых соответствует изменениям рельефа местности. Установка стационарных СУБОКС осуществляется на опорах под углом, учитывающим направление «восток-запад», на уровне высоты подвижного состава обеспечит наименьшую длину траектории луча и максимальное отношение сигнал/шум для ПУБОКС, установленных на крышах вагонов. Стационарные СУБОКС соединяются при помощи электрического кабеля (витой пары) длиной порядка 100м через маршрутизаторы и мультиплексоры (MUX) волоконно-оптической системы передачи ВОСП. Имеются варианты УБОКС, позволяющие использовать вместо витой пары оптическое волокно [12]. Отсюда, можно создать широкополосный канал связи с подвижными объектами с использованием беспроводного оптического канала, протяженность которого зависит от мощности лазеров, удаленности места установки СУБОКС от MUX и расстояния между станциями, оснащенными мультиплексорами ВОСП. С увеличением мощности лазера можно построить систему связи, позволяющую пассажирам поезда с помощью сети Wi-Fi и БОКС выйти на коммутаторы сети мобильной или спутниковой связи. Для повышения надежности связи предусмотрена установка радиостанций на опорах контактной сети и крыше локомотива, работающих в свободном диапазоне 2,4ГГц, которые связаны через маршрутизаторы (на опорах контактной сети) с ВОСП. Для реализации

двусторонней связи предлагается использовать две несущие длины волн: от стационарной СУБОКС к подвижной - λ_1 , в обратном направлении - λ_2 . Это позволит уменьшить объем оборудования на крышах вагонов.

Таким образом, в разработанной системе двусторонней беспроводной оптической связи, состоящей из нескольких приемопередающих узлов, содержащих приемопередающие интерфейсы, приемопередающие оптические системы с автоматическим регулированием оптической оси, лазер с управляемым источником питания для регулирования мощности оптического сигнала и глубины амплитудной модуляции, фотоприемник, имеются следующие особенности:

1) приемопередающие узлы подразделяются по месту расположения на стационарные, устанавливаемые на опорах контактной сети, и подвижные, устанавливаемые на крышах вагонов подвижного состава, подключаемые к каналу беспроводной оптической связи через коммутатор сети поезда согласно алгоритма детектора максимального значения;

2) приемники приемопередающих узлов оснащены автоматической регулировкой усиления для стабилизации амплитуды электрического импульса из-за изменения уровня оптического сигнала при движении подвижного состава;

3) для повышения надежности связи предусматривается установка радиостанций на опорах контактной сети и крыше локомотива.

Работу системы на базе БОКС можно описать следующим образом.

Излучение лазера 1 с длиной волны λ_1 через коллиматорную систему 3 поступает от стационарного приемопередающего узла 10 на подвижные приемопередающие узлы 11 на крышах вагонов подвижного состава через оптическую систему 4 на фотоприемники 2 (рис.2.5).

Сигнал с выхода фотоприемника 2 поступает на устройство измерения мощности оптического сигнала 6. Результаты измерений от всех блоков 6 приемопередающих узлов 11 передаются в коммутатор 12, который с помощью микропроцессора осуществляет сравнение, выбор и подключение к каналу оптической связи приемопередающего узла 11, имеющего максимальное значение

сигнала. Подключенный узел 11 остается в рабочем состоянии пока уровень мощности сигнала не упадет за допустимую границу (рис.2.6).

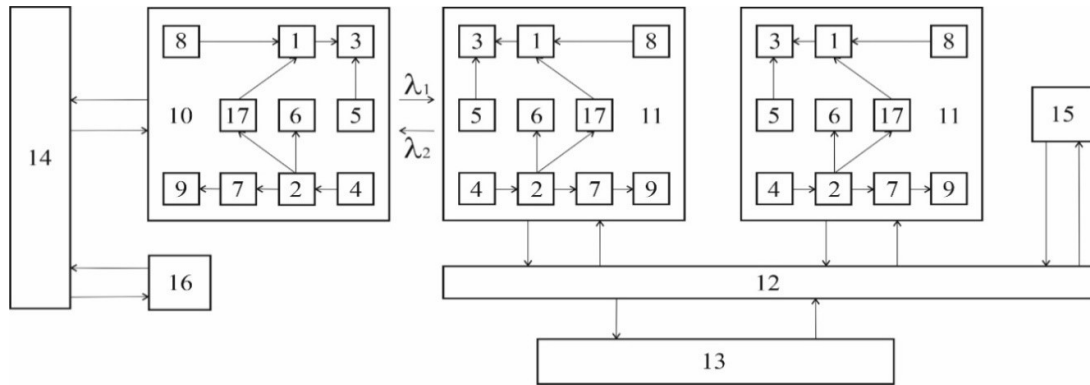


Рисунок 2.5 – Система двухстороннего канала беспроводной оптической связи [39]

1 – лазер (модулятор) с длиной волны λ_1 или λ_2 и управляемым источником питания;

2 – демодулятор (фотоприемник);

3 – оптическая система передатчика (коллимирующая оптика с регулировкой оптической оси);

4 – оптическая система приемника (оптические концентратор и полосовой фильтр);

5 – вычислитель разностного сигнала для корректировки оптической оси;

6 – устройство измерения уровня оптического сигнала;

7 – автоматическая регулировка усиления приемника;

8 – интерфейс передатчика;

9 – интерфейс приемника;

10 – стационарный приемопередатчик СУБОКС;

11 – подвижный приемопередатчик ПУБОКС;

12 – коммутатор с функциями оценки уровней сигналов и сравнения их согласно алгоритму детектора максимального значения;

13 – контроллер сети Wi-Fi поезда;

14 – маршрутизатор сети ВОСП;

15 – подвижная радиостанция;

16 – стационарная радиостанция (резервный канал связи);

17 – устройство формирования сигналов управления глубиной модуляции.

Падение уровня сигнала (рис.2.6) происходит при удалении приемопередающего узла 11 от стационарного узла 10. Далее к каналу подключается следующий приемопередающий узел 11, ближе всего находящийся к стационарному узлу 10.

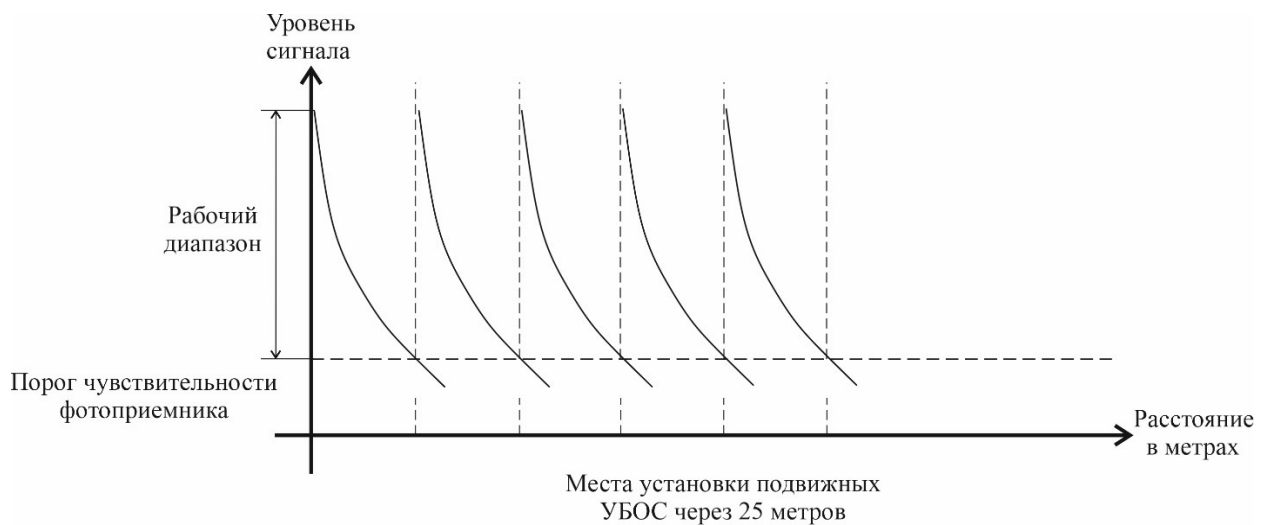


Рисунок 2.6 – Изменение уровня сигнала при движении поезда

На рис. 2.6 изображены зависимости уровней сигнала от расстояния между УБОКС на входе фотоприемников 2 и приемопередающих узлов ПУБОКС 11, установленных на крышах вагонов, при движении поезда в моменты прохождения ПУБОКС мимо опоры контактной сети СУБОКС

Ввиду того, что при движении поезда нельзя обеспечить постоянную амплитуду импульса на выходе фотоприемника 2, то необходимо предусмотреть систему автоматической регулировки усиления 7 (рис.2.5). Далее через интерфейс приемника 9 сигнал поступает через коммутатор 12 на контроллер 13 сети Wi-Fi поезда. В обратном направлении информация поступает через блоки 13 и 12 и

интерфейс передатчика 8 на модулятор, где главным элементом является лазер 1 с длиной волны λ_2 и регулируемым источником питания, затем на оптическую систему 3, состоящую из коллиматорной оптики и системы автоматической подстройки оптической оси. Излучение лазера с длиной волны λ_2 поступает в фотоприемник 2 приемопередающего узла 10 через оптическую систему приемника 4, состоящую из оптического концентратора и полосового фильтра, далее - на интерфейс приемника 9 и маршрутизатор 14 сети ВОСП. Для резервирования оптического канала используется радиоканал, построенный с помощью стационарной 16 и локомотивной 15 радиостанций. При ухудшении условий распространения сигнала из-за повышения затухания в атмосфере требуется предусмотреть систему регулирования мощности лазеров и величины амплитуды импульсов 17 в приемнике узла 10 и приемнике активного узла 11. В блоке 17 осуществляются: 1) оценка уровня входного сигнала, расчеты величины среднего значения тока питания лазера и величины амплитуды импульса с помощью микроконтроллера; 2) формирование управляющих сигналов для регулировки мощности лазеров 1 узлов 10 и 11 передатчика через исполнительный элемент в источнике питания. Блок 17 включается в случае, если измеренный уровень сигнала в блоке 6 вышел за границы допустимых значений (рис.2.6).

На рис.2.7 представлена функциональная схема узлов БОКС, обеспечивающих работоспособность канала беспроводной оптической связи на железнодорожном транспорте.

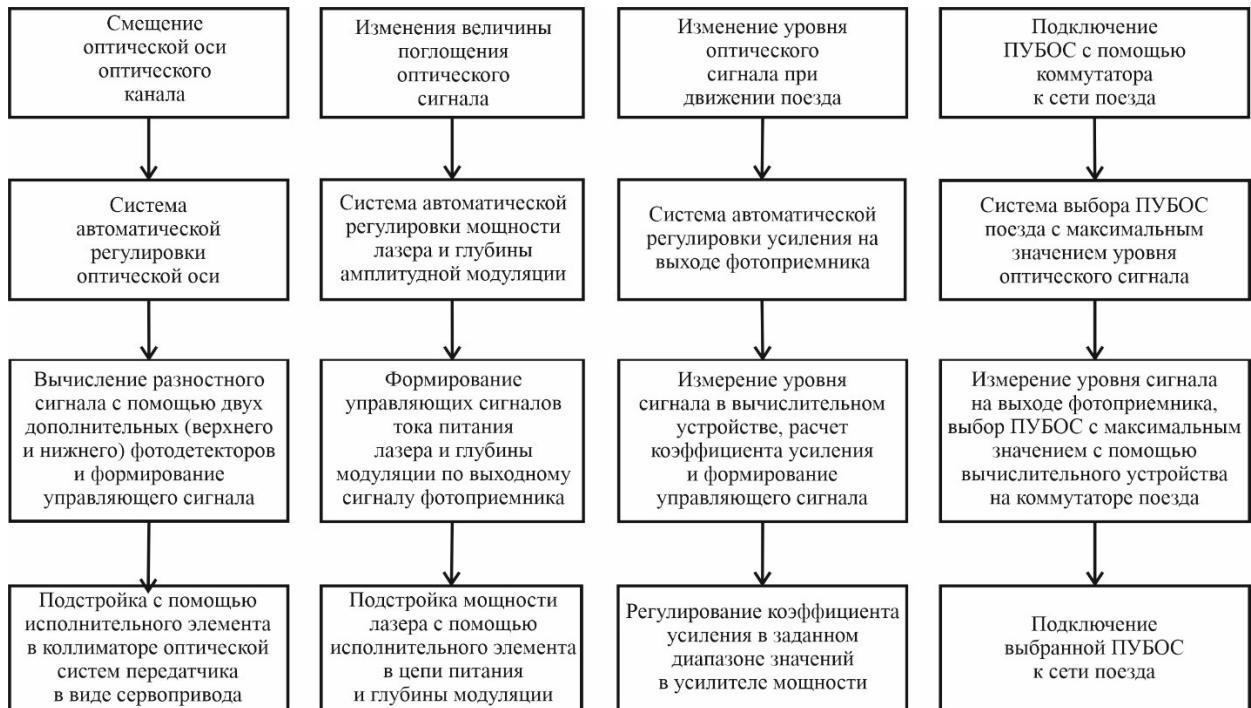


Рисунок 2.7 – Функциональная схема узлов БОКС

Предполагается, что устойчивое и надежное функционирование беспроводного оптического канала связи будут обеспечивать следующие системы, связывающие стационарный узел и подвижные узлы УБОКС (рис. 2.5):

1. Система автоматического регулирования оптической оси (АПОО) 3, исполнительным элементом в которой является сервопривод для изменения углового положения коллиматора. Смещение луча лазера происходит после прохождения пучка света по трассе (между узлами 10 и 11), который фиксируется верхним и нижним фотодетекторами. Разностный сигнал фотодетекторов корректирует угловое положение коллиматора СУБОКС и ПУБОКС [12,39-41].
2. Система автоматической регулировки усиления АРУ 7 в приемнике сигналов.
3. Система автоматического подключения с помощью блока 12 приемопередающего узла 11.
4. Система автоматического регулирования мощности лазера и глубины модуляции с помощью блока 17 (АРМЛ).

На рис.2.8 представлена структурная схема сети связи стационарных объектов с поездом, которая может быть использована для участков с длиной

перегона, превышающей протяженность (дальность действия) однопролетного канала БОКС (рис.2.5).

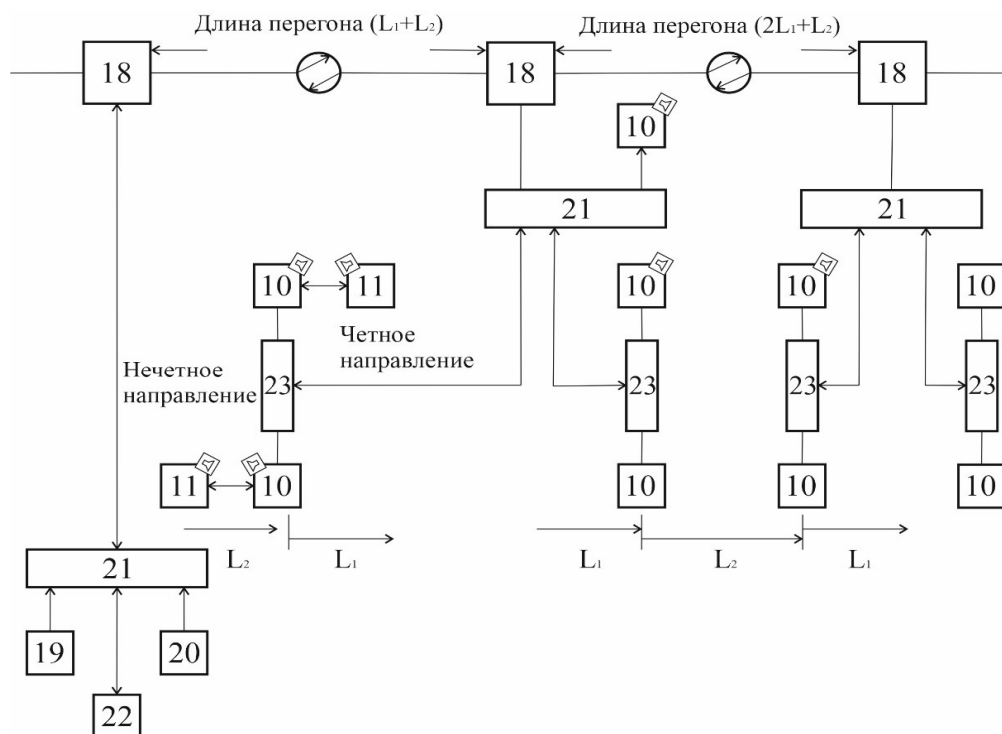


Рисунок 2.8 – Структурная схема сети связи стационарных объектов с поездом

- 18 – MUX;
- 19 – видеокамера;
- 20 – тепловизор;
- 21 – маршрутизатор
- 22 – пульт поездного диспетчера;
- 23 – разветвитель на опоре контактной сети.

Сеть связи организована с помощью оборудования ВОСП для участков с длиной перегонов не более $(2L_1+L_2)$, где L - протяженность однопролетного канала БОКС, рассчитанная с учетом расположения СУБОКС на опоре контактной сети, максимальное удаление которой от MUX ограничивается возможностями «витой пары» и дополнительного усилителя (не менее 100м). Длина перегона с помощью электрического кабеля и разветвителей на опорах контактной сети делится на три участка, с разной длиной L . Стационарный СУБОКС устанавливается на опоре

контактной сети на максимальном расстоянии от мультиплексора ВОСП на станции, и может с помощью оптического канала БОКС передавать и принимать высокоскоростные сигналы, связывая между собой, например, машиниста, диспетчера и др. При этом длина оптического однопролетного канала L выбирается в зависимости от мощности лазера и заданной дальности связи (от 100м и более). Так, на одной опоре рядом с MUX может быть установлен СУБОКС с дальностью канала БОКС L_1 , на другой опоре – дальностью L_2 , при этом ($L_2 > L_1$). На опорах контактной сети могут устанавливаться по паре СУБОКС с направленными (фокусированными) пучками света в противоположных направлениях (четное и нечетное направления движения поездов), которые работают на одной длине волны, не создавая помех друг другу.

На рис.2.9 представлена структурная схема двухуровневой сети с двухсторонним беспроводным оптическим каналом связи с поездом для случая, когда длина перегонов более ($2L_1 + L_2$).

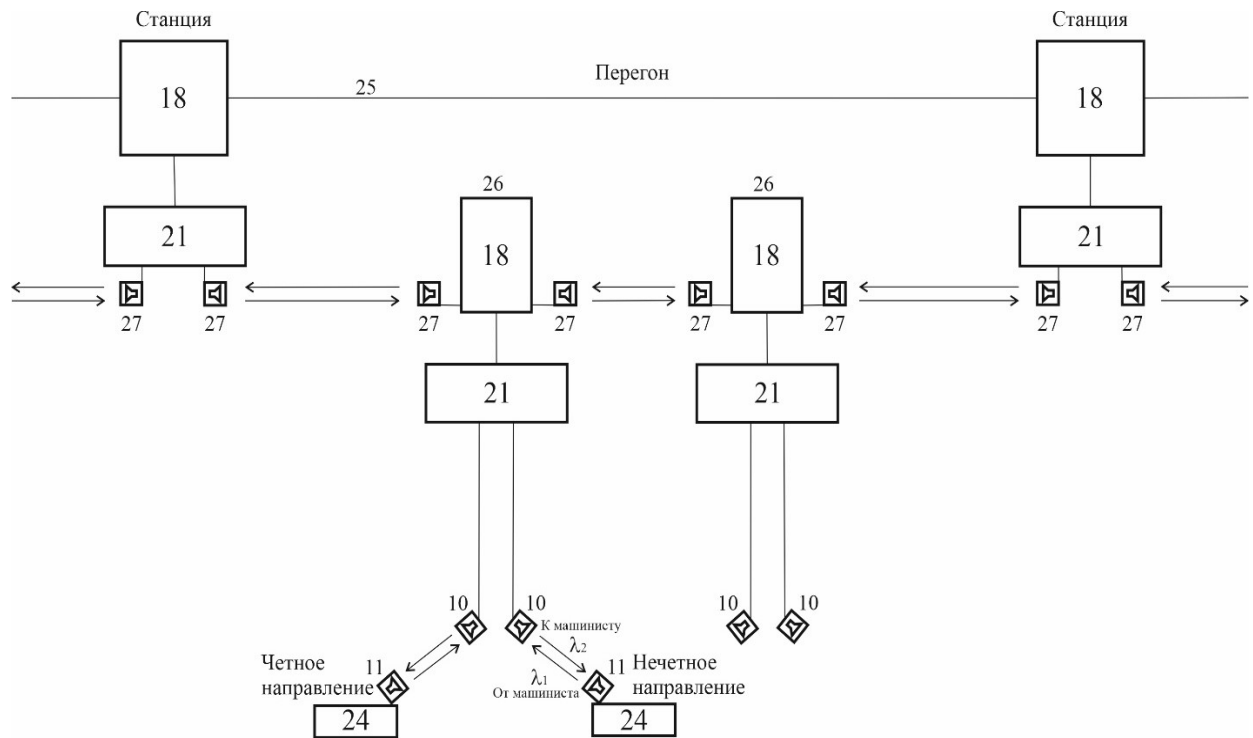


Рисунок 2.9 – Структурная схема двухуровневой сети с двухсторонним беспроводным оптическим каналом связи.

- 24 – подвижной состав;
- 25 – ВОЛС;
- 26- опора контактной сети;
- 27 – УБОКС для организации нижнего уровня сети.

Для решения задачи построения беспроводной оптической связи на перегонах большой протяженности (свыше 5 км), превышающей возможности БОКС (рис.2.5), предлагается создание нижнего уровня сети, состоящей из УБОКС (27) и MUX (18), разделяющих информационные потоки в разных направлениях, и работающих по принципу радиорелейной линии. Причем для организации дуплексной связи с поездом целесообразно использовать оборудование с двумя длинами волн λ_1 и λ_2 , в противном случае нужно устанавливать по два комплекта УБОКС. Рабочие длины волн выбираются, исходя из условий безопасности для пассажиров поезда в диапазоне выше 800НМ в окнах прозрачности инфракрасного диапазона [12].

Анализ работы разработанной системы двусторонней оптической беспроводной связи показал следующее (рис. 2.5):

1. Время прохождения сигнала в системе автоматической подстройки оптической оси (АПОО) между узлами 10 и 11, а также время срабатывания (быстродействие) исполнительного элемента в петле обратной связи блока 3 (сервопривода) должно быть меньше длительности элементарного импульса. Время на преодоление сигналом расстояния 25м (учитывающее высоту опоры контактной сети) со скоростью света между узлами 10 и 11 в петле обратной связи составит 162нс. При скорости передачи двухпозиционных сигналов 1Гбит/с длительность элементарного импульса составляет величину 1нс. С учетом инерционности исполнительного элемента можно сделать вывод: во время подстройки системы 3 возможны искажения элементарных импульсов в цифровом пакете.

2. Время срабатывания (быстродействие) элементов, входящих в систему автоматической регулировки усиления в приемнике УБОКС, должно быть значительно меньше длительности элементарного импульса (1нс). Так, время

срабатывания элементов в петле АРУ, реализованных с помощью наноэлектроники, не превысит 10пс [42], что позволит обеспечить своевременную подстройку уровня сигнала в приемнике.

3. Длительность переключения с одного подвижного ПУБОКС на другое, зависящее от быстродействия исполнительных элементов и тактовой частоты микропроцессора 12, должно быть: 1) значительно меньше времени активной работы подвижного ПУБОКС; 2) меньше длительности элементарного импульса. Если поезд движется со скоростью 120км/ч (33,3 м/с), то предполагаемое расстояние 25м (между узлами связи 11 на крыше вагона) поезд пройдет за 0,75с. Это значит, что каждые 0,75с потребуется переключать узлы 11 в движущемся поезде. Тактовая частота современных микропроцессоров имеет порядок 4ГГц (может быть и выше), что соответствует длительности переключения 0,25нс. Поэтому временные затраты на переключения блоков 11 соответствуют условиям первому и второму пунктам.

4. Длительность срабатывания устройств, входящих в петлю обратной связи регулирования мощности лазера, состоящего из времени прохождения оптического сигнала между узлами 11 и 10 и обратно, а также времени работы устройств 17 и исполнительного элемента в источнике питания лазера, должно быть меньше длительности элементарного импульса (1нс). Время на преодоление сигналом расстояния 25м (между СУБОКС и ПУБОКС) со скоростью света в петле обратной связи составит 162нс (см. пункт 1). Поэтому искажения элементарных импульсов в информационном пакете неизбежны во время подстроек системы при скорости передачи информации 1Гб/с и выше.

Таким образом, для оценки работоспособности системы оптической связи нужно определить эффективность систем АПОО и АРМЛ с помощью вероятностей ошибки $P_{ош}$ и потерь информационного пакета $P_{потерипакета}$ при совпадении времени передачи пакета с процессом подстройки оптической оси или мощности лазера.

Вероятности можно подсчитать с помощью математических ожиданий длительностей подстройки системы $M[t_{\text{подстройка}}]$ и отсутствия ее $M[t_{\text{отсутствиенподстройки}}]$ по причине турбулентности следующим образом [30]:

$$P_{\text{потеряпакета}} = P_{\text{подстройки}} \times P_{\text{пакета}}; \quad (2.6)$$

$$P_{\text{подстройки}} = \frac{M[t_{\text{подстройки}}]}{M[t_{\text{подстройки}}] + M[t_{\text{отсутствиенподстройки}}]}; \quad (2.7)$$

$$P_{\text{пакета}} = \frac{t_{\text{пакета}}}{t_{\text{пакета}} + t_{\text{паузы}}}, \quad (2.8)$$

где $M[t_{\text{подстройки}}] + M[t_{\text{отсутствиенподстройки}}] = M[T_{\text{период}}]$ - длительность периода турбулентности;

$P_{\text{подстройки}}$ - вероятность наличия периода подстройки системы;

$P_{\text{пакета}}$ - вероятность передачи информационного пакета;

$t_{\text{пакета}}$ - длительность информационного пакета;

$t_{\text{паузы}}$ - длительность паузы между пакетами;

$t_{\text{подстройки}}$ - длительность периода подстройки системы;

$t_{\text{отсутствиенподстройки}}$ - длительность периода отсутствия подстройки.

Длительность периода подстройки системы АРМЛ состоит из времени прохождения луча от подвижного ПУБОКС к стационарному и обратно, а также времени работы функциональных блоков 4,2,17,1,3 в узлах 10 и 11 (рис.2.5).

С учетом быстродействия современной элементной базы электроники (время срабатывания порядка 10пс) и количества функциональных блоков, период процесса подстройки может длиться порядка 167нс.

Для расчетов вероятностей потерь и ошибки требуется статистика метеорологических изменений. Известно, например, что периоды турбулентности в атмосфере делятся на медленные и быстрые [43].

Так, для быстрой турбулентности с периодом наступления 1мс и медленной с периодом 10с вероятности по формуле (2.7) соответственно будут равна:

$$P_{\text{подстройки}} = \frac{167 \cdot 10^{-9} \text{с}}{10^{-3} \text{с}} = 1,67 \cdot 10^{-4}; \quad (2.9) \text{ (быстрая турбулентность);}$$

$$P_{\text{подстройки}} = \frac{167 \cdot 10^{-9} \text{с}}{10 \text{с}} = 1,67 \cdot 10^{-8} \quad (2.10) \text{ (медленная турбулентность).}$$

Наиболее опасны частые изменения турбулентности. Вероятность ошибки разряда (элементарного импульса) можно определить по формуле [44]:

$$P_{\text{ош}} \approx P_{\text{ан}}/n, \quad (2.11)$$

где $P_{\text{ан}}$ - аномальная ошибка, что означает ошибка хотя бы в одном разряде пакета ($P_{\text{потеряпакета}}$), n - число разрядов.

Учитывая, что при передаче информации основное время занимают полезные сигналы (разряды пакетов), паузы между ними составляют меньше 10% от длительности пакета [28], то вероятность передачи пакета во время сеанса связи равна 0,88. Отсюда, вероятность потери пакета (2.6) имеет порядок $1,5 \cdot 10^{-4}$ для частых и $1,5 \cdot 10^{-8}$ для редких турбулентностей. Для гиперкадра, состоящего из нескольких сот бит, вероятность ошибки равна (2.11):

$$P_{\text{ош}} = (1,5 \cdot 10^{-4}/10^3) = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ (для быстрой турбулентности);}$$

$$P_{\text{ош}} = (1,5 \cdot 10^{-8}/10^3) = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ (для медленной турбулентности).}$$

Эти цифры характеризуют работу системы АРМЛ.

Для системы АПОО время подстройки может занять величину на порядок большую, чем в системе АРМЛ из-за большей инерционности исполнительного элемента (сервопривода). Однако период подстройки оптической оси (частота подстроек оптической оси), который включает (помимо длительности работы АПОО) временные промежутки, когда не происходят подстройки системы, может быть значительно большим, чем периодичность турбулентности. Поэтому вероятность совпадения процесса подстройки оптической оси и передачи информационных пакетов может оказаться меньше, чем для случая медленной турбулентности ($P_{\text{перестройки}} = 1,67 \cdot 10^{-8}$ (2.10)).

Полученные результаты в виде значений вероятностей ошибки свидетельствуют о том, что современная элементная база электроники позволяет реализовать системы двусторонней оптической беспроводной связи БОКС с движущимся поездом.

2.4 Влияние эффекта Доплера на качество связи в локальных сетях Wi-Fi поезда

Управление движением поездов и обеспечение безопасности на ж/д транспорте возможно только с применением беспроводных технологий (радиосвязи). От качества функционирования радиоканалов зависят выполнение графика движения поездов и показатели эффективности перевозочного процесса. Оценка качества радиосвязи включает в себя не только воздействия внешних помех от контактной сети, работающих двигателей и других источников шума, но и интерференционные искажения, возникающие за счет многолучевого характера распространения отраженных от препятствий сигналов, а также эффекта Доплера (ЭД). Оценка влияния ЭД на качество радиосвязи приобретает особое значение в условиях высокоскоростного движения поездов.

В настоящее время большинство радиосистем (например, в мобильной связи и Wi-Fi) ориентировано на использование сигналов с ортогональным частотным уплотнением (OFDM). В основе принципа ортогональности лежит функция корреляции, позволяющая выбрать систему ортогональных функций, обеспечивающих наилучшее качество передачи и оптимальный прием. При совпадении входного и опорного сигналов в канале приемника коэффициент корреляции равен максимальному значению, в противном случае он равен нулю. Такой способ формирования группового сигнала (мультиплексирования) позволяет повысить его спектральную плотность путем наложения спектров соседних поднесущих частот (смежные поднесущие не интерферируют). Нарушение условия ортогональности приводит к межчастотной интерференции. Одной из причин нарушения принципа ортогональности является изменение скорости движения объектов. Это приводит к появлению эффекта Доплера, в результате которого происходят доплеровский сдвиг поднесущих частот и искажения сигнала [45,46].

Таким образом, при использовании пассажирами поезда сети мобильной связи (МС) или Wi-Fi на качество сигнала окажет влияние скоростной режим движения.

Искажения сигнала в радиоканале за счет эффекта Доплера происходят из-за наступления паразитной частотной модуляции (ПЧМ). Это проявляется следующим образом:

1) потеря части мощности полезного сигнала, не прошедшей через усилитель (фильтр) промежуточной частоты УПЧ приемника при сдвиге несущей частоты f_0 на величину паразитной девиации f_δ (динамическая составляющая погрешности), причем увеличение f_0 происходит, например, в случае приближения приемника МС или Wi-Fi к базовой станции (БС), уменьшение f_0 - в случае отдаления от БС;

2) попадания спектров соседних каналов в полосу УПЧ (помеховая составляющая погрешности).

Искажения можно оценить с помощью приведенной дисперсии суммарной погрешности σ_ε^2 , которая состоит из двух составляющих (динамической $\sigma_{дин}^2$ и помеховой $\sigma_{ном}^2$). При условии прямоугольной формы нормированной спектральной плотности мощности огибающей радиоимпульса $S_\lambda(\omega)$, имеющей косинусоидальную форму зависимости амплитуды от времени [48], и идеального УПЧ можно записать ($\sigma_{дин}^2 = \sigma_{ном}^2$) (рис. 2.10):

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_{дин}^2 + \sigma_{ном}^2 = 2\sigma_{ЭД}^2.$$

Отсюда, приведенная дисперсия погрешности от действия ЭД (отношение мощности шума к мощности полезного сигнала) будет иметь вид:

$$\delta_{\varepsilon ЭД}^2 = \frac{2\sigma_{ЭД}^2}{\sigma_{ЧМ}^2}, \quad (2.12)$$

где $\sigma_{ЧМ}^2$ - дисперсия (мощность) частотно-модулированного сигнала (радиоимпульсов с длительностью $\tau_{имп}$).

Формула (2.12) верна для обоих случаев: сближения приемника с БС (частота повышается) или удаления его от БС (частота понижается).

Для принятых выше условий (рис.2.10) можно записать выражение дисперсии $\sigma_{ЭД}^2$ [44]:

$$\sigma_{ЭД}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 + (\Delta\omega_{эф})/2}^{\omega_0 + [(\Delta\omega_{эф})/2] + \Delta\omega_{ПЧМ}} S_\lambda(\omega) d\omega,$$

$$\text{где} \quad \Delta\omega_{\text{эф}} = 2\pi\{2\Delta F_{\lambda}(M_{\text{ЧМ}}+1)\} \quad (2.12a)$$

- эффективная полоса частот сигнала с частотной модуляцией ЧМ-сигнала (эффективная полоса УПЧ);

$\Delta F_{\lambda} \cong \frac{1}{\tau_{\text{имп}}}$ - полоса частот первичного сигнала (эффективная полоса частот импульса);

$M_{\text{ЧМ}}$ - индекс частотной модуляции;

$$\Delta\omega_{\text{ПЧМ}} = 2\pi\{2M[f_{\text{ПЧМ}}](M_{\text{ПЧМ}}+1)\} \quad (2.12b)$$

- эффективная полоса частот паразитной частотной модуляции (ПЧМ) из-за частоты $f_{\text{д}}$, возникающей за счет ЭД;

$M[f_{\text{ПЧМ}}]$ - среднее значение модулирующей частоты $f_{\text{ПЧМ}}$ паразитной ЧМ от действия ЭД (рис. 2.10) с индексом модуляции $M_{\text{ПЧМ}}$;

ω_0 - несущая круговая частота сигнала;

$S_{\lambda}(\omega) = \frac{A_{\lambda}}{2\pi}$ - спектральная плотность мощности сигнала [48].

Отсюда, значения дисперсий $\sigma_{\text{ЭД}}^2$, $\sigma_{\text{ЧМ}}^2$ и приведенной суммарной погрешности $\delta_{\varepsilon\text{ЭД}}^2$ равны:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ЭД}}^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 + (\Delta\omega_{\text{эф}})/2}^{\omega_0 + [(\Delta\omega_{\text{эф}})/2] + \Delta\omega_{\text{ПЧМ}}} (A_{\lambda}/2\pi) d\omega = (A_{\lambda}/(2\pi))^2 \cdot \Delta\omega_{\text{ПЧМ}} \\ \sigma_{\text{ЧМ}}^2 &= 2 \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0}^{\omega_0 + (\Delta\omega_{\text{эф}})/2} (A_{\lambda}/2\pi) d\omega \right] = (A_{\lambda}/(2\pi))^2 \cdot \Delta\omega_{\text{эф}}, \\ \delta_{\varepsilon\text{ЭД}}^2 &= 2(\Delta\omega_{\text{ПЧМ}}/\Delta\omega_{\text{эф}}) = 2(\Delta f_{\text{ПЧМ}}/\Delta f_{\text{УПЧ}}), \end{aligned} \quad (2.13)$$

где $\Delta f_{\text{эф}} = \Delta f_{\text{УПЧ}}$ - эффективная ширина полосы частот УПЧ.

Расчет дисперсии погрешности от действия ЭД и ее составляющих
(динамической и помеховой)

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_{\text{дин}}^2 + \sigma_{\text{пом}}^2$$

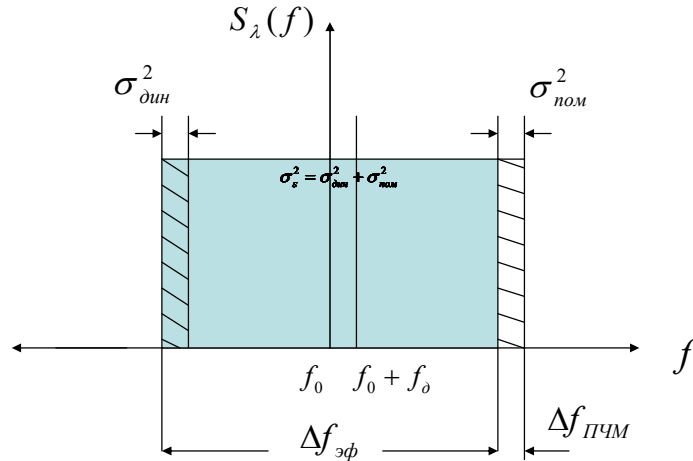


Рисунок 2.10 – К расчету суммарной дисперсии погрешности от действия эффекта Доплера

Таким образом, для расчета искажений (погрешности) от действия ЭД необходимо определить величину эффективной полосы частот ПЧМ $\Delta f_{\text{ПЧМ}}$. Для этого требуется рассчитать математическое ожидание случайной величины f_d и индекс ПЧМ $M_{\text{ПЧМ}} = \frac{M[f_{\text{ПЧМ}}]}{M[f_d]}$.

Девiation частоты f_d за счет действия эффекта Доплера можно оценить следующим образом.

Вследствие паразитной частотной модуляции из-за действия ЭД (доплеровского рассеивания частоты) несущая частота f_0 сдвигается на величину $\pm f_d$. Случайная величина f_d изменяется во времени (зависит от частоты f_0 , условий распространения сигнала, в том числе рельефа трассы и отражающих поверхностей, параметров перемещения подвижного объекта сетей МС или Wi-Fi) [46].

Как отмечалось выше, эффект Доплера приводит к тому, что спектр полезного сигнала случайным образом «перемещается» по оси частот. При этом

часть полезной информации теряется (не проходит через полосу УПЧ). В то же время в полосу УПЧ попадают посторонние сигналы, которые являются помехой.

Частоту девиации f_d можно представить в виде произведения коэффициента κ (учитывающего условия распространения радиосигнала), скорости движения объекта v , несущей частоты f_0 , $\cos \alpha$ (α - угол между расположением передатчика и направлением распространения сигнала), скорости света C . Величину частоты девиации f_d можно представить следующим образом [46]:

$$f_d = \kappa \cdot v \cdot f_0 \cdot \cos \alpha / C,$$

Для условий железнодорожного транспорта, где все объекты расположены вдоль железнодорожного полотна, угол α между приемником (установленным на СБС или ПБС в поезде) и передатчиком (мобильного телефона или БС) приближается к нулю (что соответствует наихудшему случаю, т.е. наибольшему влиянию ЭД). Отсюда, можно преобразовать выражение для частоты девиации так:

$$f_d = \frac{\kappa f_0}{C} v, \quad (2.14)$$

где v - скорость движения объекта (является функцией от случайных величин: ускорения a и времени движения объекта t в режиме замедления или ускорения (рис. 2.10) .

Для расчета ширины полосы ПЧМ и индекса паразитной частотной модуляции необходимы оценки $M[f_d]$ и $M[f_{ПЧМ}]$, которые определяются средней скоростью движения поезда v_0 и средним временем смены скоростных режимов поезда t_d .

Тогда, согласно формуле (2.14) величины $M[f_d]$ и $M[f_{ПЧМ}]$ соответственно равны:

$$M[f_d] = \frac{f_0}{C} v_0 = \frac{f_0}{C} M[(\pm a \cdot t_d)], \quad (2.15)$$

где $\kappa = 1$,

$v_0 = M[(\pm a \cdot t_d)]$ - среднее значение скорости поезда при неравномерном движении.

$$M[f_{ПЧМ}] = M\left[\frac{1}{T_d}\right],$$

где $T_{\delta} = 2 \cdot t_{\delta}$ (2.16)

- период изменения скорости движения (по аналогии с синусоидальной зависимостью на рис. 2.11).

Величина v_0 - это произведение двух независимых случайных величин, а именно: ускорения a и времени t_{δ} . Отсюда, математическое ожидание произведения случайных величин (a и t_{δ}) есть произведение их математических ожиданий [30], т.е.

$$v_0 = M[a] \cdot M[t_{\delta}].$$

Для равновероятных законов распределения плотности вероятностей случайных величин $\phi(a) = \frac{1}{A}$ и $\psi(t_{\delta}) = \frac{1}{T^*}$, где A, T^* - соответственно предельные значения ускорения a и времени t_{δ} (начиная с нуля), после операции усреднения получим $M[a]$ и $M[t_{\delta}]$:

$$M[a] = \frac{A}{2}, \quad M[t_{\delta}] = \frac{T^*}{2}.$$

Среднее значение частоты изменения скоростных режимов (2.15) равна:

$$M[f_{ПЧМ}] = \frac{1}{T^*}. \quad (2.17)$$

Пример: если $A = 2м/с^2, T^* = 60с, v_0 = 108км/час = 30м/с, f_0 = 2,4ГГц$, то на основании формул (2.15), (2.16), (2.17) получим:

$$M[f_{\delta}] = \frac{2,4 \cdot 10^9 Гц \cdot 30 м/с}{3 \cdot 10^8 м/с} = 240 Гц; \quad M[f_{ПЧМ}] = \frac{1}{60с} = 0,0167 Гц; \quad \Delta f_{ПЧМ} \cong 2 \cdot$$

$$M[f_{\delta}] = 480 Гц.$$

Рассчитанное значение $M[f_{\delta}]$ согласно опубликованным данным [45-47] окажет негативное влияние на качество связи.

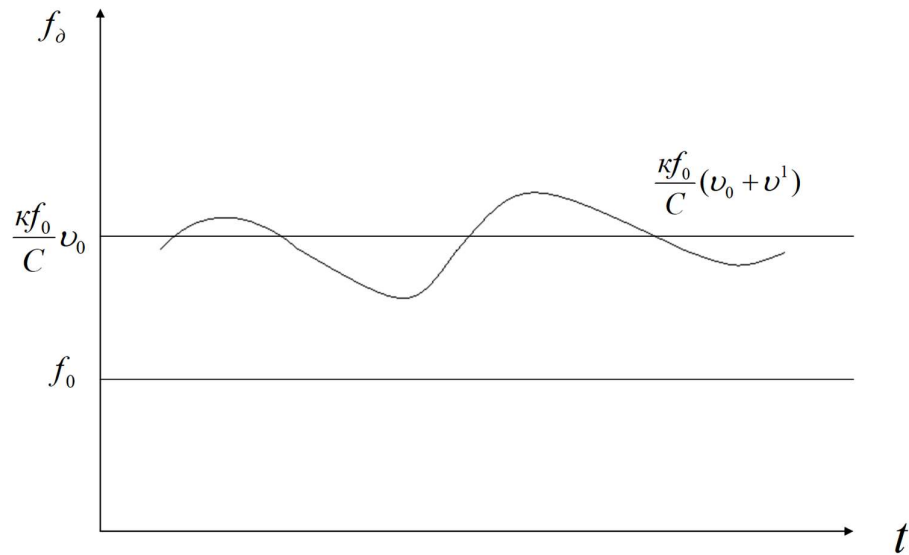


Рисунок 2.11 – График изменения девиации частоты f_d (для случая неравномерного движения объекта) по синусоидальному закону с частотой $M[f_{ПЧМ}]$

Таким образом, величина погрешности (искажений полезного сигнала) от действия ЭД $\delta_{\varepsilon ЭД}^2$ для полосы $\Delta f_{УПЧ} = 2 \cdot 10^9 \cdot 1,3 = 2,6 \cdot 10^9$ Гц (рассчитанной по формуле (2.12а), где $\Delta F_\lambda = 10^9$ Гц, $M = 0,3$ [28]), согласно формуле (2.13) равна:

$$\delta_{\varepsilon ЭД}^2 = \frac{2 \cdot 480 \text{ Гц}}{2,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}} = 369,23 \cdot 10^{-9} \cong 0,37 \cdot 10^{-7}.$$

Величина погрешности $\delta_{\varepsilon ЭД}^2$ соизмерима с действием внешних помех и других источников искажений [44]. Как показали расчеты [46,47], эффект Доплера становится заметным при скорости движения поезда свыше 100 км/ч.

Для уменьшения искажения за счет действия ЭД в приемниках предусматривается установка систем автоматической подстройки частоты (АПЧ) несущего сигнала.

Эффективность системы автоматической подстройки частоты можно оценить в результате следующего анализа.

Система автоматической подстройки частоты устанавливается в усилителе промежуточной частоты (УПЧ). Как отмечено выше, система АПЧ отслеживает изменения несущей частоты f_0 и производит ее подстройку.

В основе оценки эффективности лежит сравнение величины приведенной дисперсии суммарной погрешности от действия ЭД с использованием АПЧ $\delta_{\varepsilon_{АПЧ}}^2$ и без системы АПЧ $\delta_{\varepsilon_{ЭД}}^2$.

Анализ приведенной суммарной дисперсии погрешности $\delta_{\varepsilon_{ЭД}}^2$ и соответствующие расчетные формулы рассмотрены выше.

Для анализа влияния эффекта Доплера на работу АПЧ нужно представить ЭД как паразитную частотную модуляцию, модулирующую полезный сигнал по закону изменения скорости движения поезда. Поэтому нужно оценить ширину полосы частот ПЧМ $\Delta f_{ПЧМ}$ по формуле (2.126) [44,48].

Величина $\Delta f_{ПЧМ}$ показывает возможный диапазон изменений частоты f_0 (рис.2.12). Наряду с полосой $\Delta f_{ПЧМ}$ целесообразно ввести понятие мгновенного спектра $\Delta f_{мгн}$ [47], который характеризует динамику изменения частоты f_0 .

Цель системы АПЧ – отслеживать изменения несущей частоты f_0 в полосе мгновенного спектра $\Delta f_{мгн} = 2 \cdot M[\Delta f_{ПЧМ}]$ паразитной частотной модуляции.

Принцип работы АПЧ можно описать следующим образом. Управляющий сигнал $\lambda(t)$ с выхода частотного детектора (рис. 2.12) поступает на управляющий элемент, например, варикап в нагрузке гетеродина или частотно-модулируемого генератора (ЧМГ) и изменяет частоту выходного синусоидального сигнала ЧМГ в соответствии с изменениями, происходящими по причине ЭД.

Погрешность $\delta_{\varepsilon_{АПЧ}}^2$ от действия ЭД при использовании системы АПЧ будет определяться величиной $\Delta f_{мгн}$ (полосой удержания) [47]. Главным элементом в системе АПЧ является управляющий элемент (управитель), а именно: полупроводниковый диод, у которого барьерная емкость $p - n$ перехода зависит от приложенного обратного напряжения. От быстродействия этого элемента (скорости изменения емкости закрытого перехода варикапа от приложенного к нему запирающего напряжения $\lambda(t)$) зависит эффективность работы АПЧ.

Таким образом, эффективность системы АПЧ определяется скоростью отслеживания изменений амплитуды управляющего сигнала, зависящей от

величин ускорения a и частоты смены скоростных режимов (или продолжительности t_∂). Быстродействие управляющего элемента определяется электронными характеристиками материала (например, эффективной массой электрона, чистотой исходного химического элемента, размерами полупроводникового кристалла) [49].

Значение эффективной полосы частот сигнала, равное $\Delta f_{УПЧ}$, рассчитывается по формуле (2.12а), приведенной выше.

Величину приведенной дисперсии суммарной погрешности от действия ЭД по аналогии с выражениями (2.12),(2.13) для приемников с системой АПЧ (рис.2.12) можно определить следующим образом:

$$\delta_{\varepsilon АПЧ}^2 = \frac{2 \cdot \Delta f_{мгн}}{\Delta f_{УПЧ}}. \quad (2.18)$$

Так, на основании уже принятых выше значений $M[f_{ПЧМ}] = \frac{1}{60} = 0,0167\text{Гц}$ и $\Delta f_{УПЧ} = 2 \cdot 10^9 \cdot 1,3 = 2,6 \cdot 10^9\text{Гц}$ можно оценить ширину мгновенного спектра $\Delta f_{мгн}$ и приведенную дисперсию суммарной погрешности $\delta_{\varepsilon АПЧ}^2$.

Для расчетов примем $\Delta f_{мгн} = 2 \cdot (1/60\text{с})$, что означает изменение режимов движения в среднем через 60с.

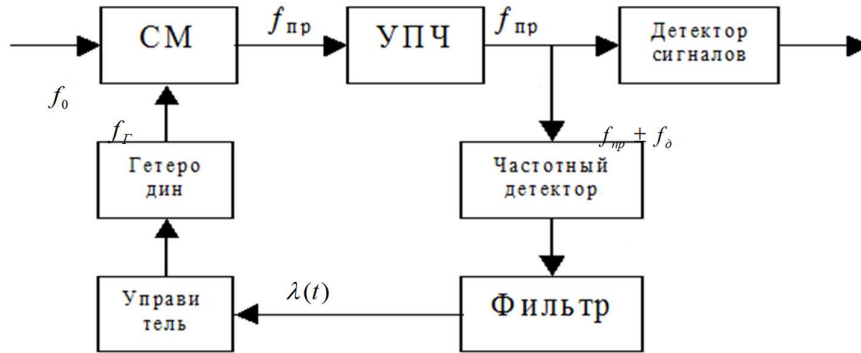
Отсюда, значение погрешности $\delta_{\varepsilon АПЧ}^2$ с учетом действия системы АПЧ равно:

$$\delta_{\varepsilon АПЧ}^2 = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,0167}{2,6 \cdot 10^9} = 0,257 \cdot 10^{-10}.$$

Величина приведенной дисперсии суммарной погрешности без системы АПЧ (рассчитанная в предыдущем параграфе) равна $\delta_{\varepsilon ЭД}^2 \cong 0,37 \cdot 10^{-7}$.

Отсюда, система АПЧ позволяет уменьшить погрешность от действия ЭД на три порядка.

Сравнение этих двух цифр показывает эффективность использования системы АПЧ.



СМ – смеситель;
 УПЧ – усилитель промежуточной частоты;
 $f_Г$ – частота гетеродина (ЧМГ);
 $f_пр$ – частота на выходе смесителя
 (промежуточная частота).

Рисунок 2.12 – Схема автоподстройки частоты

Главное в реализации системы АПЧ – установление и поддержание режима захвата полосы частот $\Delta f_{мгн}$ и обеспечение удержания этой полосы, что во многом зависит от быстродействия элементной базы системы АПЧ, т.е. использования полупроводниковых материалов нового поколения [49]. Кроме того, в современные системы АПЧ включают устройства прогнозирования, построенные на основе учета статистических характеристик немарковских случайных процессов и теории дискретных представлений (конечных разностей свыше шестого порядка) [47]. Они позволяют адаптивно отслеживать изменения мгновенного спектра и повышать эффективность АПЧ.

2.5 Выводы по главе

1. Система мониторинга на основе беспроводных технологий позволяет организовать обмен информацией между поездом, РБЦ и ДЦУ, а также между сдвоенными поездами, реализовать проекты «автомашинист» (беспилотные технологии), «виртуальная сцепка», повысить скорость и безопасность движения поездов, пропускную способность железных дорог.

2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что современный уровень техники позволяет реализовать технический мониторинг вагонов с помощью сенсорных сетей.

3. Сеть мониторинга на базе технологий БОКС, ВОСП и Wi-Fi позволяет создать устойчивые и надежные, адаптированные к условиям эксплуатации на ж/д транспорте, высокоскоростные каналы, требуемые для соединения мобильных устройств пассажиров, машинистов и членов поездной бригады подвижного состава с коммутаторами сетей оперативно-технологической, мобильной, спутниковой связи.

4. Эффект Доплера оказывает негативное влияние на качество связи при скоростях движения поезда более 100км/час. Разработанная методика оценки влияния на качество связи и расчеты показали, что значение приведенной дисперсии суммарной погрешности от действия ЭД по величине соизмеримо с действием внешних помех. Для борьбы с ЭД и его влиянием на величину вероятности ошибки за счет снижения отношения с/ш на входе приемника необходимо использование системы автоматической автоподстройки частоты АПЧ, построенной на основе прогнозирования изменений ширины и сдвига полосы частот полезного сигнала и использования элементной базы наноэлектроники.

5. Эффект Доплера влияет на качество канала Wi-Fi, на продолжительность процесса переключений базовых станций (хэндовера) в локальных сетях поезда, прежде все, ухудшая доступность канала Wi-Fi, что необходимо учитывать для реализации проектов высокоскоростного движения.

6. Время переключения (режим «мягкого хэндовера») зависит от скорости передачи информации (для временной и частотной синхронизации), быстродействия элементной базы электроники (переключений коммутаторов в вагонах поезда), а также эффективности борьбы с ЭД.

7. Чем выше стандарт мобильной связи, тем выше скорость передачи информации и диапазон частот, тем жёстче требования к быстродействию системных блоков, контроллеров, коммутаторов доступа локальных сетей Wi-Fi поезда.

8. В условиях высокоскоростного движения свыше 360км/ч (100м/с) с учетом влияния эффекта Доплера передача данных в сетях мониторинга (в том числе кабину машиниста поезда) должна осуществляться со скоростью $V=3ГГ$ бит/с (5G) и выше для обеспечения своевременной доставки информации. С учетом времени распространения сигнала от СБС до ПБС и длительностью цифровых пакетов (1000 x 0,33)нс (для указанной выше скорости передачи информации) поезд проедет расстояние порядка 1см. В противном случае ситуация может оказаться критической для обеспечения безопасности движения поездов.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ WI-FI

3.1 Разработка методики оценки статистических характеристик параметров эффективности технологии Wi-Fi

Оценка эффективности беспроводной технологии необходима для получения ответа о соответствии ее требованиям, предъявляемым к системе технического мониторинга подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта. В главе 3 такая задача решается для технологии Wi-Fi (как наиболее востребованной в настоящее время на ж/д транспорте). Для этого предложены критерии эффективности (глава 1) (доступность, оперативность и качество канала Wi-Fi) и параметры для их оценки (коэффициент доступности, время задержки передачи информации, вероятность ошибки). Ответ на поставленный выше вопрос о возможностях технологии Wi-Fi требует разработки методик расчета параметров эффективности на основании собранного экспериментального материала. Рассчитанные величины параметров необходимо затем сравнить с допустимыми значениями и на основании сравнения сделать выводы о пригодности беспроводной технологии для технического мониторинга. Если для коэффициента доступности канала Wi-Fi в качестве допустимой величины можно принять цифру 0,999 (согласно рекомендации [14]), то допустимые значения для временных задержек и вероятности ошибки необходимо отдельно рассчитать, исходя из цели и объекта мониторинга. Поэтому для оценки возможностей беспроводной технологии дополнительно требуется разработка методик оценки допустимых значений параметров эффективности Wi-Fi.

Методики расчета параметров эффективности беспроводной технологии могут иметь аналитический характер с учетом уже известных (априорных) законов распределения плотности вероятностей (глава 4) или основываться на результатах обработки новых экспериментальных данных, т.е. рассчитанных апостериорных вероятностях (например, влияния помех на качество функционирования канала Wi-Fi, глава 3). В главе 3 представлен анализ статистических характеристик,

полученных после обработки экспериментального материала работы каналов Wi-Fi метрополитена. По своим характеристикам (влияющим на распространение радиосигнала) исследуемые участки трассы (открытые и тоннели) схожи по условиям работы с ж/д транспортом.

Под каналом Wi-Fi, исследуемым в главе 3, подразумевается линия связи (канал радиосвязи) между стационарными базовыми станциями (СБС), установленными вдоль пути, и поездными базовыми станциями (ПБС) в голове и хвосте электропоезда. В канал Wi-Fi входят также демодулятор (ДМ) и декодер (ДК) приемника базовой станции, на входе которого производились измерения параметров сигнала (рис.3.1). На примере мониторинга нерегулируемых переездов с помощью системы интеллектуального видеонаблюдения (СИБ) можно оценить влияние замираний огибающей несущего сигнала на качество, доступность и оперативность канала Wi-Fi. Для оценки требуемых значений доступности (коэффициента доступности K_d), оперативности (среднего времени задержки t_3), качества связи (вероятности ошибки $P_{ош}$) предполагается, что информация на выходе ПБС поступает на вход устройства распознавания опасного объекта СИБ в поезде (рис.3.1) [49-51]. На основании рассчитанных значений вероятностей ложного $P_{лож/обн}$ и правильного обнаружения $P_{прав/обн}$, требуемых для обеспечения безопасности движения на ж/д транспорте [50,52], можно дать оценку, прежде всего допустимой величины $P_{ош}$. Для этого нужно найти символическое значение сигнал/шум $\alpha_{сим}^2$ на входе устройства обнаружения (распознавания) СИБ, которое обеспечит необходимые вероятности $P_{лож/обн}$ и $P_{прав/обн}$ (параграф 4.5). Символическое $\alpha_{сим}^2$ соответствует отношению с/ш (величине $P_{ош}$) на выходе приемника ПБС. На выходе демодулятора ДМ выделяются информационные пакеты (цифровые кадры) из символов в виде огибающих импульсов, поступающих на декодер ДК. С помощью блочного и сверточного кодирования декодер обеспечивает исправление ошибок, возникающих за счет замираний несущей, и повышает качество связи. Поэтому значение параметра $\alpha_{сим}^2$ нужно корректировать с учетом работы ДК.

В представленной работе основное внимание уделено анализу влияния медленных замираний (м/з) и быстрых замираний (б/з) сигнала на работу модемов базовых станций (БС). Формат работы модемов адаптивно изменяется (тип модуляции, позиционность кода a , скорость кодирования, защитный временной интервал) для уменьшения вероятности ошибки. При этом сохранение заданного качества связи происходит в ущерб скорости передачи информации.

Как отмечено выше, особенности распространения сигналов дециметрового диапазона технологии Wi-Fi в условиях движения поезда приводят к изменениям уровня полезного сигнала на входе приемника БС в результате наложения и интерференции отраженных волн (синусоидальных помех). Возникают явления медленных замираний (м/з) и быстрых замираний (б/з) огибающей несущего сигнала, с которыми связаны провалы отношения мощностей сигнала и шума (с/ш) и ухудшение качества связи. Для борьбы с этими явлениями периодически происходят переключения СБС и ПБС (хэндовер), а также имеют место флуктуации и провалы канальной скорости (к/с) за счет коррекции работы модема согласно алгоритму базовых станций БС. Изменяются следующие параметры: позиционность кода a (от 4 до 1024) и тип модуляции (BPSK, QPSK, QAM), скорость кодирования (от 1/2 до 5/6), величина защитного интервала или циклического префикса $\tau_{u/pr}$ от 400пс до 800пс, числа пространственных потоков от 1 до 4. Обзор стандартов Wi-Fi с указанием основных параметров приведен в приложении 1. В анализируемых экспериментальных данных, снятых на входе ПБС, использовался вариант технологии Wi-Fi с позиционностью кода не выше 64 и одним пространственным потоком. Адаптивные изменения формата модуляции базовых станций СБС на основании данных о значении с/ш, поступающих от ПБС, приводят к резким провалам канальной скорости к/с и относительно продолжительным флуктуациям к/с в пределах от максимального значения до минимального (от 650Мбит/с до 50Мбит/с и ниже). Последствия хэндовера, флуктуаций и резких провалов к/с непосредственно сказываются на показателях эффективности технологии Wi-Fi. Так, имеет место снижение коэффициента доступа K_D из-за хэндовера, повышение временной задержки t_3 передачи данных

из-за флуктуаций к/с, ухудшение качества связи из-за резких провалов к/с (практически до нуля), которые воспринимаются приемником как аномальная ошибка $P_{ан}$ [51-61]. На рис.3.1 приведена схема, поясняющая алгоритм расчета качества канала Wi-Fi.

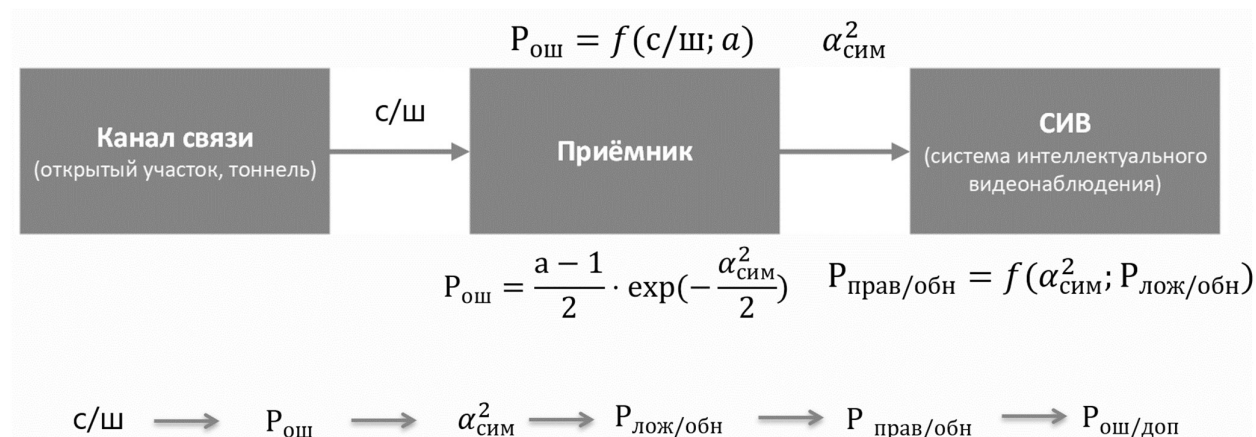


Рисунок 3.1 – Расчетная схема оценки качества канала Wi-Fi

Так, влияние синусоидальных помех на входе приемника (ДМ), снижающих эффективность канала Wi-Fi, анализируется через искажения несущего сигнала. Последствия искажений измеряются отношением мощностей с/ш: а) для медленных замираний через $\alpha_{м/з}^2$ (под шумом подразумевается внутренний шум, определяющий порог чувствительности приемника); б) для быстрых замираний через $\alpha_{б/з}^2$ (под шумом подразумеваются искажения огибающей, носящие случайный характер). Как отмечено выше, резкие изменения огибающей (выбросы и провалы из-за б/з) по причине интерференции отраженных сигналов повторяются в виде выбросов, провалов и флуктуаций к/с из-за движения поезда и зависят от скорости. Эти явления в свою очередь, приводят к аномальным ошибкам и временным задержкам передачи информации.

Таким образом, для разработки методик оценки параметров эффективности технологии Wi-Fi (доступности, оперативности и качества) требуются исследования статистических характеристик по частоте и длительности процесса

хэндовера, флуктуаций и провалов к/с на основании собранного экспериментального материала [54,55].

3.2 Описание эксперимента для оценки параметров эффективности функционирования сети Wi-Fi поезда

В работе представлен анализ статистических характеристик канала сети Wi-Fi на метрополитене, полученных в результате эксперимента, проведенного при поддержке компании «Максима Телеком» [53-62].

На рис.3.2а,б представлена схема организации сети Wi-Fi в электропоезде метро, которая состоит из двух поездных (мобильных) базовых станций (ПБС) в головном и хвостовом вагонах, маршрутизаторов и контроллеров, управляющих работой сети поезда, а также коммутаторов и точек доступа в каждом вагоне. Локальная сеть Wi-Fi поезда связывается с коммутатором ядра системы Wi-Fi метрополитена с помощью стационарных базовых станций (СБС) в тоннелях и на открытых участках.

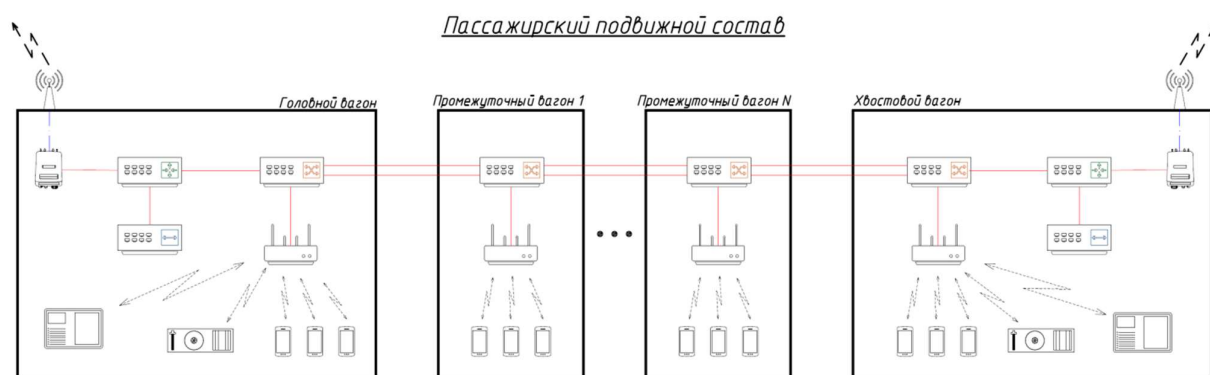


Рисунок 3.2а – Схема локальной сети Wi-Fi поезда метрополитена

Условные обозначения	
	Маршрутизатор
	Компьютер
	Антенна
	Базовая станция
	Контроллер
	Точка доступа
	Смартфон
	Датчики
	Устройство вывода информации
	Кабель FTP
	Кабель PC
	Канал Wi-Fi

Рисунок 3.2б – Условные обозначения схемы локальной сети Wi-Fi поезда метрополитена

В результате эксперимента получены следующие характеристики канала Wi-Fi между СБС и ПБС для скорости поезда не более 50км/ч (рис.3.3, рис.3.4, рис.3.5, приложение 2):

1) характеристика комплексного параметра модуляции и кодирования (TxMCS), изменяющегося в пределах от 7 до 1 и означающего степень сжатия (зависящей от варианта сочетания типа модуляции, скорости кодирования и величины циклического префикса в четырех пространственных потоках стандарта IEEE 802.11ax [3,59,60]);

2) характеристики показателя уровня принимаемых сигналов (RSSI) и отношения с/ш (SNR), вычисляемого как: $SNR = -RSSI - (-95\text{дБ})$ (порог чувствительности приемника ПБС);

3) моменты осуществления хэндовера (переключения) ПБС в локальной сети поезда (HO_CUrrM);

4)) моменты осуществления хэндовера (переключения) СБС (HO_CUrrAP);

5) канальная скорость к/с канала Wi-Fi между ПБС и СБС (TxRate).

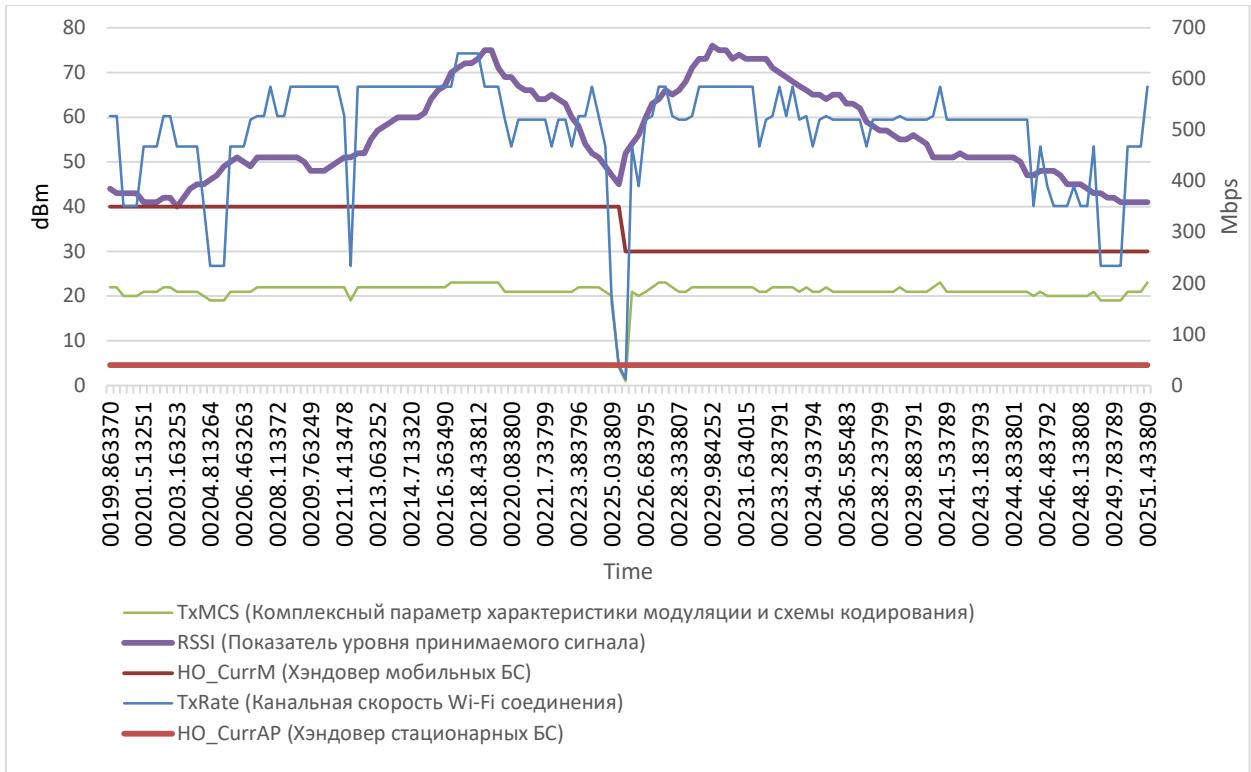


Рисунок 3.3 – Провалы к/с канала Wi-Fi в тоннеле метро в результате хэндовера

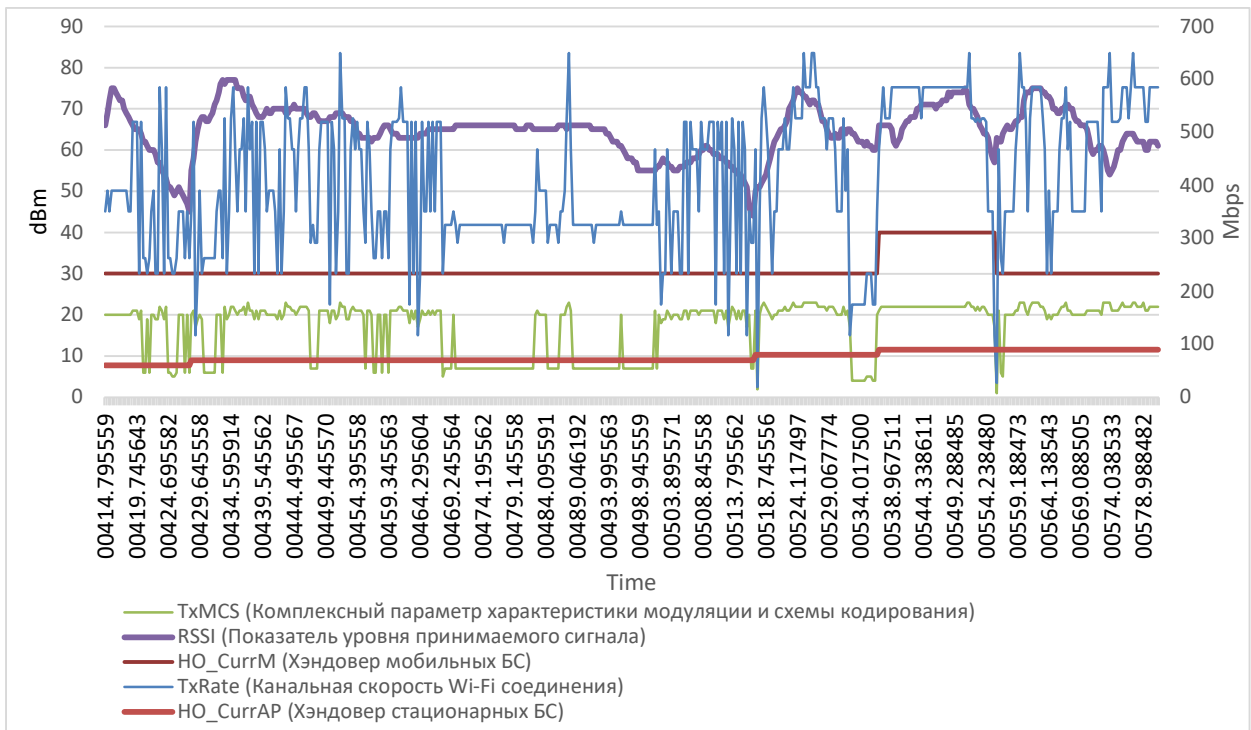


Рисунок 3.4 – Флуктуации к/с канала Wi-Fi поезда метро в результате м/з и б/з

Как видно из рис.3.3, 3.4 изменения уровня сигнала имеют вид медленных замираний (м/з) несущей, на которые накладываются быстрые замирания (б/з), имеющие вид выбросов и провалов с разбросами уровня сигнала в пределах ± 10 дБ. Быстрые замирания являются результатом интерференции прямого и отраженных лучей от стенок тоннеля или ограждений пути на открытых участках перегонов.

Медленные замирания вызваны периодическим изменением уровня сигнала (носящего случайный характер) при удалении поезда от одной СБС и приближении к другой СБС с последующим переключением ПБС (хэндовером). Хэндовер повторяется каждый раз, когда находится базовая станция (СБС или ПБС) с лучшим отношением с/ш.

Таким образом, в процессе движения поезда постоянно происходят переключения базовых станций: головной ПБС на хвостовую ПБС и обратно; с одной СБС на другую СБС, а также двойной хэндовер, сопровождающийся почти одновременным переключением стационарных базовых станций на линии и поездных базовых станций в поезде. Последствия двойного хэндовера (СБС и ПБС) проявляются в виде более продолжительных и глубоких провалов канальной скорости практически до нуля («обрыв канала»).

3.3 Анализ экспериментальных данных работы канала сети Wi-Fi поезда

Целью проведенного эксперимента является оценка характера изменений уровня сигнала и с/ш под действием м/з и б/з, а также их влияния на колебания канальной скорости и продолжительность процесса переключений базовых станций (хэндовера). Интерес к хэндоверу объясняется тем, что в эти моменты времени происходят изменения канальной скорости до нуля, что означает «обрыв канала» (рис.3.3). Продолжительные флуктуации и провалы к/с (рис.3.4), причиной которых также являются медленные и быстрые замирания, могут означать потерю информации. Такие потери происходят за счет временных задержек передачи, например, информации от видеокамеры на переезде, которая должна поступить в центр принятия решений за 40мс (длительность видеокадра). Статистика глубоких

провалов к/с и длительности хэндовера позволяет оценить эффективность технологии Wi-Fi (доступности, оперативности и качества канала) для мониторинга подвижного состава и инфраструктуры на ж/д транспорте.

Процесс хэндовера длится определенное время, которое затрачивается на операции переключений коммутаторов точек доступа вагонов и перенаправление потоков информации в поезде, например от головной ПБС к хвостовой ПБС, а также подстройка ПБС на канал трафика СБС (частотная и временная синхронизация). Продолжительность временных задержек в одном коммутаторе может составить величину в сотню микросекунд [53-55]. С учетом времени распространения сигнала по витой паре от головного до хвостового вагонов и временных задержек на каждом промежуточном узле общее время задержки может иметь порядок сотен миллисекунд. Отмеченные на рис.3.3, 3.4 в виде ступенек (НО_CurrM; НО_CurrAP) моменты хэндовера сопровождаются глубокими провалами на графиках канальной скорости TxRate, длительность которых зависит от замираний уровня сигнала и с/ш. На графиках (рис.3.3, 3.4) отчетливо проявляется корреляция между изменениями уровня сигнала RSSI (SNR), и параметром сжатия TxMCS. Так, медленные замирания определяют моменты переключений базовых станций, когда находится СБС с большим уровнем сигнала. Быстрые замирания несущего сигнала определяют вид модуляции, скорость и позиционность кодирования, а также циклический префикс, защищающий от межсимвольных искажений [3,55-61]. Снижение уровня сигнала отражается в переходе от многопозиционного вида модуляции КАМ-64 (квадратурная амплитудная модуляция), требующего высокого значения с/ш, к менее позиционным вариантам (КАМ-16; КАМ-4). Происходит также снижение скорости кодирования (добавляется большее число корректирующих разрядов, используется блочное и сверточное кодирование) и увеличение защитного интервала (префикса) между символами в цифровом пакете. В результате изменяется число бит информации, приходящееся на один элементарный импульс, и соответственно канальная скорость. По сути флуктуации канальной скорости к/с имеют жесткую

корреляцию с параметром с/ш на входе приемника ПБС из-за «цепи обратной» связи с СБС через радиоканал.

Особенно отчетливо видно, как происходит отслеживание уровня сигнала RSSI параметром сжатия TxMCS в тоннелях из-за сложных условий распространения, которое приводит к резким флуктуациям к/с (рис.3.4). На открытых участках (рис.3.5) наблюдается заметное снижение уровня сигнала (с/ш) и как следствие, канальной скорости (к/с). Значения с/ш на открытых участках снижаются примерно в 2 раза, что можно объяснить требованиями к мощности радиосредств (во избежания возникновения электромагнитных помех) и изменениями условий распространения [14,63].

Как отмечено выше, негативные явления в виде провалов и флуктуаций к/с, а также хэндоверов в значительной степени влияют на доступность, оперативность и качество связи. Так, флуктуации и провалы к/с ниже 50 Мбит/с, а также хэндовер с большой вероятностью могут привести к ошибкам, временным задержкам и срывам сеансов связи и в итоге, возникновению опасных ситуаций на ж/д транспорте, связанных с безопасностью движения поездов. Например, для передачи видеокadra (40мс) от в/камеры с модулем Wi-Fi и матрицей 1,3 MPix [16,17,49,53] со скоростью 100Мбит/с потребуется 39мс. Задержка информации в случае снижения к/с может негативно отразиться на работе СИВ, а именно, вероятностях $P_{лож/обн}$ и $P_{прав/обн}$. Это в свою очередь, приведет к снижению оперативности принятия решений в экстренных ситуациях и повлияет на безопасность движения поездов, управляемых с помощью беспилотных технологий.

Оценка коэффициента доступности после обработки экспериментальных данных функционирования локальной сети Wi-Fi поезда на временном отрезке, длительностью 1000с, показала следующее. Коэффициент доступности на отдельных участках и в тоннелях не превышал 0,978. Такая цифра объясняется длительностью и количеством переключений базовых станций, из которых более частыми являлись двойные хэндоверы (рис.3.3,3.4.3.5). Для повышения коэффициента доступности до величины 0,999 [14] требуется уменьшение

количества и снижение продолжительности переключений (хэндоверов). Количество можно сократить за счет совершенствования алгоритма переключений базовых станций. Для выбора базовой станции БС с наилучшим параметром с/ш рекомендуется использовать устройства прогнозирования величины и скорости изменения уровня сигнала. Такая мера позволит исключить кратковременные переключения базовых станций (в пределах поезда, а также с одной СБС на другую и обратно) в течение нескольких секунд (рис.3.3,3.4) (НО_CurrM, НО_CUrrAP, см. с. 73). Для уменьшения продолжительности хэндоверов необходимо перейти на новую элементную базу нанoeлектроники, обладающую более высоким быстродействием [49, 63-64].

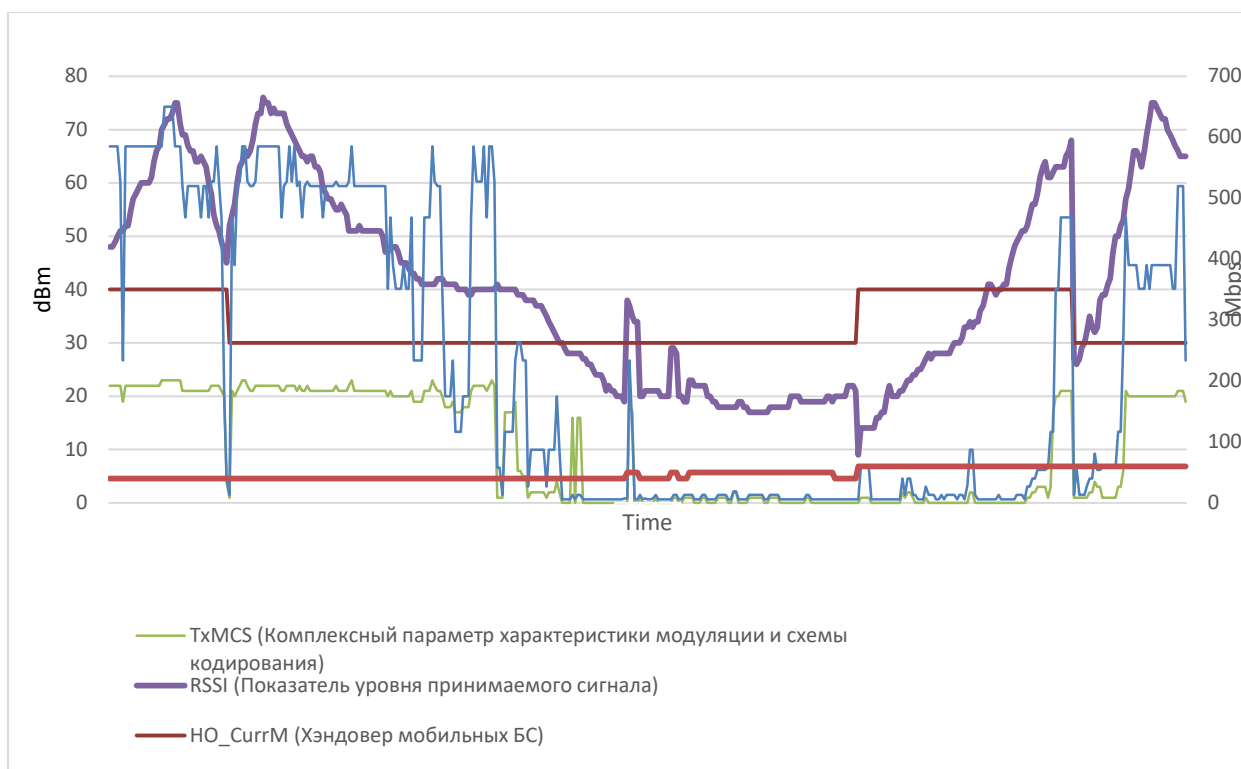


Рисунок 3.5 – Изменения уровня сигнала и с/ш на открытых участках

Анализ характера колебаний канальной скорости и частоты снижений к/с ниже 50 Мбит/с (практически до нуля) показал, что в течение 1000с при движении поезда со средней скоростью не более 50км/ч в тоннеле произошло 22 провала к/с средней длительностью 5мс. Это позволило дать оценку вероятности провала к/с

ниже 50 Мбит/с $P_{к/с}$, равную $P_{к/с} \approx 9,17 \cdot 10^{-5}$. Величина вероятности $P_{к/с}$ означает, что в расчете на каждые 10000 цифровых пакетов, длительностью ≤ 5 мс, более 9 пакетов будут искажены или потеряны [17,53].

Следует отметить негативное влияние флуктуаций и провалов к/с от б/з на открытых участках из-за относительно низкого значения с/ш и возможного влияния погодных условий, а также в тоннелях из-за большого числа отражающих поверхностей. Опасность заключается в том, что наблюдаемые флуктуации и провалы к/с ниже 50 Мбит/с (рис.3.5) могут привести к такому же «обрыву канала», который имеет место при хэндовере. При частых провалах к/с (почти каждую секунду) канал становится практически недоступным (рис.3.5). Поэтому особое значение имеет борьба с причинами провалов, а именно, быстрыми замираниями (б/з) уровня сигнала, которые являются главным фактором ухудшения качественных характеристик канала Wi-Fi в тоннелях и на открытых участках.

При проектировании антенн рекомендуется более тщательный учет статистических характеристик среды (трассы) распространения сигнала Wi-Fi, чтобы уменьшить количество отражающих поверхностей. Необходимо учитывать тот факт, что в стандарте IEEE 802.11ax используется специальное антенное оборудование. Оно позволяет организовать мультиплексирование потоков информации по технологии MIMO [3,28,61] на основе разнесения по диаграмме направленности и поляризации электромагнитных волн. Поэтому для борьбы с быстрыми замираниями возможно рекомендовать разнесенный прием в пространстве.

Таким образом, главными причинами негативных реакций базовых станций технологии Wi-Fi в виде хэндоверов, флуктуаций и резких провалов канальной скорости являются возникающие при движении поезда медленные и быстрые замирания огибающей, влияющие на параметр с/ш на входе приемника.

Как отмечено выше, длительность хэндовера непосредственно определяет величину коэффициента доступности K_d . Продолжительные флуктуации к/с влияют на временные задержки передачи информации (оперативность связи).

Резкие и глубокие провалы к/с вызывают аномальные ошибки в цифровых пакетах и их потерю.

Для оценки эффективности технологии Wi-Fi и соответствия требованиям, предъявляемым к техническому мониторингу, необходима разработка методик расчета коэффициента доступности, оперативности (вероятности и величины временной задержки), а также качества связи (вероятности ошибки). Разработка методик подразумевает определение законов распределения плотности вероятностей случайных величин длительностей хэндовера τ_x , опасных флуктуаций к/с $\tau_{o/фл}$, провалов к/с $\tau_{пр/к/с}$, их числовых характеристик, а также вероятностей наступления этих событий.

3.4 Исследование статистических характеристик параметров эффективности канала Wi-Fi

3.4.1 Цели и задачи разработки методики оценки эффективности технологии Wi-Fi

Целью разработки методик оценки эффективности технологии является получение ответа на вопрос о возможностях канала Wi-Fi и соответствии его требованиям техническому мониторингу подвижного состава.

Оценка эффективности технологии Wi-Fi и разработка методик расчета параметров доступности, оперативности и качества канала связи возможна при наличии статистических характеристик хэндовера, флуктуаций и провалов канальной скорости.

Как отмечено выше, в качестве оценок принято использовать для характеристик доступности – коэффициент доступности K_d , оперативности доставки информации – вероятность временных задержек и среднюю длительность временных задержек $M[t_3]$, качества связи - вероятность ошибки $P_{ош}$ и аномальной ошибки $P_{ан}$ или вероятность потери цифрового пакета $P_{n/пак}$ (см. с.79). Для реализации поставленной цели требуется решить следующие задачи. На первом этапе необходимо выявить на основании экспериментального материала: 1) какие

факторы (случайные процессы) являются причинами искажений информации; 2) каким образом они влияют на эффективность канала Wi-Fi (доступность, оперативность, качество связи). На втором этапе оценить статистические характеристики случайных процессов (законы распределения плотности вероятностей и числовые значения математического ожидания, дисперсии длительности хэндовера τ_x , опасных флуктуаций τ_{o/ϕ_l} и провалов к/с $\tau_{np/k/c}$) (см. параграф 3.3). На третьем этапе разработать методику расчета параметров эффективности канала Wi-Fi с учетом обработанного статистического материала.

Как отмечено в параграфе 3.3, главной причиной потери качества, оперативности и доступности канала Wi-Fi являются провалы канальной скорости между базовыми станциями. Причинами изменений величины к/с являются особенности распространения сигналов дециметрового диапазона и условия работы технологии Wi-Fi, принцип организации связи, который предусматривает постоянное переключение базовых станций при перемещении поездов. Отсюда, возникающие медленные и быстрые замирания несущей (из-за удаления от СБС и интерференции отраженных лучей в точке приема) при движении поезда непосредственно влияют на скорость передачи информации (через позиционность кода, типа модуляции, скоростью кодирования и значения циклического префикса). Для анализа влияния быстрых и медленных замираний несущей на характеристики канала Wi-Fi следует перечислить основные негативные факторы, ухудшающие работу канала. Как отмечено выше, уменьшение величины отношения мощностей сигнал/шум (с/ш) при провалах огибающей (из-за б/з) резко снижает скорость передачи информации. Фактически колебания канальной скорости отслеживают случайные флуктуации с/ш, возникающие за счет быстрых замираний сигнала. Это приводит к изменениям канальной скорости к/с и снижению ее до 50 Мбит/с (и ниже) или флуктуациям (в пределах от 650Мбит/с до 50Мбит/с). Резкие перепады к/с могут происходить с частотой примерно 1 провал в секунду (рис.3.3, 3.4, 3.5). При хэндовере и провале к/с (из-за м/з) практически до нуля кратковременно происходит «обрыв канала».

В зависимости от продолжительности описанных выше явлений и их влияния на результаты мониторинга можно выделить следующие важные случаи, возможные в процессе работы сети Wi-Fi. Для оценки допустимых значений критериев эффективности технологии в качестве примера технического мониторинга принята система интеллектуального видеонаблюдения СИВ за нерегулируемым переездом. В этом случае могут возникать такие события:

1) **хэндовер**, длительностью свыше 40мс (опасен потерей видеокадра и ошибками в процессе распознавания объекта с помощью системы СИВ в случае передачи видеоинформации с переезда в кабину машиниста или бортовой компьютер) влияет на коэффициент доступности сети связи и временные задержки передачи информации;

2) **глубокие провалы к/с** до 50 Мбит/с и ниже, длительностью свыше 40мс (последствия аналогичны пункту 1), влияют на коэффициент доступности сети связи и временные задержки передачи информации;

3) **флуктуации к/с** с провалами к/с до 50 Мбит/с и ниже, длительностью свыше 40мс (последствия аналогичны пункту 1) влияют на коэффициент доступности сети связи и временные задержки передачи информации;

4) **хэндовер**, длительностью менее 40мс (опасен нарушением частотной и временной синхронизации, которые воспринимается приемником как аномальные ошибки) влияет на качество связи (величину вероятности ошибки) и повторы передачи данных (временные задержки);

5) **глубокие провалы к/с** до 50 Мбит/с и ниже, длительностью менее 40мс (последствия аналогичны пункту 4) влияет на качество связи (величину вероятности ошибки) и повторы передачи данных (временные задержки);

6) **флуктуации к/с** с провалами к/с до 50 Мбит/с и ниже с частотой не менее 1 провала в секунду, длительностью менее 40мс (последствия аналогичны пункту 4) влияют на качество связи (величину вероятности ошибки) и повторы передачи данных (временные задержки).

Следует отметить, что срыв синхронизации и аномальные ошибки при провалах к/с происходят потому, что каналный кодек не успевает перестраиваться

из-за инерционности элементной базы [3]. Это приводит к тому, что не все символы вовремя поступают в приемник БС. По величине аномальной ошибки $P_{ан}$ в переданных кадрах можно оценить вероятность ошибки и ухудшение качества распознавания опасных объектов (в системах интеллектуального видеонаблюдения) через вероятности ложного и правильного обнаружения [16,52]. Описанные выше негативные явления наступают при совпадении медленных замираний (м/з) и быстрых замираний (б/з), оказывающих негативное влияние на входной сигнал базовой станции ПБС при движении поезда. Поэтому с помощью экспериментальных данных требуется рассчитать вероятности наступления медленных и быстрых замираний, а также вероятности наступления хэндовера, провала и опасных флуктуаций к/с.

Таким образом, для решения поставленной задачи требуется найти законы распределения плотности вероятностей (ПРВ) длительности хэндовера τ_x , продолжительности провалов $\tau_{пр/к/с}$ и флуктуаций $\tau_{о/фл}$ канальной скорости, а также средние значения $M[\tau_x]$, $M[\tau_{пр/к/с}]$, $M[\tau_{о/фл}]$. Статистические характеристики (ПРВ средние значения, дисперсия и вероятности) позволят рассчитать коэффициент доступности K_d , вероятность ошибки $P_{ош}$, временные задержки в передаче информации $M[t_з]$, а также разработать методику оценки критериев эффективности системы технического мониторинга подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта. Для итоговой оценки соответствия технологии Wi-Fi требованиям ж/д транспорта необходимо знать допустимые значения коэффициента доступности, временных задержек и вероятности ошибок.

3.4.2 Оценка статистических характеристик длительности хэндовера

Для оценки эффективности исследуемой технологии и соответствия требованиям безопасности движения поездов требуется оценить степень опасности возникновения аварии на ж/д транспорте по вине канала Wi-Fi. Такая ситуация возможна в случае несвоевременной доставки информации в кабину машиниста от в/камеры с модулем Wi-Fi на переезде в случае «обрыва канала» в моменты

хэндовера. Главной причиной наступления хэндовера – это снижение отношения с/ш на входе ПБС, которое возникает при движении поезда и удаления ПБС от СБС (м/з), а также из-за эффекта многолучевости и интерференции отраженных сигналов и флуктуаций уровня несущей (б/з). Поэтому вероятность наступления хэндовера зависит от с/ш и характеризует доступность канала Wi-Fi. Длительность хэндовера колеблется в широком диапазоне от долей секунды до секунды и более. Наиболее опасны те из них, продолжительность которых соизмерима с длительностью видеокадра (будут определять эффективность обнаружения опасных объектов). Отсюда, для оценки влияния хэндовера на величину коэффициента доступности K_d требуется рассчитать вероятность наступления «опасного» хэндовера.

Для этого необходима вероятность совпадения следующих событий в процессе работы канала Wi-Fi:

- 1) снижение уровня сигнала из-за медленных замираний и переключение БС, которое наступает с вероятностью $P_{м/з}$;
- 2) уменьшение уровня сигнала из-за быстрых замираний с вероятностью $P_{б/з}$, сопровождающихся глубоким провалом к/с между СБС и ПБС;
- 3) наступление «опасного» хэндовера с вероятностью $P_x(\tau_x > t_d)$, длительность которого τ_x больше допустимого времени t_d (например, равного длительности в/кадра 40мс).

Вероятность возникновения временных задержек (несвоевременной доставки информации из-за хэндовера, равносильные недоступности канала) $P_{в/з}$ можно рассчитать следующим образом:

$$P_{в/з} = P_{м/з} \cdot P_{б/з} \cdot P_x(\tau_x > t_d). \quad (3.1)$$

Вероятность $P_{м/з}$ зависит от скорости движения поезда и определяется по следующей формуле [65]:

$$P_{м/з} = \frac{M[T_{м/з}]}{M[\Delta T_{м/з}]} = 0,131 \quad (3.2)$$

где $M[T_{м/з}] = 4,91\text{с}$ - среднее значение длительности медленных замираний (рис.3.3,3.4) на уровне 60-95=-35 (дБ) для средней скорости движения 50км/ч;

$M[\Delta T_{M/3}] = 37,38\text{с}$ – период медленных замираний, усредненный (так же, как величина $M[T_{M/3}]$) за временной промежуток, равный 1000с.

Вероятность быстрых замираний зависит от величины полуволны излучения и скорости движения поезда [61]. Определяется аналогично выражению (3.2) как отношение среднего значения длительности $b/3$ $M[t_{b/3}] = 2\text{мс}$ к математическому ожиданию периода $M[\Delta t_{b/3}] = 10\text{мс}$ (для тоннелей и открытых участков) [61]. Отсюда, вероятность возникновения быстрых замираний при скорости движения порядка 50 км/ч равна $P_{b/3} = 0,22$.

Вероятность превышения временной задержки передачи информации в 40мс из-за хэндовера рассчитывается на основании закона плотности распределения вероятностей (ПРВ) продолжительности хэндовера. Случайный характер длительности τ_x определяется зависимостью процесса переключений БС от параметра с/ш канала Wi-Fi и временем подстройки ПБС и СБС.

Для расчета вероятности временных задержек из-за хэндовера по формуле (3.1) требуется определить вероятность наступления опасного хэндовера $P_x(\tau_x > t_d)$.

Эту вероятность можно рассчитать с помощью закона распределения плотности вероятностей ПРВ длительности хэндовера на основании собранного экспериментального материала.

В результате обработки экспериментальных данных рассчитаны математическое ожидание и дисперсия времени τ_x , а также построена гистограмма для определения закона ПРВ случайной величины τ_x , представленной на (рис.3.6).

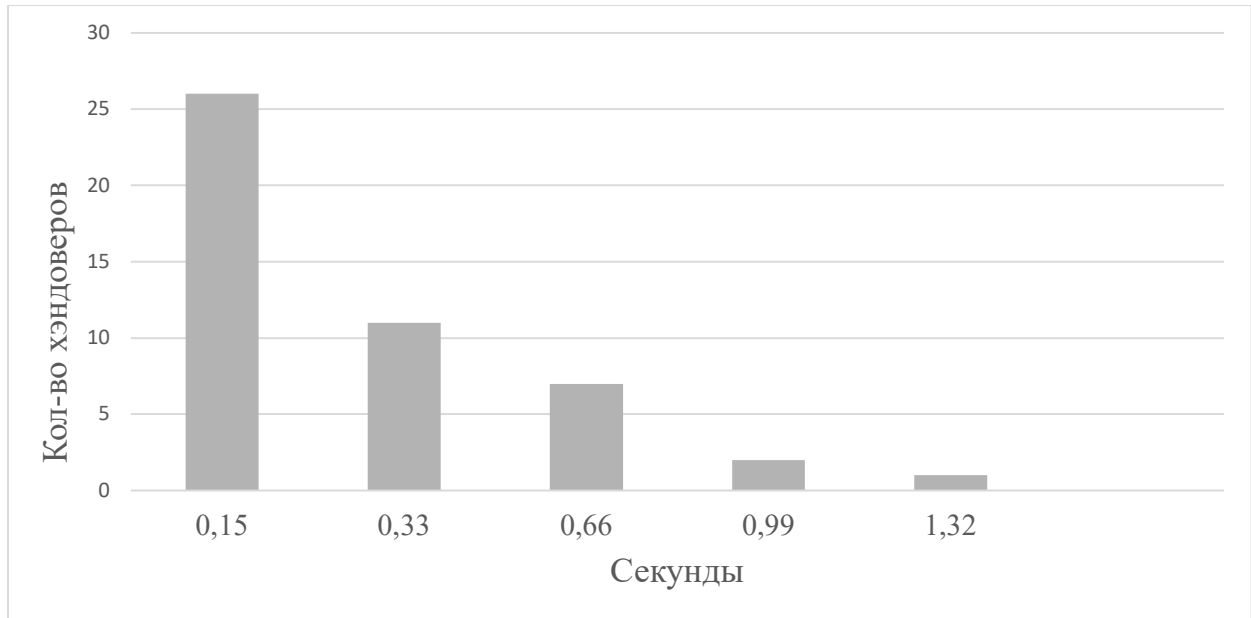


Рисунок 3.6 – Гистограмма распределения длительности хэндовера

Как показали экспериментальные данные, коэффициент вариации распределения длительности τ_x или «обрыва канала» (равный отношению среднеквадратического отклонения к среднему значению) близок к единице (1,09). Поэтому в качестве ПРВ принят экспоненциальный закон [30]. Отсюда, вероятность превышения временной задержки t_3 из-за хэндовера свыше выбранного значения t_d равна:

$$P_x(\tau_x > t_d) = \int_{t_d}^{\infty} \lambda \cdot \exp(-\lambda t) dt = e^{-\frac{t_d}{M[\tau_x]}} = 0,779, \quad (3.3)$$

где $M[\tau_x] = 160$ мс- среднее значение длительности τ_x хэндовера, т.е. «обрыва канала» (согласно статистическим данным);

$$\lambda = 1/M[\tau_x]; t_d = 40\text{мс}.$$

Отсюда с учетом формул (3.1-3.3) величина вероятности возникновения опасной ситуации из-за временной задержки по вине хэндовера равна:

$$P_{6/3} = 0,131 \times 0,22 \times 0,779 \cong 0,022.$$

Отсюда, коэффициент доступности равен $K_d = 1 - 0,022 = 0,978$ (см. с.77).

Вероятность наступления опасного хэндовера (длительностью свыше 40мс), влияющего на коэффициент доступности, можно получить на основании экспериментальных данных (без оценки ПРВ) по формуле [65]:

$$P_x(\tau_x > t_\delta) = \frac{\sum \tau_x}{T} \quad (3.4),$$

где в числителе учитываются только хэндоверы с длительностью более 40мс, в знаменателе - время эксперимента 1000с.

Вероятности $P_{в/з}$ и $P_x(\tau_x > t_\delta)$ характеризуют доступность канала Wi-Fi при условии, что все другие причины, влияющие на доступность (провалы и флуктуации канальной скорости), по длительности на порядок меньше (см. с.82).

В отсутствии статистических данных по м/з и б/з рассчитать коэффициент доступности K_δ возможно с помощью следующих выражений:

$$K_\delta = 1 - P_{н/\delta}, \quad (3.5)$$

$$P_{н/\delta} = P_x \cdot P_x(\tau_x > t_\delta), \quad (3.6)$$

где $P_{н/\delta}$ – вероятность того, что канал не доступен (соответствует наступлению опасного хэндовера, длительность которого более t_δ ;

$P_x = \frac{\sum \tau_x}{T} = 0,028$ - вероятность наступления хэндовера (в числителе - общее время, затраченное на все хэндоверы, в знаменателе - продолжительность эксперимента 1000с). Отличие формул (3.5-3.6) от (3.4) заключается в характеристике и объеме статистических данных.

Таким образом, предложены три способа расчета коэффициента доступности, в основе которых лежит экспериментальный материал: 1) на основании статистических данных о вероятностях наступления м/з и б/з; 2) по формуле (3.4) при учете только хэндоверов, длительностью более t_δ ; 3) при отсутствии статистических данных о характере м/з и б/з по формулам (3.5,3.6).

Вычисления величины K_δ по формулам (3.1), (3.4) и (3.5,3.6) дают цифры, близкие по величине. Однако расчеты по (3.1) позволяют реализовать более глубокий анализ причин и следствий замираний сигнала.

Результаты расчетов по формуле (3.1) означают, что на тысячу хэндоверов приходится 22 опасных переключений БС, которые в случае нахождения постороннего объекта на переезде могут привести к аварии (столкновению с поездом) из-за задержки доставки информации и начала торможения поезда. Согласно статистике, собранной в результате проведенного эксперимента, 1000

переключений БС может произойти за 5000с, что соответствует промежутку времени, равному $\approx 13,89$ час. Эта цифра характеризует степень опасности движению, исходящую от хэндоверов, а именно: в среднем примерно каждые 50с происходит хэндовер при скорости движения поезда 50км/ч.

Таким образом, на основании статистического материала дана оценка величины коэффициента доступности, которая равна с учетом тоннелей и открытых участков $K_d \cong 0,978$ (при рекомендуемой норме 0,999 [14]).

Как было отмечено выше, понятие «обрыв канала» есть опасный хэндовер, который сопровождается продолжительным (свыше 40мс) провалом канальной скорости почти до нуля. С увеличением скорости движения сокращаются периоды замираний и длительность их. Однако, продолжительность хэндовера ограничивается снизу временем переключений коммутаторов и синхронизаций базовых станций, зависящим от быстродействия элементной базы электроники. Это означает, что с увеличением скорости движения поездов повышается вероятность опасных последствий из-за хэндовера для управления движением поездов особенно при использовании беспилотных технологий.

Условия функционирования сети Wi-Fi на метрополитене близки к условиям ж/д транспорта (открытые участки и тоннели). Поэтому представленные выше исследования канала Wi-Fi для метрополитена могут быть использованы для оценки эффективности беспроводных каналов сети Wi-Fi для технического мониторинга подвижного состава на ж/д транспорте.

3.4.3 Оценка статистических характеристик флуктуаций канальной скорости

Для оценки оперативности связи с использованием канала Wi-Fi необходим анализ влияния опасных флуктуаций канальной скорости на временные задержки при передаче данных. Опасными флуктуациями считаются те, которые имеют глубокие провалы к/с (см. с.82). Для характеристики длительности таких флуктуаций τ_{o/ϕ_l} и расчета вероятности $P(\tau_{o/\phi_l} > t_d)$ превышения их допустимого значения временной задержки t_d требуется определение закона распределения плотности вероятностей ПРВ. Основное влияние на временные задержки

оказывают длительные флуктуации канальной скорости. Они происходят согласно изменениям комплексного параметра модуляции TxMCS (рис.3.3,3.4,3.5) из-за выбросов и провалов огибающей сигнала в результате б/з. На основании результатов обработки экспериментальных данных построены гистограммы длительности флуктуаций τ_{o/ϕ_l} , определены математическое ожидание $M[\tau_{o/\phi_l}]$ и дисперсия $D[\tau_{o/\phi_l}]$ и коэффициент вариации. Представленная на рис.3.7 гистограмма имеет вид экспоненты (коэффициент вариации близок к единице), что позволяет предположить показательный закон ПРВ.

Вероятность $P(\tau_{o/\phi_l} > t_\delta)$ рассчитывается на основании полученного среднего значения $M[\tau_{o/\phi_l}]$ случайной величины τ_{o/ϕ_l} и ПРВ (для любого допустимого значения t_δ) по формуле:

$$P(\tau_{o/\phi_l} > t_\delta) = \exp\left(-\frac{t_\delta}{M[\tau_{o/\phi_l}]}\right). \quad (3.7)$$

Вероятность $P(\tau_{o/\phi_l} > t_\delta)$ (3.7) характеризует опасность наступления аварии в случае задержек, например, видеoinформации на входе системы интеллектуального видеонаблюдения СИВ. Как отмечено выше, потеря каждого кадра (временная задержка) может снизить вероятность правильного обнаружения постороннего объекта на нерегулируемом переезде (параграф 3.1).

Оперативность канала Wi-Fi традиционно оценивается вероятностью $P(t_3 < t_\delta)$ того, что временная задержка t_3 не превысит допустимого времени t_δ . Для расчета вероятности отсутствия временной задержки $P(t_3 < t_\delta)$ из-за опасных флуктуаций к/с (до 50 Мбит/с) требуется перемножение двух вероятностей по формуле:

$$P(t_3 < t_\delta) = P_{o/\phi_l} \cdot P(\tau_{o/\phi_l} < t_\delta), \quad (3.8)$$

где P_{o/ϕ_l} – вероятность наступления опасных флуктуаций, т.е. наличия флуктуаций любой продолжительности с глубокими провалами к/с (в числителе длительность всех опасных флуктуаций, в знаменателе - время эксперимента 1000с);

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

Вероятность $P(\tau_{o/\phi_l} < t_\delta)$ являются дополнением до единицы вероятности $P(\tau_{o/\phi_l} > t_\delta)$ (3.7), т.е. $P(\tau_{o/\phi_l} < t_\delta) = 1 - P(\tau_{o/\phi_l} > t_\delta)$. Вычисление вероятностей осуществляются с

помощью закона ПРВ случайной величины $\tau_{o/фл}$. Для этого построена гистограмма распределения длительности $\tau_{o/фл}$, представленная на рис.3.7.

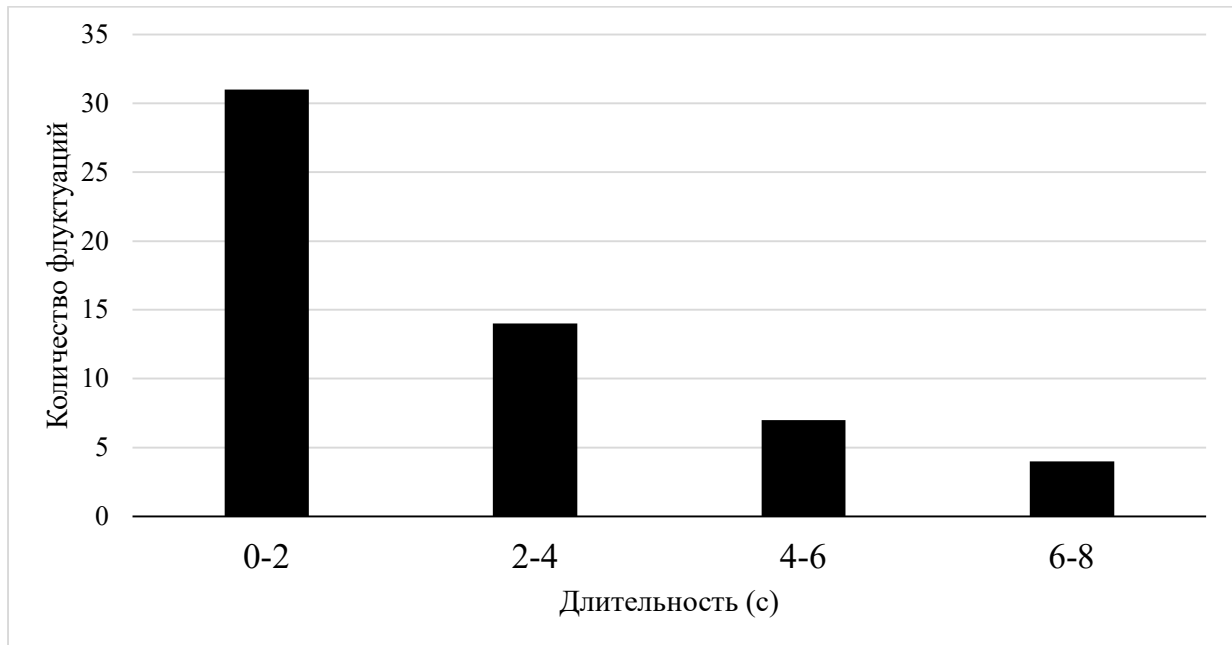


Рисунок 3.7 – Гистограмма длительности опасных флуктуаций к/с с провалами до 50 Мбит/с.

Закон ПРВ длительности $\tau_{o/фл}$ позволяет рассчитать вероятность наступления опасных флуктуаций и оценить оперативность канала Wi-Fi для других задач мониторинга подвижного состава и объектов инфраструктуры ж/д транспорта, имеющих отличные от рассмотренных выше значений t_d .

Гистограмма распределения $\tau_{o/фл}$ (рис.3.7) имеет вид экспоненциального закона с параметрами $\lambda=1/M[\tau_{o/фл}]$, $M[\tau_{o/фл}] = 2,87с$. Вероятность, что длительность $\tau_{o/фл}$ будет меньше t_d , равна $P(\tau_{o/фл} < t_d) = 0,014$.

С помощью собранного экспериментального материала (по аналогии с хэндовером (3.4.2) можно рассчитать вероятность наступления опасных флуктуаций (длительностью свыше 40мс) по формуле [65]:

$$P_{o/фл} = \frac{\sum \tau_{o/фл}}{T}, \quad (3.9)$$

где в числителе учитываются только опасные флуктуации с длительностью более 40мс, в знаменателе – продолжительность эксперимента 1000с.

Расчет по формуле (3.9) показал, что вероятность равна $P_{o/фл} = 0,172$. Отсюда, вероятность отсутствия временной задержки (3.8) равна $P(t_3 < \tau_d) = 0,00241$. Сравнение методов оценки оперативности канала Wi-Fi по формулам (3.8) и (3.9) свидетельствует о том, что расчеты по (3.8) позволяют сделать более глубокий анализ.

Для оценки степени опасности длительных флуктуаций к/с на оперативность передачи данных мониторинга требуется определить допустимое значение временной задержки t_d . Как отмечено выше, большинство происшествий на ж/д транспорте происходит на переездах. Поэтому оценку оперативности целесообразно рассчитывать согласно данным эффективности системы СИВ, т.е. сравнивать с длительностью одного в/кадра от видеокамеры, установленной на переезде, т.е. принять в качестве $t_d = 40\text{мс}$ [52].

Полученные цифры означают, что в большинстве случаев с вероятностью, близкой к единице (0,998), будут иметь место временные задержки в передаче информации технического мониторинга, что может отразиться на эффективности работы системы интеллектуального видеонаблюдения (СИВ) и безопасности движения поездов.

3.4.4 Оценка статистических характеристик провалов канальной скорости

Провалы канальной скорости оказывают существенное влияние на все характеристики работы канала Wi-Fi, используемого для технического мониторинга подвижного состава и инфраструктуры ж/д транспорта.

Как было отмечено выше, провалы к/с происходят: в результате медленных замираний огибающей м/з, (переключений базовых станций типа хэндовера), быстрых замираний б/з из-за многолучевости распространения сигналов (провалы и выбросы огибающей). Хэндоверы ухудшают доступность канала Wi-Fi. Одиночные провалы к/с проявляются в виде резких изменений скорости передачи

информации, воспринимаемых приемником как аномальные ошибки. Продолжительные изменения в виде глубоких флуктуаций к/с увеличивают время передачи данных и провоцируют повторные сеансы связи, что значительно ухудшает оперативность канала Wi-Fi. Таким образом, провалы к/с влияют на доступность, оперативность и качество связи. На рис. 3.8. представлены графики изменения к/с и среднего значения к/с (в виде синусоиды) при движении поезда по участку.

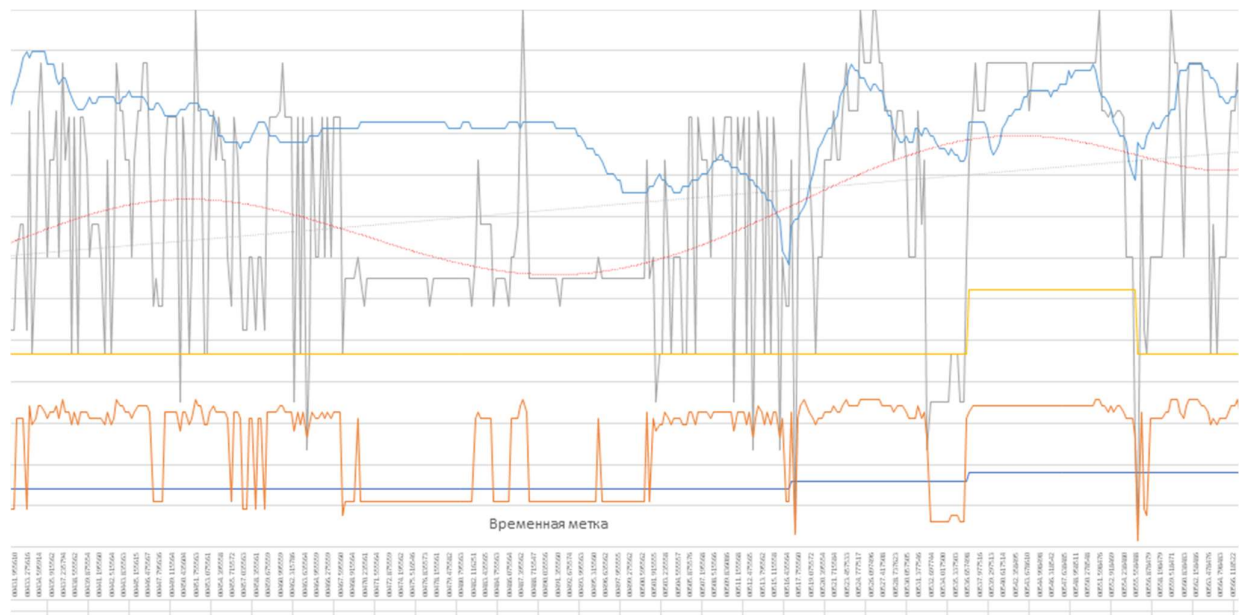


Рис.3.8. Графики изменения канальной скорости при движении поезда по участку

Как видно из рис.3.8, среднее значение канальной скорости к/с отслеживает изменения отношения с/ш под действием м/з, зависящие от скорости движения поезда, характеристик участка (тоннель, станция, открытый участок), размещения СБС, алгоритма работы БС, включая вид модуляции, количество пространственных потоков, поляризацию электромагнитной волны, размещение и тип антенн. Однако даже работа канала при средних значениях с/ш (в тоннеле и открытом участке соответственно: 60дБм и 30дБм и канальной скорости в 300 Мбит/с) не исключает провалов и флуктуаций к/с, вызывающих временные задержки и ошибки в канале Wi-Fi.

Как отмечено выше, на качество связи (величину вероятности аномальной ошибки $P_{ан}$ или потери цифрового пакет $P_{n/пак}$), оказывают провалы к/с ниже 50 Мбит/с. Построенная гистограмма количества провалов n ниже определенного уровня (рис.3.9) позволяет рассчитать вероятность того, что к/с опустится ниже заданного значения, и провести детальный анализ характера провалов к\с. Рассчитанные математическое ожидание и дисперсия случайной величины n позволяют сделать вывод об экспоненциальном законе распределения плотности вероятностей глубины провалов к/с (в Мбит/с) и рассчитать величину вероятности опасного провала к/с (ниже 50Мбит), а именно $P_{о/пР}$. Математическое ожидание $\tau_{np/к/с}$ дает возможность найти общую продолжительность провалов к/с за все время наблюдения (1000с) и вероятность наступления провала к/с $P_{np/к/с}$. Вычисленные с помощью гистограммы (рис.3.9) значения вероятностей $P_{np/к/с}$, $P_{о/np/к/с}$ требуются для оценки качества канала Wi-Fi.

Построенная гистограмма (рис.3.9) позволяет оценить вероятностные характеристики глубины провалов и случайной величины $\tau_{np/к/с}$ (длительности провалов к/с), а также сделать следующие выводы: ПРВ имеет экспоненциальный характер, длительность провалов, кратная временной шкале измерений 33мс, может достигать восьми секунд, средняя длительность $\tau_{np/к/с}$ равна 6с. Основной вклад в эту величину вносят неглубокие провалы не более 200Мбит/с.

На рис.3.9 каждый столбец соответствует числу n провалов к/с, которые по величине опускались ниже определенного значения (начиная с 250Мбит/с до 50Мбит/с с шагом в 50Мбит/с). Причем чем глубже провал, тем длительность его уменьшается (см. также рис.3.3-3.5). Важно отметить, что продолжительность глубоких провалов к/с (ниже 50 Мбит/с) больше или соизмерима с длительностью цифрового пакета. Это означает, что провал к/с может вызвать как одиночные ошибки, так и аномальные, которые можно приравнять к вероятности потери пакета $P_{n/пак}$.

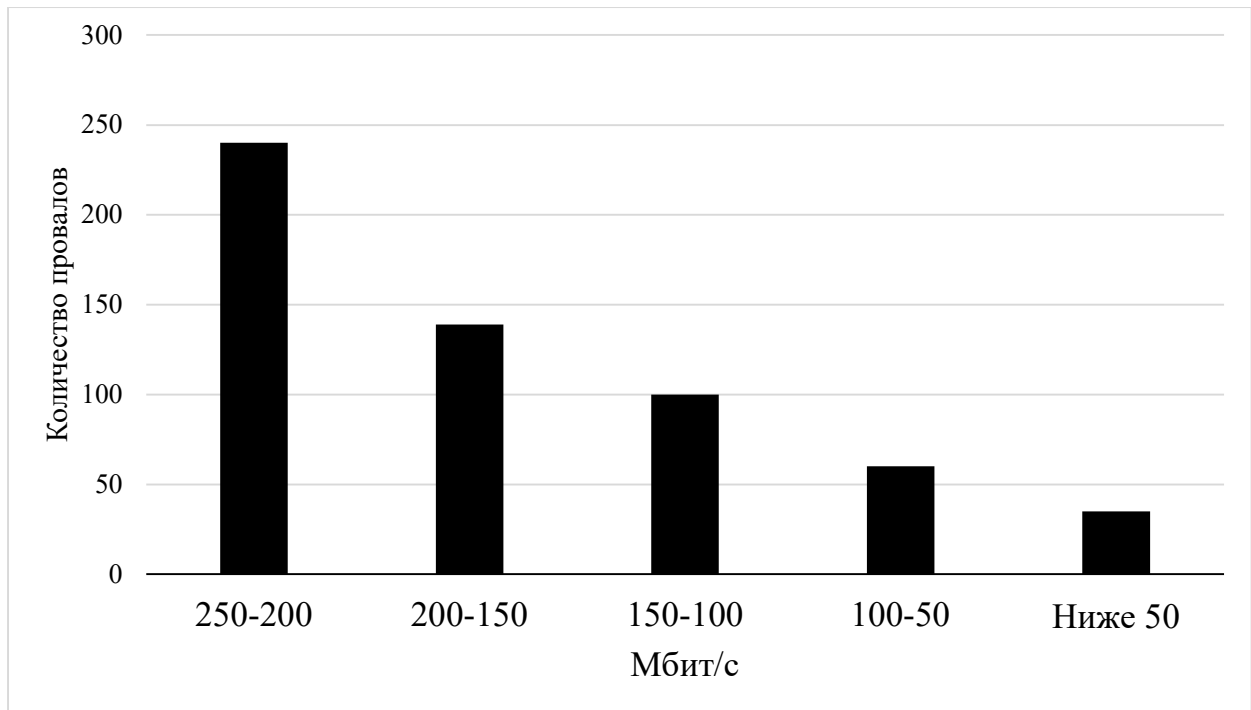


Рисунок 3.9 – Гистограмма распределения количества n провалов к/с по величине (Мбит/с)

Как отмечено выше, гистограмма позволяет осуществить более глубокий анализ изменений к/с, оценить среднюю величину глубины провала к/с и рассчитать с помощью экспоненциального закона ПРВ случайной величины n вероятность наступления опасного провала к/с $P_{o/np/к/с}$. В нашем примере опасный провал означает снижение к/с ниже 50 Мбит/с, который вызывает потерю пакета (аномальную ошибку).

Вероятность потери пакета $P_{n/нак}$ можно рассчитать по формуле (3.10):

$$P_{n/нак} = P_{np/к/с} \cdot P_{o/np/к/с}, \quad (3.10)$$

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

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

Вероятность $P_{np/к/с}$ рассчитывается как дробь: в числителе - общая длительность провалов к/с, в знаменателе – время наблюдения $T=1000с$.

Вероятность $P_{o/np/к/с}$ рассчитывается на основании построенной гистограммы и показательного закона ПРВ (рис.3.9).

С помощью обработанных экспериментальных данных вероятность наступления провала к/с $P_{np/к/с}$ равна:

$$P_{np/к/с} = \frac{\sum \tau_{np/к/с}}{T} = 0,344. \quad (3.11)$$

На основании гистограммы распределения глубины провалов к/с (рис.3.9) рассчитана вероятность наступления опасного провала, равная $P_{o/np/к/с} = 0,061$. Отсюда, вероятность потери пакета с учетом формулы (3.10) равна: $P_{n/пак} = 0,021$.

Для вычисления вероятности ошибки необходимо разделить $P_{n/пак}$ на число бит в пакете, которое меняется в зависимости от стандарта технологии Wi-Fi от 20 до 160 (байт) [3]. Учитывая, что потеря пакета может произойти даже при одиночной ошибке в случае отрицательного результата при проверке на четность в канальном декодере [3], можно принять, что порядок величины $P_{n/пак}$ приблизительно соответствует $P_{ош}$. Полученное в результате эксперимента значение вероятности $P_{n/пак}$ свидетельствует, что более 2% пакетов будут потеряны. Чтобы понять, насколько это опасно для качества канала Wi-Fi, следует провести исследование влияния вероятности ошибки на эффективность технического мониторинга подвижного состава и оценить допустимую величину $P_{ош}$.

Точность приведенных выше вычислений вероятностей по формулам (3.2), (3.4), (3.9), (3.11) определяется шагом временной шкалы измерений, равной 0,33с (приложение 2). Отсюда, величина допуска (неточности) значений вероятностей равна $\pm 0,00033$. С учетом того, что оценки вероятностей округлены до третьего знака после запятой, влияние допуска (ошибки измерений) можно считать незначительным.

3.5 Выводы по главе

1. На основании полученных и обработанных экспериментальных данных работы канала Wi-Fi дана оценка статистических характеристик канала Wi-Fi.

2. Медленные и быстрые замирания огибающей сигнала, связанные с движением поезда и эффектом «многолучевости», оказывают существенное

влияние на эффективность работы канала Wi-Fi (доступность, оперативность, качество связи).

3. Особенности распространения сигнала дециметрового диапазона (многолучевость) наиболее сильно отражаются на условиях работы в тоннелях (возникновение быстрых замираний при движении поезда) из-за большого числа отражающих поверхностей.

4. Характер медленных замираний (м/з) определяется скоростью движения поезда, расстановкой базовых станций, условиями распространения радиоволн (тоннель или открытый участок).

5. Быстрые замирания (б/з) также зависят от скорости движения поезда, типа участка (открытый или тоннель), формы тоннеля (прямоугольный или овальной), свойств покрытия стен тоннеля, оборудования (кабеля, линейных и станционных устройств автоматики и связи).

6. Затухание радиосигнала зависит от типа участка: на открытых участках отношение мощностей сигнала к шуму (с/ш) значительно меньше, чем в тоннелях (из-за условий распространения сигнала и требований по соблюдению электромагнитной обстановки).

7. При анализе длительности и глубины провалов и флуктуаций канальной скорости необходим учет условий распространения сигнала (см. пункты 5,6)

8. Для уменьшения негативного воздействия быстрых замираний в тоннелях отношение с/ш на входе приемника увеличивается на три порядка по сравнению с открытыми участками.

9. Среднее значение канальной скорости определяется средним уровнем флуктуаций уровня сигнала из-за б/з и числом переключений БС из-за м/з.

10. Глубина провалов и длительность флуктуации к/с зависят от характера б/з и являются «защитной реакцией» модемов канала Wi-Fi от ошибок, происходящих вследствие изменений отношения с/ш.

11. Провалы или выбросы огибающей сигнала за счет быстрых замираний приводят к провалам канальной скорости (для уменьшения числа ошибок) за счет

снижения позиционности кода, скорости кодирования, повышения защитного временного интервала между символами цифрового пакета.

12. Следствиями замираний сигнала являются: хэндовер («обрыв канала»), флуктуации канальной скорости (временные задержки передачи информации), глубокие провалы канальной скорости (аномальные ошибки).

13. Законы распределений плотности вероятностей ПРВ длительностей хэндовера, флуктуаций канальной скорости (к/с), глубины и длительности провалов канальной скорости можно аппроксимировать экспоненциальными функциями.

14. Для уменьшения числа хэндоверов требуется изменить алгоритм переключений базовых станций, а также перейти на наноэлектронику, имеющую более высокое быстродействие элементной базы.

15. На основании полученных и обработанных экспериментальных данных дана оценка статистических характеристик канала Wi-Fi:

а) коэффициент доступности $K_d=0,978$; б) временная задержка в среднем составляет 2,87с; в) вероятность отсутствия временной задержки $P(t_3 < t_d) = 0,00241$; в) вероятность потери пакета $P_{n/nak} = 0,021$.

16. Сравнительная характеристика исследуемого канала с нормами сотовой связи (4G) [66] показывает следующие преимущества технологии Wi-Fi:

- а) коэффициент доступности выше в 1,075раз;
- б) среднее время задержки передачи данных меньше в 3,5 раза;
- в) вероятность потери цифрового пакета меньше в 4 раза.

17. Повысить эффективность канала Wi-Fi (доступность, оперативность, качество) возможно за счет перехода на наноэлектронику. За счет увеличения быстродействия элементной базы, которое минимум на три порядка выше, чем у микроэлектроники [42], показатели канала Wi-Fi улучшатся, а именно:

- а) увеличится коэффициент доступности не менее, чем в 1,022 раза;
- б) снизятся временные задержки передачи данных более, чем в 7,2 раз;
- в) повысится качество (вероятность ошибки) на три порядка.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ WI-FI

4.1. Методики оценки доступности, оперативности и качества канала Wi-Fi

Для определения показателей эффективности системы технического мониторинга (доступности канала Wi-Fi, оперативности связи и качества) на основании экспериментальных данных необходимо разработать методики оценок коэффициента доступности, вероятности временной задержки (в том числе из-за повторных передач данных мониторинга), вероятности ошибки при приеме отдельного символа и цифрового пакета.

Как отмечено в параграфе 3.4, главными причинами недоступности канала, временных задержек и снижения качества в системе мониторинга с помощью технологии Wi-Fi являются провалы и флуктуации канальной скорости к/с, вызванные быстрыми (б/з) и медленными (м/з) замираниями несущего сигнала во время движения поезда, а также переключениями базовых станций (хэндовером).

Первопричиной негативных явлений (провалов к/с и хэндовера) являются снижение уровня сигнала (с/ш) (возникновение замираний), которое наступает с вероятностью $P_{с/ур}$, равной произведению вероятностей наступления медленных затуханий $P_{м/з}$ и быстрых затуханий $P_{б/з}$ (см. параграфы 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4), а именно: $P_{с/ур} = P_{м/з} \cdot P_{б/з}$ (см. с.84).

Частота наступлений: хэндовера, провалов и флуктуаций к/с, рассчитанная с помощью экспериментальных данных, позволяет оценить вероятности таких событий (с.95).

Вероятности P_x , $P_{np/к/с}$, $P_{o/фл}$ рассчитываются статистическим путем как результат деления суммарных длительностей хэндовера, провалов и опасных флуктуаций к/с на время T (продолжительность эксперимента), (см. параграф 3.4):

$$P_x = \frac{\sum \tau_x}{T}; P_{np/к/с} = \frac{\sum \tau_{np/к/с}}{T}; P_{o/фл} = \frac{\sum \tau_{o/фл}}{T}.$$

На основании результатов обработки экспериментальных данных по частоте и продолжительности хэндовера τ_x , по глубине провалов к/с, а также длительности

провалов $\tau_{np/к/с}$ и флуктуаций $\tau_{o/фл}$ к/с можно определить законы распределений плотности вероятностей (ПРВ) этих случайных величин. Затем рассчитать вероятности превышения длительности временной задержки t_3 за счет $\tau_x, \tau_{o/фл}, \tau_{np/к/с}$ допустимого значения t_d (длительности тайм-слота, цифрового кадра или пакета, видеокadra), а именно (см. с.82):

а) вероятность $P_x(\tau_x > t_d)$ того, что продолжительность хэндовера превысит величину t_d (например, длительности в/кадра в 40мс) и произойдет «обрыв канала»;

б) вероятность $P(\tau_{o/фл} > t_d)$ того, что продолжительность опасных флуктуаций к/с (с провалами до 50Мбит/с) превысит t_d и произойдет временная задержка в/кадра (сбой в системе распознавания опасных объектов);

в) вероятность $P(\tau_{o/np/к/с} > t_d)$ того, что продолжительность опасного провала к/с (ниже 50 Мбит/с) превысит t_d , т.е. длительность цифрового пакета и произойдет ошибка (потеря пакета).

В качестве допустимых значений критериев эффективности технологии Wi-Fi приняты следующие величины: для коэффициента доступности 0,999 [14], временной задержки при передаче данных в СИВ (длительность одного видеокadra) 40мс [16], вероятности ошибки $P_{ош} \leq 10^{-5}$ согласно рекомендациям [14]. Как отмечено выше (параграф 3.1), при выборе величины допустимой временной задержки при передаче данных рассматривается пример мониторинга нерегулируемого переезда. Видеоинформация с переезда с помощью системы интеллектуального видеонаблюдения (СИВ) передается в кабину машиниста поезда (или бортовой компьютер). Задержанный по вине канала связи один видеокادر может вызвать ошибку в распознавании опасного объекта. Для удовлетворительного качества работы СИВ и обеспечения требуемых значений вероятностей правильного $P_{прав/обн}$ и ложного обнаружений $P_{лож/обн}$ качество связи должно быть $P_{ош} \leq 10^{-5}$. Величина вероятности ошибки меняется в зависимости от позиционности кода и вида модуляции при движении поезда из-за флуктуаций уровня сигнала (м/з и б/з). Поэтому в параграфе 4.3. рассмотрена методика расчета

качества связи, учитывающая специфику алгоритма работы технологии Wi-Fi и возможные колебания значений $P_{ош}$.

Следует отметить, что разработанные методики расчета показателей эффективности канала Wi-Fi основываются на экспериментальных данных (законах ПРВ длительности хэндовера τ_x , глубине и продолжительности провалов $\tau_{np/к/с}$, опасных флуктуаций $\tau_{о/фл}$ к/с, а также средних значений $M[\tau_x]$, $M[\tau_{np}]$, $M[\tau_{о/фл}]$), а также аналитического материала теории передачи сигналов (помехоустойчивости аналоговых и цифровых систем). В результате предложены методики оценки критериев эффективности канала Wi-Fi для технического мониторинга, учитывающие причины возникновения хэндовера, флуктуаций и провалов к/с (медленные и быстрые замирания огибающей сигнала) и последствия в виде искажений символов в цифровых пакетах.

4.2 Разработка методики оценки коэффициента доступности канала Wi-Fi

Доступность канала Wi-Fi – важный критерий эффективности беспроводной технологии, определяющий способность своевременной доставки данных технического мониторинга на подвижной состав и в центр принятия решений.

Понятие доступности означает, что канал находится в рабочем состоянии и может передавать информацию. Доступность характеризуется коэффициентом доступности K_{δ} . Для оценки коэффициента K_{δ} необходим экспериментальный материал. По статистическим данным определяются временные промежутки, когда канал Wi-Fi не выполняет описанную выше функцию (не доступен). Отношение суммы временных промежутков хэндовера, глубоких провалов и флуктуаций к/с к общему времени функционирования канала есть вероятность недоступности $P_{н/д}$ канала между базовыми станциями поезда (ПБС) и стационарными (СБС), установленными вдоль ж/д полотна. Коэффициент доступности канала, являются дополнением до единицы вероятности $P_{н/д}$, а именно: $K_{\delta} = 1 - P_{н/д}$ (см. параграф

3.4.2). Вероятность $P_{н/д}$ можно определить экспериментально (параграф 3.4.2) или аналитически.

Аналитическая формула для расчета $P_{н/д}$, в которой есть связь между причиной (снижением уровня сигнала) и следствием (наступлением опасного хэндовера), имеет следующий вид:

$$P_{н/д} = P_{с/ур} [P_x \cdot P_x(\tau_x > t_d) + P_{нр/к/с} \cdot P(\tau_{нр/к/с} > t_d) + P_{о/фл} \cdot P(\tau_{о/фл} > t_d)], \quad (4.1)$$

где $P_{с/ур}$ - вероятность снижения уровня сигнала из-за м/з и б/з (с.98);

P_x – вероятность возникновения хэндовера (см.3.4.2, с.98);

$P_x(\tau_x > t_d)$ - - вероятность наступления опасного хэндовера (см.3.4.2, с.84);

$P_{нр/к/с}$ - вероятность наступления провала к/с (см. 3.4.4, с.94);

$P_{о/нр/к/с}$ – вероятность наступления опасного провала к/с (ниже 50 Мбит/с) (см.3.4.4, с.95);

$P_{о/фл}$ - вероятность наступления опасных флуктуаций с провалами до 50Мбит/с (см. 3.4.3, с.91);

$P(\tau_{о/фл} > t_d)$ - вероятность, что длительность флуктуаций больше t_d (см. 3.4.3, с.91)

Формула (4.1) исходит из того, что в результате снижения уровня сигнала из-за м/з и б/з замираний возможны варианты событий: наступление хэндовера; провала или флуктуаций к/с. Отличие вероятностей P_x ; $P_{нр/к/с}$; $P_{о/фл}$ в выражениях (4.1) от (3.4, 3.9, 3.11) заключается в том, что в первом случае – это априорные вероятности, во втором – апостериорные (полученные в результате эксперимента).

Вероятностью $P_{н/д}$ (4.1) можно также характеризовать оперативность канала Wi-Fi, которая заключается в том, что временная задержка превысит (или не превысит) допустимое время, например, 40мс (длительность одного видеокadra) или 4,615мкс (длительность цифрового кадра [28]). Другой подход к оценке оперативности представлен в параграфе 4.3.

Варианты отклонений величины с/ш из-за хэндовера, провалов и флуктуаций к/с, длительностью менее t_d , приемное устройство БС воспринимает как аномальные ошибки, вызванные несвоевременным поступлением символов в кадре

(управления или трафика). Вероятность аномальной ошибки $P_{ан}$ (потери цифрового пакета) можно рассчитать следующим образом:

$$P_{ан} = P_{с/ур} [P_x \cdot P_x(\tau_x < t_\delta) + P_{np/\kappa/c} \cdot P(\tau_{np/\kappa/c} < t_\delta) + P_{o/\phi\lambda} \cdot P(\tau_{o/\phi\lambda} < t_\delta)] \quad (4.2)$$

Вероятности $P_x(\tau_x < t_\delta)$; $P(\tau_{np/\kappa/c} < t_\delta)$; $P(\tau_{o/\phi\lambda} < t_\delta)$ в формуле (4.2) являются дополнением до единицы вероятностей: $P_x(\tau_x > t_\delta)$; $P(\tau_{np/\kappa/c} > t_\delta)$; $P(\tau_{o/\phi\lambda} > t_\delta)$ в формуле (4.1).

Как отмечено выше, оценкой качества канала Wi-Fi является вероятность ошибки при приеме элементарного импульса $P_{ош}$, порядок которой можно рассчитать через вероятность аномальной ошибки $P_{ан}$, которая равносильна потере пакета, исходя из формулы [44]: $P_{ан} = \kappa \cdot P_{ош}$, где κ - количество символов (импульсов) в кадре (см.3.4.4, с.95). Разработанная методика расчета для оценки вероятности ошибки $P_{ош}$ представлена в параграфе 4.4.

Аналитическая формула (4.1) позволяет сделать прогноз величины коэффициента доступности канала Wi-Fi с помощью полученных экспериментальных данных на основании оценок значений вероятностей $P_{с/ур}$, $P_{м/з}$, $P_{б/з}$, $P_x(\tau_x > t_\delta)$, $P(\tau_{np/\kappa/c} > t_\delta)$, $P(\tau_{o/\phi\lambda} > t_\delta)$.

Как показал анализ экспериментальных данных, длительность хэндовера много больше, чем продолжительность одиночных провалов и опасных флуктуаций к/с с провалами до нуля, требующими повторных передач. Это значит, что основное влияние на доступность канала Wi-Fi оказывает процесс хэндовера. Отсюда вероятности $P(\tau_{np/\kappa/c} > t_\delta)$, $P(\tau_{o/\phi\lambda} > t_\delta)$ в формуле (4.1) можно принять близкими к нулю, если время $t_\delta = 40$ мс.

При этом необходимо учесть алгоритм переключений базовых станций БС, в основе которого (выбора активной или рабочей БС) лежит принцип максимального отношения мощностей с/ш. Поэтому вероятность наступления хэндовера P_x (3.4) в большей степени определяется вероятностью провала огибающей несущего сигнала под действием медленных замираний, так как среднее значение с/ш зависит от характера м/з (рис.3.3,3.4). Отсюда, расчетную формулу (4.1) для

вероятности наступления недоступности канала Wi-Fi можно переписать следующим образом:

$$P_{н/д} = P_{с/ур} \cdot P_x \cdot P_x(\tau_x > t_d). \quad (4.3)$$

Произведение трех вероятностей в выражении (4.3) означает, что одновременно имеет место три события: 1) снижение уровня сигнала на входе ПБС; 2) принятие решения о хэндовере; 3) длительность хэндовера оказывается более t_d .

Произведение $P_{с/ур}$ (вероятности снижения уровня) и P_x (вероятность возникновения хэндовера) есть вероятность $P_{6/3}$ (вероятность временных задержек, см. 3.4.2, с.84). Таким образом, рассчитанный коэффициент доступности ($K_d = 0,978$) в параграфе 4.3.2. по формулам (3.1), (3.5), (3.6) соответствует расчетам по формуле (4.3).

Вероятность P_x определяется экспериментально (см. 3.4.2). Аналитическая формула для расчета P_x может быть получена после детального анализа алгоритма переключений БС, который зависит от производителя аппаратуры Wi-Fi.

4.3 Разработка методики оценки оперативности канала Wi-Fi

Оперативность технологии Wi-Fi и соответствие ее требованиям технического мониторинга подвижного состава ж/д транспорта оценивается средним значением временной задержки $M[t_3]$ в передаче информации и вероятностью того, что временная задержка не превысит (или превысит) заданную допустимую величину t_d . На оперативность доставки данных мониторинга влияет любая временная задержка (провал и флуктуации к/с, а также хэндовер, означающий «обрыв канала»). Расчетная формула для оценки времени задержки $M[t_3]$ имеет следующий вид (см.4.2, с.100):

$$M[t_3] = \{P_x \cdot M[\tau_x] + P_{о/фл} \cdot M[\tau_{о/фл}] + P_{np/к/с} \cdot M[\tau_{np/к/с}]\}, \quad (4.4)$$

где $M[\tau_x]$ - математическое ожидание длительности хэндовера или временных задержек;

$M[\tau_{o/\phi л}]$ - математическое ожидание продолжительности опасных флуктуаций или временных задержек;

$M[\tau_{np/\kappa/c}]$ - математическое ожидание провалов к/с или временных задержек.

Вероятности P_x ; $P_{o/\phi л}$; $P_{np/\kappa/c}$ вычисляются на основании статистического материала, собранного в результате эксперимента (глава 3).

Превышение значения $M[t_3]$ (4.4) величины допустимого времени t_0 будет свидетельствовать о недостаточной оперативности канала Wi-Fi. Значение вероятности превышения t_0 позволит оценить частоту этого явления.

Расчет временных задержек из-за хэндоверов, резких провалов и опасных флуктуаций к/с, которые увеличивают длительность передачи данных, требует дополнительных пояснений. Это касается прежде всего длительных провалов к/с, которые могут приводить не только к временным задержкам на время более заданной величины t_0 (например, длительности цифрового кадра t_k), но и срывам сеансов связи, а также повторным передачам информации. В результате значительно снижается оперативность канала Wi-Fi. Поэтому требуются дополнительные уточнения к расчету временных задержек.

Для более детального анализа временных задержек из-за повторных передач нужен анализ увеличения времени сеанса связи, которые возникают при длительностях хэндовера, провалов и флуктуаций к/с свыше, например, времени цифрового кадра t_k стандарта Wi-Fi. Например, при условии однократного повтора кадра t_k длительностью 4,615мкс [44], время передача данных длится 9,23мкс, временная задержка соответствует длительности кадра. Необходимо определить среднее число повторов цифровых кадров, которое происходит из-за срывов сеансов связи. Требуется оценить также среднее количество повторов передачи при нарушении работы канала Wi-Fi по вине хэндовера n_x , провалов $n_{np/\kappa/c}$ и опасных флуктуаций к/с $n_{o/\phi л}$. Общее время задержки есть произведение среднего числа повторов в случае неподтверждения начала сеанса связи (с учетом вероятностей с.100) на длительность цифрового кадра t_k в каждом из перечисленных выше случаев:

$$M[t_3] = P_{c/yp} \cdot t_k (P_x \cdot n_x + P_{o/\phi_l} \cdot n_{o/\phi_l} + P_{np/k/c} \cdot n_{np/k/c}), \quad (4.5)$$

где n_x - среднее число повторных передач из-за хэндовера;

n_{o/ϕ_l} - среднее число повторных передач из-за опасных флуктуаций к/с;

$n_{np/k/c}$ - среднее число повторных передач из-за опасных провалов к/с .

Согласно трактовки алгоритма вычисления $M[t_3]$ по формуле (4.5), если временная задержка t_3 не превысила величину длительности t_k , то повторных передач не будет.

Среднее число повторных передач n в предположении, что максимальное число повторов не превышает пяти, рассчитывается для каждого случая (хэндовера, провалов и флуктуаций к/с) отдельно по следующей формуле:

$$n = 1 \times P(\tau > t_k) + 2 \times P(\tau > 2t_k) + 3 \times P(\tau > 3t_k) + 4 \times P(\tau > 4t_k) + 5 \times P(\tau > 5t_k), \quad (4.6)$$

где $P(\tau > mt_k)$ - вероятность того, что длительность (хэндовера, провала или флуктуаций к/с) превысит время t_k m , где $m=1,2,3,4,5$ (одного, двух .. пяти) цифровых кадров.

Конкретные значения времени $M[t_3]$ и числа допустимых повторных передач m (4.6) зависят от алгоритма технологии Wi-Fi.

Если сравнить по влиянию на оперативность канала Wi-Fi временные задержки из-за одиночных провалов и флуктуаций к/с, а также хэндовера, то наибольшую опасность имеют флуктуации к/с с провалами до 50 Мбит/с. Отсюда, расчетную формулу $M[t_3]$ можно упростить следующим образом:

$$M[t_3] \cong P_{o/\phi_l} \cdot M[\tau_{o/\phi_l}]. \quad (4.7)$$

Вычисления по формулам (4.5), (4.6), (4.7) предполагают предварительную оценку апостериорных вероятностей наступления хэндовера, опасных флуктуаций и провалов к/с (с.103).

Так, для вычисления оперативности по формуле (4.7) апостериорная вероятность наступления опасных флуктуаций P_{o/ϕ_l} и среднее значение τ_{o/ϕ_l} определяются экспериментальным путем (см.3.4.3).

Как отмечено выше, оперативность технологии Wi-Fi можно оценить также с помощью вероятности превышения (или не превышения) временной задержки t_3

допустимого значения t_0 . Для этого требуется определить ПРВ длительности t_3 или временных задержек из-за хэндовера, флуктуаций и провалов к/с (4.4). Для расчета по формуле (4.7) в качестве ПРВ и среднего значения времени t_3 можно использовать результаты обработки статистических данных гистограммы времени опасных флуктуаций к/с τ_{o/ϕ_n} (см. 3.4.3). При условии экспоненциального закона ПРВ вероятность превышения t_3 допустимого значения t_0 (например, 40мс) можно рассчитать следующим образом:

$$P(t_3 > t_0) = \int_{t_0}^{\infty} \lambda \cdot \exp(-\lambda t) dt = \exp\left(-\frac{t_0}{M[t_3]}\right), \text{ где } \lambda = \frac{1}{M[t_3]}.$$

Вероятность не превышения временной задержки t_3 допустимого значения t_0 определяется как: $1 - P(t_3 > t_0)$. Аналогичный метод расчета вероятности не превышения заданного времени с учетом только опасных флуктуаций к/с приведен в параграфе 3.4.3, (3.8), (3.9).

В результате получена величина вероятности задержки, не превышающей допустимое значение, равное $P(t_3 < t_0) = 0,00241$.

Оценка величины допустимого времени t_0 для технического мониторинга требует отдельного исследования. Это время может меняться в зависимости от цели и объекта технического мониторинга.

4.4. Разработка методики оценки качества канала Wi-Fi

Критерий качества канала технического мониторинга и оценки его с помощью вероятности потери пакета $P_{n/нак}$ (аномальной ошибки $P_{ан}$) или вероятности ошибки при приеме элементарного импульса $P_{ош}$ являются характеристикой достоверности принятой информации и обоснованием последующих действий. Для определения значений $P_{n/нак}$ и $P_{ош}$ необходима разработка методики расчета вероятностей на основе анализа помех, действующих в канале Wi-Fi, а также других факторов, влияющих на качество канала Wi-Fi. Такими факторами являются: 1) зависимость вероятностных характеристик м/з и б/з (отношения с/ш) от скорости движения поезда на открытых участках и в

тоннелях; 2) влияние алгоритма изменения параметра модуляции базовой станции (главное, скорости передачи информации) от флуктуаций амплитуды несущего сигнала; 3) влияние алгоритма переключений БС на количество хэндоверов, в том числе «ложных»; 4) влияние характеристик элементной базы электроники на отношение с/ш и быстродействие переключений устройств сети Wi-Fi поезда.

Преимущества любой методики расчета качества канала заключается в том, что не надо каждый раз собирать статистический материал, проводить измерения и расчеты апостериорных вероятностей. На основании готовой методики и имеющихся априорных вероятностей, законов ПРВ, математических ожиданий и дисперсий случайных величин (см. 3.4), а также характеристик зависимостей перечисленных выше факторов на стадии эскизных проектов можно дать оценку целесообразности использования канала Wi-Fi для конкретной задачи.

В работе основное внимание уделено анализу воздействия синусоидальных помех, возникающих в канале Wi-Fi за счет снижения отношения мощностей полезного сигнала и шума на входе приемника (с/ш) из-за медленных замираний (м/з) и флуктуаций уровня несущей из-за быстрых замираний (б/з) сигнала. Как отмечено в (3.4.4), интерференция отраженных лучей вызывает аномальные ошибки, которые приводят к ухудшению качества канала Wi-Fi. Последствием аномальной ошибки (потеря от одного до всех символов цифрового пакета) может стать (согласно алгоритма работы канального декодера [3]) отбраковка всего пакета. Поэтому для характеристики качества (как функции вероятности от с/ш) используются значения $P_{n/пак}$ и $P_{ош}$, так как и одиночная ошибка может привести при проверке на четность к потере пакета. Рекомендованные параметры оценки качества канала приведены в [67-71].

Таким образом, при расчетах качества требуется учитывать глубину провалов несущей из-за б/з на фоне внутреннего шума приемника. Как отмечено выше, причины медленных замираний заключаются в уменьшении уровня сигнала (с/ш) при движении поезда и удалении от СБС. Последствия м/з зависят от уровня сигнала и порога чувствительности приемника в виде отношения с\ш α^2 . Параметр α^2 непосредственно определяет количество хэндоверов. Последствия быстрых

замираний б/з зависят от глубины искажений огибающей за счет наложения отраженных сигналов. Глубина провалов или выбросов огибающей определяются отношением с/ш (α^2), условиями распространения сигнала и скоростью движения поезда. Искажения огибающей влияют на амплитуду импульса и (как будет показано ниже) на временной сдвиг символа в пределах своего интервала с учетом циклического префикса. Можно сделать следующий вывод на основании материала главы 3.4: быстрые замирания – это изменения уровня входного сигнала относительно среднего значения, определяемого м/з. Быстрые замирания (рис.3.3, 3.4,3.4) имеют отрезки относительно незначительных колебаний уровня сигнала и заметные отклонения от среднего значения (-35дБм) входного сигнала (например, провалы и выбросы начиная с $\pm 2,5\text{дБм}$).

Последствиями замираний входного сигнала являются ошибки пропуска и ложного обнаружения символа. Трактовка механизма образования ошибок за счет выбросов амплитуды импульса из-за б/з и последствий образования временных сдвигов импульса за пределы временного интервала представлена на рис 4.1 [44]. Так, выброс огибающей входного сигнала приводит к росту амплитуды импульса на выходе демодулятора ДМ приемника и расширению его по длительности. Момент срабатывания решающего устройства (РУ) с пороговым алгоритмом работы (т.е. порогового устройства ПУ) на уровне U_{nop} , фиксирующего огибающую на выходе ДМ фронтами импульса, сдвинется за счет искажений на интервал $\Delta t = (t_2 - t_1)$. В результате от переднего фронта решающее устройство ПУ сработает раньше на время Δt . На тот же временной промежуток отодвинется задний фронт импульса. Если сдвиг не превышает величину защитного интервала (циклического префикса $\tau_{u/np}$), то ошибка не произойдет. Если временной сдвиг превысит защитный интервал $\tau_{u/np}$, то на следующем интервале (разряде кодового слова) от заднего фронта предыдущего импульса на уровне U_{nop} может быть зафиксирована единица вместо нуля (ложное срабатывание ПУ). При провале огибающей входного сигнала и соответственно амплитуды символа происходит сужение импульса. В этом случае главной причиной ошибки (пропуска) является

уменьшение амплитуды импульса ниже $U_{нор}$. Для пояснения, как связаны провалы уровня входного сигнала и отношения с/ш с уменьшением амплитуды импульса, ниже приведены примеры.

При провале с/ш (SNR с.72) на 20дБм из-за м/з амплитуда импульса на выходе демодулятора (при условии, что демодулятор имеет коэффициент передачи близкий к 1) уменьшится в 10 раз.

При провале огибающей несущего сигнала (рис.3.3,3.4,3.5) на 3дБм (SNR с.72) из-за б/з на выходе демодулятора амплитуда уменьшится в 1,41 раза и также могут произойти ошибки пропуска символа (при двухпозиционном кодировании понятие импульса и символа совпадают). Таким образом, главная задача – провести анализ взаимосвязи между флуктуациями амплитуды входного сигнала из-за м/з и б/з (причинами ухудшения качества) и последствиями в виде ошибок пропуска и ложного срабатывания решающего устройства (с помощью вероятности $P_{ош}$).

В основе методики расчета вероятности ошибки $P_{ош}$ лежит анализ экспериментальных данных работы канала Wi-Fi поезда и оценка аномальных искажений полезного сигнала от действия м/з и б/з (глава 3). Как отмечено выше, аномальные ошибки символов происходят из-за флуктуаций огибающей сигнала на выходе демодулятора (ДМ), которые приводят к изменениям амплитуды импульса (уменьшению или росту) и временным сдвигам Δt положения импульса за пределы своего интервала (разряда). Если величина Δt превысит защитный интервал (циклический префикс $\tau_{ц/пр}$), то произойдет ошибка ложного различения символа с вероятностью ложного срабатывания $P_{л/ср}$. Как отмечено выше, это означает превышение порога $U_{нор}$ передним и задним фронтами импульса соответственно на предыдущем или последующем временном интервале из-за сдвига импульса за пределы защитного интервала. Это есть следствие временной дисперсии, которая происходит в результате «многолучевости» распространения радиосигнала дециметрового диапазона [61].

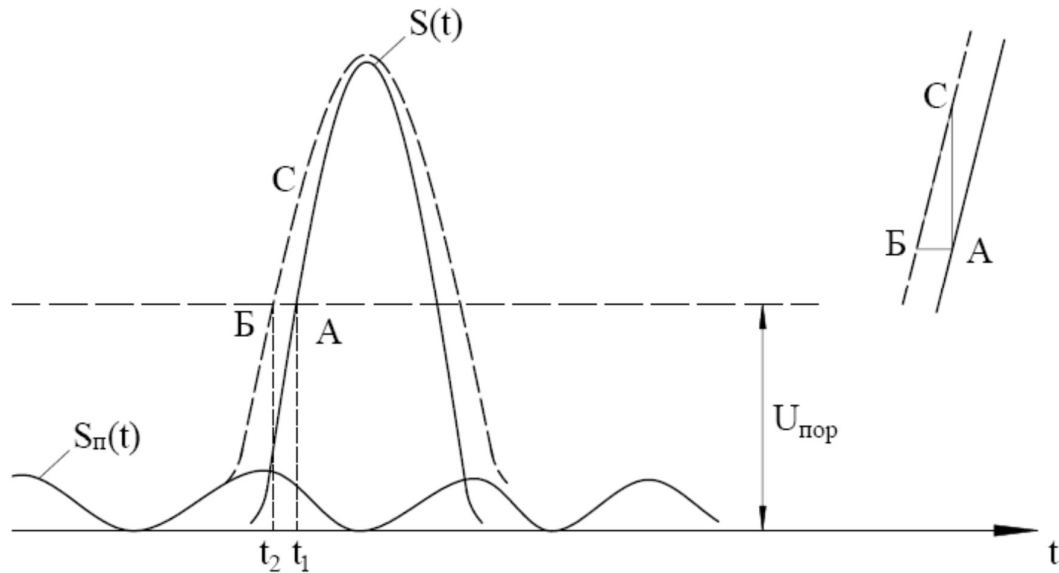


Рисунок 4.1 – Механизм образования временных сдвигов Δt символа за счет замираний огибающей: $S(t)$ и $S_n(t)$ соответственно огибающая импульса и шума от б/з; t_1 и t_2 моменты срабатывания ПУ на уровне $U_{пор}$ (точки А и Б) соответственно в отсутствии шума и с шумом [44]

При условии неизменности порога срабатывания ПУ, которое фиксирует символ на уровне $U_{пор}$, равном середине амплитуды импульса, могут происходить аномальные ошибки. Вероятность аномальной ошибки – это ошибка хотя бы в одном символе цифрового кадра (пакета) [44]. Длительность выбросов или провалов несущей от б/з (десятки мс) в случае наложения с цифровым кадром длительностью, равной произведению числа символов (в зависимости от стандарта Wi-Fi порядка сотни [3]) на время одного импульса (десятые доли мс [3,28]), позволяет сделать вывод о возможности возникновения аномальной ошибки.

Другой случай возникновения ошибки соответствует провалу огибающей входного сигнала. Снижение амплитуды импульса из-за б/з можно представить символически в виде повышения порога ПУ в то же число раз. Снижение амплитуды на фоне собственного шума приемника опасно ошибками пропуска символа. Кроме того, момент фиксации во времени положения импульса (срабатывания ПУ) также искажается из-за снижения крутизны импульса на уровне порога (чем ближе к верхушке импульса, тем меньше крутизна). Максимальная крутизна импульса имеет место в середине амплитуды импульса. Временной сдвиг

в пределах разряда является ошибкой для фазоимпульсной модуляции. Для цифровых видов модуляции ошибка происходит только при сдвиге, превышающим $\tau_{ц/пр}$. Это происходит, если увеличение амплитуды и длительности импульса достаточно большие. В результате временной сдвиг фронтов приведет к ошибкам в распознавании символа (ложном срабатывании ПУ) (рис. 4.1).

Таким образом, при выбросе огибающей из-за б/з и росте амплитуды импульс расширяется (передний фронт двигается влево, задний фронт передвигается вправо и на смежных временных интервалах происходят ошибки, например, фиксируются 1 вместо 0). При этом порог $U_{пор}$ символически опускается ближе к основанию импульса, где крутизна переднего фронта меньше. Следовательно, медленные замирания (средний уровень входного сигнала) определяют величину порога $U_{пор}$ срабатывания ПУ на уровне половины амплитуды импульса, быстрые замирания – тип ошибки при приеме импульса (пропуска или ложного срабатывания). При этом важно адаптивно отслеживать м/з и подстраивать величину $U_{пор}$.

Отсюда, вероятность ошибки $P_{ош}$ в результате действия б/з можно оценить по формуле:

$$P_{ош} = P_{пров} \cdot P_{пр/с} + P_{выбр} \cdot P_{л/ср} \quad , \quad (4.8)$$

где $P_{пров}$ – вероятность провала огибающей несущего сигнала из-за б/з ($P_{б/з}$ с.85);

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

$P_{пр/с}$ – вероятность пропуска импульса из-за провала огибающей символа;

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

Вероятность пропуска импульса $P_{пр/с}$ наступает в результате провала огибающей несущего сигнала на входе приемника БС. Это значит, что пропуск импульса будет иметь место, если совпадут два события: замирание несущей и провал амплитуды импульса ниже порога.

Вероятность $P_{л/ср}$ соответствует вероятности события $P(\Delta t > \tau_{ц/пр})$, когда временной сдвиг фронта импульса больше циклического префикса из-за выброса

$P_{выбр}$ огибающей (б/з) и происходит ложное срабатывание ПУ. Это значит, что ложное срабатывание произойдет, если совпадут два события: выброс несущей и временной сдвиг положения импульса больше защитного интервала.

Таким образом, вероятность ошибки $P_{ош}$ из-за ложного срабатывания ПУ ($P_{л/ср}$) и пропуска ($P_{пр/с}$) в случае от б/з происходит следующим образом.

Пороговый алгоритм ДМ (как наиболее простой в технической реализации) сработает на первый выброс огибающей за границами интервала. Как отмечено выше, произойдет ошибка (4.8) (ошибка хотя бы одного символа в кадре или пакете), если соблюдены два условия: 1) величина временного сдвига $\Delta t > \tau_{ц/пр}$; 2) амплитуда символа превысит порог $A_{сум} > U_{пор}$. Выполнение первого условия оценивается вероятностью $P(\Delta t > \tau_{ц/пр})$ (4.9); второго - вероятностью ложного срабатывания $P_{л/ср}$. На практике при выполнении первого условия (временного сдвига на соседний интервал) РУ сработает от первого выброса амплитуды [3,61]. Поэтому величина $P(\Delta t > \tau_{ц/пр})$ определяет вероятность $P_{л/ср}$.

Вероятности $P_{пров}$; $P_{выбр}$ рассчитаны на основании экспериментальных данных по формулам (где в числителе - суммарное время провалов или выбросов огибающей несущего сигнала, в знаменателе - общее время эксперимента (1000с). В результате получены следующие цифры вероятностей провалов и выбросов, изменяющихся в пределах $\pm 2,5$ дБм: $P_{пров} = 0,022$, $P_{выбр} = 0,031$. Как показал анализ влияния величины (измеренной в дБм) провалов и выбросов на качество канала Wi-Fi, заметные ошибки происходят при провалах и выбросах, начиная с величины $\pm 1,5$ дБм.

Вероятность пропуска символа (импульса) $P_{пр/с}$ можно рассчитать из предположения релейского закона распределения плотности вероятностей огибающего импульса на выходе демодулятора ДМ [44]. Величина $P_{пр/с}$ есть вероятность того, что амплитуда импульса опустится ниже порога $U_{пор}$, определяется по формуле:

$$P_{пр} = \exp(-U_{пор}^2 / 2\sigma_h^2), \quad (4.9)$$

где σ_h^2 – дисперсия случайных флуктуаций амплитуды импульса в результате флуктуаций огибающей входного сигнала приемника от действия б/з, представленная в виде шума (искажений).

Выражение (4.9) означает, что провал амплитуды под действием б/з будет больше порога.

Вероятность $P(\Delta t > \tau_{ц/нр})$ или $P_{л/ср}$ можно оценить по формуле [30], исходя из предположения нормального закона ПРВ:

$$P(\Delta t > \tau_{ц/нр}) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta t}^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_{\Delta t}^2}\right) dx, \quad (4.10)$$

где $x = \Delta t$, $\sigma_{\Delta t}^2$ – дисперсия Δt .

Для расчета вероятностей $P_{нр/с}$, $P(\Delta t > \tau_{ц/нр})$ или $P_{л/ср}$ требуется определение дисперсии глубины провалов и выбросов несущей под действием б/з.

Шум или искажения огибающей от б/з есть результат интерференции (наложения множества отраженных лучей полезного сигнала, имеющих разную начальную фазу и амплитуду). Поэтому, закон ПРВ случайных флуктуаций огибающей входного сигнала приемника соответствует нормальному закону [30]. Величину дисперсии таких флуктуаций σ_h^2 можно определить на основании экспериментальных данных с помощью правила «трех сигм». В качестве примера ниже приведен расчет вероятности $P(\Delta t > \tau_{ц/нр})$.

Так, с учетом чувствительности (порогового уровня) приемника ПБС $p_{н/ч} = -95$ дБм (рис.3.5.), среднего значения с/ш $\alpha_{м/з}^2 = 60$ дБм и величины флуктуаций параметра $\alpha_{б/з}^2$ (± 5 дБм) дисперсия шума имеет порядок: $\sigma_h^2 \cong 10^{-9}$ Вт. Представленное значение дисперсии получено после расчета величин флуктуаций амплитуды несущего сигнала на входе демодулятора под действием б/з $\alpha_{б/з}^2$ на основании экспериментальных данных. Таким образом, глубина б/з определяет дисперсию σ_h^2 (глава 3).

Временной сдвиг Δt символа (импульса) есть случайная величина, которая распределена по закону Гаусса, так как является следствием воздействия шума (гауссовских искажений) от б/з. Дисперсия $\sigma_{\Delta t}^2$ временного сдвига (с учетом

коэффициента передачи ДМ, равного единице) определяется через дисперсию σ_h^2 и крутизну импульса D_s на уровне порога $U_{пор}$ следующим образом [44] (см. выражения ниже).

Так, для углов между порогом и огибающей на уровне половины амплитуды импульса $U_{пор} = \frac{A_{сим}}{2}$, близких к максимально возможной крутизне импульса и с соответствующей величиной D_s^2 , рассчитанной как квадрат тангенса угла $89,970$ ($D_s^2 = 3 \cdot 10^6$), дисперсия временного сдвига Δt , вычисленная по формуле [44], равна:

$$\sigma_{\Delta t}^2 = \frac{\sigma_h^2}{D_s^2}, \quad (4.11)$$

т. е. составит величину $\sigma_{\Delta t}^2 \cong 0,33 \cdot 10^{-15}$ (рис.4.1).

Максимальную крутизну D_s , которая имеет место в середине импульса, можно обеспечить при адаптивном отслеживании изменений уровня входного сигнала из-за м/з.

Влияние крутизны импульса на временной сдвиг и вероятность ошибки можно показать на следующих примерах. Для угла 60^0 на уровне порога $U_{пор} = \frac{A_{сим}}{2}$ срабатывания ПУ, где $A_{сим}$ - амплитуда символа или элементарного импульса на входе ПУ, определяемая параметром $\alpha_{6/3}^2$, крутизна (тангенс угла) равна величине $D_s^2 = (1,73)^2 \cong 3$.

Отсюда, дисперсия временных сдвигов Δt (4.11), в результате которых импульс может передвинуться на соседний интервал, переносящий символ «0», составит: $\sigma_{\Delta t}^2 = \frac{\sigma_h^2}{D_s^2} = \frac{10^{-9}}{3} \approx 0,33 \cdot 10^{-9}$.

Для угла в 85^0 крутизна переднего фронта импульса составит величину $tq_{85^0} = 11,73$, $D_s^2 \cong 137,6$, временной сдвиг по сравнению с углом в 60^0 уменьшится на два порядка, а именно:

$$\sigma_{\Delta t}^2 = \frac{\sigma_h^2}{D_s^2} = \frac{10^{-9}}{137,6} \approx 0,73 \cdot 10^{-1}.$$

Отсюда, от крутизны импульса дисперсия временной ошибки может измениться на несколько порядков. Следовательно, значительное влияние на

вероятность временного сдвига (ошибки ложного срабатывания) оказывает крутизна фронта импульса.

Для расчета вероятности ошибки по формуле (4.8) требуются значения вероятностей выброса $P_{выбр}$ и провала $P_{пров}$ несущей за счет б/з. Как отмечено выше, после обработки экспериментальных данных (с флуктуациями несущей в пределах $\pm 2,5$ дБм) имеем: $P_{выбр} = 0,031$, $P_{пров} = 0,022$.

Расчет вероятности $P(\Delta t > \tau_{ц/пр})$, характеризующей $P_{л/ср}$, приведен ниже.

На основании (4.10) с помощью табличного интеграла $V[x]$ (дополнения к интегралу вероятности [30]), для максимально возможной крутизны импульса (4.11) получим следующее значение для $P(\Delta t > \tau_{преф})$:

$$P(\Delta t > \tau_{ц/пр}) = P(x_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} \exp(-\frac{z^2}{2}) dz, \text{ где } x_1 = \frac{\Delta t}{\sigma_{\Delta t}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-9}}{0,173 \cdot 10^{-9}} = 2,31;$$

$$P(\Delta t > \tau_{преф}) = 9,176 \cdot 10^{-2} \text{ для } \tau_{ц/пр} = 400 \text{ пс.}$$

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 (с/ш) не должно превышать 30дБм. Уровень $p_{с/от}$ с учетом чувствительности приемника (-95дБм) имеет порядок (-65дБм). Поэтому на открытых участках при расчете ошибок сигнала нужно учитывать шум приемника.

В тоннелях больше отражающих поверхностей (стенки тоннеля и внутреннее оборудование), чем на открытых участках. Это значит, что влияние эффекта интерференции отраженных лучей на входе приемника сильнее. Поэтому отношение с/ш имеет порядок 60дБм, средний уровень сигнала $p_{с/т}$ соответственно равен величине (-35дБм). В этом случае шумом приемника можно пренебречь. Величина σ_h^2 для разброса выбросов сигнала $\pm 2,5$ дБм меняется следующим образом: для открытых участков $\sigma_h^2 = 1,314 \cdot 10^{-8}$ Вт, для тоннелей $\sigma_h^2 = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Вт.

На величину $P_{л/ср}$ значительное влияние оказывает крутизна импульса и защитный интервал. Так, для максимальной крутизны импульса, отмеченной выше, в тоннелях вероятность $P_{л/ср}$ для значения защитного интервала $\tau_{ц/пр} = 400$ пс равна

$P_{л/ср} = 0,47$, для $\tau_{ц/нр} = 800$ пс вероятность уменьшается более, чем в 5 раз, а именно:
 $P_{л/ср} = 0,09$.

На открытых участках амплитуда значительно меньше, а длительность импульса не меняется. Поэтому импульс растягивается, и крутизна падает в число раз, соответствующее отношению амплитуд на открытых участках и тоннелях. Так, для открытого участка с учетом шума приемника вероятность ложного срабатывания несколько выше $P_{л/ср} = 0,49$. Однако, увеличение защитного интервала в этом случае влияет на $P_{л/ср}$ незначительно.

Как отмечено выше, амплитуда импульса постоянно изменяется под действием медленных замираний сигнала. Поэтому важно отслеживать изменение амплитуды и адаптивно подстраивать величину порога согласно характеру колебаний огибающей сигнала (м/з).

С учетом отмеченных выше замечаний для расчета вероятности $P_{ош}$ приняты следующие значения при $\alpha_{б/з}^2 = \pm 2,5$ дБм для открытого участка с учетом шума приемника вероятность ложного срабатывания $P_{л/ср} = 0,49$; 2) для тоннеля $P_{л/ср} = 0,47$.

Для расчета вероятности пропуска импульса (4.9) из-за провалов огибающей нужно знать закон распределения плотности вероятностей амплитуды сигнала, изменяющейся под действием б/з. Как отмечено выше, распределение плотности вероятностей флуктуаций огибающей на выходе демодулятора за счет искажений от помех (б/з) подчиняется закону Рэлея.

Это означает, что пропуск сигнала наступает, когда глубина провала (искажений амплитуды импульса) превышает порог. Подставляя в формулу (4.9) $U_{пор} = A_{сум}/2$ (с учетом значений уровня сигнала $p_{с/м} = -35$ дБм для тоннелей и открытых участков $p_{с/ом} = -65$ дБм при $\alpha_{б/з}^2 = \pm 2,5$ дБм) получим примерно одинаковую величину вероятности пропуска импульса $P_{нр/с} = 0,04$. Это означает, что для открытых участков с учетом шума приемника и тоннелей вероятность пропуска $P_{нр/с}$ имеет одинаковый порядок.

Отсюда, вероятность $P_{ош}$, характеризующая также потери пакетов, рассчитанная по формуле (4.8) для $\tau_{ц/np} = 400$ пс, имеет следующие значения: $P_{ош} = 0,0152$ (открытые участки), $P_{ош} = 0,0146$ (тоннели). Эти цифры, полученные аналитическим путем, имеют тот же порядок, что вероятность потери пакета ($P_{n/пак} = 0,021$), полученная выше экспериментально (с.95 параграф 3.4.4).

Полученная выше оценка качества связи через вероятность ошибки не позволяет ответить на вопрос соответствия канала Wi-Fi техническим требованиям мониторинга на ж/д транспорте. Необходимо определить допустимые значения вероятностей потери пакета и ошибки при приеме элементарных символов. Эту задачу можно решить, рассмотрев конкретный пример мониторинга, а именно: обнаружения опасного объекта на переезде с помощью системы интеллектуального видеонаблюдения СИВ.

4.5 Оценка допустимого значения вероятности ошибки для технологии Wi-Fi

Расчет допустимых или требуемых значений коэффициента доступности, вероятности задержки сеанса связи, вероятности потери пакета необходимы для оценки эффективности беспроводных каналов связи и пригодности их для сетей технического мониторинга на ж/д транспорте. Для каждой задачи мониторинга в зависимости от объекта могут потребоваться свои методики, в результате которых будут свои значения перечисленных выше параметров. Оценка допустимых значений критериев эффективности беспроводной технологии – это последний этап исследований соответствия каналов связи техническим требованиям мониторинга выбранного объекта. Значения оценок критериев доступности (коэффициент доступности) и величины допустимой временной задержки приведены в параграфах 3.4.2 и 3.4.3.

Расчет допустимого значения вероятности ошибки $P_{ош}$ требует более детального анализа. Как отмечено в предыдущих главах, в диссертационной работе оценка допустимого качества (вероятности потери пакета или ошибки) произведена на основании требований технического мониторинга

нерегулируемого переезда, осуществляемого с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения (СИБ). В этом случае значение $P_{ош}$ рассчитывается, исходя из эффективности работы СИБ. Это значит, что канал Wi-Fi должен обеспечить требуемые значения вероятностей ложного и правильного обнаружения опасных объектов (на переезде) [16,50,52] (см. параграф 3.1).

Методика расчета допустимой величины $P_{ош}$ следующая: а) зафиксировать требуемые значения вероятностей правильного $P_{прав/обн}$ и ложного $P_{лож/обн}$ обнаружения объектов с помощью СИБ; б) найти выражение, связывающее качество канала Wi-Fi ($P_{ош}$) и величину отношения с/ш на входе устройства распознавания СИБ, которое обеспечивает необходимые значения вероятностей $P_{прав/обн}$ и $P_{лож/обн}$; в) на основании алгоритма Неймана-Пирсона рассчитать вероятность $P_{прав/обн}$ от вероятности ошибки на выходе канала Wi-Fi, определяющей с/ш на входе устройства распознавания СИБ; г) построить графики зависимости $P_{прав/обн}$ от $P_{лож/обн}$ при фиксированном значении $P_{ош}$ для разной позиционности кода a (типа модуляции).

Таким образом, на первом этапе из аналитического выражения для $P_{ош}$ следует получить символическое значение отношение сигнала к шуму $\alpha_{сим}^2$, которое определяет качество сигналов на выходе канала Wi-Fi. На основании расчетной формулы для вероятности ошибки при флуктуации амплитуды и начальной фазы несущего сигнала [44] получим $\alpha_{сим}^2$:

$$P_{ош} = \frac{a-1}{2} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_{сим}^2}{2}\right), \quad (4.12)$$

При оценке значения $\alpha_{сим}^2$ необходимо учитывать зависимость величины вероятности ошибки физического импульса от позиционности кода a . Чем выше позиционность, тем больше должно быть отношение с/ш для обеспечения качества (для сохранения вероятности ошибки на требуемом уровне). Поэтому при вычислении значения $P_{ош}$ необходимо учитывать количество бит информации, переносимого элементарным импульсом. Так, количество информации для $a = 2$ равно 1бит [44]. С повышением позиционности увеличивается число бит,

приходящихся на один символ, что можно учесть с помощью следующего выражения: $\log_2 a$.

Таким образом, используя выражения (4.12), (4.13) для вычисления $\alpha_{сим}^2$ при $P_{ош}$, равной например, $P_{ош} = 10^{-5}$ [14,66-69] и позиционности $a=2$ получим $\alpha_{сим}^2=21,43$; для $a=4$ и для $a=16$ (с учетом формулы $\log_2 a$) - соответственно $\alpha_{сим}^2=20$; $\alpha_{сим}^2=18,66$.

Далее значение $\alpha_{сим}^2$ следует увеличить минимум в 1,585 раз (на 2дБм) за счет энергетической эффективности блочного и сверточного кодирования [44].

Известно, что система интеллектуального видеонаблюдения (СИБ), получив информацию с выхода приемника системы Wi-Fi с вероятностью ошибки $P_{ош}$, (соответствует отношению с/ш на входе устройства распознавания СИБ $\alpha_{сим}^2$), должна обеспечить следующие вероятности ложного $P_{лож/обн}$ и правильного $P_{прав/обн}$ обнаружений опасного объекта на переезде: $P_{лож/обн} \leq 10^{-4}$, $P_{прав/обн} \geq 0,9994$ для средней скорости движения не более 120 км/ч [16,72].

Используя критерий Неймана-Пирсона, можно получить допустимое значение вероятности ошибки $P_{ош}$, которое требуется обеспечить на входе устройства распознавания в виде оптимального фильтрующего устройства системы СИБ [16,50]. Для этого нужно:

1) задавшись вероятностью $P_{лож/обн} = 10^{-4}$ и величиной $\alpha_{сим}^2$ (4.14) получить значение порога устройства обнаружения СИБ и аргумента x табличного интеграла «дополнения к интегралу вероятности» $V[x]$ [30],

$$\alpha_{сим}^2 = -2 \ln \frac{2P_{ош}}{a-1}; \quad (4.14)$$

2) получить значение вероятности $P_{прав/обн}$ с помощью табличного интеграла $V[x]$ по формуле:

$$P_{прав/обн} = 1 - V[x]; \quad (4.15)$$

3) сравнить $P_{прав/обн}$ с требуемым значением вероятности правильного обнаружения $P_{прав/обн} \geq 0,9994$;

4) сделать выводы о допустимости величины вероятности ошибки на выходе ПБС.

Величине вероятности $P_{лож/обн} = 10^{-4}$ соответствует аргумент табличного интеграла $x = 3,71$, т.е. $V[3,71]$.

Из формул (4.14) и (4.15) вытекает вывод: чем больше позиционность a , тем меньше $P_{прав./обн.}$, тем сложнее обеспечить требуемое качество связи канала Wi-Fi.

Результаты расчетов вероятностей $P_{прав./обн}$ для разных значений позиционности кода a и $P_{ош}$ представлена на рис.4.1, 4.2, а также табл.1-3.

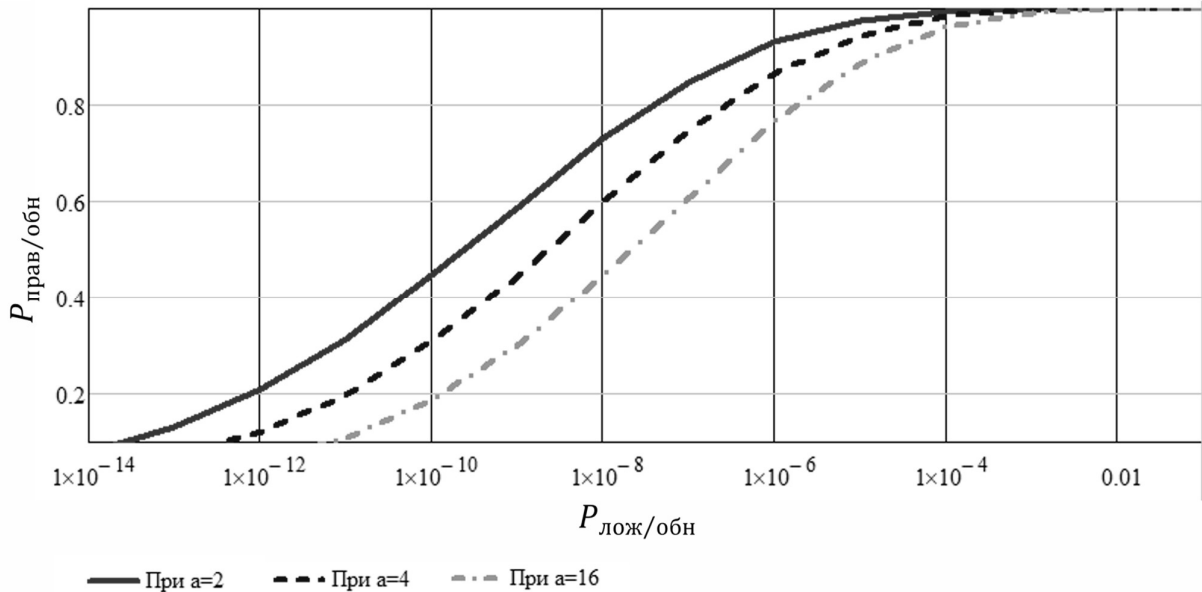
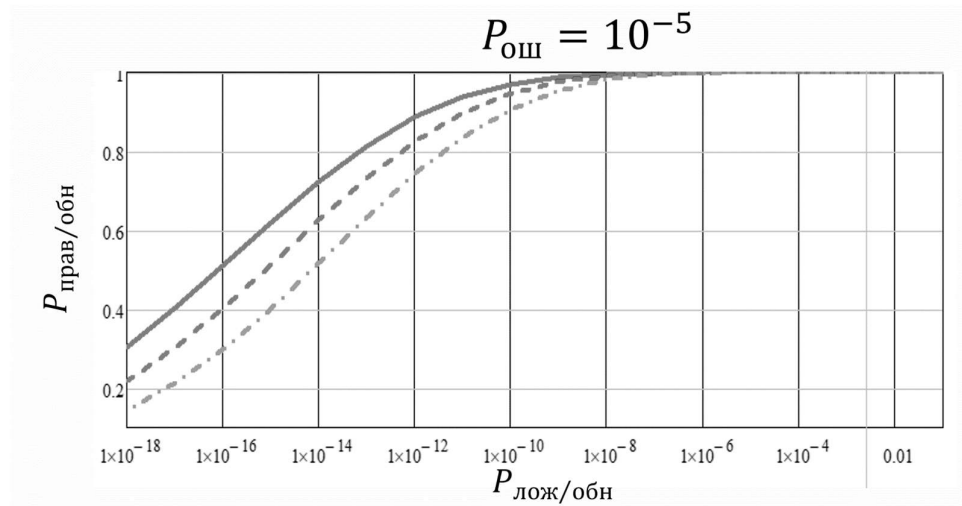
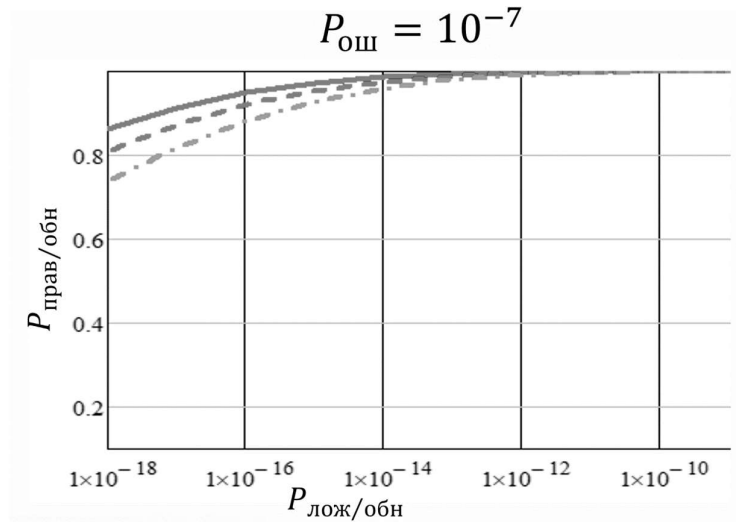


Рисунок 4.2 – Графики зависимости $P_{прав./обн} = f(P_{лож./обн})$ для $P_{ош} = 10^{-3}$ и разных a

Из рис.4.2 можно сделать вывод, что качество канала Wi-Fi $P_{ош} = 10^{-3}$ не соответствует требованиям мониторинга нерегулируемого переезда с помощью СИВ. Для сравнения возможностей разных элементных баз (микроэлектроники и наноэлектроники) на рис.4.3 приведены аналогичные графики $P_{прав./обн} = f(P_{лож./обн})$. Для разных значений a и вероятностей ошибки, обеспечиваемых микроэлектроникой ($P_{ош} = 10^{-5}$) и наноэлектроникой ($P_{ош} = 10^{-7}$), (расчеты см. приложение 3).



а)



б)

Рисунок 4.3 (а, б) – Графики зависимости $P_{\text{прав/обн}} = f(P_{\text{лож/обн}})$ для микроэлектроники а) и нанoeлектроники б)

В табл. 1, 2, 3 представлены результаты расчетов зависимости $P_{\text{прав/обн}} = f(P_{\text{лож/обн}})$ для разных вероятностей ошибки $P_{\text{ош}}$ (10^{-3} ; 10^{-5} ; 10^{-7}) и позиционности кода (типа модуляции). Для высокоскоростного движения к вероятностям правильного и ложного обнаружений опасных событий необходимы повышенные требования ($P_{\text{ош}}$ не более 10^{-7}).

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

Позиционность кода a $P_{\text{лож/обн}}$	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 $P_{\text{прав/обн}}$ для микроэлектроники ($P_{\text{ош}} = 10^{-5}$)

Позиционность кода a $P_{\text{лож/обн}}$	2	4	16
10^{-4}	0.999997083	0.9999898367	0.9999656416
10^{-5}	0.9999658763	0.9998968904	0.999698971
10^{-6}	0.9997605731	0.999361888	0.9983625655

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

Позиционность кода a $P_{\text{лож/обн}}$	2	4	16
10^{-4}	0.9999999996	0.9999999984	0.9999999936
10^{-5}	0.999999989	0.9999999606	0.999999862
10^{-6}	0.9999998351	0.9999994697	0.9999983332

Результаты расчетов, приведенных в табл.1-3, свидетельствуют о том, что необходим переход на нанoeлектронику, обладающую значительно большим быстродействием по сравнению с микроэлектроникой [42,72-74].

Так, нанoeлектроника, обеспечивающая значения вероятности ошибки $P_{\text{ош}} \leq 10^{-7}$ позволяет значительно улучшить вероятность правильного обнаружения $P_{\text{прав/обн}}$ (минимум на три порядка, см.табл. 2.3).

Новая элементная база на основе нанoeлектроники позволит значительно улучшить вероятность правильного обнаружения, что важно для повышения

безопасности движения и реализации технологий высокоскоростного и беспилотного движения поездов.

4.6 Выводы по главе

1. Медленные замирания несущего сигнала (средние значения отношения с/ш) определяют характер флуктуаций уровня входного сигнала, влияющий на изменения амплитуды символов на выходе ДМ приемника, являются случайным процессом, который в пределах ограниченного участка движения (ж/д перегона) можно рассматривать как стационарный. Среднее значение уровня входного сигнала определяет порог ПУ на выходе ДМ и оказывает значительное влияние на вероятность ошибки.

2. Быстрые замирания б/з уровня сигнала оказывают существенное влияние на качество связи (вероятность ошибки). Статистические характеристики флуктуаций (выбросов и провалов) уровня входного сигнала зависят от скорости движения поезда, а также внутренней структуры тоннелей и рельефа открытых участков. Глубина провалов и выбросов несущей из-за б/з определяет мощность помехи, воздействующей на амплитуду символа, и величину ошибки (пропуска и ложного срабатывания ПУ). Значения флуктуаций несущего сигнала, наблюдавшиеся в эксперименте, имеет следующие пределы: от ± 5 дБм до $\pm 1,5$ дБм.

3. Алгоритм работы модема канала Wi-Fi отслеживает флуктуации входного сигнала и подстраивает параметры модуляции (позиционность кода, скорость кодирования, циклический префикс и т.д.) таким образом, чтобы уменьшить вероятность ошибки. Это приводит, в свою очередь, к флуктуациям канальной скорости, длительные провалы которой вызывают сбои в работе канала. Совершенствование алгоритма работы БС должно коррелироваться с задачами мониторинга и критериями эффективности канала Wi-Fi, т.е. нахождение компромисса между скоростью передачи информации и качеством связи.

4. Выбросы и провалы входного уровня сигнала вызывают изменения амплитуды импульса и ошибки в фиксации временного положения импульса, которые приводят к аномальным ошибкам пропуска и ложного срабатывания решающего устройства. Для повышения качества связи порог ПУ должен адаптивно изменяться в зависимости от m/z .

5. Для совершенствования алгоритма работы канала Wi-Fi (модемов БС) необходимы расчеты вероятности пропуска и ложного обнаружения (вероятности ошибки) и оценка законов распределения плотности вероятностей и дисперсии флуктуаций уровня входного сигнала из-за b/z и m/z .

6. Для ответа на вопрос о соответствии технологии Wi-Fi требованиям, предъявляемым к каналам технического мониторинга, необходима оценка допустимых значений по доступности, оперативности и качеству. Эти требования определяются задачей и объектом мониторинга. Так, например для успешного видеонаблюдения за переездами с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения СИВ необходимо обеспечить требуемые значения вероятностей правильного и ложного обнаружения опасного объекта.

7. Разработанная методика оценки параметров доступности, оперативности и качества работы канала Wi-Fi позволяет оценить возможности беспроводной технологии для технического контроля подвижного состава и разработать способы повышения эффективности сети мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВЫВОДЫ

1. Медленный замирания уровня входного сигнала определяют величину $c/\text{ш}$ и процессы хэндовера, которые зависят от скорости движения поезда, условий распространения сигнала и расположения БС.

2. Быстрые замирания уровня входного сигнала зависят от скорости движения поезда и условий распространения сигнала и определяют флуктуации и провалы k/c .

3. Главным фактором, определяющим величину коэффициента доступности канала Wi-Fi, является хэндовер («обрыв канала»).
4. Коэффициент доступности канала Wi-Fi равен $K_d = 0,987$ при норме $K_d = 0,999$.
5. Главным фактором, определяющим оперативность канала Wi-Fi, являются продолжительные флуктуации канальной скорости с провалами к/с до 50 Мбит/с.
6. Среднее значение временной задержки передачи данных в канале Wi-Fi с вероятностью $P(t_z > t_0) = 0,998$ составляет величину 2,87с.
7. Глубокие провалы к/с вызывают аномальные ошибки (потери цифровых пакетов).
8. Величина вероятности потери пакета $P_{n/пак}$ равна 0,021 (согласно экспериментального расчета); 0,015 (согласно теоретического расчета).
9. Технология Wi-Fi с использованием многопозиционного кодирования обеспечивает требуемые вероятности правильного $P_{прав/обн} \geq 0,9994$ и ложного обнаружения $P_{лож/обн} \leq 10^{-4}$ для систем интеллектуального видеонаблюдения СИВ при условии, что вероятность ошибки на выходе канала будет $P_{ош} \leq 10^{-5}$.
10. Как показали исследования, канал Wi-Fi не отвечает требованиям мониторинга нерегулируемого переезда, но может успешно применяться для контроля технического состояния грузовых и пассажирских вагонов с целью установления сроков профилактического ремонта.
11. Для обеспечения требуемой эффективности технологии Wi-Fi для технического мониторинга подвижного состава и реализации проекта высокоскоростного движения поездов потребуется переход на новую элементную базу наноэлектроники и совершенствование алгоритма работы БС.

РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для повышения доступности канала Wi-Fi требуется сокращение длительности и количества хэндоверов.

2. Количество хэндоверов можно сократить путем совершенствования алгоритма переключений (перейти от алгоритма выбора «максимального значения» к алгоритму «допустимого значения уровня сигнала»).

3. Для снижения продолжительности процесса переключений базовых станций необходимо повысить быстродействие элементной базы (устройств сети Wi-Fi поезда) путем перехода на нанoeлектронику.

4. На оперативность канала Wi-Fi основное влияние оказывают флуктуации канальной скорости к/с с провалами до 50Мбит/с. Поэтому уменьшение длительности и глубины провалов к/с возможно за счет увеличения с/ш на входе приемника БС путем повышения чувствительности приемного устройства (перехода на нанoeлектронику). При этом будет иметь место снижение влияния быстрых замираний огибающей сигнала.

5. На качество канала Wi-Fi влияют провалы к/с ниже 50Мбит/с, которые отслеживают замирания огибающей сигнала, зависят от глубины б/з и проявляются в виде аномальных ошибок. Для улучшения качества необходимо повышать с/ш (см. пункт 4).

6. Для сохранения качества канала Wi-Fi при б/з на уровне $P_{ош} \leq 10^{-5}$ помимо увеличения с/ш (см. пункты 5, 4) необходимо прогнозировать среднее значение входного сигнала (медленные замирания). Адаптивная подстройка величины порога срабатывания решающего устройства ДМ приемника позволит значительно уменьшить вероятность ошибки.

7. Использование элементной базы нанoeлектроники позволит уменьшить вероятность ошибки на два порядка и значительно улучшить вероятности правильного и ложного обнаружений, что актуально в условиях высокоскоростного движения и переход на беспилотные технологии управления поездами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации [Текст]: Постановление Правительства Российской Федерации от 18 сентября 2019 года № 1203-47 // Собрание законодательства. – 2019. - № 1203-47. – С.8-155.
2. Радиоволны и распространение радиоволн. — Текст: электронный // Meanders : [сайт]. — URL: meanders.ru/radiovolny.shtml (дата обращения: 13.09.2022).
3. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи /Шахнович И.В.- М.: «Техносфера», 2006.- 287с.
4. Максим, М. М. Как работает и как настраивается сеть по технологии Mesh / М. М. Максим. — Текст: электронный // Help-Wi-Fi : [сайт]. — URL: <https://help-wifi.ru/tekh-podderzhka/mesh-set/> (дата обращения: 13.09.2022).
5. Wireless sensor networks: a survey / I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. — Текст : непосредственный // Computer Networks. — 2002. — № Volume 38, Issue 4. — С. 393-422.
6. R. W. Lewis, S. Maddison and E. J. C. Stewart, "An extensible framework architecture for wireless condition monitoring applications for railway rolling stock," 6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014), 2014, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.1008.
7. M. Gao, P. Wang, Y. Wang and L. Yao, "Self-Powered ZigBee Wireless Sensor Nodes for Railway Condition Monitoring," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 19, no. 3, pp. 900-909, March 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2709346.
8. Alawad H, Kaewunruen S. Wireless Sensor Networks: Toward Smarter Railway Stations. Infrastructures. 2018; 3(3):24. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030024>
9. Клоков, А. Беспроводная оптическая связь. Мифы и реальность – Технологии и средства Связи – 2001. – №2. – С.23-24.
10. Гринфилд Д. Оптические сети // К.: ТИД” ДС. – 2002. – С.83-91.

11. Paudel R. et al. High-speed Train Communications System Using Free Space Optics. // Le-Minh H., Ghassemlooy Z., Ijaz M., Rajbhandari S. – IET, 2010. – С. 6-17.

12. Терминалы для мобильных объектов. — Текст : электронный // АО "Мостком" : [сайт]. — URL: <http://www.mostkom.ru/ru/терминалы-для-мобильных-объектов> (дата обращения: 31.05.2022).

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

14. Функциональные задачи управления сетью связи. — Текст : электронный // Студопедия : [сайт]. — URL: https://studopedia.su/10_35917_kriterii-vibora-arhitekturi-sistemi-svyazi.html?ysclid=16rsgilyhv792232946 (дата обращения: 13.09.2022).

15. Ивашевский, М.Р. Перспективный канал связи с движущимся поездом // Инновационные научные исследования в современном мире: II Международная НПК. Уфа, 28 февраля 2020 г. – НИЦ Вестник науки, 2020. – С. 33-39

16. Журавлева, Л.М. Оценка влияния радиоканала на качество видеосигнала систем видеонаблюдения на железнодорожном транспорте / Л.М. Журавлева, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев, В.В. Левшунов – Проектирование и технология электронных средств. – 2019. – №3. – С.51-58.

17. Левшунов, В. В. Эффективность беспроводных технологий для технического мониторинга на железнодорожном транспорте/ В.В. Левшунов, Л.М. Журавлева, Д.А. Рыжков, М.А. Нилов – Проектирование и технология электронных средств. – 2022. – №1. – С.3–8

18. Пат. RU 104904 U1 Российская Федерация, МПК В61К 9/00 (2006.01) В61L 25/02 (2006.01). Система мониторинга состояния подвижной единицы железнодорожного состава [Текст]/ Бороненко Ю.П., Цыганская Л.В.; Акционерное общество "Научно-внедренческий центр "Вагоны"(АО "НВЦ "Вагоны"). – 2017145947; заявл. 26.12.2017; опубл. 06.03.2019 Бюл. №7.

19. R. W. Lewis, S. Maddison and E. J. C. Stewart, "An extensible framework architecture for wireless condition monitoring applications for railway rolling stock," 6th

IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014), 2014, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.1008.

20. Пат. RU 193435 U1 Российская федерация, МПК В61L 25/00. Устройство для мониторинга параметров движения и технического состояния подвижного состава метрополитена [Текст]/ Александровский Ф.М.; Закрытое акционерное общество "АйТи Десижн". – 2019125992; заявл. 17.08.2019; опубл. 29.10.2019.

21. Пат. RU 2600420 С2 Российская Федерация, СПК G01G 19/04 (2020.02); В61D 49/00 (2020.02); В61К 9/00 (2020.02); В61К 9/06 (2020.02). Система мониторинга железнодорожного грузового вагона [Текст]/ Бороненко Ю.П., Даукша А.С.; Общество с ограниченной ответственностью "Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий" (ООО "ВНИЦТТ"). – 2019114834; заявл. 14.05.2019; опубл. 11.03.2020 Бюл. № 8.

22. Bouaziz M., Yan Y., Kassab M., Soler J., Berbineau M. (2018) Evaluating TCMS Train-to-Ground Communication Performances Based on the LTE Technology and Discreet Event Simulations. In: Moreno García-Loygorri J., Pérez-Yuste A., Briso C., Berbineau M., Pirovano A., Mendizábal J. (eds) Communication Technologies for Vehicles. Nets4Cars/Nets4Trains/Nets4Aircraft 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 10796. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90371-2_12

23. Feng X.J. (2013). Wireless Backhaul Technology in Monitoring System for Subway OTN+WiMax. In Advanced Materials Research (Vols. 846-847, pp. 680-683). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.846-847.680>

24. Jo JH, Jo B, Kim JH, Choi I. Implementation of IoT-Based Air Quality Monitoring System for Investigating Particulate Matter (PM10) in Subway Tunnels. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020; 17(15):5429. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155429>

25. M. Gao, P. Wang, Y. Wang and L. Yao, "Self-Powered ZigBee Wireless Sensor Nodes for Railway Condition Monitoring," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 19, no. 3, pp. 900-909, March 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2709346.

26. Alawad H, Kaewunruen S. Wireless Sensor Networks: Toward Smarter Railway Stations. *Infrastructures*. 2018; 3(3):24. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030024>

27. Левшунов, В. В. Система мониторинга подвижного состава и инфраструктуры железнодорожного транспорта на основе беспроводных технологий / Л.М. Журавлева, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков, М.А. Нилов // Заявка на изобретение Российской Федерации на изобретение «Федеральный институт промышленной собственности» Рег. №2022111876 от 29.04.2022 – 2022г.

28. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи [Текст] / Ю. А. Громаков. – М.: Эко-трендз, 2000. – 239 с.

29. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi: учебное пособие / [Е. В. Смирнова, А. В. Пролетарский и др.] ; под общ. ред. А. В. Пролетарского. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 446 с.

30. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей / Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. - М.: Радио и связь, 1983. - 414 с.

31. M.Sivaranjani, Dr.J.Vidhya "System Performance of Free Space Optics in Underground Moving Train Using Optisystem 14"; "Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)" 2017;

32. R. Paudel, Z. Ghassemlooy, H. Li. Minh, S.Rajbhanderi; "Modelling of free space optical link for ground-to-train communications using a Gaussian source." "The Institution of Engineering and Technology" 2013;

33. R. Paudel, H. Le-Minh, Z. Ghassemlooy, M. Ijaz and S. Rajbhandari "High speed train communications system using free space optics"; "Optical Communications Research Group, NCRLab, Northumbria University" 2017;

34. RU 2 281 610, C1, кл. H04B 10/10, опубл. 10.08.2006 г." Устройство передачи данных через открытый оптический атмосферный канал связи ";

35. RU 2 451 397, C2, кл. H04B 10/10, опубл. 10.08.2011; " Устройство системы оптической связи с автоматическим сопровождением светового луча на приемнике информации";

36. RU 2 155 450, C1, кл. H04B 10/12, опубл. 27.08.2000; "Устройство двухсторонней оптической связи";

37. RU 57 995, U1, кл. H04B 17/00. опубл. 27.10.2006; “Система беспроводной оптической связи”;

38. RU 2 225 024, C1, кл. G02B 27/64 опубл. 27.02.2004. “ Система стабилизации изображения на подвижном основании”.

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

40. Левшунов, В. В. Беспроводный оптический канал связи с подвижными объектами / В.В. Левшунов, Л.М. Журавлёва, Д.А. Рыжков, Д.Х. Чьонг – Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 1. – С.13–16.

41. 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.

42. Мартинес-Дуарт, Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Мартин-Палма Р. Дж., Агулло-Руеда. Ф. — Москва : Техносфера, 2009. — 368с.;

43. Проектирование инфракрасного канала [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/2806677/> (дата обращения 25.01.2019).

44. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте / Г. В. Горелов, А. Ф. Фомин, А. А. Волков, В. К. Котов. — Москва : Транспорт, 2001. — 415 с.;

45. Эффект Доплера в сетях: GSM, 3G, 4G. — Текст : электронный // Хабр : [сайт]. — URL: <https://habr.com/ru/post/131248/> (дата обращения: 08.06.2022).

46. Майков, Д. Ю. Влияние эффектов Доплера на OFDM сигнал / Д. Ю. Майков, А. С. Вершинин. // Молодой ученый. — 2014. — № 21 (80). — С. 175-179.

47. 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.

48. Васильев, Д. В. Радиотехнические цепи и сигналы / Д. В. Васильев, М. Р. Витоль, Ю. Н. Горшенков. — Москва : Радио и связь, 1982. — 528 с.

49. Журавлева, Л. М. Новые материалы в оптоэлектронике / Л. М. Журавлева, М. Р. Ивашевский, И. Ф. Музафаров. // Мир транспорта. — 2018. — № 2. — С. 74-83.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. 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.

56. 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.

57. 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.

58. 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.

59. 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.

60. 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.

61. Ратынский М.В. Основы сотовой связи. Радио и связь 2000., 248с.

62. 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.

63. Plekhanov, V. Using isotopic effect in nanostructures / V. Plekhanov, L. Zhuravleva, N. Legkiy. // Life Science Journal. — 2014. — № 11(7s). — С. 306-309.

64. Zhuravleva, L. Isotopic nanostructures / L. Zhuravleva, N. Legkiy, V. Plekhanov. // Life Science Journal. — 2014. — № 11(8s). — С. 331-335..

65. Сидякин Н.М. Элементы теории случайных импульсных потоков. Сов. Радио 1965, 263с.

66. Сети сотовой подвижной связи. Нормы на показатели качества услуг связи и методики проведения их оценочных испытаний. / В. Ю. Квицинский, Ю. А.

Павленко, В. В. Афанасьев [и др.]. — 2-е изд. — Москва : МИНСВЯЗИ РОССИИ, 2002. — 48 с.

67. Технический комитет, Росстандарта, ТК Качество связи / комитет, Росстандарта, ТК Технический. — Текст : электронный // ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО НАДЗОРУ В СФЕРЕ СВЯЗИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ (РОСКОМНАДЗОР) : [сайт]. — URL: <https://rkn.gov.ru/communication/p714/> (дата обращения: 13.09.2022).

68. Блог компании Гарс «Для кого SLA – мгла, расскажем, в чем тут дела» / Блог компании Гарс. — Текст : электронный // Хабр : [сайт]. — URL: <https://habr.com/ru/company/garstelecom/blog/143305/?ysclid=16rr299g8l543864303> (дата обращения: 13.09.2022).

69. ФЗ «О Связи», Приказ №92 «Об утверждении Норм на электрические параметры основных цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей ВСС России»

70. Минимальные пределы доступности сети связи / Эрланг. — Текст : электронный // Телекомфорум : [сайт]. — URL: <http://electrosvyaz.com/forum/viewtopic.php?t=15942&ysclid=16rsejl0d142761266> (дата обращения: 13.09.2022).

71. Российская библиотека научных журналов и статей (РАН) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/veroyatnostnoe-opisanie-turbulentnyh-protsessov-v-atmosfere/viewer>, свободный – (20.08.2020)

72. Журавлева, Л.М. Повышение качества сигналов системы интеллектуального видеонаблюдения / Л.М. Журавлева, М.Р. Курьянцев, В.Л. Лошкарев – Проектирование и технология электронных средств. – 2018. – №1. – С.37-44.

73. Борисенко С.И. Физика полупроводниковых наноструктур: учебное пособие/ С.И. Борисенко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.- 115 с.

74. Левшунов В. В. Система мониторинга технического состояния подвижного состава с помощью технологии беспроводной связи Wi-Fi / Л.М. Журавлева, В.В. Левшунов, Д.А. Рыжков – Международная научно-практическая конференция

«Железнодорожный транспорт и технологии (Railway transport and technologies, RTT-2021) – Российская Федерация, г. Екатеринбург – 2022г.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ж/д – железная дорога;

ДЦУ – диспетчерский центр управления;

БОКС – беспроводный оптический канал связи;

БС – базовая станция;

ПБС – поездная базовая станция;

СБС – стационарная базовая станция;

РБЦ – центр радиоблокировки;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

к/с – канальная скорость;

СИВ – система интеллектуального видеонаблюдения

АОСП – атмосферная оптическая система передачи;

АРМЛ – автоматическое регулирование мощности лазера и глубины модуляции;

АБТЦ-МШ – система интервального регулирования и обеспечения безопасности движения поездов;

СМО – система массового обслуживания;

СУБОКС – стационарные устройства беспроводной двусторонней оптической связи;

ПУБОКС – подвижные устройства беспроводной двусторонней оптической связи;

УБОС – устройства беспроводной оптической связи;

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи информации;

АПОО – автоматическая подстройка оптической оси;

АРУ – автоматическая регулировка усиления приемника;

АСПМЛ – адаптивная система подстройки мощности лазера;

МС – мобильная связь;

ПЧМ – паразитная частотная модуляция;

АПЧ – автоматическая подстройка частоты;

УПЧ – усилитель промежуточной частоты;

ЭД – эффект Доплера;

ЧМГ – частотно-модулируемый генератор;

ДМ – демодулятор;

ДК – декодер;

м/з – медленные замирания;

б/з – быстрые замирания;

с/ш – отношение мощностей сигнала к шуму на входе приёмника;

ц/пр – циклический префикс;

ПРВ – плотность распределения вероятностей;

ПУ – пороговое устройство;

Wi-Fi – технология беспроводной локальной сети стандартов IEEE 802.11;

LTE – стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных для мобильной сотовой связи;

GSM – стандарт цифровой мобильной сотовой связи с разделением каналов по времени (TDMA) и частоте (FDMA);

IEEE – международная некоммерческая ассоциация специалистов в области телекоммуникации;

GPS – система глобального позиционирования;

MIMO – метод пространственного кодирования и передачи сигнала;

MUX – мультиплексор;

MESH – самоорганизующаяся сенсорная сеть на базе датчиков-«маячков»;

Zig Bee – структура беспроводных сенсорных узлов с автономным питанием;

ISM – полосы радиочастотного спектра, выделенных для промышленных, научных и медицинских целей;

Multi-hop – ячеистая сеть со многими центрами коммутации;

RSSI – характеристика показателя уровня принимаемых сигналов;

TxMCS – характеристика комплексного параметра модуляции и кодирования;

TxRate – канальная скорость к/с канала;

SNR – безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума;

Insineon SMARTi – специальные высокоскоростные чипы;
 $P_{\text{пр}}$ – чувствительность приёмника;
 $P_{\text{атм}}$ – потери мощности оптического сигнала в атмосфере;
 K_{∂} – коэффициент доступности;
 λ – интенсивность входного потока;
 μ – интенсивность выходного потока;
 v_T – коэффициент вариации ПРВ времени переприёма;
 σ_T – среднееквадратичное отклонение;
 m_T – среднее значение длительности занятия канала (частоты);
 T_1 – среднее время одного переприёма узлом сенсорной сети;
 N – количество узлов переприёма в сенсорной сети;
 $D[T]$ – дисперсия времени обслуживания заявки;
 $M[T^2]$ – среднее значение квадрата времени обслуживания заявки;
 λ_1 – несущие длины волн оптического сигнала от стационарной СУБОКС к подвижной;
 λ_2 – несущие длины волн оптического сигнала от подвижной СУБОКС к стационарной;
 L – длина однопролетного канала БОКС;
 $P_{\text{подстройки}}$ – вероятность наличия периода подстройки системы;
 $P_{\text{пакета}}$ – вероятность передачи информационного пакета;
 $t_{\text{пакета}}$ – длительность информационного пакета;
 $t_{\text{паузы}}$ – длительность паузы между пакетами;
 $t_{\text{подстройки}}$ – длительность периода подстройки системы АРМЛ;
 $t_{\text{отсутствиеподстройки}}$ – длительность периода отсутствия подстройки АРМЛ;
 $P_{\text{ан}}$ – аномальная ошибка;
 $P_{\text{ош}}$ – вероятность ошибки (элементарного символа);
 n – число разрядов;
 f_0 – несущая частота;
 f_d – паразитная девиация;

- σ_{ε}^2 – приведенная дисперсия суммарной погрешности;
 $\sigma_{\text{дин}}^2$ – динамическая составляющая σ_{ε}^2 ;
 $\sigma_{\text{пом}}^2$ – помеховая составляющая σ_{ε}^2 ;
 $S_{\lambda}(\omega)$ – нормированная спектральная плотность мощности огибающей радиоимпульса;
 $\sigma_{\text{ЧМ}}^2$ – дисперсия (мощность) частотно-модулированного сигнала;
 $\sigma_{\text{ЭД}}^2$ – приведенная дисперсия погрешности от действия ЭД;
 $\Delta\omega_{\text{эф}}$ – эффективная полоса сигнала с частотной модуляцией;
 ΔF_{λ} – полоса частот первичного сигнала (импульса);
 $M_{\text{ЧМ}}$ - индекс частотной модуляции;
 $\Delta\omega_{\text{ПЧМ}}$ – эффективная полоса частот паразитной частотной модуляции (ПЧМ);
 $M[f_{\text{ПЧМ}}]$ – среднее значение модулирующей частоты $f_{\text{ПЧМ}}$ паразитной ЧМ;
 ω_0 – несущая круговая частота сигнала;
 $\Delta f_{\text{эф}}$ – эффективная ширина полосы частот УПЧ;
 $M_{\text{ПЧМ}}$ – индекс ПЧМ;
 v – скорость движения объекта;
 T_{δ} – период изменения скорости движения;
 $M[f_{\text{ПЧМ}}]$ – среднее значение частоты при изменении скоростных режимов;
 $\Delta f_{\text{мгн}}$ – мгновенный спектр;
 $\Delta f_{\text{УПЧ}}$ – эффективная полоса частот УПЧ;
 $\delta_{\varepsilon\text{ЭД}}^2$ – приведенная дисперсия суммарной погрешности без системы АПЧ;
 t_3 – среднее время задержки;
 $P_{\text{лож/обн}}$ – вероятность ложного обнаружения;
 $P_{\text{прав/обн}}$ – вероятность правильного обнаружения;
 $\alpha_{\text{сим}}^2$ – символическое значение сигнал/шум на входе СИБ;
 a – позиционность кода;
 $P_{\text{ан}}$ – вероятность аномальной ошибки;
 $P_{\text{к/с}}$ – вероятность провала к/с;

- τ_x – длительность хэндовера;
 $\tau_{o/фл}$ – длительность опасных флуктуаций;
 $\tau_{np/к/с}$ – длительность провалов канальной скорости;
 $\tau_{o/np/к/с}$ – длительность опасных провалов канальной скорости;
 $M[t_z]$ – средняя длительность временных задержек;
 $P_{б/з}$ – вероятность наступления б/з;
 $P_{в/з}$ – вероятность возникновения временных задержек;
 $P_{м/з}$ – вероятность наступления м/з;
 $P_{н/д}$ – вероятность недоступности канала;
 P_x – вероятность наступления хэндовера;
 $P_x(\tau_x > t_d)$ – вероятность наступления опасного хэндовера;
 $P_{o/фл}$ – вероятность наступления опасных флуктуаций;
 $P_{np/к/с}$ – вероятность наступления провала к/с;
 $P_{o/np/к/с}$ – вероятность наступления опасного провала к/с;
 $P_{n/пак}$ – вероятность потери пакета;
 $P_{с/ур}$ – вероятность снижения уровня сигнала;
 $P_{н/д}$ – вероятность недоступности канала;
 $M[\tau_{o/фл}]$ – математическое ожидание продолжительности опасных флуктуаций;
 $M[\tau_{np/к/с}]$ – математическое ожидание провалов к/с;
 t_k – длительность цифрового кадра;
 n_x – среднее число повторных передач из-за хэндовера;
 $n_{np/к/с}$ – среднее число повторных передач из-за опасных провалов к/с;
 $n_{o/фл}$ – среднее число повторных передач из-за опасных флуктуаций к/с;
 $\tau_{ц/np}$ – величина защитного интервала (циклический префикс);
 $P(\tau > mt_k)$ – вероятность того, что длительность (хэндовера, провала или флуктуаций к/с) превысит время mt_k ;
 $U_{пор}$ – уровень срабатывания ПУ;
 $P_{пров}$ – вероятность провала огибающей несущего сигнала из-за б/з;

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

$P_{пр/с}$ – вероятность пропуска импульса из-за провала огибающей;

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

$A_{сум}$ – амплитуда импульса на входе ПУ;

σ_h^2 – дисперсия случайных флуктуаций амплитуды импульса;

$P_{н/ч}$ – пороговый уровень приёмника ПБС;

D_s – крутизна импульса;

$P_{с/от}$ – уровень входного сигнала на открытых участках;

$P_{с/т}$ – уровень входного сигнала в тоннелях;

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА СТАНДАРТОВ WI-FI

Характеристики	802.11a (1999)	802.11b (1999)	802.11g (2003)	802.11n (2009)	802.11ac (2014)	802.11ax (2020)	802.11ad (2016)	802.11ah (2017)
Метод модуляции	<u>OFDM</u> (52 несущ.)	<u>HR-DSSS</u>	DSSS, ССК, OFDM	OFDM	OFDM (длина символа 4 мкс)	<u>OFDMA</u> (длина символа 13,6 мкс)	OFDM и SC (Single Carrier)	OFDM
Тип модуляции	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	DBPSK и DQPSK	DBPSK и DQPSK	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	.+256-QAM	.+1024-QAM	SQPSK, QPSK, 16-QAM, 64- QAM	SQPSK, QPSK, 16-QAM, 64- QAM, 256- QAM
Скорость передачи (PHY)	< 54 Мбит/с	< 11 Мбит/с	< 54 при OFDM, <11 при DSSS	< 600 Мбит/с	<u><3,47 Гбит/с</u>	<10,7 Гбит/с	<7 Гбит/с	< 347 Мбит/с
Рабочий диапазон частот	5 ГГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц	2,4- 2,5 или 5 ГГц	5 ГГц	2,4-2,5 или 5 ГГц	60 ГГц	900 МГц
Кол-во непересекающихся каналов	12	3	3	3 при 2,4ГГц; 12 при 5ГГц	24 при 5ГГц	3 при 2,4ГГц; 12 при 5ГГц	6	4
Максимальная ширина канала	20 МГц	20 МГц	20 МГц	20, 40 МГц	20, 40, 80, 80+80, 160 МГц	20, 40, 80, 80+80, 160 МГц	2,16 ГГц	<u>16 МГц</u>
Метод кодирования сигнала	SISO			MIMO- SU (до 4x4)/SISO	MU-MIMO (8x8 только вниз)	MU-MIMO	SISO	
Защита	WEP	WEP	<u>WPA</u>	<u>WPA2</u>	WPA2	<u>WPA3</u>	WPA2	WPA2
Максимальное расстояние, м	120	140	140	250	300	300	10	300

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ТАБЛИЦА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Timestamp	CurrMobile	CurrAP	InfoMobile	InfoAP	RSSI	LAN_Tpt	WLAN_Tpt	TxMCS	TxFlags	TxRate	RxMCS	RxRate
00000.000000	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	68172	65146	4	36	175	23	650
00000.330000	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	30234	33325	20	36	351	23	650
00000.660001	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	41254	44552	21	36	468	23	650
00000.992456	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	16051	16765	5	36	234	23	650
00001.320001	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	42236	42277	20	36	351	23	650
00001.649994	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	54094	56293	5	36	234	23	650
00001.979990	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	37486	38084	20	36	351	23	650
00002.309985	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	34990	36010	20	36	351	23	650
00002.639994	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	56422	58009	5	36	234	23	650
00002.969998	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	24725	19399	5	36	234	23	650
00003.299983	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	48455	55788	5	36	234	23	650
00003.630000	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	43326	44232	20	36	351	23	650
00003.960068	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	29753	30682	1	36	58	23	585
00004.289983	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	74944	77122	20	36	351	23	650
00004.620015	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	141446	136467	5	36	234	23	650
00004.950335	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	385197	393830	20	36	351	23	650
00005.280065	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	402136	408886	20	36	351	23	650
00005.610001	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	368209	381926	5	36	234	23	650
00005.940034	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	271445	278773	20	36	351	23	650
00006.270008	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	269818	278004	5	36	234	23	650
00006.600051	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	268520	277050	5	36	234	23	650
00006.930052	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	61	270624	277370	20	36	351	23	650
00007.260580	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	222885	227821	20	36	351	23	650
00007.590000	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	59	319189	326801	20	36	351	23	650
00007.920610	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	59	270625	277574	20	36	351	23	650
00008.250008	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	58	271042	278162	20	36	351	23	650
00008.579999	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	58	270156	276632	4	36	175	23	650
00008.910094	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	59	271325	277853	4	36	175	23	650
00009.240508	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	271433	277453	7	36	292	23	650

00009.570003	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	269489	276848	7	36	292	23	650
00009.900017	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	271316	277911	6	36	263	23	650
00010.230005	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	59	270858	279085	6	36	263	23	650
00010.560009	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	270402	276724	6	36	263	23	650
00010.890098	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	270872	278064	7	36	292	23	650
00011.220071	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	61	271135	276838	7	38	325	23	650
00011.550007	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	61	269800	276194	7	38	325	23	650
00011.880005	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	61	271671	277219	7	38	325	23	650
00012.210110	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	214619	216865	7	38	325	23	650
00012.540044	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	326784	337647	6	38	292	23	650
00012.870345	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	271152	277747	6	38	292	23	650
00013.200007	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	270937	276106	6	38	292	23	650
00013.530068	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	62	269372	279731	6	38	292	23	650
00013.860008	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	271464	276808	6	38	292	23	650
00014.190049	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	64	271528	277755	6	38	292	23	650
00014.520006	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	66	247344	256094	6	38	292	21	468
00014.850366	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	67	187743	189721	6	38	292	23	650
00015.601731	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	68	166745	170525	6	38	292	22	527
00015.931732	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	68	238968	249282	6	38	292	21	520
00016.261720	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	69	258924	260316	6	38	292	20	351
00016.591727	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	69	284995	288979	6	38	292	21	468
00016.921874	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	70	337820	343683	6	38	292	22	585
00017.251818	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	69	250297	267443	1	36	58	21	468
00017.582691	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	69	290211	287612	6	36	263	21	468
00017.911841	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	67	343893	355470	20	36	351	21	520
00018.241958	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	69	298270	304329	6	36	263	21	520
00018.571789	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	70	271702	278177	7	38	325	21	520
00018.901873	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	71	269561	275987	7	38	325	21	468
00019.231827	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	71	252276	266906	7	38	325	21	520
00019.561729	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	70	257198	253221	6	36	263	21	468
00019.891736	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	69	250699	259272	17	36	117	20	351
00020.222111	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	70	249717	259235	6	36	263	20	351

00020.551760	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	70	218811	220942	20	36	351	20	351
00020.881728	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	70	242130	246588	20	38	390	20	351
00021.211734	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	70	191608	196240	6	36	263	19	234
00021.541851	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	69	271770	277116	17	36	117	22	527
00021.871732	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	71	292051	303433	20	36	351	20	351
00022.201726	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	73	206091	208752	20	36	351	20	351
00022.531765	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	75	170261	177067	1	36	58	20	351
00022.861808	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	74	210902	212108	20	36	351	20	351
00023.191739	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	72	269772	277868	20	36	351	22	527
00023.521793	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	71	261265	267816	1	36	58	20	351
00023.852072	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	71	242786	247552	19	36	234	20	351
00024.181748	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	72	252120	258015	20	38	390	20	351
00024.511774	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	73	252972	259163	20	38	390	20	351
00024.841925	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	73	248282	255642	19	36	234	22	527
00025.171730	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	73	355485	363547	20	38	390	23	585
00025.501749	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	74	288763	296475	20	38	390	21	468
00025.831729	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	73	297663	298899	19	36	234	21	520
00026.161736	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	73	301739	310892	7	36	292	21	520
00026.491796	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	73	329255	334725	7	36	292	21	520
00026.821794	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	74	374547	383854	7	38	325	21	520
00027.151726	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	74	265908	271616	7	36	292	20	351
00027.481721	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	74	229147	240177	7	38	325	19	234
00027.811736	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	74	235890	241182	7	36	292	20	390
00028.141782	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	75	274203	279736	7	38	325	20	390
00028.471734	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	76	300350	305904	7	38	325	21	468
00028.801723	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	76	275797	283815	7	38	325	20	351
00029.131752	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	76	215003	219792	7	38	325	19	234
00029.461739	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	74	172723	182491	7	38	325	18	175
00029.791729	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	73	94114	97785	5	36	234	17	117
00030.121725	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	68	54711	56146	6	36	263	1	27
00030.451733	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	67	11586	12031	20	36	351	0	29
00030.781717	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	67	30739	31599	20	36	351	16	59

00031.111720	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	66	48204	46746	20	36	351	17	117
00031.441734	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	65	46219	49787	5	36	234	2	87
00031.771725	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	53769	54271	6	36	263	2	97
00032.101778	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	77295	78429	6	36	263	2	87
00032.431737	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	64	70960	71854	6	36	263	2	97
00032.761740	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	65	92909	95386	6	36	263	4	195
00033.091730	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	63	101869	103612	20	36	351	2	97
00033.421744	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	73941	75437	5	36	234	2	97
00033.751758	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	81933	84201	5	36	234	2	97
00034.081767	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	60	76584	77666	5	36	234	2	97
00034.411728	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	59	78682	81446	7	38	325	2	97
00034.741769	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	58	77427	79844	7	38	325	2	97
00035.071735	5.0.251.87	5.0.251.214	5.0.251.87	5.0.251.214	56	77662	78361	7	36	292	2	97
00035.401816	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	71683	74350	5	36	234	3	117
00036.061724	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	102365	74350	1	36	58	2	87
00036.391718	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	56184	29836	1	36	58	1	58
00036.721916	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	61	104349	43697	1	36	58	2	97
00037.051730	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	63	156411	78121	4	36	175	2	97
00037.381713	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	61	84054	54153	7	36	292	1	27
00037.711725	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	63	18159	7956	7	36	292	1	13
00038.041722	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	65	54292	23733	6	38	292	1	58
00038.371728	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	66	12047	11126	6	38	292	0	6
00038.701754	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	67	33493	12741	7	36	292	1	58
00039.031720	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	67	47569	23182	23	36	585	1	65
00039.361728	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	66	9765	11925	7	36	292	1	13
00039.691728	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	65	6469	3489	6	36	263	0	6
00040.021726	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	64	11555	5027	6	38	292	0	6
00040.351734	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	68	10627	5703	20	36	351	1	13
00040.681717	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	70	39529	16706	6	38	292	5	52
00041.011729	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	72	94820	43836	6	38	292	5	108
00041.341739	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	74	122123	57579	6	38	292	4	175
00041.671734	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	75	287863	148261	6	38	292	21	468

00042.001758	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	75	253713	129795	7	36	292	6	263
00042.331730	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	76	218267	118980	6	38	292	21	468
00042.661725	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	77	298229	151320	6	38	292	20	351
00042.991722	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	76	341403	169028	6	38	292	21	520
00043.322066	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	76	361989	185666	6	38	292	20	390
00043.651735	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	78	347407	173548	7	36	292	20	390
00043.981833	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	78	394032	197235	7	38	325	20	390
00044.311727	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	77	359887	188099	7	38	325	21	468
00044.641719	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	77	331660	163537	7	36	292	20	351
00044.971729	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	76	264614	141671	7	38	325	20	351
00045.301732	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	74	306339	153062	7	36	292	20	351
00045.633411	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	72	342798	169090	7	38	325	20	351
00045.961729	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	72	369323	184594	7	38	325	20	390
00046.292272	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	72	305704	159348	7	38	325	23	585
00046.621725	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	72	323475	169585	7	38	325	22	527
00046.951726	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	71	317349	160070	7	36	292	20	351
00047.282118	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	70	273576	160644	7	38	325	21	520
00047.611719	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	70	358704	156525	6	38	292	20	351
00047.941730	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	70	346329	174974	6	38	292	21	520
00048.271716	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	69	335726	172153	6	38	292	21	468
00048.601732	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	70	327055	170286	6	38	292	19	234
00048.931729	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	70	241597	127567	5	38	260	22	527
00049.261721	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	69	226740	118487	20	36	351	20	351
00049.591720	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	68	252879	122820	20	36	351	21	520
00049.921728	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	68	284571	148269	20	36	351	21	468
00050.251732	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	67	249645	127642	4	36	175	21	520
00050.582423	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	66	272057	136277	5	38	260	6	263
00050.911728	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	66	332352	166682	5	38	260	21	468
00051.241730	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	66	351418	171717	5	38	260	19	234
00051.571734	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	65	277383	152531	7	38	325	20	351
00051.901951	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	65	295230	144226	7	38	325	19	234
00052.231731	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	64	323495	172488	5	38	260	20	390

00052.561728	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	294871	140508	6	36	263	19	234
00052.891716	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	371196	185840	6	36	263	20	351
00053.221731	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	63	235981	129318	6	36	263	19	234
00053.552163	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	63	304589	159080	6	36	263	21	468
00053.881718	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	64	378007	178139	6	36	263	20	351
00054.212199	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	64	397341	198011	1	36	58	21	468
00054.541730	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	63	420181	213675	6	36	263	21	520
00054.871732	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	419677	214039	20	36	351	21	520
00055.201715	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	60	413942	216161	5	36	234	21	520
00055.531878	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	61	162414	82717	6	36	263	21	468
00055.861715	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	331601	170452	6	36	263	21	520
00056.191719	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	129727	85265	4	36	175	20	351
00056.521724	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	92883	40029	3	36	117	20	351
00056.854511	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	126207	59667	3	36	117	21	520
00057.181713	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	62	264339	129742	2	36	87	20	351
00057.511727	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	60	142828	79878	18	36	175	21	520
00057.842087	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	60	135465	75708	2	36	87	20	390
00058.171726	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	60	168071	80784	3	36	117	21	468
00058.501728	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	61	237494	114620	3	36	117	20	351
00058.831718	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	60	288179	136706	5	36	234	21	520
00059.161728	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	58	233262	129020	5	36	234	23	585
00059.491727	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	58	176545	94043	1	36	58	22	585
00059.821871	5.0.251.87	5.0.252.228	5.0.251.87	5.0.252.228	63	309748	141901	7	36	292	22	585
00060.481912	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	54	190503	194203	19	36	234	20	351
00061.466081	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	374306	194702	20	38	390	22	527
00061.796069	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	56	303827	154974	7	36	292	22	585
00062.126079	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	305802	163152	4	36	175	22	585
00062.456088	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	221208	116527	7	36	292	22	585
00062.786099	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	54	199314	99732	7	36	292	20	390
00063.116079	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	222190	112013	7	36	292	20	390
00063.446085	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	54	250057	126280	7	36	292	21	468
00063.776082	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	287002	136290	7	36	292	21	520

00064.106405	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	56	379892	200169	7	36	292	21	520
00064.436084	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	56	437582	219000	7	38	325	21	520
00064.766075	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	57	407907	206888	7	38	325	21	520
00065.096214	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	57	445144	226602	7	38	325	21	520
00065.426298	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	58	394735	198560	7	38	325	21	520
00065.756077	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	57	406401	212423	7	38	325	21	520
00066.086069	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	57	266180	149042	7	36	292	6	121
00066.416081	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	57	239296	115157	7	36	292	20	351
00066.746085	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	56	256746	127496	3	36	117	20	351
00067.076089	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	231577	121945	3	36	117	22	527
00067.406106	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	260530	135050	3	36	117	18	175
00067.736105	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	257726	139105	20	36	351	20	351
00068.066086	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	330850	159388	7	36	292	20	351
00068.397606	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	270588	147985	7	36	292	18	175
00068.726086	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	333293	161410	20	36	351	21	520
00069.056081	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	364953	190005	4	36	175	22	527
00069.386071	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	55	350315	172650	7	36	292	19	234
00069.716077	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	54	319396	169045	20	36	351	21	520
00070.046080	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	54	295972	149904	6	36	263	19	234
00070.376084	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	53	299541	153314	20	36	351	19	234
00070.706082	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	53	337029	167294	7	36	292	21	520
00071.036069	5.0.254.179	5.0.251.214	5.0.254.179	5.0.251.214	53	388762	194309	3	36	117	21	520
00071.366218	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	62	319792	168157	1	33	27	19	234
00071.696063	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	63	103017	71722	3	32	26	1	27
00072.026066	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	63	37717	16108	17	36	117	1	58
00072.356079	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	67	78663	37036	4	36	175	4	175
00072.686066	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	68	120167	66654	4	36	175	1	58
00073.016071	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	68	29375	15544	4	36	175	0	29
00073.346068	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	68	11258	7106	1	36	58	0	6
00073.676076	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	65	18952	9767	17	36	117	0	29
00074.006077	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	66	78832	30405	4	36	175	18	175
00074.336162	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	68	212614	104060	4	36	175	18	175

00074.666079	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	70	236320	110879	1	36	58	19	234
00074.996079	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	71	377484	183111	4	36	175	21	468
00075.326075	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	72	241474	138363	4	36	175	7	292
00075.656079	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	73	297773	141944	4	36	175	7	325
00075.986087	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	73	361984	182082	4	36	175	7	325
00076.316107	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	73	344143	176587	4	36	175	20	390
00076.646614	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	72	333490	166760	1	33	27	7	292
00076.976072	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	71	384056	194652	4	36	175	21	520
00077.306084	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	70	289921	150636	4	36	175	18	175
00077.636072	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	70	410692	207518	4	36	175	19	234
00077.966081	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	69	369638	190917	4	36	175	19	234
00078.296077	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	68	400319	198695	4	36	175	21	468
00078.626071	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	68	361852	188699	4	36	175	20	351
00078.956082	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	69	394482	200467	4	36	175	20	390
00079.286074	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	69	376590	193718	4	36	175	19	234
00079.616510	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	68	304915	157970	3	36	117	21	520
00079.946078	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	67	300345	154936	19	36	234	19	234
00080.276123	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	65	274385	140973	4	36	175	21	468
00080.606075	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	65	285793	136475	4	36	175	21	468
00080.936075	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	65	311941	177859	4	36	175	19	234
00081.266076	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	63	219528	99738	4	36	175	7	292
00081.596077	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	62	267580	170528	17	36	117	21	468
00081.926088	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	62	229336	118841	1	36	58	20	351
00082.256083	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	60	206646	100011	4	36	175	7	292
00082.586074	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	61	290067	147781	4	36	175	7	292
00082.916086	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	60	315593	156389	1	36	58	7	292
00083.246082	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	58	281084	154694	1	36	58	5	234
00083.576077	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	58	184044	100833	1	36	58	21	468
00083.906077	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	58	264993	124663	1	33	27	21	468
00084.236078	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	58	211715	135132	1	36	58	19	234
00084.566074	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	58	226453	86936	1	36	58	19	234
00084.896079	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	57	237542	120141	1	36	58	7	292

00085.226095	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	58	247040	127284	18	36	175	7	325
00085.556120	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	58	272391	136182	17	36	117	19	234
00085.886075	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	56	282221	139613	1	36	58	20	351
00086.216072	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	54	241618	128477	1	36	58	18	195
00086.546140	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	54	199624	104266	3	36	117	5	234
00086.876086	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	55	280275	120072	18	36	175	20	351
00087.206082	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	54	189214	99692	3	38	130	20	351
00087.536971	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	53	367637	171206	3	36	117	21	520
00087.866178	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	55	344325	177469	3	36	117	20	351
00088.196077	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	56	329585	170169	4	36	175	21	468
00088.526084	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	55	372656	186143	5	36	234	20	351
00088.856075	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	55	352700	181328	19	36	234	21	468
00089.186195	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	54	331996	156843	1	36	58	20	351
00089.516077	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	53	351493	181420	3	36	117	19	234
00089.846077	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	267239	141540	19	36	234	6	263
00090.176460	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	355786	179974	3	36	117	6	263
00090.506285	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	329954	163557	19	36	234	21	468
00090.836571	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	366357	185565	4	36	175	20	390
00091.166074	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	323797	169464	3	36	117	20	390
00091.496117	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	341664	169321	19	36	234	21	468
00091.826113	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	51	392758	199424	19	36	234	21	468
00092.156078	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	50	282033	153985	19	36	234	21	468
00092.486074	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	51	431015	203796	4	36	175	21	520
00092.816080	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	51	334028	177848	4	36	175	20	351
00093.146085	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	269121	137198	2	36	87	20	390
00093.476072	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	306588	157514	19	36	234	20	390
00093.806082	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	338934	165228	3	36	117	20	390
00094.136214	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	379338	189614	3	36	117	20	390
00094.466084	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	385583	204554	19	36	234	20	390
00094.796515	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	315874	164284	19	36	234	20	390
00095.126081	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	52	344446	169824	4	38	195	20	390
00095.456610	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	51	362219	181780	2	36	87	21	468

00095.786073	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	51	434300	220085	2	36	87	22	527
00096.116092	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	50	401720	205453	2	36	87	20	390
00096.446856	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	49	352108	180914	3	36	117	20	390
00096.776082	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	49	320540	165054	3	38	130	19	234
00097.106080	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	49	268920	150131	3	36	117	20	390
00097.436082	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	49	368199	166888	3	36	117	20	351
00097.766634	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	49	382331	198536	3	36	117	20	390
00098.096074	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	50	336233	166083	3	38	130	20	390
00098.426112	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	50	366764	190028	3	36	117	21	520
00098.756079	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	50	305021	170101	1	36	58	21	520
00099.086126	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	49	309464	145013	3	36	117	21	520
00099.416082	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	47	314337	154563	3	36	117	21	520
00099.746760	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	47	391960	201965	3	38	130	22	527
00100.076116	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	47	410377	205244	3	38	130	21	468
00100.406080	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	48	381185	183111	3	38	130	21	468
00100.736084	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	48	306214	171017	3	36	117	20	351
00101.066081	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	48	240718	121918	2	36	87	20	351
00101.396079	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	47	373989	182705	3	36	117	20	390
00101.726073	5.0.254.179	5.0.252.228	5.0.254.179	5.0.252.228	46	357395	178301	2	38	97	20	351
00102.056837	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	52	358238	204349	2	36	87	20	390
00102.716060	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	52	10784	3210	1	36	58	1	27
00103.046073	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	53	26580	15653	2	36	87	17	117
00103.376106	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	55	23759	12424	5	36	234	0	13
00103.706071	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	57	22784	12237	7	38	325	0	13
00104.036073	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	58	18465	9472	7	38	325	0	13
00104.366080	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	59	26895	12433	7	36	292	2	40
00104.696112	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	59	82404	36412	6	38	292	2	87
00105.026096	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	62	258593	119309	21	36	468	3	117
00105.356067	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	63	153191	89950	6	38	292	2	97
00105.686083	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	64	76322	47088	7	36	292	1	13
00106.016071	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	65	30729	13791	20	36	351	1	27
00106.346070	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	65	13453	5982	3	36	117	0	13

00106.676088	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	64	18616	11119	2	36	87	1	27
00107.006076	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	65	37176	15170	3	36	117	1	58
00107.336420	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	69	180350	70236	5	36	234	19	234
00108.088761	5.0.254.179	5.0.252.227	5.0.254.179	5.0.252.227	73	343065	168522	6	36	263	6	263
00174.783246	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	44	85305	85956	19	33	108	22	527
00175.113249	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	44	70508	73720	19	33	108	22	527
00175.443275	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	45	96029	96909	19	33	108	22	527
00198.213248	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	44	95962	97829	22	36	527	21	520
00198.543254	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	44	111943	115066	22	36	527	21	520
00198.873249	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	45	139889	141614	22	36	527	21	520
00199.203487	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	45	127398	129461	22	36	527	21	520
00199.533830	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	45	142689	146249	22	36	527	21	520
00199.863370	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	44	125761	130508	22	36	527	21	520
00200.193252	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	43	126015	129508	22	36	527	21	468
00200.523326	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	43	155616	158521	20	36	351	21	468
00200.853301	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	43	221040	218890	20	36	351	22	527
00201.183279	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	43	161318	173902	20	36	351	22	527
00201.513251	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	41	107340	107624	21	36	468	22	527
00201.843279	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	41	149782	151403	21	36	468	22	527
00202.173294	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	41	167923	173550	21	36	468	21	468
00202.503253	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	42	216814	223220	22	36	527	21	468
00202.833459	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	42	179598	182769	22	36	527	20	390
00203.163253	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	40	189361	198726	21	36	468	20	351
00203.493353	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	42	146978	143781	21	36	468	20	351
00203.823260	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	44	185781	192099	21	36	468	21	468
00204.153340	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	45	195279	194030	21	36	468	22	527
00204.483487	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	45	313650	323411	20	36	351	21	468
00204.813264	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	46	254397	266150	19	36	234	21	468
00205.143347	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	47	273367	279768	19	36	234	21	520
00205.473369	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	49	338068	343855	19	36	234	21	520
00205.803757	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	50	304538	313537	21	36	468	21	520
00206.133242	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	51	266329	273318	21	36	468	21	520

00206.463263	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	50	274645	280542	21	36	468	21	520
00206.793288	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	49	212022	216192	21	38	520	21	520
00207.123610	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	51	309512	319508	22	36	527	20	351
00207.453257	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	51	213799	220194	22	36	527	21	468
00207.783275	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	51	231345	237213	22	38	585	21	468
00208.113372	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	51	270950	274041	22	36	527	21	520
00208.443464	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	51	300323	310498	22	36	527	21	520
00208.773276	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	51	298849	305691	22	38	585	21	520
00209.103412	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	51	307504	314043	22	38	585	21	520
00209.433253	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	50	284114	293783	22	38	585	21	520
00209.763249	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	48	274120	278080	22	38	585	21	520
00210.093245	5.0.251.87	5.0.251.238	5.0.251.87	5.0.251.238	48	267762	276597	22	38	585	21	520
00297.964999	5.0.254.179	5.0.251.242	5.0.254.179	5.0.251.242	19	401	186	0	32	6	0	6
00297.965178	5.0.254.179	5.0.251.242	5.0.254.179	5.0.251.242	19	401	340	0	32	6	0	6
00298.295025	5.0.254.179	5.0.251.242	5.0.254.179	5.0.251.242	20	1147	198	0	32	6	0	6
00298.295198	5.0.254.179	5.0.251.242	5.0.254.179	5.0.251.242	20	1147	4	0	32	6	0	6
00298.625218	5.0.254.179	5.0.251.242	5.0.254.179	5.0.251.242	19	877	25	0	32	6	1	13
00298.955205	5.0.254.179	5.0.251.238	5.0.254.179	5.0.251.238	20	1260	404	0	32	6	4	39
00299.285073	5.0.254.179	5.0.251.238	5.0.254.179	5.0.251.238	20	1637	465	0	32	6	0	6
00299.615089	5.0.254.179	5.0.251.238	5.0.254.179	5.0.251.238	20	1036	465	0	32	6	1	13
00301.595161	5.0.254.179	5.0.251.238	5.0.254.179	5.0.251.238	20	345	201	0	32	6	0	6
00397.641196	5.0.251.87	5.1.36.191	5.0.251.87	5.1.36.191	52	257	291	1	33	27	22	243
00397.971190	5.0.251.87	5.1.36.191	5.0.251.87	5.1.36.191	54	174	195	1	33	27	23	270
00398.301188	5.0.251.87	5.1.36.191	5.0.251.87	5.1.36.191	56	280	271	2	33	40	21	216
00398.631193	5.0.251.87	5.1.36.191	5.0.251.87	5.1.36.191	56	115	138	2	33	40	19	234
00463.305556	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	63	266058	127076	19	36	234	21	468
00463.635564	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	63	224058	127076	21	38	520	23	585
00463.965646	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	63	305012	145179	17	36	117	23	650
00464.295604	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	64	248412	82575	19	36	234	20	351
00497.295563	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	58	217602	146398	7	38	325	19	260
00497.625558	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	58	286340	163528	7	38	325	19	260
00497.955555	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	57	337251	163528	7	38	325	19	234

00498.285558	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	57	344416	180463	7	38	325	22	527
00498.615675	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	365957	171511	7	38	325	19	234
00498.945559	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	342052	171511	7	38	325	21	520
00499.275562	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	291802	172591	7	38	325	19	234
00499.605556	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	119433	75940	7	38	325	20	351
00499.935557	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	146702	75940	7	38	325	20	351
00500.265562	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	87424	50203	7	38	325	20	390
00500.595562	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	38572	31793	7	38	325	19	234
00500.925562	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	57322	26405	7	38	325	21	468
00501.255556	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	51067	26405	21	36	468	19	260
00501.585565	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	56	59201	26910	7	38	325	19	234
00501.915555	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	56	47652	48047	20	36	351	20	351
00502.245570	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	57	95390	48047	18	36	175	20	390
00502.575562	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	58	55780	24668	19	36	234	20	351
00502.905569	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	57	82798	26857	19	36	234	20	390
00503.235558	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	57	50916	26857	21	36	468	20	390
00503.565566	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	56	41150	19021	20	36	351	19	234
00503.895571	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	56	36955	19636	19	36	234	20	390
00504.225557	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	34869	16939	20	36	351	20	390
00504.555557	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	32656	16939	20	36	351	20	351
00504.885570	5.0.254.179	5.0.251.237	5.0.254.179	5.0.251.237	55	39210	20846	20	36	351	20	390
00598.125067	5.0.254.179	5.0.252.222	5.0.254.179	5.0.252.222	73	443960	220332	22	36	527	20	351
00598.455065	5.0.254.179	5.0.252.222	5.0.254.179	5.0.252.222	73	400589	213266	21	38	520	20	351
00598.785176	5.0.254.179	5.0.252.222	5.0.254.179	5.0.252.222	74	255118	125760	21	38	520	6	263
00599.115180	5.0.254.179	5.0.252.222	5.0.254.179	5.0.252.222	73	422391	209932	21	38	520	20	351
00599.445949	5.0.254.179	5.0.252.222	5.0.254.179	5.0.252.222	72	449458	228464	21	38	520	20	390
00599.775369	5.0.254.179	5.0.252.222	5.0.254.179	5.0.252.222	72	435878	221170	22	36	527	20	390
00600.105230	5.0.254.179	5.0.252.222	5.0.254.179	5.0.252.222	72	439263	221901	23	36	585	20	390
00600.435069	5.0.254.179	5.0.252.222	5.0.254.179	5.0.252.222	72	427119	221168	21	38	520	20	390
00645.315063	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	64	24731	21855	21	36	468	0	6
00645.645052	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	2293	1543	21	36	468	0	6
00645.975054	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	3045	1785	21	36	468	0	6

00646.305335	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	67	1183	532	21	38	520	1	13
00647.056960	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	68	15219	7583	21	36	468	16	59
00647.386966	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	69	16247	8025	22	36	527	18	175
00647.716985	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	70	26253	9994	22	36	527	19	234
00648.046961	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	72	33053	19218	23	36	585	18	175
00648.376988	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	73	36875	20425	21	36	468	17	117
00648.706968	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	75	119320	46810	21	36	468	6	263
00649.036989	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	76	193127	98242	22	38	585	19	234
00697.546971	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	257588	127692	23	38	650	21	520
00697.876971	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	242379	119863	23	38	650	21	468
00698.206969	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	335461	171854	23	38	650	21	520
00698.537844	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	352866	174983	23	38	650	19	234
00698.866963	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	332949	175159	23	38	650	21	520
00699.197070	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	321724	162209	23	38	650	22	527
00699.526954	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	297956	150565	23	38	650	21	468
00699.857617	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	303966	158317	23	38	650	21	468
00700.186961	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	271544	133377	23	38	650	20	351
00700.516965	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	302064	153623	23	38	650	18	175
00700.847345	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	246413	136188	23	38	650	19	234
00701.176966	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	100174	50673	23	38	650	20	351
00701.508005	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	159964	78835	23	38	650	21	520
00701.836957	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	174419	85696	23	38	650	21	520
00702.167549	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	222902	116921	23	38	650	21	468
00702.496961	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	276156	129031	23	38	650	21	468
00702.826970	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	219164	126791	20	38	390	21	520
00703.157005	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	283938	145902	21	36	468	20	351
00703.486962	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	282414	132535	21	38	520	19	234
00703.817541	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	280041	140578	21	36	468	21	520
00704.146968	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	267996	135457	21	36	468	21	520
00704.476969	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	294169	152311	21	36	468	19	234
00704.806962	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	211180	111373	21	36	468	21	520
00705.136968	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	167697	90932	19	36	234	21	520

00705.467474	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	176844	90108	18	38	195	21	520
00705.797067	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	264765	119468	18	36	175	21	468
00706.126999	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	241930	137709	20	36	351	19	234
00706.456974	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	230027	112419	20	36	351	21	468
00706.786961	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	230944	116916	20	36	351	21	520
00707.116967	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	210653	113825	21	36	468	20	351
00707.446967	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	254997	123481	21	36	468	21	520
00707.776973	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	211665	125381	21	36	468	19	234
00708.107429	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	256512	106864	21	36	468	21	520
00708.436970	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	327957	166010	22	38	585	21	520
00708.766966	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	300816	159634	22	38	585	23	650
00709.096967	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	291979	144651	22	38	585	23	585
00709.427486	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	324364	160742	21	36	468	23	585
00709.756958	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	369243	185425	21	38	520	23	585
00710.086956	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	287972	156408	20	38	390	23	585
00710.416965	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	393731	186673	20	38	390	23	650
00710.746965	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	318995	175583	21	38	520	19	234
00711.076971	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	290337	140620	21	38	520	19	234
00711.406970	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	307883	155700	21	38	520	20	351
00711.737593	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	336537	169181	21	38	520	22	527
00712.066972	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	298631	152223	22	36	527	22	527
00712.396969	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	321811	168321	23	36	585	23	585
00712.726961	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	249865	124291	23	38	650	20	351
00713.056967	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	233658	117734	23	36	585	21	468
00713.388096	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	304541	151061	23	36	585	23	585
00713.717224	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	340524	174002	23	38	650	21	468
00714.046969	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	356956	180229	23	38	650	23	585
00714.376972	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	360728	181625	23	38	650	23	650
00714.706957	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	302461	153339	21	38	520	22	527
00715.036967	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	289905	155720	21	36	468	19	234
00715.366971	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	197472	98415	21	38	520	21	468
00715.696966	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	310581	161424	21	38	520	19	234

00716.026959	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	342378	168584	22	38	585	19	234
00716.356965	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	304016	165603	22	36	527	20	351
00716.686971	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	206003	103604	22	38	585	23	585
00717.016954	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	175742	95483	23	36	585	23	585
00717.346957	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	78525	48273	23	38	650	23	585
00717.676967	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	151270	65774	23	38	650	21	468
00718.006967	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	150112	71807	23	38	650	21	520
00718.336964	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	145186	84407	23	38	650	21	520
00718.666969	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	254889	118710	23	38	650	21	520
00718.997466	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	337406	160926	23	38	650	21	520
00719.327132	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	394298	199683	23	36	585	19	234
00719.656967	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	360065	185052	23	38	650	21	520
00719.986958	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	360920	181286	23	38	650	21	468
00720.316954	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	324184	169884	23	38	650	19	234
00720.647714	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	331770	169507	23	36	585	19	234
00720.976957	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	265772	142831	22	36	527	20	351
00721.306961	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	210264	108738	23	38	650	19	234
00721.636965	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	190904	95864	23	38	650	21	520
00721.966970	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	183119	92349	23	38	650	21	520
00722.296965	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	185692	94123	23	38	650	20	351
00722.626966	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	177891	96039	23	38	650	19	234
00722.956969	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	98600	48500	23	38	650	21	520
00723.286960	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	195153	92399	22	36	527	21	520
00723.616971	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	243407	127412	23	38	650	21	520
00723.946969	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	208206	102762	23	38	650	21	520
00724.276960	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	251837	127445	23	38	650	19	234
00724.606968	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	157179	80585	23	36	585	21	468
00724.936968	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	66	153300	88163	23	38	650	19	234
00725.266962	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	124760	62230	23	38	650	20	351
00725.596963	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	65	121824	70637	23	36	585	19	234
00725.926969	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	64	188489	90425	23	36	585	22	585
00726.256959	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	63	179845	88552	20	36	351	19	234

00726.586959	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	62	199206	97054	20	38	390	21	468
00726.916966	5.0.254.179	5.0.252.221	5.0.254.179	5.0.252.221	62	209942	109558	20	38	390	22	585
00794.983005	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	68	39419	17931	21	38	520	1	27
00795.312987	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	68	45847	24041	21	38	520	1	27
00795.643003	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	68	42294	24041	21	38	520	1	58
00795.973004	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	68	54539	24637	21	36	468	19	234
00796.303000	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	70	79350	38380	21	36	468	1	58
00796.633019	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	71	96786	38380	21	36	468	19	234
00796.963068	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	71	138945	69566	21	38	520	18	175
00797.293027	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	73	165497	81933	22	36	527	19	234
00797.623031	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	74	183514	81933	21	38	520	18	175
00797.953055	5.0.254.179	5.1.36.112	5.0.254.179	5.1.36.112	75	287266	135340	21	38	520	19	234
00830.714782	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	69	255915	127668	23	38	650	19	260
00831.044789	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	69	379577	181511	23	38	650	19	260
00831.374777	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	68	250978	138499	23	36	585	4	195
00831.704863	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	68	286130	142088	23	38	650	19	234
00832.034785	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	67	337833	161958	23	38	650	19	234
00832.364789	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	67	401111	201996	23	38	650	20	351
00832.694772	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	67	382439	202247	23	38	650	20	351
00833.024778	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	68	190694	109167	23	38	650	18	175
00833.354783	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	68	232860	110971	23	38	650	19	234
00880.874779	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	351289	176753	21	36	468	21	468
00881.204777	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	233250	130908	5	36	234	21	468
00881.534780	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	133779	83539	17	36	117	21	520
00881.864845	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	193760	76675	1	33	27	21	520
00882.194777	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	257977	130854	1	36	58	21	520
00882.524778	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	211062	117600	1	36	58	21	520
00882.854777	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	159029	81569	1	36	58	21	520
00883.184771	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	120447	47164	2	33	40	20	351
00883.514804	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	376572	195340	7	33	135	20	351
00883.845065	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	340953	170386	4	36	175	21	520
00884.175141	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	304009	153721	4	36	175	21	468

00884.504778	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	379315	188526	7	33	135	17	117
00884.835519	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	404396	204460	21	36	468	19	234
00885.164775	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	428167	216160	23	38	650	21	520
00885.494770	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	380124	199857	23	38	650	20	351
00885.824773	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	331871	163614	23	38	650	21	520
00886.154823	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	392370	198825	23	36	585	21	520
00886.484772	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	337174	171368	23	38	650	21	520
00886.814781	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	346119	183375	23	38	650	21	520
00887.144780	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	294798	144388	22	38	585	21	520
00887.474775	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	357886	179409	22	38	585	21	520
00887.804800	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	378731	188694	23	36	585	21	520
00888.134783	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	406091	206111	23	36	585	21	520
00888.464784	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	47	427845	217559	22	38	585	19	234
00888.794782	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	47	446368	224633	21	36	468	21	520
00889.124780	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	47	450195	228700	21	36	468	19	234
00889.454774	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	47	272018	152010	21	36	468	20	351
00889.784772	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	47	235431	122261	23	36	585	21	520
00890.114775	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	250052	123905	23	36	585	18	175
00890.444782	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	246471	122792	22	38	585	18	175
00890.775605	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	264431	133864	23	36	585	21	468
00891.104777	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	49	329443	162964	23	36	585	21	520
00891.434784	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	49	207532	109440	23	36	585	19	234
00891.764785	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	49	282912	151335	23	38	650	21	520
00892.095960	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	50	227334	114831	23	38	650	18	175
00892.424771	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	49	228173	113403	23	38	650	21	520
00892.754780	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	49	224977	113875	23	38	650	21	520
00893.084779	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	49	287053	140162	23	38	650	21	520
00893.414788	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	297447	155449	23	38	650	21	468
00893.745362	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	48	312717	152139	23	38	650	21	468
00894.074783	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	47	359396	181090	23	38	650	17	117
00894.407970	5.0.254.179	5.0.252.219	5.0.254.179	5.0.252.219	46	314185	159853	23	38	650	21	520
00936.735552	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	71	124176	53646	22	36	527	17	130

00937.065557	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	73	187751	94103	22	38	585	17	130
00937.395556	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	74	4816	14228	22	38	585	19	234
00937.725573	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	74	146984	57569	22	38	585	4	175
00938.055550	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	75	289745	135900	22	38	585	19	260
00938.385542	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	74	251420	139205	22	38	585	19	234
00938.715554	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	74	273236	134056	22	38	585	19	234
00939.045555	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	74	322033	154809	22	38	585	19	260
00939.375561	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	75	371718	186462	23	36	585	19	260
00939.705546	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	74	391534	200217	23	38	650	19	260
00940.037621	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	74	327944	167208	23	38	650	19	260
00940.365554	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	75	388953	192971	22	38	585	19	260
00940.695550	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	74	353923	191793	22	38	585	19	260
00941.025555	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	73	350934	171067	22	38	585	19	260
00941.355559	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	73	382190	191692	22	36	527	19	260
00941.685571	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	72	387477	198888	22	38	585	19	260
00942.015553	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	71	379668	189592	22	38	585	19	260
00953.235586	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	62	418381	215151	22	38	585	20	390
00953.565553	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	63	354845	182893	22	38	585	20	390
00953.896507	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	63	417086	210691	22	38	585	20	390
00954.225556	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	62	422363	215625	22	36	527	20	351
00954.555627	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	62	362427	187115	23	36	585	20	351
00954.886048	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	60	357952	179727	23	36	585	20	390
00955.216077	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	60	379313	193651	23	36	585	20	390
00955.545543	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	59	385666	194682	23	36	585	20	390
00955.875553	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	59	414840	207886	23	38	650	20	390
00956.205563	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	59	416742	212932	23	38	650	20	390
00956.535559	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	59	404573	212551	22	36	527	20	390
00995.142907	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	48	325530	160460	22	36	527	20	351
00995.473123	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	49	300533	158657	22	36	527	19	234
00995.802327	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	49	253010	130571	22	36	527	21	520
00996.132334	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	50	257310	129647	21	36	468	21	520
00996.462336	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	49	254334	133647	22	36	527	21	520

00996.792353	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	50	244157	120924	22	36	527	21	520
00997.122330	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	50	231434	114821	23	36	585	20	351
00997.452334	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	50	217180	114406	22	36	527	19	234
00997.782319	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	50	213352	110239	22	36	527	21	468
00998.112318	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	51	147789	77217	22	36	527	22	527
00998.442326	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	51	97197	51731	22	36	527	21	468
00998.772328	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	51	115921	66135	22	36	527	21	520
00999.102319	5.0.254.179	5.0.252.218	5.0.254.179	5.0.252.218	51	86481	38428	22	36	527	21	520
00999.432461	5.0.254.179	5.0.252.101	5.0.254.179	5.0.252.101	58	155501	72887	22	36	527	21	520
00999.762373	5.0.254.179	5.0.252.101	5.0.254.179	5.0.252.101	59	121861	76205	20	36	351	2	87
01000.092313	5.0.254.179	5.0.252.101	5.0.254.179	5.0.252.101	60	80353	37561	20	36	351	1	65

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПРОГРАММА МАТНСАД С РАСЧЁТАМИ ГРАФИКОВ ЗАВИСИМОСТИ $P_{\text{ПРАВ/ОБН}} = f(P_{\text{ЛОЖ/ОБН}})$

<p><u>ORIGIN</u> := 1</p> <p>Pos := $1.11 \cdot 10^{-5}$</p> <p>as(i) := $-2 \cdot \ln(2 \cdot \text{Pos} \cdot \log(a_i, 2))$</p> <p>as(1) = 21.431</p> <p>as1(i) := $1.585 \cdot \text{as}(i)$</p> <p>as1(1) = 33.968</p> <p>$\sqrt{2 \cdot \text{as1}(1)} = 8.242$</p> <p>x(i) := $3.71 - \sqrt{2 \cdot \text{as1}(i)}$</p> <p>x(1) = 4.532 ⋮</p>	<p>a :=</p> $\begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 8 \\ 16 \\ 32 \end{pmatrix}$	<p>Pos' := $1.11 \cdot 10^{-7}$</p> <p>as'(i) := $-2 \cdot \ln(2 \cdot \text{Pos}' \cdot \log(a_i, 2))$</p> <p>as'(1) = 30.641</p> <p>as'1(i) := $1.585 \cdot \text{as}'(i)$</p> <p>as'1(1) = 48.566</p> <p>$\sqrt{2 \cdot \text{as}'1(1)} = 9.856$</p> <p>x'(i) := $3.71 - \sqrt{2 \cdot \text{as}'1(i)}$</p> <p>x'(1) = 6.146</p>	<p style="text-align: right;">+</p> <p>Pos'' := $1.11 \cdot 10^{-3}$</p> <p>as''(i) := $-2 \cdot \ln(2 \cdot \text{Pos}'' \cdot \log(a_i, 2))$</p> <p>as''(1) = 12.22</p> <p>as''1(i) := $1.585 \cdot \text{as}''(i)$</p> <p>as''1(1) = 19.369</p> <p>$\sqrt{2 \cdot \text{as}''1(1)} = 6.224$</p> <p>x''(i) := $3.71 - \sqrt{2 \cdot \text{as}''1(i)}$</p> <p>x''(1) = 2.514</p>
---	---	--	--

$$V(x) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Given

1.28	$V(x) = 10^{-18}$
2.33	Find(x) \rightarrow 8.75729034878126808
3.09	
3.71	
4.26	
4.75	
5.2	
5.61	
6	
6.36	
6.71	
7.03	
7.35	
7.65	
7.94	
8.22	
8.49	
8.76	

$$x :=$$

$$i := 1..18$$

$$xq'(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as'1(1)}|$$

$$xq'(1) = 8.576$$

$$P_{\text{прав}}'(i) := \begin{cases} V(xq'(i)) & \text{if } i \geq 20 \\ 1 - V(xq'(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$xq'1(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as'1(2)}|$$

$$xq'1(4) = 5.92$$

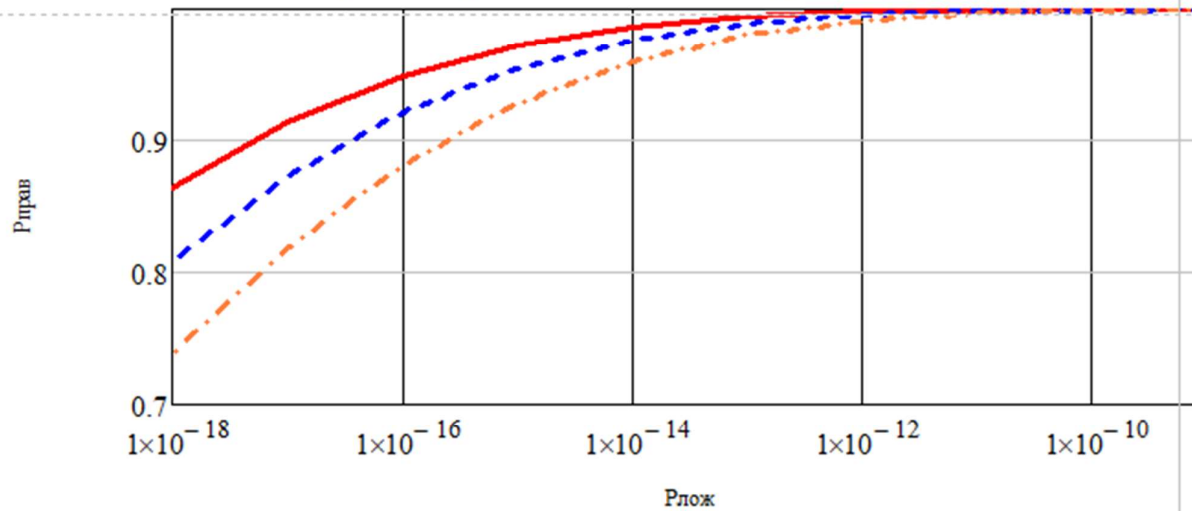
$$P_{\text{прав}4}'(i) := \begin{cases} V(xq'1(i)) & \text{if } i \geq 20 \\ 1 - V(xq'1(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$xq'2(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as'1(4)}|$$

$$xq'2(4) = 5.689$$

$$P_{\text{прав}16}'(i) := \begin{cases} V(xq'2(i)) & \text{if } i \geq 20 \\ 1 - V(xq'2(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Отношение вероятности правильного и ложного обнаружений для наноэлектроники (10^{-7})



— При $a=2$
 - - - При $a=4$
 ···· При $a=16$

Для 120 км/ч (10^{-4}):

$$P_{\text{прав}}'(4) = 0.9999999996 - a = 2$$

$$P_{\text{прав}4}'(4) = 0.9999999984 - a = 4$$

$$P_{\text{прав}16}'(4) = 0.9999999936 - a = 16$$

Для 360 км/ч (10^{-6}):

$$P_{\text{прав}}'(6) = 0.9999998351 - a = 2$$

$$P_{\text{прав}4}'(6) = 0.9999994697 - a = 4$$

$$P_{\text{прав}16}'(6) = 0.9999983332 - a = 16$$

+

$$xq(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as1(1)}|$$

$$xq(1) = 6.962$$

$$P_{\text{прав}}(i) := \begin{cases} V(xq(i)) & \text{if } i \geq 17 \\ 1 - V(xq(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$xq1(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as1(2)}|$$

$$xq1(4) = 4.261$$

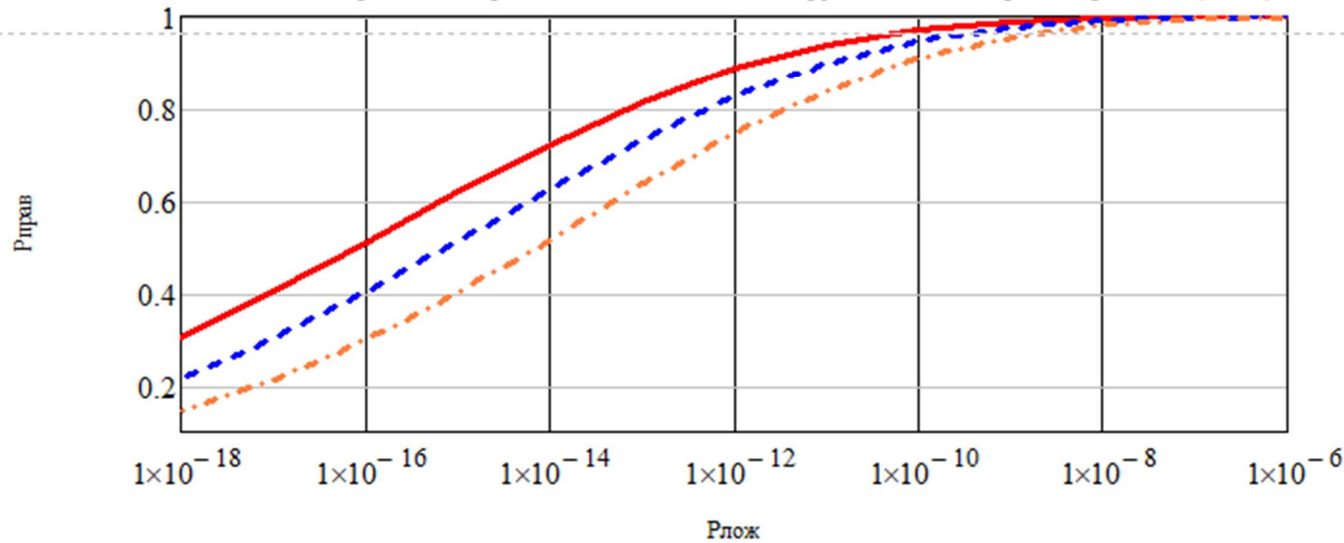
$$P_{\text{прав4}}(i) := \begin{cases} V(xq1(i)) & \text{if } i \geq 16 \\ 1 - V(xq1(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$xq2(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as1(4)}|$$

$$xq2(4) = 3.981$$

$$P_{\text{прав16}}(i) := \begin{cases} V(xq2(i)) & \text{if } i \geq 15 \\ 1 - V(xq2(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Отношение вероятности правильного и ложного обнаружений для микроэлектроники (10^{-5})



— При $a=2$
 - - - При $a=4$
 ··· При $a=16$

Для 120 км/ч (10^{-4}):

$$P_{\text{прав}}(4) = 0.999997083 - a = 2$$

$$P_{\text{прав4}}(4) = 0.9999898367 - a = 4$$

$$P_{\text{прав16}}(4) = 0.9999656416 - a = 16$$

Для 360 км/ч (10^{-6}):

$$P_{\text{прав}}(6) = 0.9997605731 - a = 2$$

$$P_{\text{прав4}}(6) = 0.999361888 - a = 4$$

$$P_{\text{прав16}}(6) = 0.9983625655 - a = 16$$

$$xq''(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as''1(1)}|$$

$$xq''(1) = 4.944$$

$$R_{\text{прав}}''(i) := \begin{cases} V(xq''(i)) & \text{if } i \geq 10 \\ 1 - V(xq''(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$xq''1(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as''1(2)}|$$

$$xq''1(4) = 2.15$$

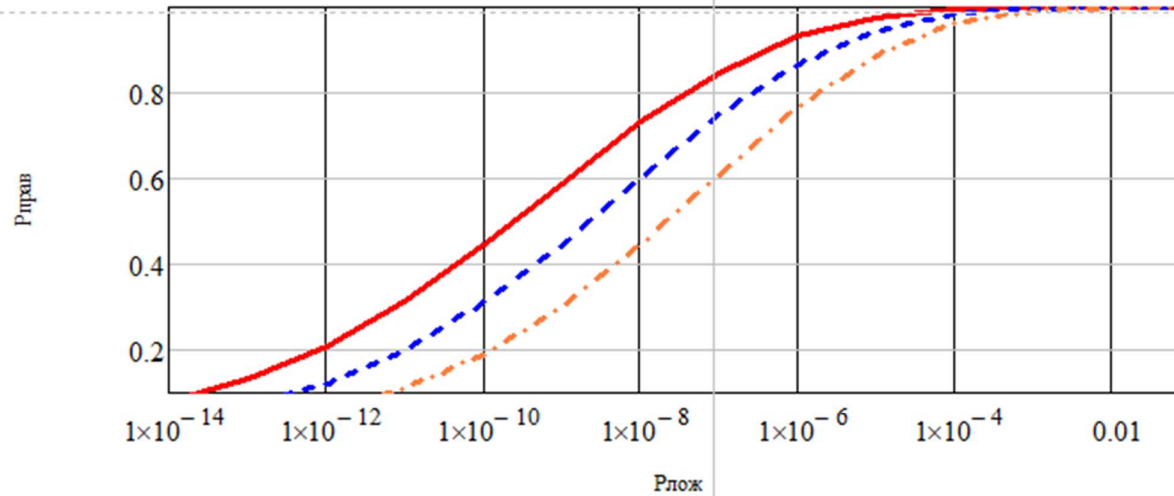
$$R_{\text{прав4}}''(i) := \begin{cases} V(xq''1(i)) & \text{if } i \geq 9 \\ 1 - V(xq''1(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$xq''2(i) := |x_i - \sqrt{2 \cdot as''1(4)}|$$

$$xq''2(4) = 1.763$$

$$R_{\text{прав16}}''(i) := \begin{cases} V(xq''2(i)) & \text{if } i \geq 8 \\ 1 - V(xq''2(i)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Отношение вероятности правильного и ложного обнаружений для микроволновки (10^{-3})



— При $a=2$
 - - - При $a=4$
 - · - При $a=16$

Для $120 \text{ км/ч } (10^{-4})$:

$$R_{\text{прав}}''(4) = 0.9940325562 - a = 2$$

$$R_{\text{прав4}}''(4) = 0.9842386493 - a = 4$$

$$R_{\text{прав16}}''(4) = 0.9610199887 - a = 16$$

Для $360 \text{ км/ч } (10^{-6})$:

$$R_{\text{прав}}''(6) = 0.9297683306 - a = 2$$

$$R_{\text{прав4}}''(6) = 0.8665890751 - a = 4$$

$$R_{\text{прав16}}''(6) = 0.7650516483 - a = 16$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КАНДИДАТСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



Maxima Telecom

Акционерное общество «МаксимаТелеком»
(АО «МаксимаТелеком»)
ИНН 7703534295, КПП 771001001, ОГРН 1047796902450
Тел./Факс: +7 (495) 704-27-77, e-mail: info@maximatelecom.ru
Адрес местонахождения: Россия, 127006, Москва,
Старопименовский переулок, дом 10

05 сентября 2022 г. № И-22- АО1

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Левшунова В. В. «Разработка и исследование беспроводных каналов сети
технического мониторинга подвижного состава»

Настоящим актом подтверждаем, что разработанные Левшуновым В. В. методики оценки эффективности (доступности, оперативности и качества) канала Wi-Fi поезда, полученные в результате работы над кандидатской диссертацией, использованы при реализации проекта по титулу «Беспроводная сеть передачи данных стандарта Wi-Fi для использования на строящихся объектах инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен» БКЛ (участок ст. Аминьевское шоссе - ст. Мичуринский проспект –ст. Проспект Вернадского)».

С уважением,
Заместитель генерального
директора
по инфраструктуре
АО «МаксимаТелеком»

О.В. Заправатов



**Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственное объединение Инжиниринг»**

107140, Москва, Новый 3-й пер., дом №5, строение 1, пом/каб I/5
ИНН 7708336515, КПП 770801001, info@npoeng.ru

Исх № 01/190922 от 22.08.2022

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Левшунова В. В. «Разработка и исследование беспроводных каналов сети технического
мониторинга подвижного состава»

Настоящим актом подтверждаем, что разработанные Левшуновым В. В. методические основы проектирования каналов сети технического мониторинга ж/д транспорта на основе беспроводных технологий, полученные в результате работы над кандидатской диссертацией, использованы при реализации проекта по титулу «Строительство второго главного пути на участке Реутово - Балашиха».

Исполнительный директор


 **О.В. Ширяев**

НПО ИНЖИНИРИНГ

107140, Москва, Новый 3-й пер., дом №5, строение 1, пом/каб I/5
ИНН 7708336515, КПП 770801001, info@npoeng.ru

Исх. №03/010922 от 01.09.22г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Левшунова В. В. «Разработка и исследование беспроводных каналов сети технического
мониторинга подвижного состава»

Настоящим актом подтверждаем, что разработанные Левшуновым В. В. методические основы проектирования каналов сети технического мониторинга ж/д транспорта на основе беспроводных технологий, полученные в результате работы над кандидатской диссертацией, использованы при реализации проекта по титулу «Модернизация линии связи на участке Минеральные воды - Ищерская».

Исполнительный директор



О.В. Ширяев



Россия, 108820, г. Москва, п. Мосрентген,
ул. Героя России Соломатина, д.3, 33
Тел.: +7 (964) 725-22-13
E-mail: info@settransproekt.ru
www.settransproekt.ru

Исх. № И16-22 от 08.09.2022

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Левшунова В. В. «Разработка и исследование беспроводных каналов сети
технического мониторинга подвижного состава»

Настоящим актом подтверждаем, что разработанные Левшуновым В. В. методики оценки эффективности (доступности, оперативности и качества) канала Wi-Fi поезда, полученные в результате работы над кандидатской диссертацией, использованы при реализации проекта по титулу «Юго-Западный участок третьего пересадочного контура, станция метро «Проспект Вернадского» - станция метро «Можайская» 6 этап: «Участок линии от ст. «Проспект Вернадского» до ст. «Аминьевское шоссе». Корректировка в части изменения технических решений и сметной стоимости».

С Уважением,
Генеральный директор
ООО «СетьТрансПроект»



Белкин А. П.



Общество с ограниченной ответственностью
«Связьпроект групп»

Россия, 129344, г. Москва,
ул. Енисейская, дом 12, 161
Тел.: +7 (964) 725-22-10
E-mail: info@spgrupp.ru
www.spgrupp.ru

22.08.2022 № А-02/22

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Левшунова В. В. «Разработка и исследование беспроводных каналов сети технического
мониторинга подвижного состава»

Настоящим актом подтверждаем, что разработанные Левшуновым В. В. методические основы проектирования каналов сети технического мониторинга ж/д транспорта на основе беспроводных технологий, полученные в результате работы над кандидатской диссертацией, использованы при реализации проекта по титулу «Этап XII «Строительство нового остановочного пункта Ольгино» в рамках выполнения работ по титулу: «Организация пригородно-городского пассажирского железнодорожного движения на участке Апрелевка - Железнодорожная».

Генеральный директор
ООО «Связьпроект групп»

_____ Левшунова Д. С.

Главный инженер
ООО «Связьпроект групп»

_____ Гугуев О. В.

