

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(Н И У « Б е л Г У »)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
**КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ БЕСПРОВОДНОЙ
СЕТИ СВЯЗИ ДЛЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ
УСЛУГ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ МАРШРУТЕ МОСКВА - ТВЕРЬ**

Выпускная квалификационная работа
обучающегося по направлению подготовки
11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи,
магистерская программа «Системы и устройства радиотехники и связи»
заочной формы обучения, группы 07001572
Фазлиахметова Александра Радиковича

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
кафедры ИТСиТ Болдышев А.В.

Рецензент:
Заместитель начальника
«Белгородского регионального центра
связи филиала ОАО "РЖД"»
Алексенко А.А.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1 Регламент и особенности беспроводной передачи на железных дорогах.....	6
1.1 Регламент обеспечения электросвязи на железнодорожных линиях ...	6
1.2 Особенности построения систем беспроводной передачи для железных дорог	10
1.3 Особенности предоставления мультисервисного контента в пассажирских вагонах	17
1.4 Участок железнодорожной линии Москва-Тверь как объект внедрения современной концепции подвижного терминала доступа.....	21
1.5 Задачи исследования	27
Глава 2 Моделирование беспроводной системы связи стандарта LTE для связи с пассажирскими составами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь	28
2.1 Теоретические основы передачи данных стандарта LTE.....	28
2.2 Разработка модели линейно-кабельных сооружений и антенно-фидерных устройств для обеспечения беспроводной связи с пассажирскими составами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь	42
2.3 Разработка и исследования модели беспроводной передачи стандарта LTE в диапазонах 2.6 ГГц и 800 МГц	53
2.4 Основные результаты и выводы	62
Глава 3 Модель предоставления мультисервисного контента для с пассажирских составов на железнодорожном маршруте Москва-Тверь	63
3.1 Разработка схемных решений сетевой инфраструктуры пассажирских вагонов	63
3.2 Организация системы видеонаблюдения в пассажирских поездах.....	70
3.3 Основные результаты и выводы.....	75
Заключение	76
Список используемых источников.....	77
Приложение А	81

ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные технологии связи глубоко укоренились в жизни человека, а текущий уровень проникновения различных телекоммуникационных услуг все усиливает потребность в системах связи обеспечивающих высокую мобильность. В этих условиях, работы групп, занимающихся стандартизацией таких как консорциум 3GPP направлены, в первую очередь на улучшение доступность, надежности и полосы пропускания беспроводных каналов связи. Увеличение количества оконечных устройств таких как планшеты и смартфоны вызывает необходимость обеспечения связи в любой момент времени и в любом месте, что соответствует концепции NGN.

Кроме этого следует добавить, что развитие беспроводных сетей приводит к созданию инфокоммуникационной инфраструктуры, в рамках которой развиваются технические и бизнес идеи. Инфокоммуникационная инфраструктура позволяет создавать прикладные решения для многих сфер, включая и транспорт.

Текущие тренды развития инфокоммуникационных технологий связи затрагивает и такую область как пассажирские перевозки. В данной выпускной квалификационной работе рассматривается проблема обеспечения мультисервисным контентом пассажиров железных дорог России. На сегодняшний момент проблема обеспечения цифровым мультисервисным контентом пассажирских вагонов в поездах дальнего следования актуальна, т.к. существующие каналы беспроводной связи, ориентированные на железнодорожные перевозки обеспечивают важные для организации и безопасности движения железнодорожного транспорта системы. Однако, пассажирские перевозки требуют повышения качества обслуживания, одним из факторов качества обслуживания является обеспечения пассажиров услугами связи и мультисервисным контентом.

Существующие сети мобильной связи имеют слабое покрытие в зонах железнодорожных путей, в особенности это касается территория вне населенных пунктов, и не могут удовлетворить потребности пассажиров в бесперебойной телефонной связи, а также в цифровом мобильном контенте. Следует также указать на высокие ожидания современных пассажиров, для которых обеспечение беспроводной связью является на текущий момент неотъемлемой и востребованной услугой в виду почти 100% покрытия беспроводными сетями городов. Таким образом, для многих пассажиров является неудобством невозможность удовлетворить потребности в телекоммуникациях при перемещении из одного населенного пункта в другой с помощью железнодорожного транспорта. Все перечисленные факторы заставляют пассажиров выбирать альтернативные виды транспорта, что негативно сказывается на прибыли ОАО РЖД. Следуя концепции разработанной ОАО РЖД по повышению качества транспортного обслуживания в сфере пассажирских перевозок, становится необходимой разработка мероприятий и технических средств по расширению спектра услуг в пути следования. Схематическое отображение концепции качества транспортного обслуживания приведено на рисунке 1.

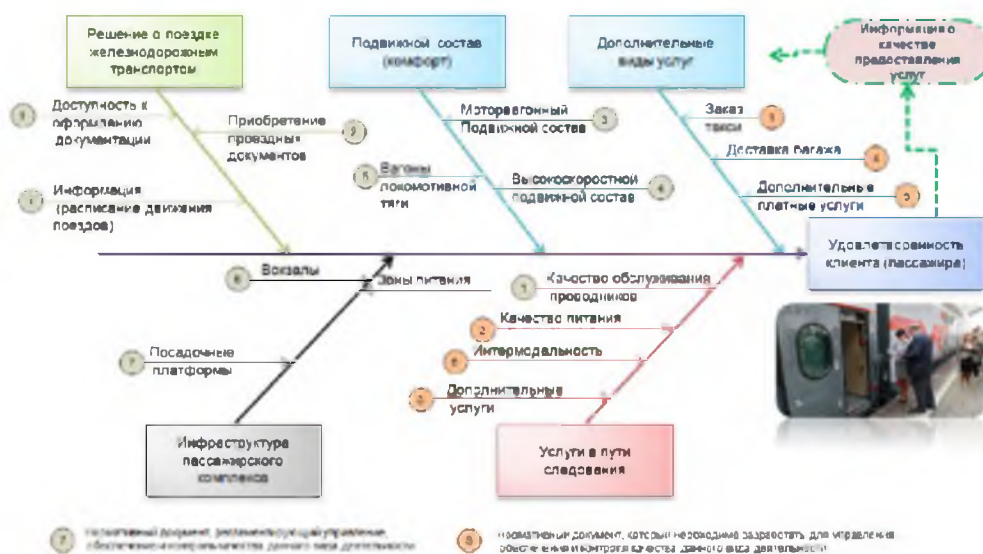


Рисунок 1 – Схематическое отображение концепции качества транспортного обслуживания ОАО «РЖД»

Построение сетевой инфраструктуры для широкополосного беспроводного доступа на железных дорогах позволит осуществить множество проектов помимо мультисервисного доступа пассажиров в сеть, например, обеспечение видеонаблюдения за состоянием внутри вагонов или удаленный контроль за путями и путепроводами, а также сбор различных данных с датчиков для измерения и диагностики специфических параметров, критичных для функционирования железных дорог.

Цель данной работы разработка и исследование модели беспроводного широкополосного доступа для обеспечения мультисервисным контентом пассажирских вагонов на пути следования железнодорожного маршрута Москва-Тверь. В рамкой данной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Провести основных регламентов и технической документацией для реализации беспроводной передачи данных на железных дорогах;
2. Изучить особенности пассажирских вагонов с целью разработки схемных решений по размещению сетевого оборудования и кабелей связи;
3. Разработать модель линейно-кабельных сооружений и антенно-фидерных устройств для обеспечения беспроводной связи с пассажирскими составами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь;
4. Разработать и исследовать модель беспроводной передачи данных по стандарту LTE в диапазонах 2.6 ГГц и 800 МГц для связи с пассажирскими поездами
5. Разработать модель предоставления мультисервисного контента для пассажирских перевозок ОАО РЖД на железнодорожном маршруте Москва-Тверь.

ГЛАВА 1 РЕГЛАМЕНТ И ОСОБЕННОСТИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

1.1 Регламент обеспечения электросвязи на железнодорожных линиях

При построении инфраструктуры для обеспечения беспроводного доступа для пассажирских поездов на железнодорожных линиях необходимо учитывать регламент технического обслуживания объектов электросвязи железных дорог. В виду того, что точки обеспечивающие беспроводной доступ на определенном участке железной дороги должны базироваться на существующей инфраструктуре электросвязи железнодорожных линий рассмотрение технических регламентов для объектов электросвязи является обязательным. В данных регламентах вводятся основные термины и понятия, а также приводятся правила монтажа и эксплуатации объектов электросвязи. Основываясь на изложенных в регламентах требованиях будет производится проектирование системы беспроводной передачи для участка железнодорожной линии Москва – Тверь.

Железнодорожная линия – технологический комплекс, включающий в себя железнодорожные пути, железнодорожные станции с полосой отвода и совокупность устройств железнодорожного электроснабжения, железнодорожной автоматики и телемеханики, железнодорожной электросвязи, здания, строения, сооружения, устройства и оборудование, обеспечивающие функционирование этого комплекса и безопасное движение железнодорожного подвижного состава.

Техническое обслуживание и ремонт объектов электросвязи осуществляется в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации железнодорожного транспорта Российской Федерации (ПТЭ), Инструкции по движению поездов и маневровой работе на железных дорогах

Российской Федерации и иных нормативных и технологических документов, распространяющихся на хозяйство связи ОАО «РЖД».

В первую очередь, рабочие места электромехаников, электромонтеров, старших электромехаников должны быть обеспечены необходимыми для эксплуатируемых объектов электросвязи нормативными, технологическими, эксплуатационными документами, принципиальными и монтажными схемами эксплуатируемых технических средств электросвязи.

Кроме того, целях обеспечения бесперебойности действия объектов электросвязи, для оперативности устранения нарушений штатного режима в работе технических средств, повышения эффективности использования рабочего времени руководители структурных подразделений Центральной станции связи могут устанавливать дежурство на дому или на рабочем месте с соблюдением требований действующих нормативно-правовых актов.

Задачи технического обслуживания объектов электросвязи

Основными задачами технического обслуживания объектов электросвязи являются: обеспечение бесперебойного функционирования технических средств электросвязи, восстановление исправного состояния, устранение причин отказов, повреждений или сбоев в работе технических средств.

Организация технического обслуживания объектов электросвязи предусматривает:

- подготовку и допуск инженерно-технических работников к эксплуатации, мотивацию их труда;
- выбор эффективных и экономичных видов и методов технического обслуживания и ремонта объекта электросвязи;
- периодические осмотры объектов электросвязи и служебно-технических зданий;
- автоматизацию работ по контролю технического состояния, сбору и анализу информации о надежности технических средств;

- контроль качества работ, в том числе выполняемых подрядными (фирменными, сервисными) организациями;
- техническое освидетельствование с целью оценки возможности дальнейшей эксплуатации устройств электросвязи;
- планирование выполнения основных работ и организационно - технических мероприятий;
- ведение технической документации;
- организацию материально-технического обеспечения;
- организацию транспортирования, хранения, консервации и утилизации аппаратуры и оборудования электросвязи;
- организацию аварийно-восстановительных работ;
- обеспечение безопасности движения, безопасности труда, пожарной и экологической безопасности.

В зависимости от влияния отдельных объектов электросвязи на безопасность движения поездов, бесперебойность процесса перевозок и других технологических процессов ОАО «РЖД», качество услуг электросвязи в структурных подразделениях Центральной станции связи – филиала ОАО «РЖД» могут применяться три вида технического обслуживания:

- регламентированное техническое обслуживание;
- техническое обслуживание с периодическим контролем;
- неплановое техническое обслуживание.

Техническое обслуживание с периодическим контролем.

Техническое обслуживание с периодическим контролем выполняется с периодичностью установленной планом-графиком технического обслуживания в объеме работ, установленным технологическими картами, а объем остальных работ определяется техническим (фактическим) состоянием объекта электросвязи в момент начала технического обслуживания. Техническое обслуживание с периодическим контролем может применяться

только при наличии системы мониторинга, анализа статистики отказов за предшествующие периоды и при обеспечении резервирования.

Внеплановое техническое обслуживание

Внеплановое (по фактическому состоянию) техническое обслуживание осуществляется без предварительного назначения, по техническому состоянию. При данном техническом обслуживании регулярные регламентные работы не проводятся, а осуществляется только оперативное восстановление работы объектов электросвязи после отказов или происшествий и проведение отдельных работ по повышению надежности технических средств. В основном применяется при наличии системы мониторинга и при обеспечении резервирования, для объектов железнодорожной технологической электросвязи, отказы которых не нарушают безопасность движения поездов и бесперебойность процессов перевозок. Перечень объектов электросвязи, по которым разрешено внеплановое техническое обслуживание, разрабатывается дирекциями связи или другими структурными подразделениями Центральной станции связи - филиала ОАО «РЖД» и утверждается Центральной станцией связи - филиалом ОАО «РЖД».

Планирование, контроль и учет выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту объектов электросвязи осуществляется в соответствии с требованиями настоящей Инструкции, с использованием Единой Системы Мониторинга и Администрирования технологической связи ОАО «РЖД» (ЕСМА), реализующей:

- учет и анализ нарушений работы объектов электросвязи;
- учет и анализ технической оснащенности;
- планирование и контроль исполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту объектов электросвязи;
- учет объектов электросвязи, обслуживаемых по гарантийному сроку;
- учет отступлений от норм содержания объектов электросвязи и т.д.

Данные выдержки из регламентов являются важными, для осуществления проектирования беспроводной инфраструктуры для железнодорожной линии Москва-Тверь.

1.2 Особенности построения систем беспроводной передачи для железных дорог

Развитие систем электросвязи внутри вагонов на железнодорожных линиях началось в Европе в 70х годах XX века. В результате появления систем диагностики возникла необходимость в сборе и передаче служебной информации для контроля и управления. Для передачи данных вначале использовались линии электроснабжения поезда с нагрузкой от 24 до 110 Вольт. Спустя некоторое время появились отдельные системы передачи данных которые являлись физически независимыми от систем электроснабжения подвижного состава. Также использовались и беспроводные радиосистемы передачи, в основном, в целях экстренного оповещения и связи машиниста.

С развитием электроники, информационных и телекоммуникационных технологий потребности в передаче данных для железных дорог увеличились, в виду необходимости повышения безопасности поездок, оптимизации использования существующей инфраструктуры за счет увеличения частоты движения поездов, снижения эксплуатационных расходов и технического обслуживания. Потребности в передаче данных, связанных с эксплуатацией и обслуживанием поездов и железнодорожных линий, также дополняют потребность в предоставлении инфокоммуникационных услуг.

Таким образом, можно говорить о необходимости внедрения концепции Интеллектуальной транспортной среды, которая бы позволяла поездам “общаться”, т.е. обеспечивать взаимодействие различных датчиков, систем мониторинга и контроля, что возможно лишь на базе развитой

сетевой инфраструктуры. Неотъемлемой частью данной инфраструктуры должны являться беспроводные технологии связи, которые позволяют быстро и эффективно разворачивать сетевую среду без планирования и прокладки структурированных кабельных систем внутри подвижного состава. Простота развертывания, относительно низкая стоимость введения в эксплуатацию, хорошая гибкость и простота подключения новых устройств являются неоспоримыми преимуществами перед проводными сетями связи. Эти факторы являются особо актуальными в современных условиях. Следует обозначить две основных сферы применения беспроводных технологий на железнодорожных линиях.

1. Передача данных находящемуся в движении подвижному составу по беспроводным технологиям, иллюстрация концепции на рисунке 1.1.

2. Использование беспроводных технологий внутри подвижного состава, иллюстрация концепции на рисунке 1.2.

Рассмотрим первую сферу применения беспроводных технологий подробнее. Концепцию беспроводной связи с подвижным составом можно проиллюстрировать следующим рисунком.



Рисунок 1.1 – Концепция беспроводной связи с подвижным составом



Рисунок 1.2 – Концепция предоставления цифрового контента по беспроводному каналу в пассажирских поездах

В первую очередь следует отметить сложности, возникающие при эксплуатации и/или проектировании подобных систем:

1. Металлический каркас поезда в некотором роде представляет собой клетку Фарадея, что вызывает потери при приеме/передаче сигналов. Однако использование в качестве каркасных материалов композитов в определенной степени нивелирует данную проблему.

2. Инфраструктура железнодорожных линий является средой с повышенным уровнем вибраций и высокими наводками, что требует особых мер по размещению телекоммуникационного оборудования.

3. Широкий диапазон температур. Среднегодовая температура воздуха в России, составляет -5.5 °С. Размах среднегодовой температуры в отдельных точках России составляет 36 градусов (от -23 до $+13$). Что

является также негативным фактором при эксплуатации оборудования электросвязи и требует определенных решений.

4. Высокая вероятность сбоев в питании. Серьезные риски вызывает сосуществование электрической сети питания для движения подвижных составов и слаботочной сети электросвязи.

5. Непригодность поездов как полностью независимых источников питания.

Таблица 1.1 – Полоса пропускания различных сервисов, востребованных на железнодорожных линиях

Сервис	Средняя полоса пропускания
Система контроля	100 Кбит/с (восх./нисх. линии связи)
Система оперативного голосового оповещения	150 Кбит/с (восх./нисх. линии связи)
Система видеонаблюдения	50 Кбит/с (нисх. линия связи), 2-6 Мбит/с на вагон (восх. линия связи)
Системы поддержки	200-500 Кбит/с (восх./нисх. линии связи)
Система информирования пассажиров	100 Кбит/с (нисх. линии связи)
Мультимедиа (трансляция ТВ, радио)	7 Мбит/с на вагон (нисх. линия связи), 20 Кбит/с (восх. линия связи)
Доступ в Интернет	10 Мбит/с на вагон (нисх. линия связи), 2 Мбит/с (восх. линия связи),

В подобных условиях для обеспечения надежной беспроводной связи является скрупулёзный расчет беспроводного канала характеристик его распространения. Однако, существующие модели, в значительной степени были разработаны для обеспечения мобильной наземной подвижной связи, и большинство из них не подходят для железнодорожной среды.

Следовательно, необходимо разработать модель, которая бы максимально отвечала особенностям проектируемой системы беспроводной связи. Для этого необходимо определиться с сервисами, которые планируется предоставлять пассажирам, а также полосу пропускания, необходимую для обеспечения этих сервисов – таблица 1.1. Это, в свою очередь, определяет базовую технологию беспроводной передачи.

Исходя из данных представленных в таблице, можно сделать вывод, что средняя пропускная способность на вагон, в среднем, не превышает 30 Мбит/с. Условно, все сервисы можно разделить на две группы, основываясь на требуемой для их функционирования полосе пропускания.

1. Сервисы, требующие широкополосный доступ. К данной группе относятся сервисы для пассажиров: доступ в Интернет, мультимедиа. А также сервисы, использующие передачу изображений, такие как системы видеонаблюдения.

2. Сервисы, не требовательные к широкополосным каналам. К данной группе относятся: сигнальная передача, системы контроля и управления, системы оперативного голосового оповещения и системы информирования пассажиров.

Однако стоит отметить, что улучшение качества или повышение безопасности предоставления сервисов может увеличить полосу пропускания до нескольких сотен мегабит в секунду. При этом необходимо обеспечивать вероятность ошибок при пакетной передаче на уровне 10^{-3} .

Специфика предоставления телекоммуникационных услуг на железнодорожных линиях существенно отличается как от классической мобильной связи, так и от общественного сектора телекоммуникационных услуг. С одной стороны, для связи на железнодорожных линиях существует целый ряд строгих ограничений и особенностей:

1. Высокая мобильность абонентов;
2. Высокая частота хэндовера, т.е. передачи абонента от одной базовой станции к другой;

3. Требования повышенной надежности каналов связи;
4. Повышенные требования к качеству обслуживания мультимедиа контентом (QoS).

С другой стороны, существует ряд положительных сторон железнодорожного транспорта, которые значительно упрощают проектирование сетей связи:

1. Маршрут абонента полностью детерминирован;
2. Скорость движения абонента детерминирована;
3. Хорошая предсказуемость потоков трафика и возможность соответственного “усиления” слабых мест сетевой инфраструктуры для их предотвращения.

Изложенные особенности напрямую влияют на архитектуру построения телекоммуникационных сетей для железнодорожных линий.



Схема двусторонней поездной радиосвязи
А – В – станции

Рисунок 1.3 – Схема двусторонней поездной радиосвязи

Имеющаяся, на текущий момент, беспроводная связь на участке железнодорожной линии Москва-Тверь ограничивается использованием радиотелефонных станций (схема представлена на рисунке 1.3). Для радиотелефонной связи машиниста с диспетчером, дежурным по станции, а также машинистами других поездов предусмотрена использование

радиостанций типа 55P22B-1.1М. На крыше головного вагона устанавливается коротковолновая антенна. В комплект радиостанции входят блок питания, блок низкочастотных и вызывных устройств, приемопередатчик, два пульта управления, антенно-согласующее устройство, два громкоговорителя, тройники и микрофон.

Зачастую на электрифицированных линиях в отдельных зонах пропадает радиосвязь с диспетчером или дежурным по станции. Нормальной радиосвязи препятствуют гладкие и импульсные помехи, возникающие в результате работы преобразовательных устройств тяговых подстанций, тяговых двигателей и вспомогательных машин на электропоезде, а также искрения токоприемников вследствие плохого контакта, отключения быстродействующих выключателей и контакторов. Для уменьшения радиопомех на электропоездах используются индуктивные и емкостные фильтры. В радиоканал между стационарными и локомотивными радиостанциями включают волновод. В волновод, установленный на опорах контактной сети, электромагнитная энергия от стационарных радиостанций передается индуктивным способом с помощью возбуждающих проводов. Они подвешены параллельно волноводу на некотором расстоянии от него. Возбуждающие провода через устройства и коаксиальную линию подсоединены к стационарной радиостанции. На крыше электропоезда установлена антенна, связанная с радиостанцией через согласующее устройство и коаксиальный кабель. В качестве волноводов используют подвешенные на опорах контактной сети провода продольных линий не тягового электроснабжения.

Функционирование подобная схемы организация радиосвязи является критически важной для безопасности движения на железнодорожных линиях, однако в условиях современного развития телекоммуникаций является устаревший так как позволяет передавать только голосовые сообщения и является не устойчивой к различным помехам в условиях сложной электромагнитной обстановкой.

1.3 Особенности предоставления мультисервисного контента в пассажирских вагонах

Для современного человека использование телекоммуникационных услуг повсеместно становится нормой жизни, а отсутствие связи где бы то ни было вызывает недоумение, а иногда раздражение. Невозможность воспользоваться услугами связи во время движения железнодорожном транспорте снижает удовлетворенность потребителей в услугах связи. Радиопокрытие существующей мобильной связи позволяет охватить только часть железнодорожной сети, преимущественно на станциях, и не может справиться с высокой нагрузкой на базовые станции вызванной высокой частотой хэндовера и не регулярностью приема вне населенных пунктов.

Для решения данной проблемы предлагается использование концепции поезда как терминала доступа или подвижного терминала доступа (ПТД), которая в англоязычной литературе называется TrainAccessTerminal. Данная концепция рассматривает поезд как мобильный маршрутизатор, который позволяет осуществлять связь между базовыми станциями и мобильными абонентами внутри состава – рисунок 1.4.

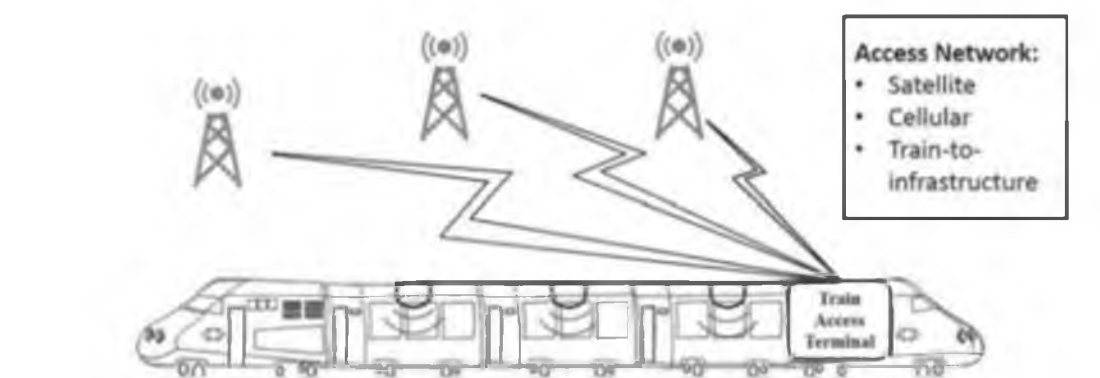


Рисунок 1.4 – Схема концепции подвижного терминала доступа

Концепция ПТД подразумевает использование нескольких возможных внешних источников WAN доступа: спутниковая связь, мобильная связь.

Основа данной концепции – использование внешней антенны для приема сигнала с внешнего источника. Далее сигнал обрабатывается и распределяется на внутреннюю сеть поезда. Таким образом коммуникация осуществляется в два шага по двум независимым каналам:

1. Канал WAN: поезд – внешняя сеть.
2. Канал LAN: поезд – мобильные абоненты внутри состава.

Следует отметить, что при проектировании WAN канала требуется разработать определенные метрики и правила размещения базовых станций, а также представить модель радиопокрытия для уточнения оптимальных точек размещения оборудования.

Преимущества подобного подхода к организации связи на подвижном составе:

1. Исключается эффект клетки Фарадея, за счет приема сигнала внешней антенной: его усиление, и перенаправление с помощью фидерного тракта внутрь поезда.

2. Отсутствует хэндовер для абонентов внутри подвижного состава, он сводится к хэндоверу одного ПТД, что серьезно снижает нагрузку на внешний радиоканал.

3. Агрегирование каналов многих пользователей в единый канал к провайдеру интернет (InternetServiceProvider), что также снижает нагрузку на сетевую инфраструктуру.

4. Предоставление внутри вагонов беспроводной связи по стандарту Wi-Fi, которой оборудованы практически все мобильные устройства пользователей в сравнении с технологией 4G, которой оборудовано гораздо меньшее количество устройств.

Использование нескольких внешних источников позволяет по максимуму использовать существующую инфраструктуру там, где это возможно, и использовать запасной канал связи, например, спутник.

Основное оборудование, формирующее радиоканал между подвижным составом и базовыми станциями на железнодорожной линии расположено в

голове поезда, при этом вагоны при заезде в депо в подвижных составах постоянно меняются. Сеть работает в постоянном движении, в результате которого все время меняются сетевые порты и физические устройства, через которые идет трафик одних и тех же сессий из одного состава. В связи с этим существует целый ряд архитектурных проблем организации сети:

1. Необходимо обеспечивать полностью автоматическую настройка сети состава при замене или изменении порядка вагонов;
2. Автоматическое распределение внутри вагонных точек доступа между двумя контроллерами W-Fi в поезде;
3. Корректное получение пользователями и оборудованием в составе IP-адресов;
4. Вывод трафика пользователя через правильную базовую станцию, активную в данный момент времени;
5. Перескакивание MAC-адресов с одного порта стационарного коммутатора на другой при движении поезда, требующее постоянного обновления MAC-таблиц на сетевых портах.

Решение этих проблем на существующей сетевой инфраструктуре мобильных сетей операторов, за счет создания отдельного “виртуального оператора” использующего арендованную сетевую инфраструктуру и частотный ресурс не представляет возможным.

Для организации стабильного канала связи с движущимся составом необходимо развернуть сетевую инфраструктуру на железнодорожной линии, установив базовые станции на опорах линий связи. Использование специализированных антенн с узкой диаграммой направленности, позволит обеспечивать меньшее рассеивание сигнала и большее расстояние при прочих равных условиях.

Базовая архитектура модели сетевого взаимодействия поезда с сетевой инфраструктурой железнодорожных линий представлена на рисунке 1.5

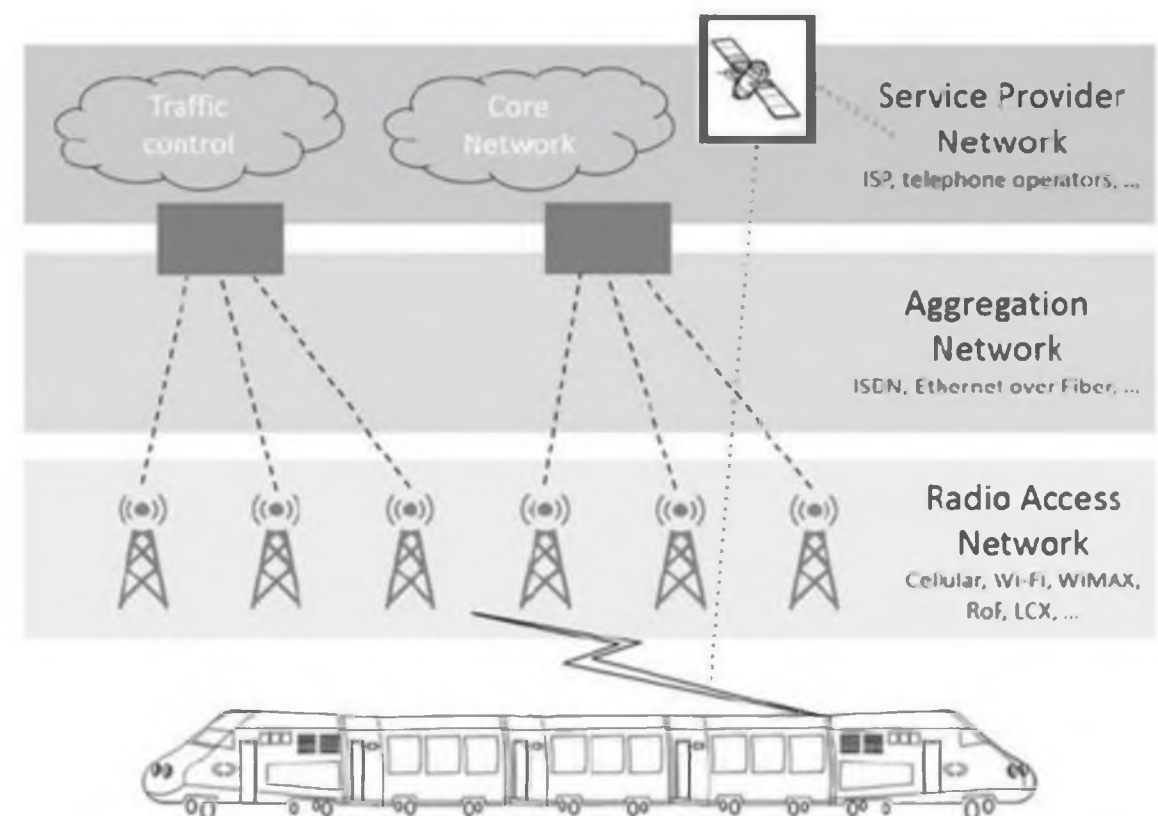


Рисунок 1.5 – Схема базовой архитектуры модели сетевого взаимодействия поезда с сетевой инфраструктурой железнодорожных линий

Для осуществления проектирования сетевой инфраструктуры для предоставления телекоммуникационных услуг необходимо рассмотреть особенности объекта, для которого планируется создание данной инфраструктуры: в данном случае, участок железных дорог Москва-Тверь. Рассмотрев особенности данного участка железных дорог будет разработан план по внедрению телекоммуникационных систем на базе представленной базовой архитектуры сетевого взаимодействия.

1.4 Участок железнодорожной линии Москва-Тверь как объект внедрения современной концепции подвижного терминала доступа.

Для пассажирских перевозок на участке железных дорог Москва – Тверь с конца 2015, начала 2016 года используются поезда типа ЭС1/ЭС2Г «Ласточка» (Электропоезд Сименс, 1-й / 2-й тип) — семейство пассажирских электропоездов, созданное на основе платформы SiemensDesiro для ОАО «Российские железные дороги». В таблице 1.2 представлена информация о маршруте движения поезда от станции Ленинградский вокзал (Москва) до станции Тверь.

Таблица 1.2– Маршрут следования экспресс поездов Москва-Тверь

Станция отправления	Промежуточные станции	Станция прибытия	Протяженность маршрута	Время в пути	Тип поезда
Москва (Ленинградский вокзал)	Химки, Сходня, Крюково, Подсолнечная, Клин, Завидово, Редкино, Куприяновка	Тверь	166,5 км	100 минут.	ЭС2Г

Электропоезда ЭС1 производились заводом Siemens в городе Крефельде (Германия), а ЭС2Г и ЭС2ГП — заводом Уральские локомотивы в городе Верхней Пышме (Россия) по лицензии Siemens. По состоянию на 2017 год выпущено более сотни составов «Ласточка» всех разновидностей. Большинство из них находится в пассажирской эксплуатации, значительная часть поездов используется как межрегиональные или пригородные экспрессы, или городские поезда (ЭС2Г), часть составов эксплуатируется как пригородные.

Электропоезда «ЭС1» и «ЭС2Г» («ЭС2ГП») семейства Desiro ML RUS спроектированы на основе платформы Desiro ML и соответствуют как требованиям технической спецификации по совместимости (TSI), так и российским нормативным документам. Поезда предназначены для региональных, пригородных и городских пассажирских перевозок на железнодорожных линиях колеи 1520 мм, оборудованных высокими или низкими платформами. На рисунке 1.6 представлено распределение оборудования в вагонах поезда типа «ЭС1» и «ЭС2Г».



Рисунок 1.6 – Распределение оборудования в вагонах поезда ЭС2Г: PWR—импульсный инвертор, питающий тяговые двигатели; VQS—четырёхквadrантный входной регулятор; HBU—преобразователь питания собственных нужд; ВЛГ—зарядный агрегат аккумуляторной батареи; Т—тяговый трансформатор; LF—дроссель сетевого фильтра; ВАТ—аккумуляторная батарея; ВР—тормозной резистор; НС—главный выключатель

Бортовая сеть электропоездов типа «ЭС1» и «ЭС2Г»

К промежуточному звену одного из инверторов в каждом моторном вагоне подключены преобразователь собственных нужд, питающий бортовую сеть, и зарядное устройство. Два преобразователя установлены под промежуточными вагонами. Питание от них передается к потребителям по поездной сборной шине трёхфазного тока напряжением 380 В. Преобразователь собственных нужд и зарядное устройство аккумуляторных батарей находятся в соответствующем контейнере в промежуточных вагонах.

Напряжения питания для бортовой сети:

- 220 Вольт переменный ток;

- 12 Вольт постоянный ток (служебное питание).

Благодаря четырем автономным преобразовательным блокам электропоезд обеспечивает высокую устойчивость к техническим неисправностям. При отсутствии напряжения в контактной сети энергоснабжение сохраняется в течение 1,5 часов у аварийного освещения, громкоговорителей, звуковых сигналов, хвостовых габаритных сигналов, аварийной вентиляции, системы управления автоматическими дверями, поездных радиостанций и стояночного пружинного тормоза.

Конфигурация салона электропоездов типа «ЭС1» и «ЭС2Г»

Межвагонные переходы, расположенные в обоих торцах промежуточных вагонов и заднем торце головного вагона, выполнены в виде двустворчатых противопожарных раздвижных дверей, обладающих соответствующими рамами, уплотнениями и огнестойким остеклением. Снаружи переходы полностью окружены герметичными гибкими перекрытиями типа «гармошка».

Тамбуры в вагонах отсутствуют, пассажирские прислонно-сдвижные двери выходят непосредственно в салон и образуют в нём тамбурные зоны входа и выхода, которые отделены от основной части салона с пассажирскими местами только стеклянными перегородками. Ввиду отсутствия тамбуров для предотвращения выхолаживания пассажирского салона в зимнее время температура в этих зонах поддерживается дополнительными обогревателями с направленной подачей тёплого воздуха в тамбурную зону и обогревом стен. Система подачи свежего воздуха связана с датчиком регулирования уровня углекислого газа, ввиду чего потребляемая мощность значительно уменьшается при малом количестве пассажиров в вагонах.

Для поддержания комфортной температуры и воздухообмена вагоны поезда оснащены специальными климатическими установками, размещенными на крышах вагонов. Каждый головной вагон дополнительно оборудован компактной климатической установкой для кабины машиниста,

которая функционирует независимо от установки пассажирского салона. Климатические установки обеспечивают воздухообмен, подогрев и охлаждение воздуха. Распределение подготовленного подаваемого воздуха производится через воздушные каналы, расположенные в потолках, боковых стенках и полах вагонов.

Для обеспечения безопасности пассажиров поезд оснащен системами наружного и внутреннего видеонаблюдения, а также пожарной сигнализацией.

Вспомогательное электрооборудование, оборудование дежурного, аварийного и рабочего освещения, а также слаботочные кабельные сети расположены в потолочных консолях и под потолочной области вагонов.

Планировка вагонов поезда представлена на рисунке 1.7.

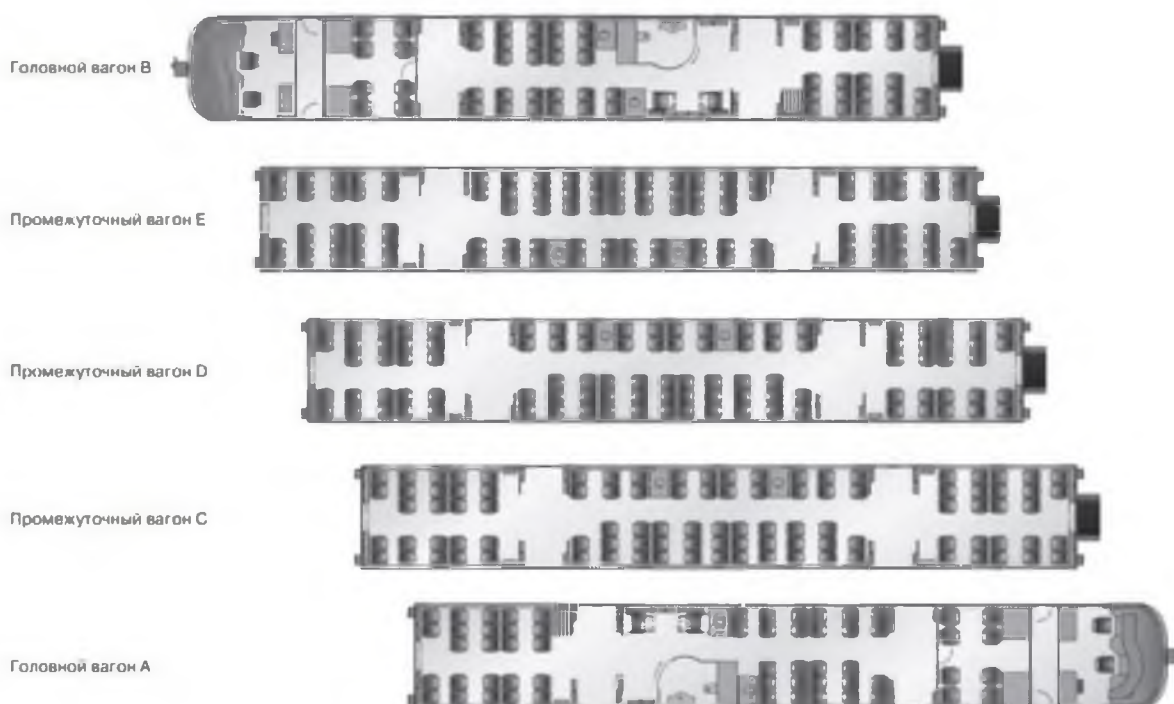


Рисунок 1.7 – Планировка вагонов электропоезда типа «ЭС2Г»

Планировка вагонов позволяет оценить:

- площадь которую необходимо охватить радиопокрытием;
- количество точек доступа на вагон;
- количество абонентских устройств на одну точку доступа;

- предпочтительную схему организации видеонаблюдения.

На рисунке 1.8 представлена карта участка железнодорожных линий ОАО РЖД на маршруте Москва-Тверь. Протяженность маршрута составляет 166,5 км.

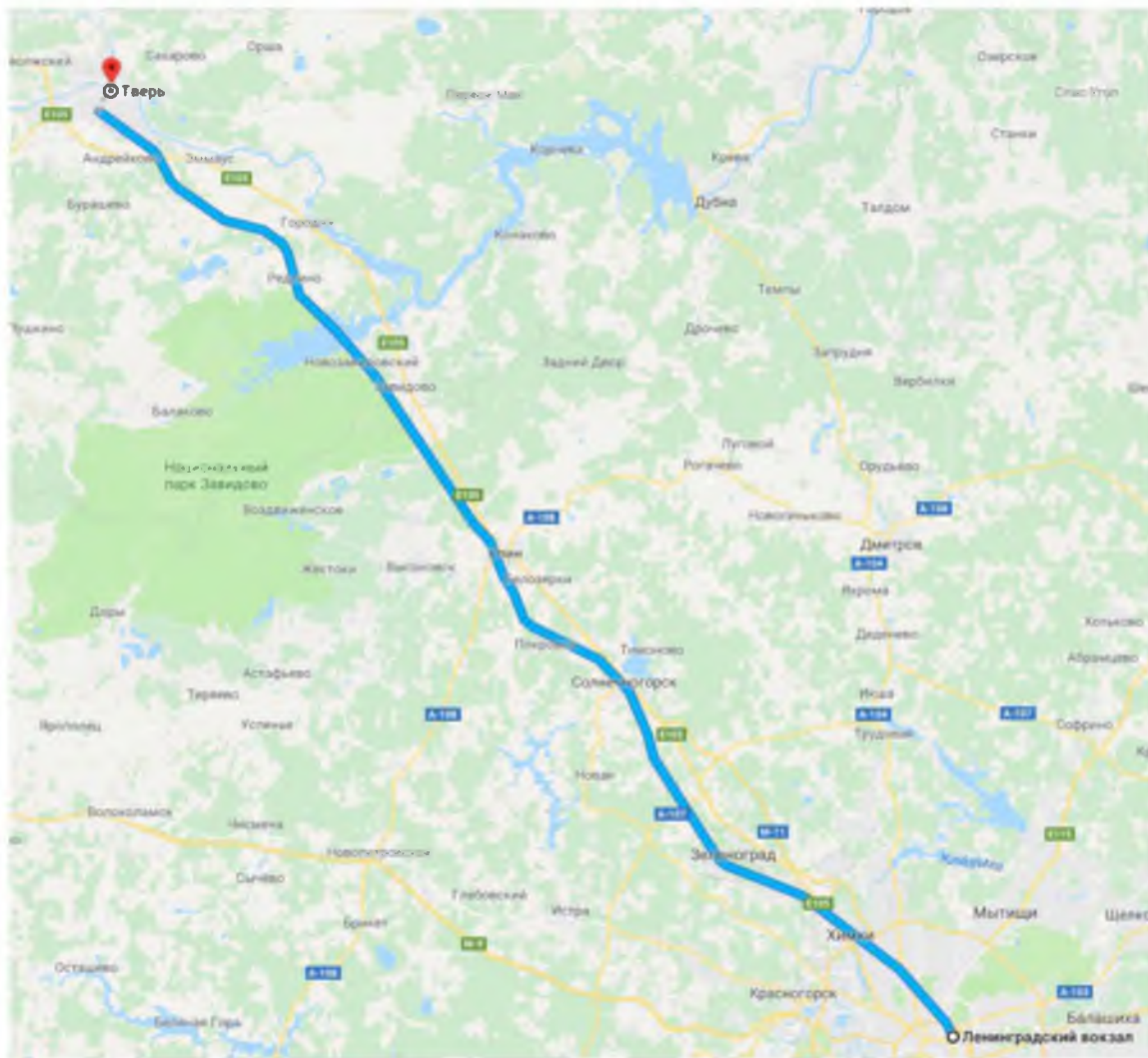


Рисунок 1.8 – Планировка вагонов электропоезда типа «ЭС2Г»

Участок железной дороги Москва-Тверь на основной протяженности имеет два пути ней с колеей 1520 мм, участок электрифицирован и имеет опоры как для контактной сети, так и для линий электросвязи. Напряжение контактной сети 3000 В, мощность 25 кВт. Схема участка ордена Ленина Октябрьской Железной Дороги (Москва – Тверь) с крупными промежуточными станциями представлена на рисунке 1.9.

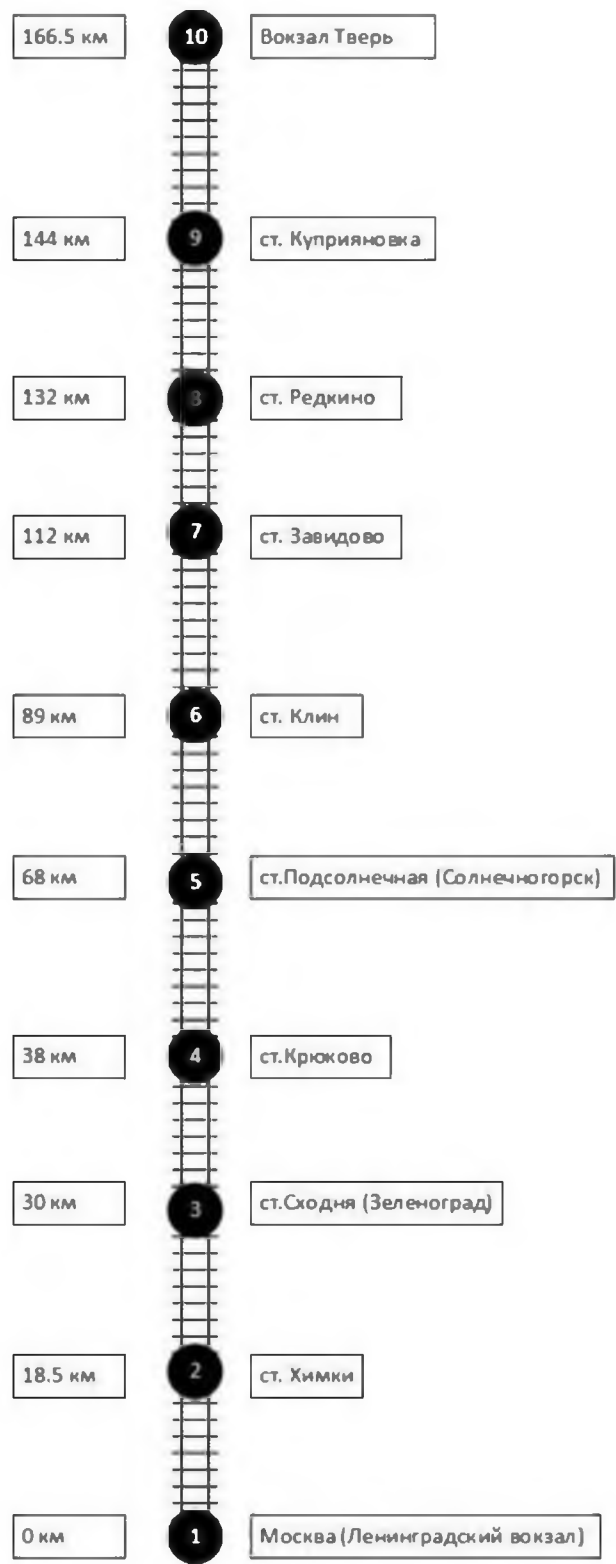


Рисунок 1.9 – Участок ордена Ленина Октябрьской Железной Дороги (Москва – Тверь)

1.5 Задачи исследования

На основе проведенного анализа состояния вопроса относительно методов организации сетевой инфраструктуры на железнодорожных линиях связи были сформулированы следующие задачи:

1. Изучить особенности пассажирских вагонов с целью разработки схемных решений по размещению сетевого оборудования и кабелей связи;
2. Разработать модель линейно-кабельных сооружений и антенно-фидерных устройств для обеспечения беспроводной связи с пассажирскими составами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь;
3. Разработать и исследовать модель беспроводной передачи данных по стандарту LTE;
4. Разработать модель предоставления мультисервисного контента для пассажирских перевозок ОАО РЖД на железнодорожном маршруте Москва-Тверь.

ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE ДЛЯ СВЯЗИ С ПАССАЖИРСКИМИ СОСТАВАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ МАРШРУТЕ МОСКВА-ТВЕРЬ

2.1 Теоретические основы передачи данных стандарта LTE

В качестве основной технологии передачи в данной работе предлагается использовать технологию LTE.

LTE изначально разрабатывалась как система с коммутацией пакетов, и ее целью является предоставление возможности установления IP соединений между абонентскими станциями (UserEquipment, UE) и сетью передачи данных (PacketDataNetwork, PDN). Под термином LTE понимается технология радио доступа, под термином EPC (EvolvedPacketCore) понимается опорная сеть оператора. Вместе LTE и EPC образуют EPS (EvolvedPacketSystem).

EPS использует концепцию EPS потоков (EPS bearers), чтобы обеспечить доставку IP пакетов между шлюзом (gateway, GW) и PDN к UE. Каждый поток - это поток IP пакетов с определенными параметрами качества обслуживания (QualityofService, QoS) на участке между GW и UE. Для одного пользователя может быть создано несколько EPS потоков, чтобы предоставлять различные QoS (например, VoIP и FTP потоки) или чтобы предоставить соединения к различным PDN.

В таблице ниже приводятся частотные диапазоны для LTE при использовании FDD (FrequencyDivisionDuplex) дуплекса, т.е. когда нисходящий и восходящий каналы передаются одновременно в разных частотных диапазонах. Также указывается с какого релиза LTE поддерживается каждый диапазон.

Таблица 1.1 – Список частотных диапазонов LTE в России

№	Оператор	Частотный диапазон (UL/DL), МГц	Ширина канала, МГц	Тип дуплекса	Номер в 3GPP
1	Yota (Мегафон)	2500-2530 / 2620-2650	30	FDD	Band 7
2	Мегафон	2530-2540 / 2650-2660	10	FDD	Band 7
3*	Мегафон	2575-2595	20	TDD	Band 38
4	МТС	2540-2550 / 2660-2670	10	FDD	Band 7
5*	МТС	2595-2615	20	TDD	Band 38
6	Билайн	2550-2560 / 2670-2680	10	FDD	Band 7
7	Ростелеком/Теле2	2560-2570 / 2680-2690	10	FDD	Band 7
8**	Ростелеком/Теле2	832-839.5 / 791-798.5	7.5	FDD	Band 20
9**	МТС	839.5-847 / 798.5-806	7.5	FDD	Band 20
10**	Мегафон	847-854.5 / 806-813.5	7.5	FDD	Band 20
11**	Билайн	854.5-862 / 813.5-821	7.5	FDD	Band 20
12***	МТС	2595-2620	25	TDD	Band 38
13	Теле2	453-457.4 / 463-467.4	4.4	FDD	Band 31

* - частоты выделены только для использования на территории Москвы и Московской области.

** - выделенная ширина канала (7.5 МГц) не соответствует стандартным. Можно использовать 5 МГц из них, например, а можно договориться с "соседним" оператором и, объединив два диапазона, получить вполне стандартной ширины канал в 15 МГц. И далее использовать его по технологии RAN Sharing.

*** - за исключением территории г. Москвы, Московской области, Республики Крым и г. Севастополя.

Стандарт LTE на физическом уровне использует технологию Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Отметим, что эта технология решает проблему устранения меж символной интерференции, которая возникает при высокоскоростной передаче данных из-за многолучевого распространения сигнала.

OFDM сигнал формируется следующим образом (рисунок 2.1). Некоторая высокоскоростная последовательность импульсов первоначально делится на множество параллельных цифровых потоков с импульсами большей длительности. Каждая вновь образованная последовательность импульсов модулируется по амплитуде и по фазе QAM полезным сигналом, несущим информацию о передаваемых данных. Полученное множество модулированных последовательностей импульсов с помощью частотного мультиплексора объединяется в совокупность разделенных по частоте ортогональных каналов (поднесущих), образуя единый широкополосный сигнал. Далее сигнал с множеством поднесущих преобразуется с помощью ЦАП в высокочастотный аналоговый радиосигнал и передается по беспроводному каналу связи.

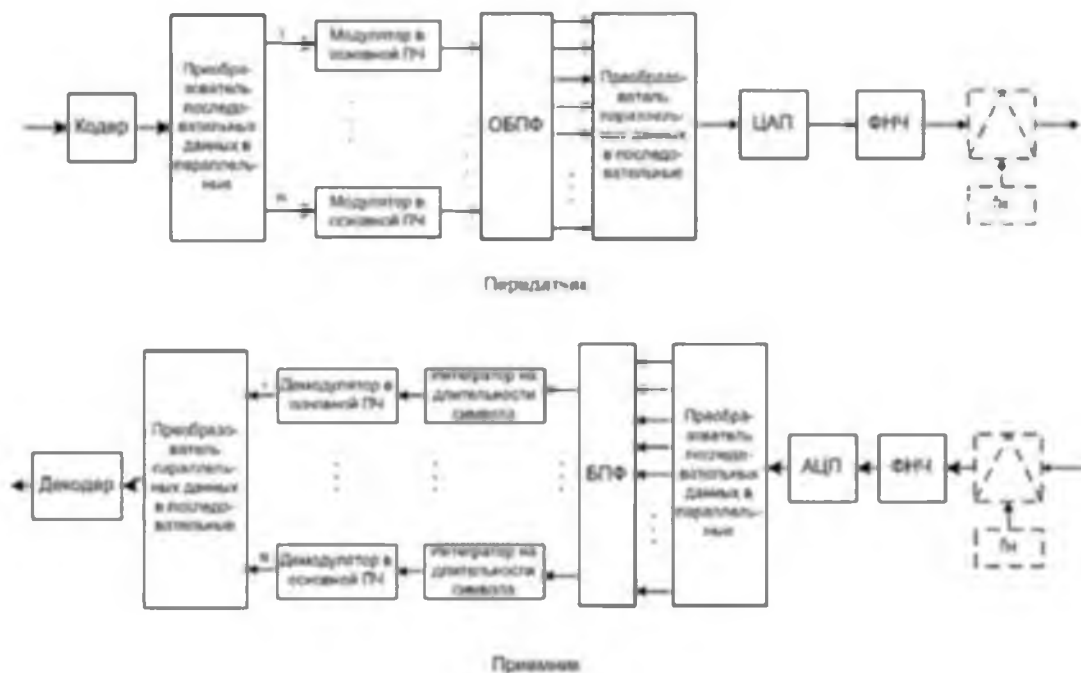


Рисунок 1.1 – Схема формирования сигнала OFDM

OFDM-сигнал представляет собой сумму поднесущих гармонических колебаний, каждая из которых модулируется своим под потоком передаваемых бит с использованием ФМ или квадратурной амплитудной модуляции (КАМ). Пусть d_i — комплексное число, представляющее амплитуду и начальную фазу $\arg(d_i)$ -го поднесущего гармонического колебания OFDM-символа при использовании QAM модуляции; будем называть это число QAM-символом; каждый QAM-символ в системах цифровой радиосвязи переносит несколько кодовых бит. Если один OFDM-символ содержит N_s поднесущих колебаний, то можно говорить, что один OFDM-символ переносит блок d_i , $i = 0, 1, 2, \dots, N_s-1$, QAM-символов. Тогда комплексная огибающая одного OFDM -символа длительностью T , который начинается в момент времени t_k , представляется выражением:

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp\left(j2\pi \frac{i}{T}(t-t_k)\right), t_k \leq t \leq t_k + T \quad (1.1)$$

Вне этого интервала времени OFDM -символ с номером k равен нулю. Формула (2.1) описывает предельный видео эквивалент OFDM - радиосигнала. Чтобы получить реальный OFDM -символ радиосигнала с прямоугольной огибающей и частотой f_0 несущего гармонического колебания, необходимо вещественную и мнимую части огибающей (2.1), соответствующие синфазной и квадратурной компонентам QAM-сигнала, умножить на $\cos(2\pi f_0 t)$ и $\sin(2\pi f_0 t)$ с последующим сложением полученных колебаний.

Из (2.1) следует, что для OFDM -видеосигнала интервал между частотами соседних поднесущих $\Delta f = 1/T$, частоты всех поднесущих кратны этому интервалу и, следовательно, на длительности одного OFDM -символа всегда укладывается целое число периодов каждой поднесущей. Для любых соседних поднесущих число периодов отличается на единицу. Начальная фаза и амплитуда каждой поднесущей определяются значением

транслируемого этой поднесущей QAM-символа d_i для разных поднесущих они обычно оказываются разными. В таких условиях когерентная демодуляция этого сигнала может быть осуществлена с использованием взаимной ортогональности всех поднесущих на интервале $t_k \leq t \leq t_k + T$. Например, в соответствии с классической теорией потенциальной помехоустойчивости для получения оценки QAM-символа d_i , с номером i из принятой реализации комплексной огибающей (2.1) (после ее выделения в приемнике традиционным способом) необходимо эту реализацию умножить на поднесущее колебание :

$$\exp\left(-j2\pi \frac{l}{T}(t-t_k)\right) \quad (1.2)$$

И результат проинтегрировать на интервале времени $t_k \leq t \leq t_k + T$:

$$\begin{aligned} & \int_{t_k}^{t_k+T} \dot{u}(t) \exp\left(-j2\pi \frac{l}{T}(t-t_k)\right) dt = \\ & = \int_{t_k}^{t_k+T} \exp\left(-j2\pi \frac{l}{T}(t-t_k)\right) \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp\left(j2\pi \frac{i}{T}(t-t_k)\right) dt = d_l T \end{aligned} \quad (1.3)$$

Фактически в соответствии с (2.3) при демодуляции одного OFDM - символа вычисляется значение спектральной плотности амплитуд данного символа на частоте $F_1=i\Delta f$ поднесущего колебания с номером i ; но спектры всех остальных поднесущих на этой частоте равны нулю. Таким образом, при таком выборе частот поднесущих и интервала между соседними частотами, связанного с длительностью символа T , в принципе можно обеспечить отсутствие взаимных влияний между поднесущими. Итак, комплексная огибающая одного OFDM-символа представлена выражением (2.1). Но эта

формула представляет собой не что иное, как обратное преобразование Фурье совокупности QAM-символов $d_i, i=0,1,2 \dots N_s-1$.

Если вместо непрерывного времени на интервале $t_k \leq t \leq t_k + T$ это преобразование вычислять только для дискретных моментов времени $t_i = t_k + i\Delta t$ и интервал дискретизации времени выбрать $\Delta t = T/(N_s - 1)$, $t = 0, 1, 2, N_s - 1$, то совокупности QAM-символов $d_i, i = 0, 1, 2, N_s - 1$ и отсчетов комплексной огибающей $u(t_i), i = 0, 1, 2, N_s - 1$ окажутся связанными обратным дискретным преобразованием Фурье (ОДПФ)

Если принять в качестве начала отсчета времени любого OFDM - символа момент его начала, то в (2.4) можно ограничиться только индексами:

$$u(l) = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp\left(j2\pi \frac{il}{N_s - 1}\right), l = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1 \quad (1.4)$$

В настоящее время известно достаточно много эффективных алгоритмов вычисления ДПФ, из которых наибольшее распространение получили быстрые алгоритмы преобразования Фурье (БПФ) В частности, N_s , — точечное обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ) требует выполнения только комплексных умножений, которые сводятся фактически только к вращению фазы Присутствующие операции сложения реализуются значительно проще и иногда не учитываются при сравнении вычислительной сложности различных алгоритмов Особенно эффективны алгоритмы БПФ, если число элементов может быть представлено в виде степени двойки В этом случае число комплексных умножений при выполнении N_s -точечного ОБПФ оказывается равным $(N_s/2)\log_2(N)$.

Таким образом, в соответствии с (2.4) формирование одного OFDM - символа радиосигнала может осуществляться следующим образом Из потока последовательно поступающих комплексных QAM-символов $d_i, i = 0, 1, 2$ формируется блок, содержащий N_s символов и предназначенный для

передачи одним OFDM -символом Этот блок с помощью ОБПФ (9 90) переводится в отсчеты комплексной огибающей $u(t_i)$ $i=0,1,2,N_s-1$ Эта операция обычно выполняется цифровыми устройствами Сформированные таким способом цифровые отсчеты с помощью цифро-аналогового преобразователя преобразуются в аналоговую реализацию $t_k \leq t \leq t_k + T$ комплексной огибающей очередного OFDM -символа, для которой справедливо представление (2.1) Далее низкочастотный сигнал может быть перенесен на необходимую частоту несущего колебания. Однако для борьбы с многолучевостью к сформированной реализации комплексной огибающей OFDM -символа сначала добавляется так называемый префикс (защитный интервал).

Преимуществами технологии OFDM являются:

1. Высокая эффективность использования радиочастотного спектра, объясняемая почти прямоугольной формой огибающей спектра при большом количестве поднесущих.

2. Простая аппаратная реализация: базовые операции реализуются методами цифровой обработки.

3. Хорошее противостояние меж символьным помехам (ISI — intersymbolinterference) и интерференции между поднесущими (ICI — intercarrierinterference). Как следствие — лояльность к многолучевому распространению.

4. Возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации.

Недостатками технологии OFDM являются:

1. Необходима высокая синхронизация частоты и времени.

2. Чувствительность к эффекту Доплера, ограничивающая применение OFDM в мобильных системах.

3. Не идеальность современных приемников и передатчиков вызывает фазовый шум, что ограничивает производительность системы.

4. Защитный интервал, используемый в OFDM для борьбы с многолучевым распространением, снижает спектральную эффективность сигнала.

Основной целью использования технологии OFDM является устранение влияния помех, вызванных многолучевым распространением сигнала. Данная технология предполагает передачу широкополосного сигнала посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих, расположенных с определенным шагом по частоте Δf . Один OFDM-символ содержит набор модулированных поднесущих. Во временной области он включает в себя поле данных и циклический префикс. В технологии LTE принят шаг между поднесущими 15 кГц, что соответствует длительности символа 66,7 мкс.

Каждому абонентскому устройству в каждом слоте назначается определенный диапазон канальных ресурсов в частотно-временной области – ресурсная сетка. Ячейка ресурсной сетки – так называемый ресурсный элемент – соответствует одной поднесущей в частотной области и одному OFDM-символу во временной. Ресурсные элементы образуют ресурсный блок – минимальную информационную единицу в канале. Ресурсный блок занимает 12 поднесущих (т.е. 180 кГц) и 7 или 6 OFDM-символов, в зависимости от типа циклического префикса – так, чтобы общая длительность слота составляла 0,5 мс. При стандартном префиксе символьная скорость составит 14000 символов/с, что соответствует, при FDD-дуплексе, агрегатной скорости от 28 до 84 кбит/с на поднесущую. Сигнал с полосой 20 МГц содержит 100 ресурсных блоков или 1200 поднесущих, что дает общую агрегатную скорость в канале от 33,6 до 100,8 Мбит/с. При заданных в стандарте значениях частота выборок для 18 БПФ оказывается кратной 3,84 МГц – стандартной частоте выборок в технологии WCDMA.

В спецификации для указания различных длительностей по оси времени используется понятие временной единицы $T_s = 1/(15000 \times 2048)$ с. Передача по радиоканалу осуществляется кадрами (frame) длиной $T_f = 307200 \times T_s = 10$ мс. При этом поддерживаются две структуры кадров. Одна для случая частотного дуплекса (FrequencyDivisionDuplex, FDD), другая - для временного дуплекса (TimeDivisionDuplex, TDD).

Структура кадров

Сначала рассмотрим кадр для случая FDD. Каждый кадр состоит из 20 слотов длиной $T_{slot} = 15360 \times T_s = 0.5$ мс, которые пронумерованы от 0 до 19. Кроме этого, выделяется понятие под кадра (subframe), который состоит из двух соседних слотов, то есть под кадр с номером i включает в себя слоты с номерами $2i$ и $2i+1$.

В случае FDD нисходящий (downlink) и восходящий (uplink) каналы передаются на разных частотах, поэтому в каждом 10 мс интервале времени имеется 10 под кадров для передачи "вниз" и 10 под кадров для передачи "вверх". На рисунке 2.2 изображена структура кадра для случая FDD.

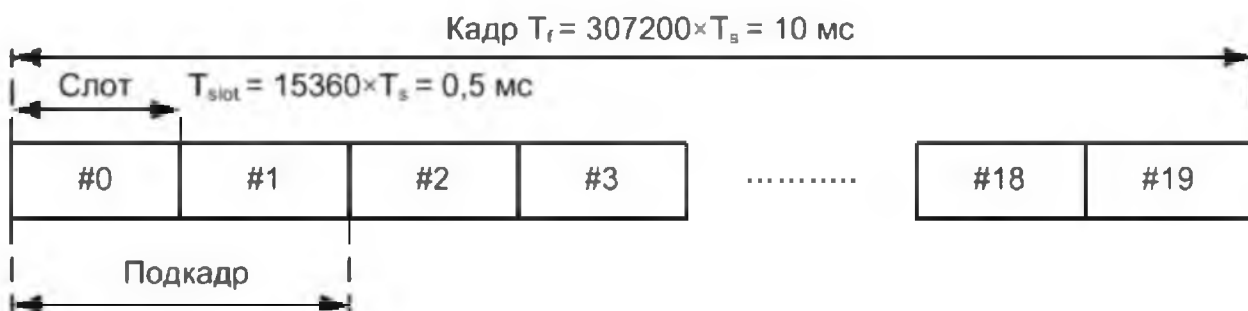


Рисунок 1.2 – Структура кадра FDD

При использовании технологии OFDM передача данных осуществляется на множестве частотных поднесущих (subcarrier). При расстоянии между поднесущими $\Delta F = 15$ кГц (опционально возможен еще вариант с 7.5 кГц) длительность OFDM символа составляет $1/\Delta F = 66.7$ мкс. В каждом слоте (0.5 мс) передают 6 или 7 OFDM символов в зависимости от

длительности циклического префикса (CyclicPrefix, CP). Длительность циклического префикса равна $T_{CP} = 160 \times T_S = 5.2$ мкс перед первым символом и $T_{CP} = 144 \times T_S = 4.7$ мкс перед остальными символами. Также есть возможность использования расширенного циклического префикса длительностью $T_{CP} = 512 \times T_S = 16.7$ мкс. В этом случае в одном слоте передаются 6 OFDM символов. На рисунке 2.3 представлены оба варианта структуры слота.

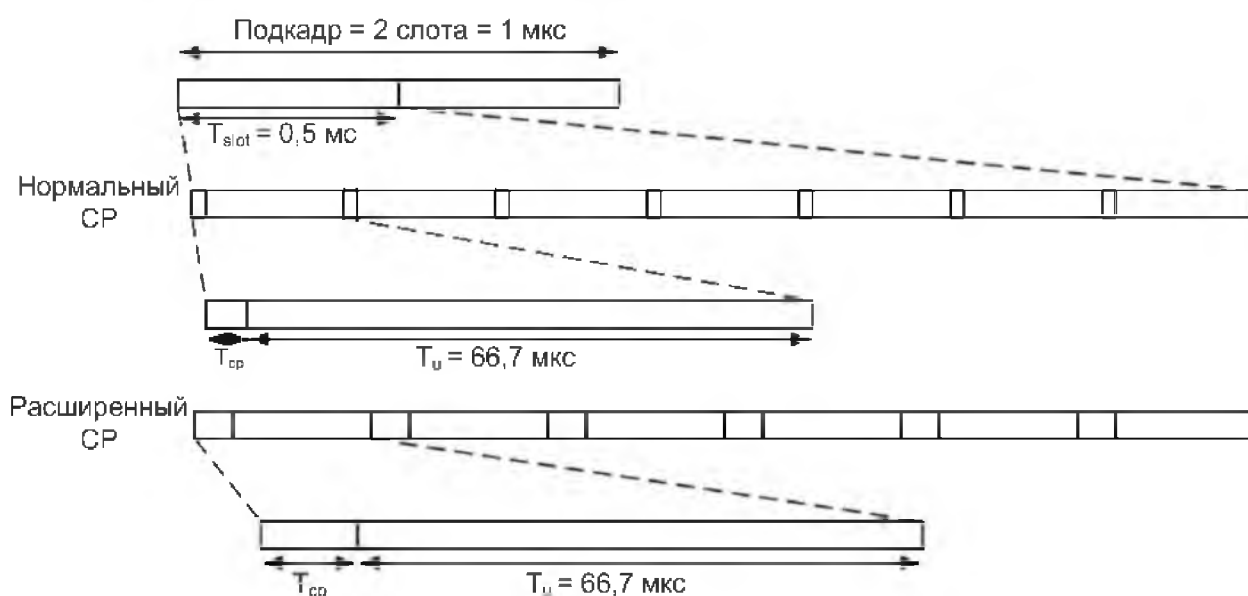


Рисунок 1.3 – Структура кадров циклического префикса

Весь каналный ресурс разбивается на ресурсные блоки (РБ, ResourceBlock, RB). Один блок состоит из 12 расположенных рядом поднесущих, занимающих полосу 180 кГц, и одного временного слота (6 или 7 OFDM символов общей длительностью 0.5 мс). Каждый OFDM символ на каждой из поднесущих образует ресурсный элемент (РЭ, ResourceElement, RE), который характеризуется парой значений $\{k, l\}$, где k - номер поднесущей, l - номер символа в ресурсном блоке. При обычной конфигурации (со стандартной длительностью циклического префикса и, следовательно, с 7-ю OFDM символами в одном слоте) в нисходящем канале каждый ресурсный блок включает в себя $12 \times 7 = 84$ ресурсных элемента.

Часть из ресурсных элементов используется для передачи пилотного (опорного) сигнала, который используется для синхронизации и оценки состояния радиоканала. Эти сигналы передаются в первом и пятом OFDM символе каждого слота при стандартной длине циклического префикса и в первом и четвертом - при расширенной длине циклического префикса. При этом, в частотной области эти сигналы разносятся на фиксированную величину. Ниже, на рисунке 2.4, приводится схема ресурсного блока с указанием ресурсных элементов, в которых передаются пилотные сигналы при стандартной длине циклического префикса.

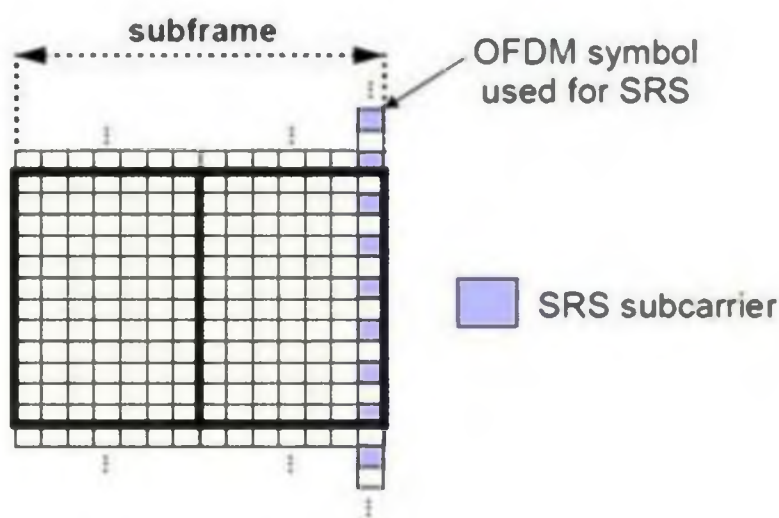


Рисунок 1.4 – Схема ресурсного блока опорного сигнала

При восходящей передаче используют те же понятия ресурсного блока и под кадра. При этом выделение ресурса пользовательским устройствам происходит на всю длительность под кадра.

Стандарт LTE был разработан для передачи данных на скорости в 150 Мбит/с при скорости мобильного абонента до 500 км/ч, однако реально достижимые пределы гораздо ниже. Так эксперименты компании Ericsson подтвердили доступную скорость на терминале в 19 Мбит/с установленного на борту реактивного самолета, летящего с скоростью 700 км/ч.

При расчете скорости максимальной передачи данных в LTE системах необходимо определить три основных параметра:

1) Ширина канала определяет количество доступных частотных ресурсов, которые могут быть использованы для передачи данных.

2) Модуляция задает модуляционно-кодирующую схему (MCS). Этот параметр характеризует качество радиоканала. Можно выбрать следующие модуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM.

3) MIMO задает схему для MIMO. Данный параметр учитывается с некоторой погрешностью. А именно, при переходе к MIMO 2x2 и MIMO 4x4 исходная скорость передачи умножается на 2 или на 4, соответственно.

Для повышения скорости передачи данных в LTE системах используются две основных подхода:

1) Использование MIMO (MultiplyInput, MultiplyOutput) антенн, данный метод пространственного кодирования сигнала, позволяет увеличить полосу пропускания канала, в котором передача данных и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн. Передающие и приёмные антенны разносят так, чтобы корреляция между соседними антеннами была слабой.

2) Использование механизмов агрегации несущих CA (CarrierAggregation).

Технология MIMO была заложена в первые версии стандарта LTE (8 выпуск), технология CA была внедрена в стандарт в 10-м выпуске спецификации LTE-Advanced.

Для построения системы передачи, использующих оба подхода для связи на высоких скоростях мобильного абонента с базовой станцией необходимо иметь данные о изменениях, которые происходят с сигналом в канале. При передаче по радиоканалу сигнал подвергается различного рода воздействиям, которые ведут к его деформации. Поэтому для успешной обработки сигнала на стороне приемника, необходимо оценить изменение сигнала из-за внешних факторов во время передачи по радиоканалу и восстановить его первоначальный вид. Для этой цели одновременно с передачей полезных данных осуществляется передача специальных

сигналов, которые называются пилотными или опорными (ReferenceSignal). Кроме этих специальных сигналов, есть сигналы, по которым оценивается состояние радиоканала, а также сигналы для определения местоположения абонентского терминала. Всего в LTE в нисходящем канале (от базовой станции к мобильной станции) на настоящий определенно пять типов пилотных сигналов.

В LTE активно применяется QAM модуляция – (Quadrature Amplitude Modulation – Модуляция методом Квадратичных Амплитуд) – это технология передачи цифрового информационного потока в виде аналогового сигнала. Это достигается путем разделения несущей волны на две несущие одинаковой частоты сдвинутые относительно друг друга на 90° , каждая из которых промодулирована по одному из двух или более дискретных уровней амплитуды. Комбинация всех уровней амплитуды на этих двух несущих представляет собой бинарную битовую картину.

I и Q компоненты – это две половины битовой картины цифрового потока передаваемые одновременно, как уровни напряжения двух идентичных частотных несущих сдвинутых на 90° . Компонента I (incident) модулирует несущую без сдвига фазы. Компонента Q (quadrature) модулирует несущую со сдвигом 90° (рисунок 2.5).

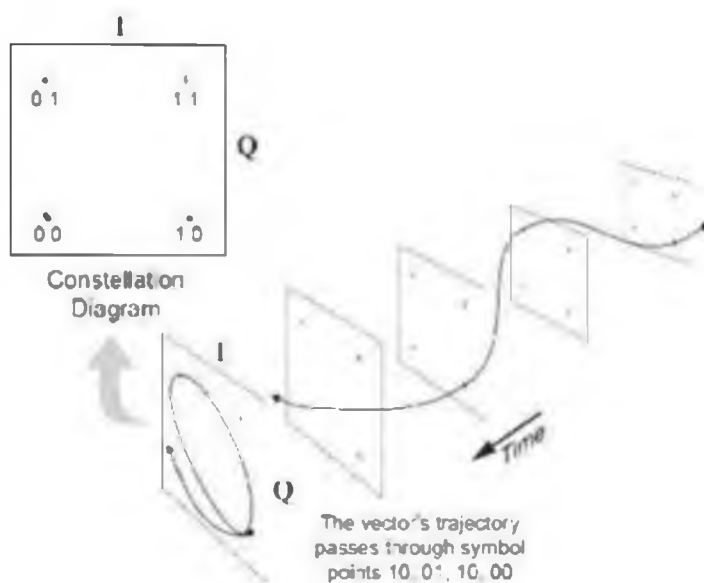


Рисунок 1.5 – Канстелляционная диаграмма, отображающая I/Q вектор

QPSK – (QuadraturePhaseShiftKeying – Кодирование методом Квадратичного Фазового Сдвига) – это простейшая форма QAM (также известная как 4-QAM). QPSK использует две несущие одинаковой частоты, сдвинутые на 90° , и два возможных уровня амплитуды. Один уровень амплитуды соответствует 0, другой – 1 (рисунок 2.5).

Конstellяционная диаграмма (или диаграмма-созвездие) – это карта, или квадратная матрица, в которой уровни амплитуды I и Q компонент QAM сигнала отображены в виде значащих точек в квадратной системе координат I x Q. Координата I определяет горизонтальную позицию точки, а Q – вертикальную (рисунок 2.6). Конstellяционная диаграмма в этой матрице образуется из горизонтальных и вертикальных линий (будь то прорисованных или же просто воображаемых) соединяющих возможные значения компонент I и Q. Целочисленное значение каждой полученной точки определяется ячейкой матрицы, в которую она попадает. Ошибка определяется как выпадение измеренной точки из ячейки.

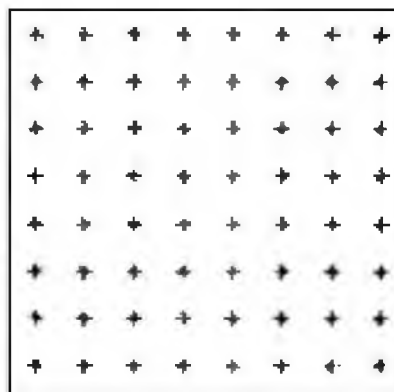


Рисунок 1.6 – QAM-64 Конstellяционная диаграмма

16-QAM диаграмма – это 4x4 матрица, в которой каждая из 16 ячеек представляет одну из 16 возможных бинарных комбинаций. Вертикальное и горизонтальное положение каждой точки соответствует I и Q уровням амплитуды сигнала, переданного в течение одного цикла. 64-QAM диаграмма представлена на рисунке 2.6.

2.2 Разработка модели линейно-кабельных сооружений и антенно-фидерных устройств для обеспечения беспроводной связи с пассажирскими составами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь

В данной работе будет промоделирован канал связи между базовой станцией и мобильным абонентом, движущимся на скорости 160-210 км/ч. В первую очередь представим разработанную схему линейно-кабельных сооружений на участке Октябрьской железной дороги – рисунок 2.7.

Данный участок железной дороги состоит из четырех ж.д. путей и сопутствующей инфраструктуры в виде электропередающих линий и линий связи. На данном участке железной дороги проложен кабель типа ДПТ с одномодовым волокном, который планируется использовать в качестве основы транспортной сети для подключения базовых станций. В домах связи на промежуточных станциях имеются оптические кроссы, к которым целесообразно осуществить подключение. В условиях отсутствия кроссов на некоторых промежуточных станциях будут смонтированы муфты, через которые будет осуществлено подключение базовых станций. Все базовые станции будут подключены к опорной LTE сети, вопросы внутренней архитектуры сети в данной работе не рассматриваются.

Установка антенно-фидерных устройств осуществляется на специально смонтированных мачтах, на высоте 15 м от поверхности земли.

В качестве диапазонов для передачи выберем следующие:

1) 800 МГц, 2) 2.6 ГГц.

В качестве несущих частот определим следующие частоты:

1) $f_1=771.5$ МГц; 2) $f_2=2.59$ ГГц, 3) $f_3=2.605$ ГГц.

Опорный сигнал задается на основе количества антенн и имеющихся лицензий на диапазоны частоты. В данной работе будет использоваться 3 несущих (рисунок 2.8), каждая из которых будет передаваться через 4

антенны. Каждая несущая будет передавать OFDM сигнал, параметры которого соответствуют стандарту LTE и указаны в таблице 2.2.

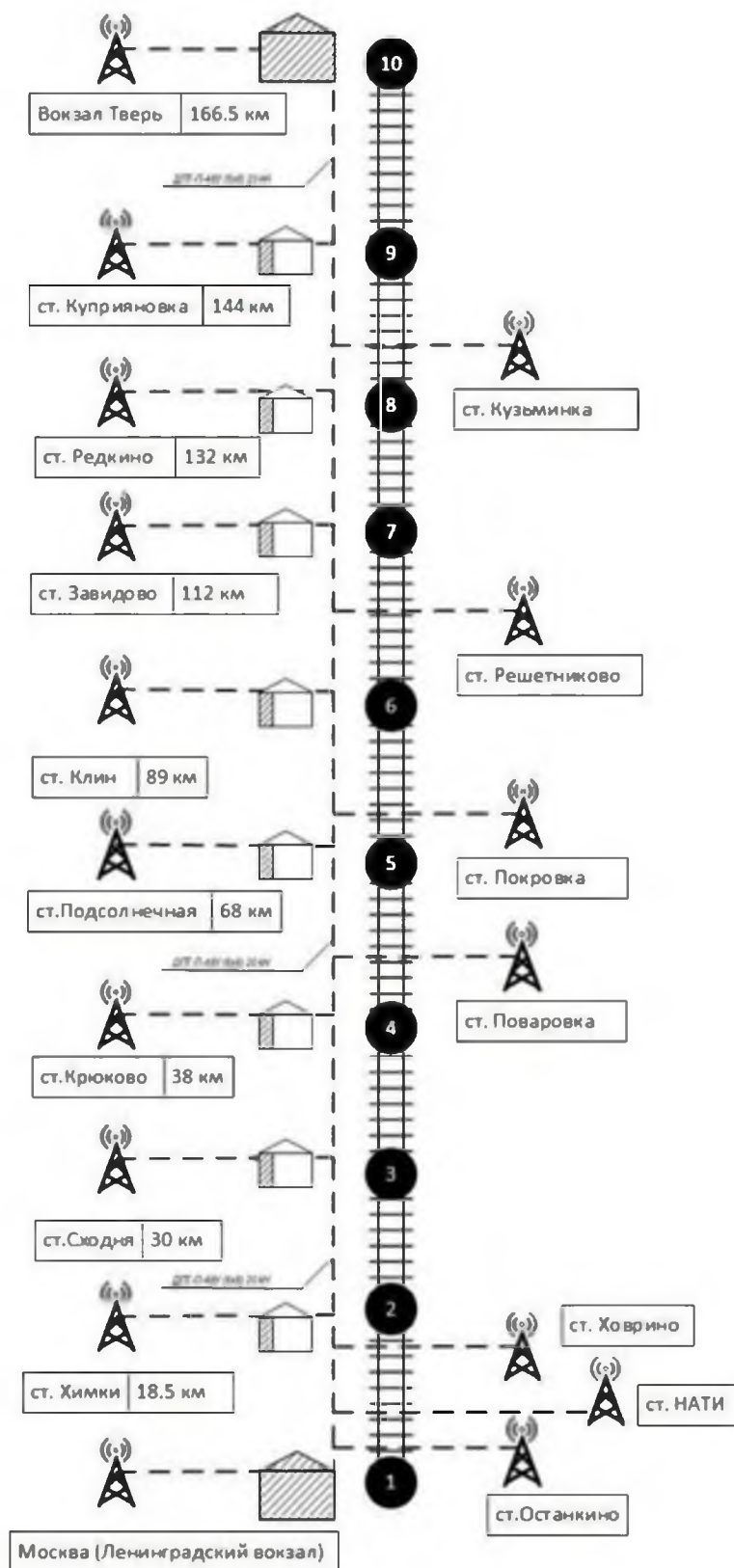


Рисунок 1.7 – Проектируемая структура сети на участке Октябрьской железной дороги

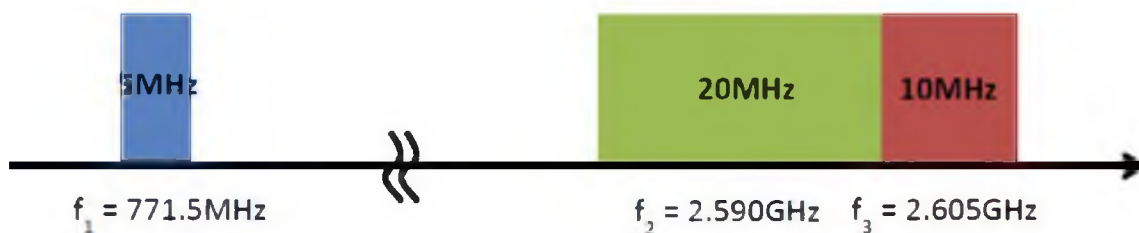


Рисунок 1.8 – Опорный сигнал для различных интервалов частот

Опорный сигнал задается на основе количества антенн и имеющихся лицензий на диапазоны частоты. В данной работе будет использоваться 3 несущих (рисунок 2.5), каждая из которых будет передаваться через 4 антенны. Каждая несущая будет передавать OFDM сигнал, параметры которого соответствуют стандарту LTE и указаны в таблице 2.2.

Таблица 1.2 – Параметры опорных сигналов

	5 МГц	10 МГц	20 МГц
Скорость передачи, Мбит/с	7.68	15.36	30.72
Длительность OFDM символа	66 микросекунд	66 микросекунд	66 микросекунд
Длительность циклического префикса	16 микросекунд	16 микросекунд	16 микросекунд
Длина OFDM символа	512	1024	2048
OFDM несущие N_c	300	600	1200

Передаваемый сигнал разбит на интервалы в 10 миллисекунд или 120 символов OFDM. Первый символ каждого интервала содержит основную последовательность синхронизации (PSS). PSS сигнал нужен для синхронизации по TTI, слотам и OFDM-символам, а также для вычисления физического идентификатора соты (PhysicalLayerCellIdentity, PCI). Передача PSS сигнала осуществляется в 0 и 10 слотах каждого кадра (нулевой и пятый

TTI, таким образом PSS передается два раза за 10 мс) и для этой передачи используются 62-е центральные поднесущие в последнем OFDM-символе слота. В качестве PSS используются три взаимно-ортогональные ZC-последовательности (Zadoff-Chu), каждой из которых соответствует идентификатор NID(2) от 0 до 2. При передаче PSS используется QPSK модуляция.

Для генерации опорного сигнала воспользуемся следующими формулами. Уравнение для определения базовой опорной последовательности:

$$r_{u,v}^{SRS}(n) = r_{u,v}^{\alpha}(n) \quad (1.5)$$

Желательно, чтобы последовательности опорного сигнала имели небольшие колебания по мощности во времени и частоте, что приводило к повышению эффективности усилителя мощности и сопоставимому качеству оценки канала для всех частотных компонентов. Последовательности Zadoff-Chu являются хорошими базовыми функциями, поскольку они показывают постоянную мощность во времени и частоте.

Опорный сигнал получается путем циклического сдвига α , базовой последовательности:

$$r_{u,v}^{\alpha}(n) = \exp(j\alpha n) \cdot r_{u,v}(n) \quad (1.6)$$

где $n = 0, \dots, M_{SC}^{RS}$, M_{SC}^{RS} - длина сигнальной последовательности; $U = 0, \dots, 29$ номер базовой последовательности в группе, $V = 0, 1$ номер последовательности внутри группы применяемый к опорным сигналам длительностью больше 6 ресурсных элементов.

$$r_{u,v}^{\alpha}(n) = \exp(j\alpha n) \cdot r_{u,v}(n) \quad (1.7)$$

Циклический сдвиг во временной области (постобработка с помощью обратного преобразования Фурье в OFDM-модуляции) эквивалентен чередованию фаз в частотной области (предобработка с помощью обратного преобразования Фурье в OFDM-модуляции). Базовая последовательность циклически сдвигается, чтобы увеличить общее количество доступных последовательностей. Для частотных не селективных каналов по 12 поднесущим блока ресурсов можно достичь ортогональности между опорными каналами, сгенерированными из одной и той же базовой последовательности, если выполняется следующее выражение

$$\alpha = 2\pi \frac{n_{SRS}}{8}, \quad (1.8)$$

где $n_{SRS}^{CS} = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$.

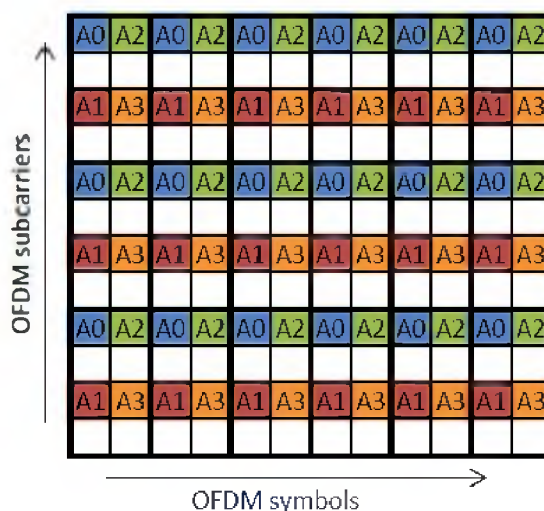


Рисунок 1.9 – Распределение ресурсных элементов по антеннам (пустые ячейки ресурсных элементов используются для минимизации интерференции между поднесущими)

Ортогональность может быть достигнута для одновременной передачи опорных сигналов по нескольким каналам с использованием тех же

частотных ресурсов без взаимных помех. Как правило, опорные сигналы, генерируемые из разных базовых последовательностей, не будут ортогональными; однако они будут обладать низким коэффициентом взаимной корреляции.

Для получения характеристик канала от различных передающих антенн сгенерируем опорный сигнал со следующим распределением ресурсных элементов, что представлено на рисунке 2.9. Следует отметить, что ресурсные элементы используются не полностью, для того чтобы снизить меж канальную интерференцию, что актуально при связи с высокомобильными абонентами.

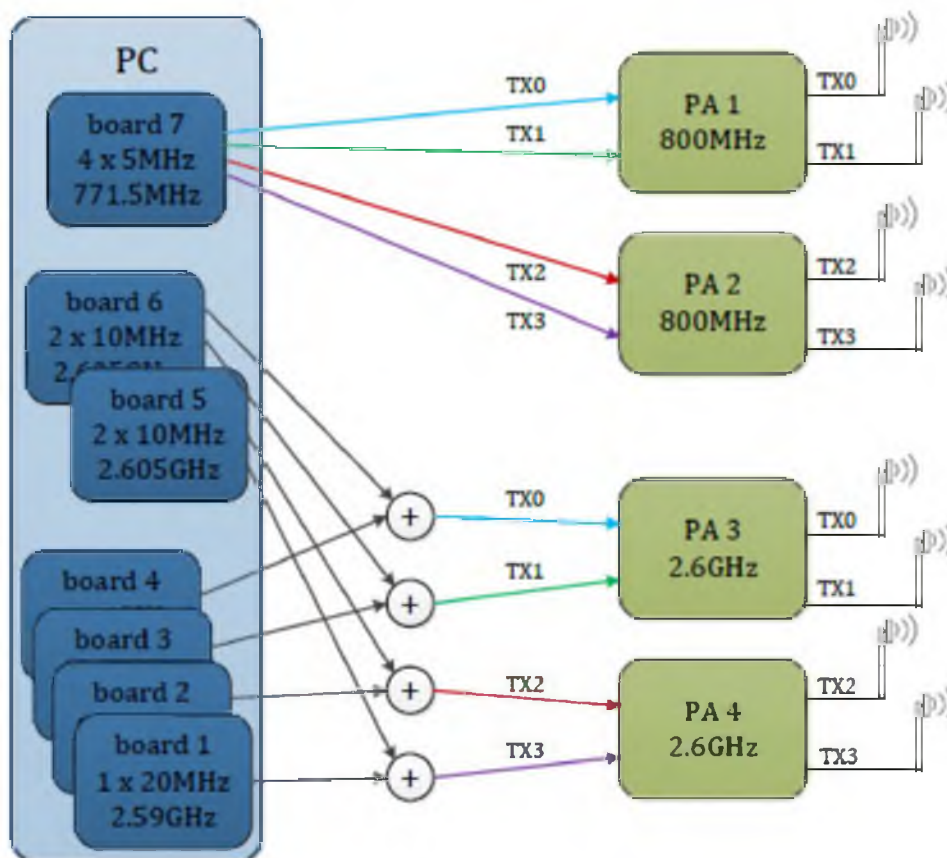


Рисунок 1.10 – Схема предлагаемого передатчика для LTE сети

Модель передатчика представлена на рисунке 2.10. Данная модель построена на базе IBM совместимого персонального компьютера, оснащенного MIMO картами с интерфейсом PCI-Express. Пропускная способность карты ограничивается полосой в 20 МГц. Сигнал формируется на ПК и передается на антенно-фидерный тракт. Для передачи в диапазоне 800 МГц используется 4 антенны, для передачи в 2.6 ГГц несущие (f_2 и f_3) объединяются в один сигнал и также используются 4 антенны. Возможные конфигурации передачи: 4x5МГц, 2x10МГц, или 1x20МГц.

В качестве антенн предлагается использовать антенны Яги-Уда, как антенны, обладающие нужными показателями направленности и усиления.

Антенна Яги-Уда – направленная антенна, состоящая из нескольких параллельных элементов, расположенных на одной линии. Часто состоят из одного элемента-облучателя, обычно диполя или петлевого вибратора. Только этот элемент испытывает возбуждение. Остальные элементы паразитные – они отражают или помогают передавать энергию в нужном направлении. Облучатель (активный вибратор) обычно находится вторым с конца, как на картинке ниже. Её размер подбирается с целью достижения резонанса при наличии паразитных элементов (для диполя это обычно 0,45 – 0,48 от длины волны). Элемент слева от облучателя – отражатель (рефлектор). Он обычно длиннее облучателя. Отражатель обычно один, поскольку добавление дополнительных отражателей мало влияет на эффективность. Он влияет на отношение мощностей сигналов антенны, излучаемых в направлениях назад/вперед (усиление в максимальном направлении по отношению к противоположному). Справа от облучателя находятся элементы-директоры, которые обычно короче облучателя. У антенны Яги-Уда очень узкий диапазон рабочих частот, а максимальное усиление составляет примерно 17 дБ.

В данной диссертационной работе антенны были промоделированы с помощью программного пакета MATLABAntennaToolbox.

Параметры антенны, смоделированной для передачи на частоте 800 МГц представлены в таблице 2.3.

Таблица 1.3 – Параметры антенны Яги-Уда для передачи на частоте 800 МГц

Параметр	Значение
Количество директоров	6
Длина директоров	0.14176 м
Расстояние между директорами	0.11816 м
Длина рефлектора	0.17377 м
Расстояние между рефлекторами	0.086865 м
Наклон	90 градусов

Результаты моделирования диаграммы направленности представлены на рисунках 2.11 и 2.12. Максимальное изотропное усиление антенны 10.4 дБ (dBi). Параметры рассеивания мощности представлены на рисунке 2.13.

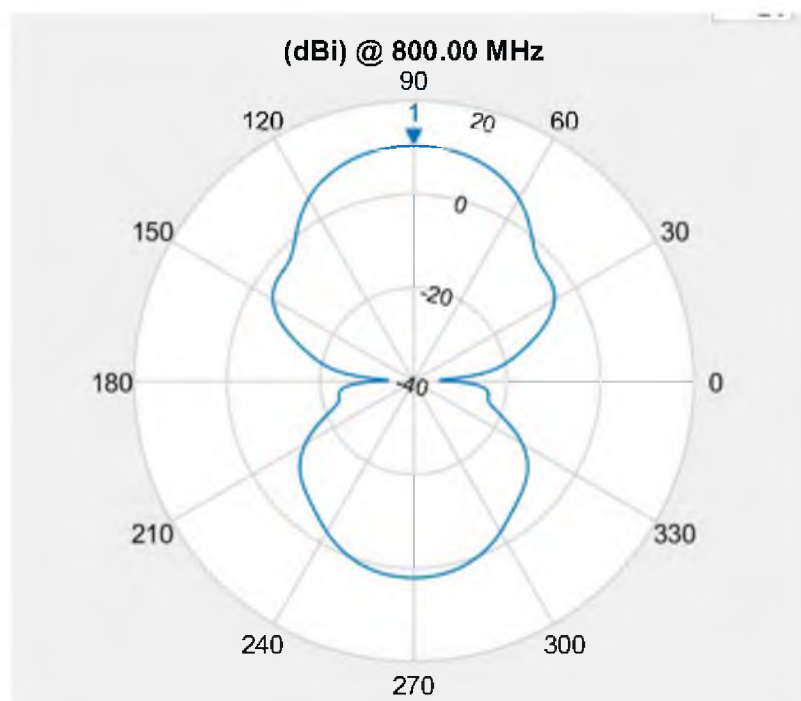


Рисунок 1.11 – Диаграмма направленности антенны конструкции Яги-Уда для работы на частоте 800 МГц

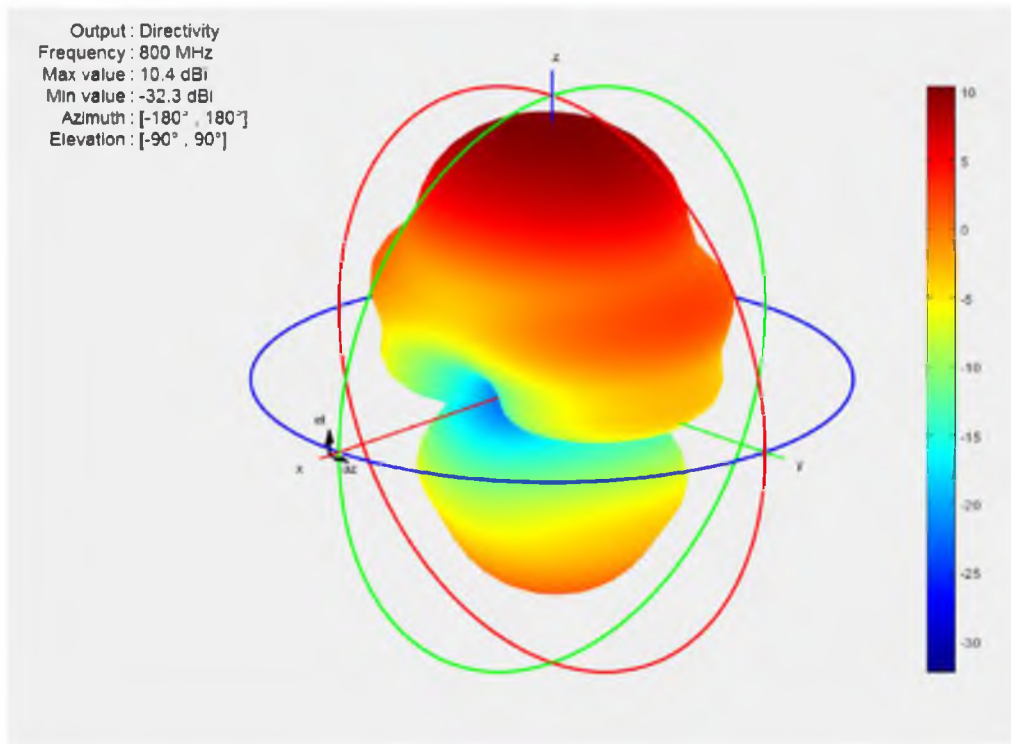


Рисунок 1.12 – Трехмерная диаграмма направленности антенны конструкции Яги-Уда для работы на частоте 800 МГц

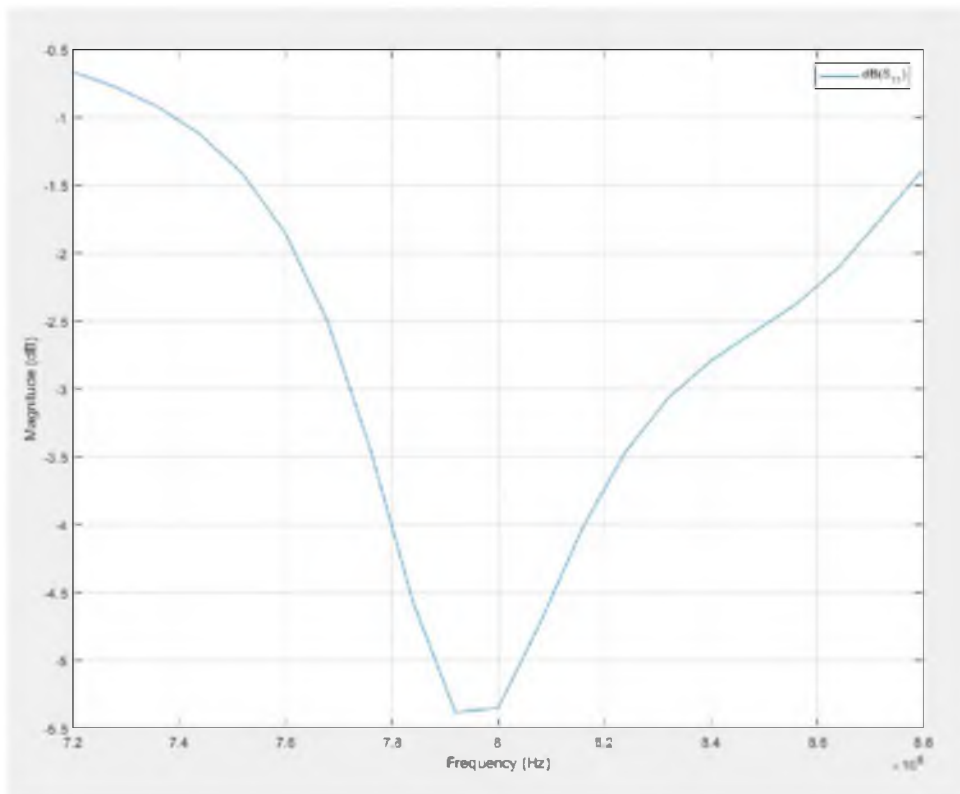


Рисунок 1.13 – Параметры рассеивания мощности антенны конструкции Яги-Уда для работы на частоте 800 МГц

Параметры антенны, смоделированной для передаче на частоте 2.6 ГГц представлены в таблице 2.4.

Таблица 1.4 – Параметры антенны Яги-Уда для передачи на частоте 800 МГц

Параметр	Значение
Количество директоров	6
Длина директоров	0.04362 м
Расстояние между директорами	0.036356 м
Длина рефлектора	0.053467 м
Расстояние между рефлекторами	0.026728 м
Наклон	90 градусов

Результаты моделирования диаграммы направленности представлены на рисунках 2.14 и 2.15. Максимальное изотропное усиление антенны 10.4 дБ (dBi). Параметры рассеивания мощности представлены на рисунке 2.16.

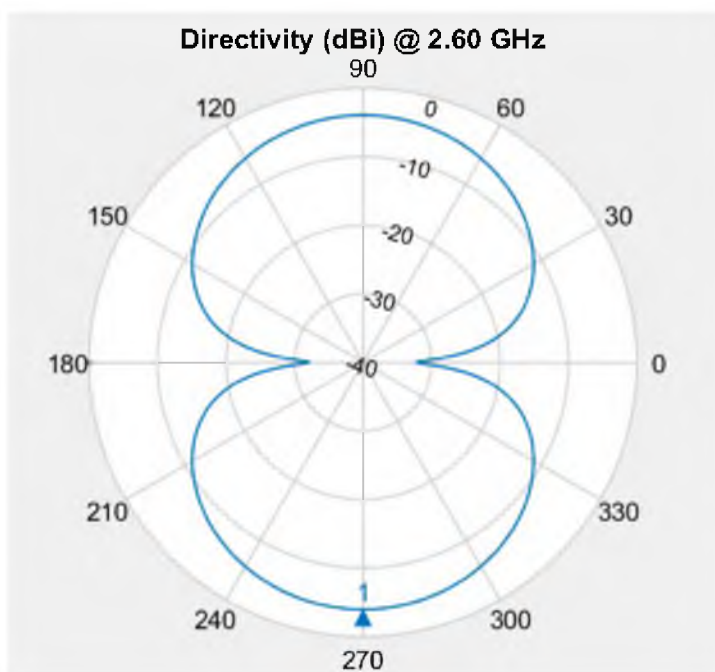


Рисунок 1.14 – Диаграмма направленности антенны конструкции Яги-Уда для работы на частоте 2.6 МГц

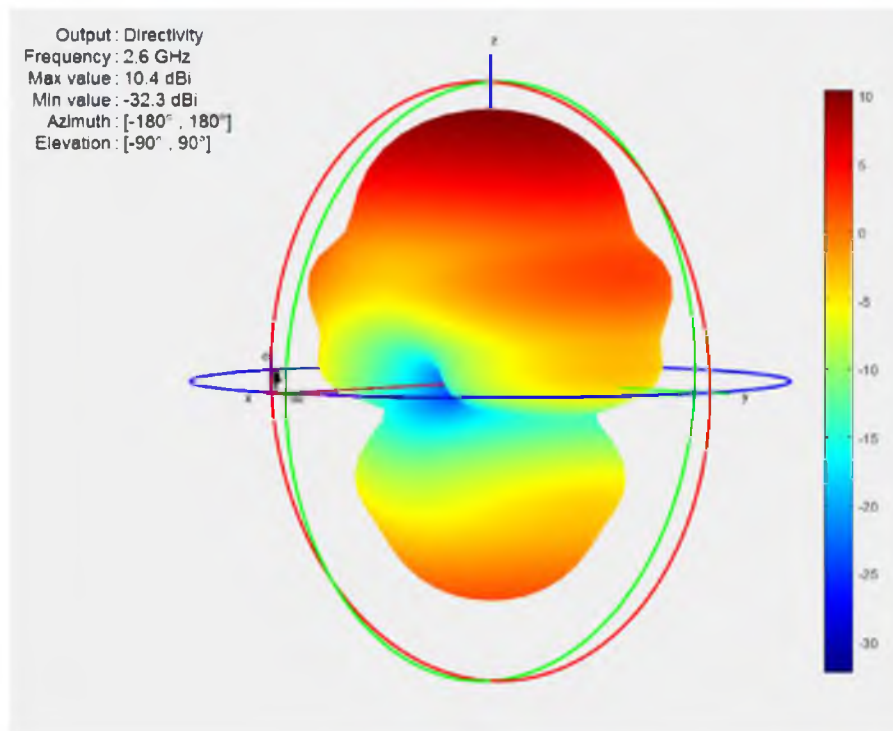


Рисунок 1.15 – Трехмерная диаграмма направленности антенны конструкции Яги-Уда для работы на частоте 2.6 ГГц

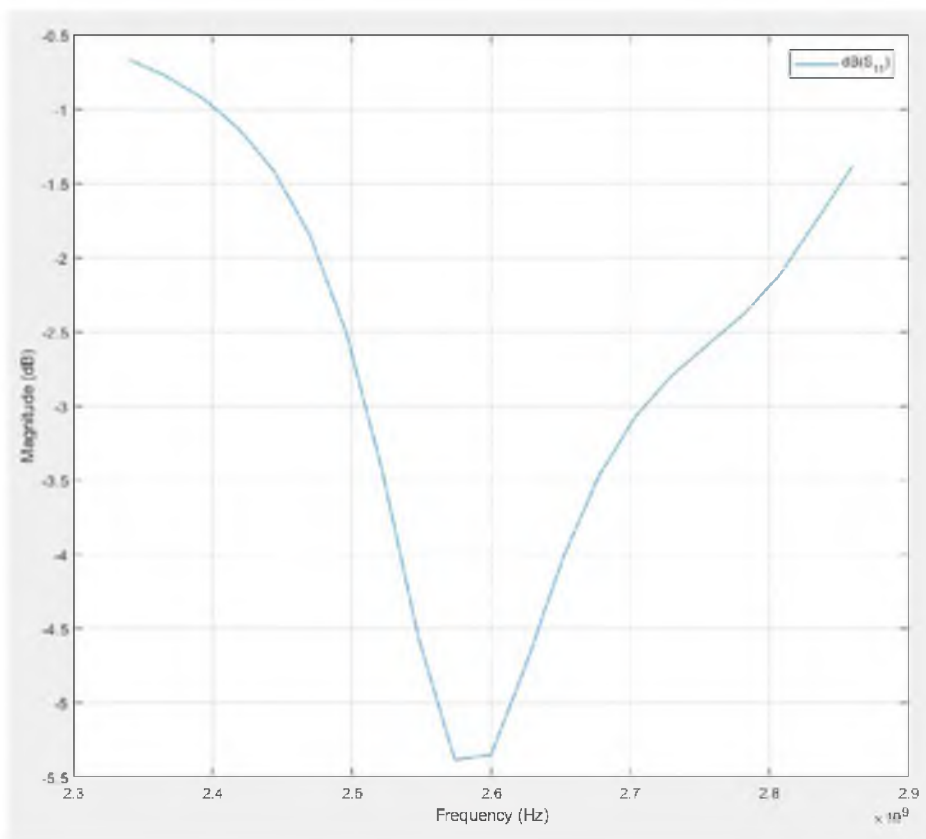


Рисунок 1.16 – Параметры рассеивания мощности антенны конструкции Яги-Уда для работы на частоте 2.6 ГГц

2.3 Разработка и исследования модели беспроводной передачи стандарта LTE в диапазонах 2.6 ГГц и 800 МГц

В соответствии с представленной моделью передатчика и антеннами, а также проектируемой структурой сети на Октябрьской железной дороге составим таблицу распределения базовых станций. Выбор мест расположения базовых станций производился исходя из местоположения домов связи при железнодорожных путях. Мачты связи устанавливаются согласно СНиП 4.02-91; 4.05-91 на территории ОАО РЖД. Высота установки антенн составляет 15 метров от уровня земной поверхности. Координаты и азимуты антенно-фидерных устройств базовых станций представлены в таблице 2.5.

Таблица 1.5 – Координаты базовых станций разрабатываемой модели

Станция	Ленинградский вокзал	Останкино	НАТИ	Ховрино	Химки	Сходня
Широта	55,77603	55,81655	55,85149	55,87435	55,89426	55,9494
Долгота	37,65543	37,60294	37,55112	37,49915	37,45133	37,29835
Высота	152	163	154	161	177	194
Азимут	130	120	120	120	120	100
№ БС	1	2	3	4	5	6
Станция	Крюково	Поваровка	Подсолнечная	Покровка	Клин	Решетниково
Широта	55,97974	56,06329156	56,18434	56,23734	56,33302	56,45044
Долгота	37,17356	37,07686186	36,97001	36,83124	36,71187	36,56379
Высота	209	215	198	206	165	149
Азимут	100	120	120	100	135	135
№ БС	7	8	9	10	11	12
Станция	Завидово	Редкино	Кузьминка	Куприяновка	Тверь	
Широта	56,55248	56,64368	56,71638	56,75677	56,8362	
Долгота	36,4372	36,29737	36,13867	36,04082	35,89302	
Высота	139	129	164	175	175	
Азимут	135	120	100	120	135	
№ БС	13	14	15	16	17	

Зона радиопокрытия предлагаемого типового передатчика для базовых станций представлена на рисунке 2.17.

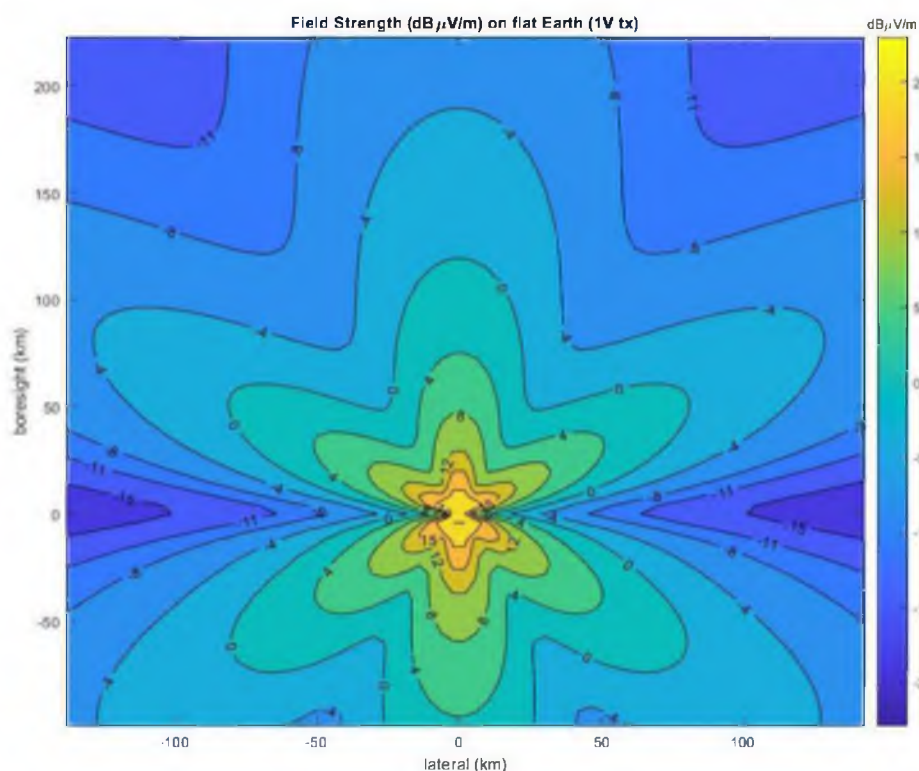


Рисунок 1.17 – Зона радиопокрытия предлагаемого типового передатчика для базовых станций без учета рельефа местности

На рисунке 2.18 представлена схема радиопокрытия совокупности базовых станций (таблица 2.5) на участке железной дороги Москва-Тверь. В качестве антенн использованы антенны конструкции Яги-Уда с шестью (для диапазона 800 МГц) и восьмью директорами (для диапазона 2.6 ГГц) осуществляется на следующих несущих частотах: $f_1=771.5$ МГц; $f_2=2.59$ ГГц, $f_3=2.605$ ГГц. Схема предлагаемого передатчика представлена на рисунке 2.10. Данный передатчик позволяет использовать временное мультиплексирование каналов ММО, максимальная пропускная способность передатчика 20 МГц. Количество антенн для передачи в диапазоне 800 МГц составляет 4, количество антенн для передачи на частотах $f_2=2.59$ ГГц, $f_3=2.605$ ГГц составляет также 4. Мощность передатчика для построенной

модели составляет 0.75 Ватт. Разработка модели радиопокрытия выполняется на базе пакета MATLABRFPropagation. Пакет RFPropagation описывает поведение электромагнитного излучения от точки передачи при его прохождении через окружающую среду. Анализ распространения радиочастот необходим для определения особенностей распространения электромагнитных волн (потерь и др.) при передачи данных от передатчика к приемнику в различных сценариях (с учетом осадков, рельефа и типа местности). Разработанная схема радиоприёма разрабатываемой сети передачи на участке железной дороги Москва – Тверь представлена на рисунке 2.18.

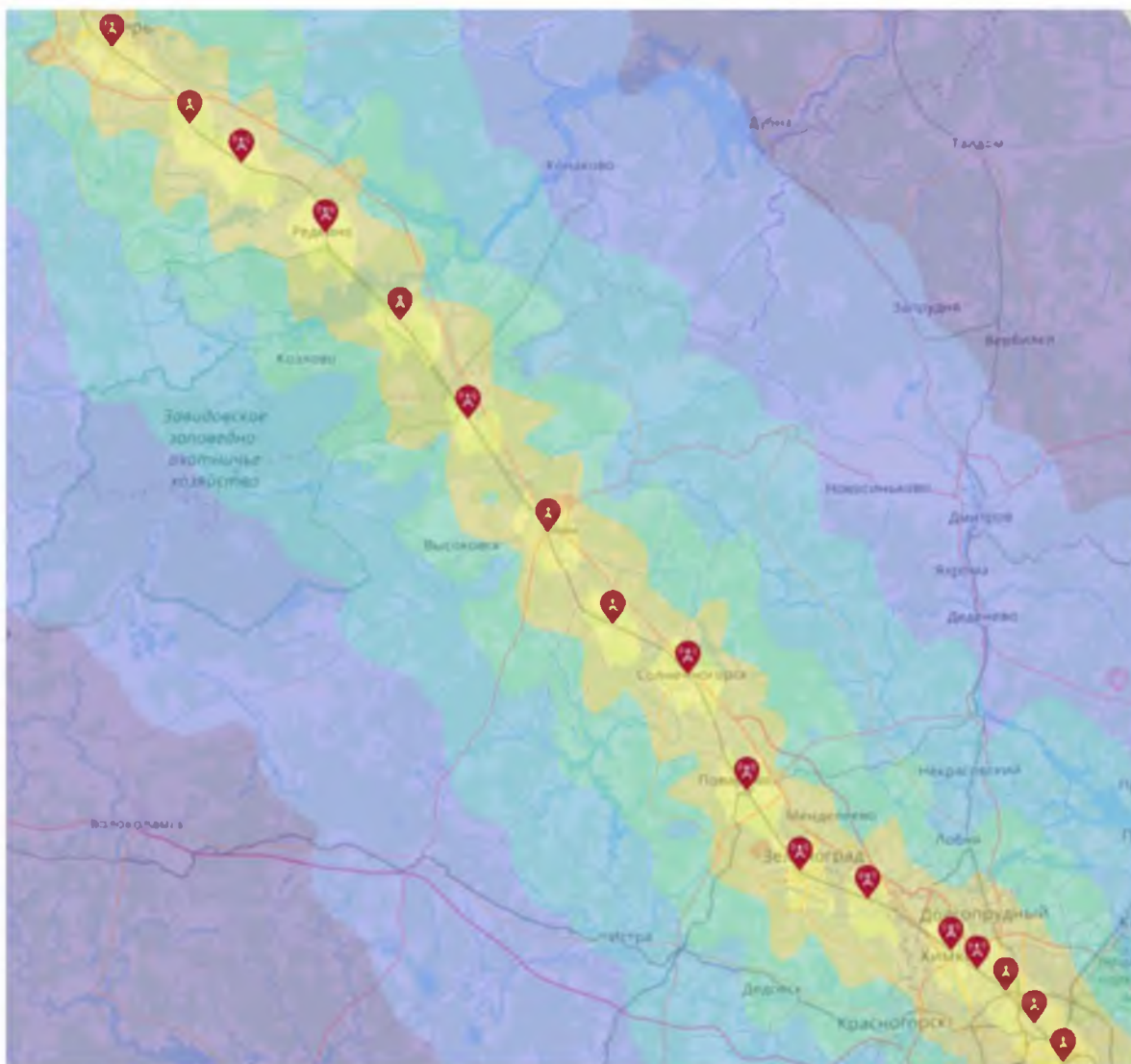


Рисунок 1.18 – Схема радиоприёма разрабатываемой сети передачи на участке Октябрьской железной дороги

Желтым цветом на схеме отмечены зоны уверенного приема, здесь следует отметить что азимуты антенн выбраны таким образом, чтобы достигать наилучшего покрытия в зоне железнодорожных путей.

Далее будет рассмотрено движение состава в зоне радиопокрытия сети и произведена оценка доплеровской задержки спектра. Оценка доплеровской задержки будем производить на участке движения Клин – Солнечногорск, на данном участке поезд может развивать максимальную скорость движения состава в 120 км/ч, крейсерская скорость движения состава на участке Москва - Тверь составляет 100 км/ч. Измерения доплеровской задержки проводятся относительно базовой станции на станции Покровка.



Рисунок 1.19 – Радиопокрытие на участке моделируемой сети Солнечногорск-Клин

Эффект Доплера – это физическое явление, состоящее в изменении частоты волн в зависимости от движения источника этих волн относительно наблюдателя. При приближении источника частота излучаемых им волн

увеличивается, а длина уменьшается. При удалении источника волн от наблюдателя их частота уменьшается, а длина волны увеличивается.

В общем случае, доплеровский сдвиг (Dopplershift) частоты вычисляется следующим образом:

$$f_D = \frac{v}{\lambda}, \quad (1.9)$$

где v – скорость движения объекта, λ – длина волны сигнала.

Длина волны — это скорость распространения волны, деленная на ее частоту:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.10)$$

здесь c – скорость света, а f – частота сигнала.

Для железнодорожного состава, движущегося со скоростью 100 км/ч (33,33 м/с), Доплеровское изменение частоты будет равно:

$$f_{D1} = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{33.33}{0.39} = 85.45 \text{ Гц},$$

$$f_{D2} = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{33.33}{0.12} = 277.75 \text{ Гц},$$

$$f_{D3} = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{33.33}{0.115} = 290 \text{ Гц}.$$

То есть, при движении абонента относительно базовой станции со скоростью 100 км/ч частота сигнала для него для несущих 771.5 МГц, 2.59 ГГц и 2.605 ГГц будет меняться на 85.45 Гц, 277.76 и 290 Гц соответственно.

Время когерентности вычисляется по формуле:

$$T_c = \sqrt{9 / (16 \cdot \pi \cdot f_D^2)} \quad (1.11)$$

Время когерентности – время, по истечении которого разность фаз волны в некоторой, но одной и той же точке пространства изменяется на π .

Рассчитаем время когерентности для всех несущих:

$$T_{c1} = \sqrt{9 / (16 \cdot \pi \cdot 85.45)} = 0.0458 \text{ с},$$

$$T_{c2} = \sqrt{9 / (16 \cdot \pi \cdot 277.75)} = 0.0254 \text{ с}, \dots$$

$$T_{c3} = \sqrt{9 / (16 \cdot \pi \cdot 290)} = 0.0248 \text{ с}.$$

Однако, данный расчет не учитывает множества параметров, характерных при передаче реальных сигналов. Для расчета доплеровского сдвига частот проведем моделирование данной ситуации средствами MATLABRFPropagation.

В виду того что при передаче используются сигнально-кодовые конструкции QPSK матрица канального сигнала может быть записана следующим образом:

$$\hat{H}_{l,i'} = y_{i',l} x_{i',l}^H \quad (1.12)$$

Здесь необходимо учесть, что в виду взаимной ортогональности синхросигналов $i = 0, \dots, N_s - 1; l = 0, \dots, N_c - 1$. $\hat{H}_{l,i'}$ не содержит нулевых элементов, $N_s = 60$, а $N_c = 75,150,300$ в зависимости от ширины полосы несущей.

С помощью RFPropagation сформируем модель взаимодействия приемника (установленного на головном вагоне подвижного состава) и передатчиков (базовых станций).

В качестве антенны приемника предлагается использовать V-образный диполь. Выбор подобной конструкции обусловлен тем, что приемник находится в постоянном движении, и плоские антенны (зачастую

используемые в LTE системах) имеют плохую диаграмму направленности относительно вектора движения, кроме того создается нагрузка на крепления антенны набегающим воздушным потоком.

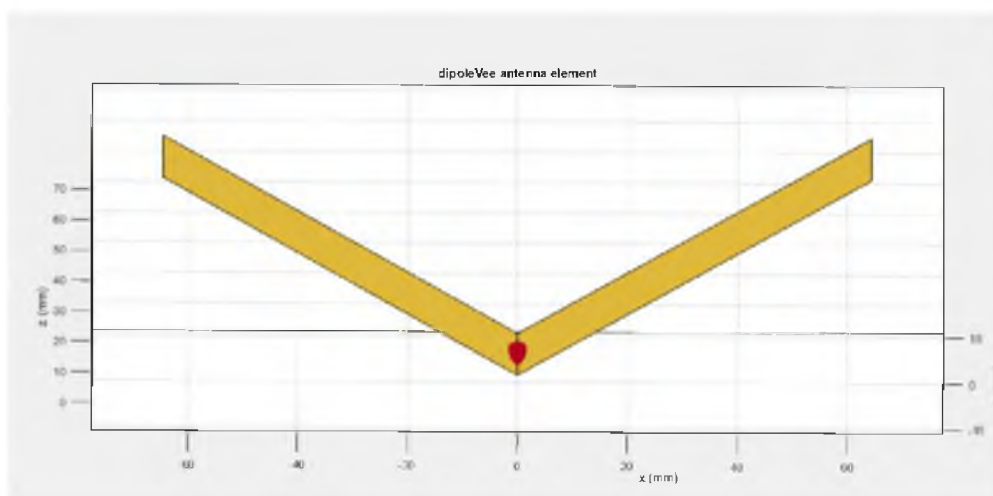


Рисунок 1.20 – V-образная антенна приемника, устанавливаемая на головном вагоне подвижного состава

Следует отметить, что поверхность поезда, является своего рода рефлектором, таким образом мы можем смоделировать диаграмму направленности антенны в трехмерном виде.

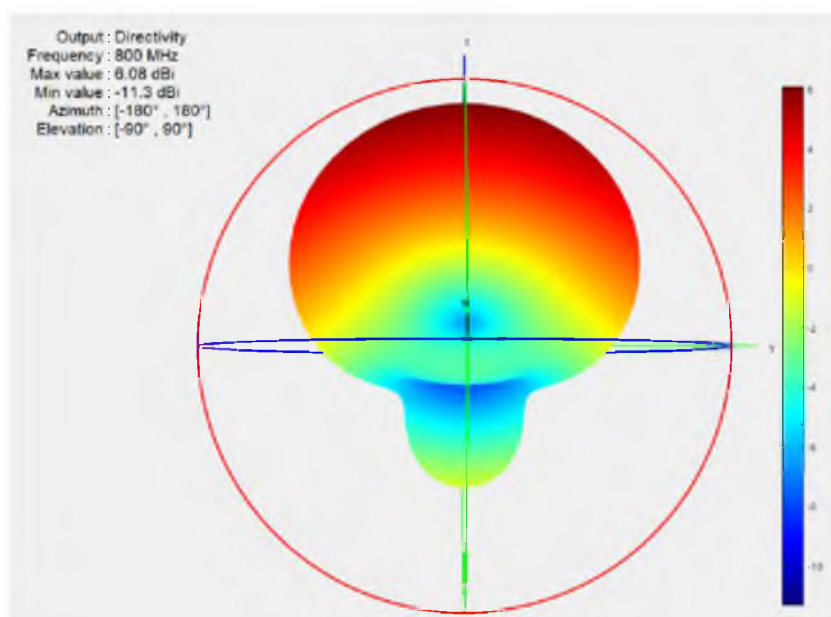


Рисунок 1.21 – Трехмерная диаграмма направленности V-образной антенны для работы на частоте 800 МГц

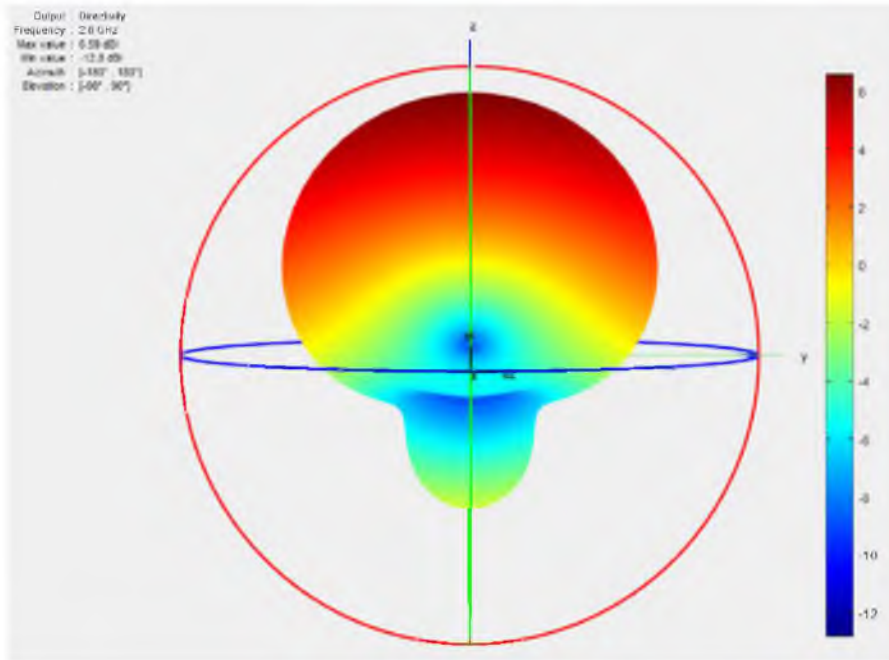


Рисунок 1.22 – Трехмерная диаграмма направленности V-образной антенны для работы на частоте 2.6 ГГц

Расчет задержки доплеровского спектра мощности (функции рассеивания) может быть получен путем обратного преобразования Фурье от одного блока данных, состоящего из 100 фреймов.

$$s_{t,u,k} = \left| \frac{1}{\sqrt{100N_s}} \sum_{i=100tN_s}^{100(t+1)N_s-1} \hat{h}_{i,k} e^{\frac{2\pi jiu}{100N_s}} \right|, \quad (1.13)$$

где переменная t зависит от ширины полосы пропускания, в случае передачи в полосе 5МГц (на частоте, несущей 800 МГц) передача 100 фреймов информации занимает 1 секунд, в случае передаче в полосе 10+20 МГц на частоте, несущей 2.6 ГГц эта величина составляет 200 фреймов и 2 секунды соответственно.

Задержка Доплеровской мощности может быть рассчитана путем усреднения всех элементов в MIMO матрице:

$$s_{t,u,k} = \frac{1}{N_T N_R} \sum_{m=0}^{N_T-1} \sum_{n=0}^{N_R-1} [s_{t,u,k}]_{m,n} \quad (1.14)$$

На рисунках 2.23 и 2.24 представлена оценка доплеровского сдвига частот при передаче на частота 800 МГц (рисунок 2.23) и на частоте 2.6 ГГц (рисунок 2.24). На 50 блоке поезд (приёмник) приближается к станции Покровка, в момент обработки блока 90 поезд (приёмник) находится в непосредственной близости от базовой станции (на расстоянии ~30 метров), в момент получения блока 130 поезд (приёмник) отдаляется от станции Покровка.

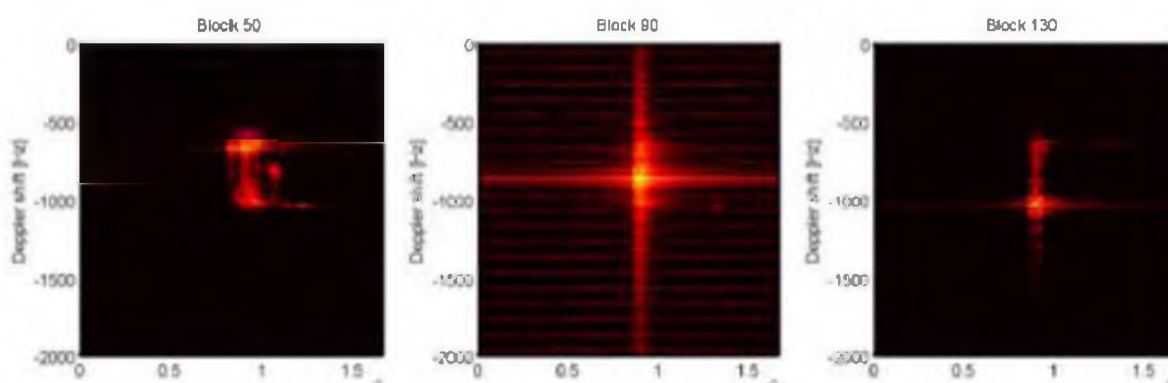


Рисунок 1.23 – Оценка доплеровского сдвига частот при передаче на частоте 800 МГц, при скорости движения 100 км/ч

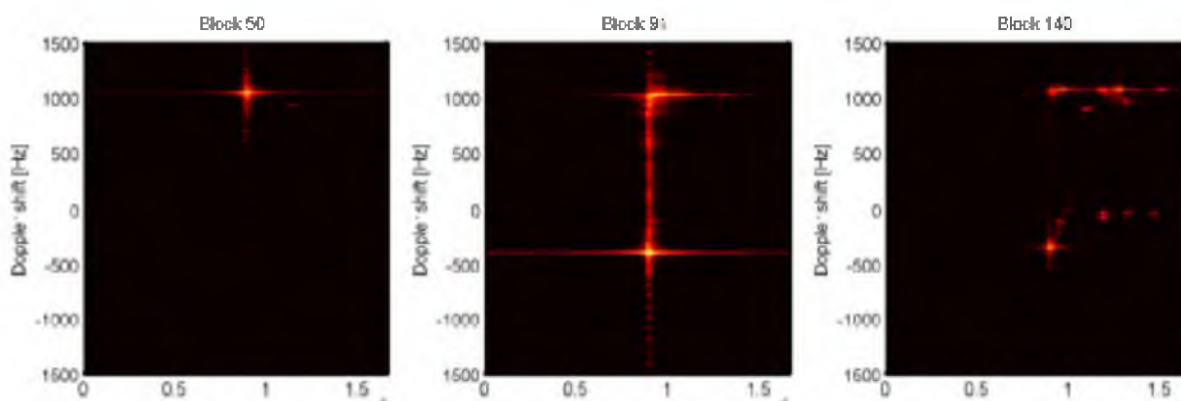


Рисунок 1.24 – Оценка доплеровского сдвига частот при передаче на частоте 2.6 ГГц, при скорости движения 100 км/ч

2.4 Основные результаты и выводы

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы во второй главе магистерской диссертации были разработаны следующие модели:

1. Модель линейно-кабельных сооружений и антенно-фидерных устройств для обеспечения беспроводной связи с пассажирскими составами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь;

2. Модель беспроводной передачи данных по стандарту LTE в диапазонах 2.6 ГГц и 800 МГц для связи с пассажирскими поездами.

В рамках работы над данными моделями были исследованы особенности антенно-фидерных устройств для передачи данных по стандарту LTE, а также построены диаграммы направленности предложенных вариантов реализации антенн. Произведен расчет зоны радио покрытия LTE сети для связи с пассажирскими составами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь. Произведена оценка доплеровского сдвига на участке следования Солнечногорск – Клин относительно базовой станции, расположенной на станции Покровка.

ГЛАВА 3 МОДЕЛЬ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО КОНТЕНТА ДЛЯ С ПАССАЖИРСКИХ СОСТАВОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ МАРШРУТЕ МОСКВА- ТВЕРЬ

3.1 Разработка схемных решений сетевой инфраструктуры пассажирских вагонов

На основе соображений, представленных в главе 1.3 в данной главе будет разработано решение для предоставления услуг абонентам на базе технологии Wi-Fi.

Wi-Fi («беспроводная точность») — стандарт на оборудование Wireless LAN. Разработан консорциумом Wi-FiAlliance на базе стандартов IEEE 802.11, «Wi-Fi» — торговая марка «Wi-FiAlliance». Технологию назвали Wireless-Fidelity (дословно «беспроводная точность») по аналогии с Hi-Fi.

В 2015 году был принят новый стандарт для беспроводных сетей передачи данных IEEE 802.11ac, который позволил передавать информацию до трех раз быстрее, чем последний сегодняшний стандарт IEEE 802.11n. В настоящее время он ограничивает передачу данных скоростью до 300 Мбит/с.

Базовый стандарт 802.11g работает на частотах 2,4-2,4835 ГГц и позволяет передавать данные с канальной скоростью 54-1 Мбит/сек, совместим со стандартом 802.11b. Для удобства передачи данных частота поделена на так называемые каналы.

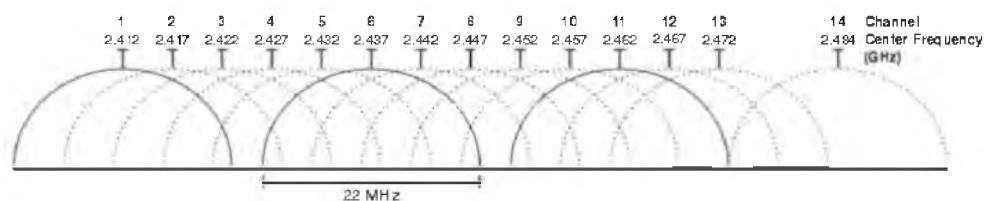


Рисунок 3.1 – Распределение каналов для стандарта Wi-Fi в диапазоне 2,4-2,4835 ГГц

Из изображения понятно, что каналов всего 14, но в зависимости от страны, в которой мы находимся, разрешенными для использования могут быть только некоторые из них. Так, например, в Украине и России разрешено использовать с 1 по 13 канал, в Японии все 14.

Проблемой при настройке беспроводной сети является перекрытие смежных каналов друг другом, что так же видно из рисунка, приведенного выше. Логично предположить, что при настройке двух смежных точек доступа, достаточно просто их настроить на разные каналы. Например, 1 и 2, или 1 и 3. Но, так как эти каналы пересекаются друг с другом, то наши точки доступа, настроенные таким образом, будут создавать помехи друг для друга. То есть если нам доступно 13 каналов, то максимум рядом мы можем настроить 3 точки доступа стандарта b и g, которые будут нормально сосуществовать, например, на 1, 6 и 11 канал. Эти данные необходимо учитывать при определении частотных каналов вещания точек беспроводного доступа внутри вагонов.

Стандарт 802.11n позволяет объединять смежные каналы для увеличения скорости передачи данных за момент времени. Объединение каналов возможно использовать в обоих диапазонах, но так как в диапазоне 2,4 ГГц доступно только 3 непересекающихся канала, использовать данную возможность в этом диапазоне крайне не рекомендуется. Так же нужно отметить что согласно стандарта, если в диапазоне 2,4 ГГц на котором используется канал удвоенной ширины появляется устройство, работающее на канале стандартной ширины, то устройство 802.11n обязано перейти на работу с каналом стандартной ширины.

Развертывание WLAN, такого как Wi-Fi в поезде, - это подход, выбираемый в Европе повсеместно. Кроме того, общепризнанно, что концепция репликации точек доступа Wi-Fi в поезде - это не только лучшее техническое решение для создания доступа к Интернет в поездах, но и идеальный клиентский интерфейс. Wi-Fi - это хорошо известная технология с

не лицензированными полосами, легко развертываемая и экономичная. Различные стандарты Wi-Fi IEEE 802.11 упоминаются в таблице 3.1.

Таблица 3.1– Стандарты Wi-Fi IEEE 802.11

Стандарт	Год введения стандарта	Частота	Скорость доступа
IEEE 802.11a	1999	5 ГГц	54 Мбит/с
IEEE 802.11b	1999	2.4 ГГц	11 Мбит/с
IEEE 802.11g	2003	2.4 ГГц	54 Мбит/с
IEEE 802.11n	2009	2.4/5 ГГц	450 Мбит/с
IEEE 802.11p	2010	5.85-5.925 ГГц	

IEEE 802.11n позволяет достичь теоретической пропускной способности до 450 Мбит / с при использовании полос пропускания (2,4 и 5 ГГц) одновременно. Он является развитием предыдущих стандартов: IEEE 802.11a на частоте 5 ГГц и IEEE 802.11b и IEEE 802.11g на частоте 2,4 ГГц.

В данном стандарте внедрены следующие улучшения:

- Стандарт основан на технологии множественного ввода с несколькими входами (MIMO);
- Объединение каналов позволяет увеличить пропускную способность до 40 МГц, вместо 20 МГц для предыдущих стандартов.

Наконец, последний стандарт Wi-Fi, разработанный с 2011 по 2013 год, был одобрен в январе 2014 года так называемым IEEE 802.11ac. Он использует только диапазон 5 ГГц. Теоретическая пропускная способность 500 Мбит / с может быть достигнута и до 7 Гбит / с с использованием методов мультиплексирования и MIMO.

В качестве топологий построения Wi-Fi сети для поезда (проблема заключается в соединении точек доступа в вагонов поезда в единую сеть) могут использоваться следующие:

- 1) Использование беспроводного моста на основе стандарта IEEE 802.11b с использованием внешних антенн. Данное решение имеет наименьшие затраты на внедрение, однако отличается низкой общей

скоростью доступа, в виду использования общей полосы пропускания (которая является недостаточно широкополосной) для передачи между вагонами.

2) Использование структурированной кабельной системы Ethernet для соединения беспроводных точек доступа к контроллеру, установленному в головном вагоне. Данное решение требует применение экранированной витой пары или оптического кабеля, а также использование специальных защищенных разъемных соединений для соединения сетей различных вагонов в единую структуру.

На основе данных о планировке вагонов в поездах типа ЭС2Г (рисунок 1.7), а также схеме распределения оборудования было спроектировано схемное решение – рисунок 3.2. Данное схемное решение позволяет оценить архитектуры предлагаемой сети и выработать рекомендации по монтажу кабельных линий внутри подвижного состава.

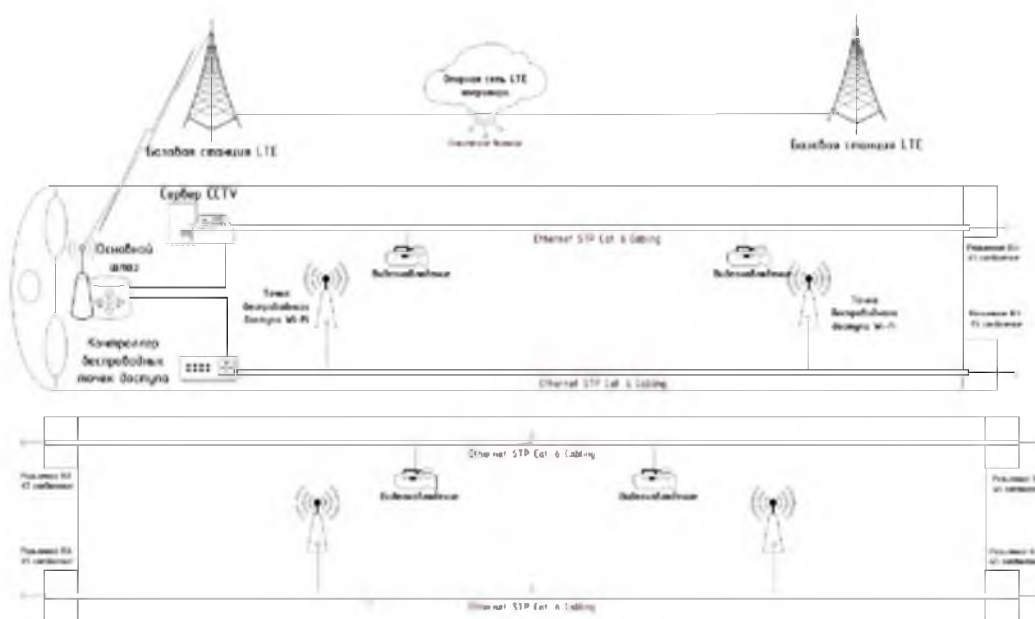


Рисунок 3.2 – Схемное решение по сетевому обеспечению пассажирских вагонов для поездов типа ЭС2Г

Архитектуру данного схемного решения можно описать следующим образом: условно схемное решение можно разделить на две части, первой

частью является оснащение головного вагона, второй частью являются ведомые вагоны.

Головной вагон должен быть оборудован антеннами для приема LTE сигнала, поступающего с базовых станций. Для этого на крыше вагона монтируется специализированная площадка, на которой осуществляется размещение антенно-фидерных устройств приемо-передатчика. Согласно описанным во второй главе соображениям выбран ансамбль V-образных антенн для приема MIMO сигнала. От площадки фидерный тракт ведет в кабину машиниста, где в шкафу для телекоммуникационного оборудования смонтирована стойка для приемо-передатчика и шлюза, выполняющего инкапсуляцию и деинкапсуляцию данных. Кроме того, в стойке размещается контроллер беспроводных точек доступа, от которого подключены беспроводные точки доступа в вагонах, а также может, при необходимости, размещен сервер видеонаблюдения. Питание оборудования в телекоммуникационной стойке должно осуществляться от бортовой сети. Рекомендуется также размещение аккумуляторных батарей бесперебойного питания, которые обеспечивали бы повышенную надежность сетевой инфраструктуры поезда. Подключение к существующей сети резервного питания нежелательно, т.к. приведет к сокращению длительности работы других жизненно-важных систем: аварийного освещения, громкоговорителей, звуковых сигналов, хвостовых габаритных сигналов, аварийной вентиляции, системы управления автоматическими дверями, поездных радиостанций и стояночного пружинного тормоза.

В виду того, что в поездах типа ЭС2Г количество вагонов может варьироваться, при этом количество головных вагонов всегда остается равным двум, телекоммуникационное оборудование должно быть размещено в обоих головных вагонах и использоваться одновременно или только на ведущем вагоне. Для сохранения приемлемой скорости доступа не рекомендуются подключать к одному центральному передатчику более 4 вагонов. Подробнее варианты организации сети будут описаны далее.

Следует отметить что для организации надежного и диверсифицированного доступа в вагонах необходимо выполнить монтаж и разводку экранированной витой пары с категорией не ниже 6а.

Новейший стандарт от TIA для повышенных стандартов производительности для кабельных сетей с витой парой был определен в феврале 2009 года в ANSI/TIA-568-C.1. В то время как кабель категории 6 имеет уменьшенную максимальную длину при использовании 10GBASE-T, кабель категории 6А (AugmentedCategory 6) характеризуется частотой до 500 МГц и имеет улучшенные характеристики перекрестных помех, позволяя 10GBASE-T работать на той же самой 100-метровой дистанции так же, как и предыдущие варианты Ethernet. Глобальный стандарт укладки кабеля ISO/IEC 11801 был расширен путем добавления поправки. Эта поправка определяет новые спецификации для компонентов Cat 6А и постоянных соединений Class EA.

Витая пара монтируется в под потолочном пространстве вагонов на специальных консолях, для каждого вагона необходимо осуществить прокладку минимум двух независимых линий. Первая из линий используется для развертывания сети видеонаблюдения, вторая – для сети доступа. Разъемные соединения EthernetClassEA располагаются в специальном техническом кожухе, с соединителями слаботочной сети поезда. Количество подключаемых к головному составу вагонов может варьироваться. Следует отметить, что кабели питания телекоммуникационного оборудования вагонов должны размещаться в специальном гофрированном кожухе не ближе чем в 25 см от телекоммуникационного кабеля.

В под потолочном пространстве также монтируются площадки для размещения RJ-45 розеток для подключения телекоммуникационного оборудования: беспроводных точек доступа и камер видеонаблюдения.

В остальных вагонах помимо структурированной кабельной инфраструктуры размещаются по две беспроводных точки доступа, питаемых от бортовой сети, а также камеры видеонаблюдения. Кроме того,

возможно подключение к сети доступа различных информационных табло и мониторов для проведения вещания телевидения или информационно-справочной информации.

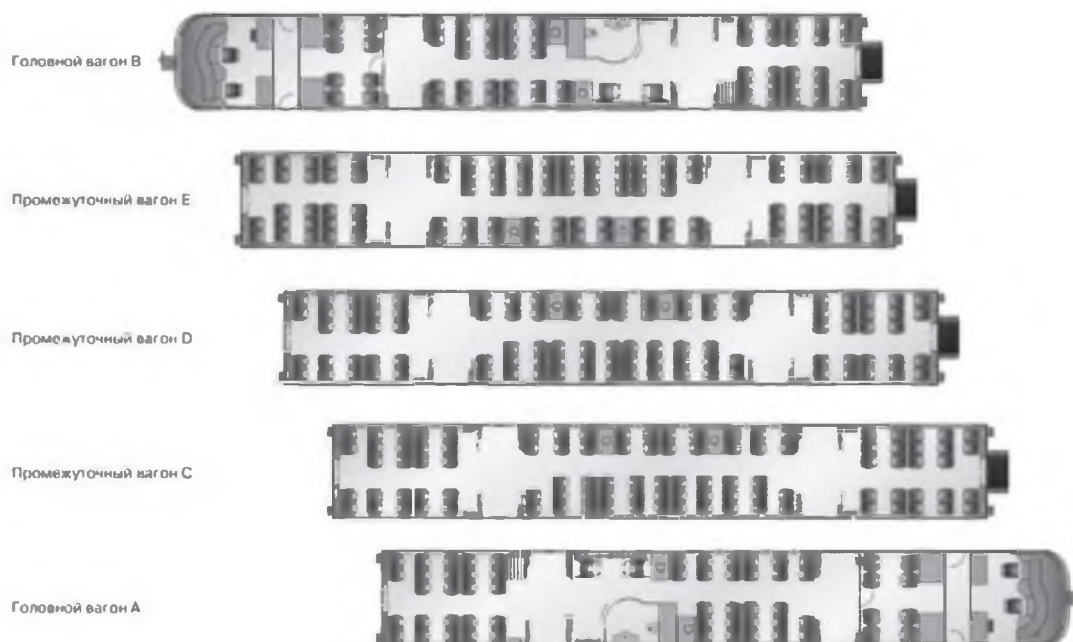


Рисунок 3.3 – Типовой состав электропоезда типа «ЭС2Г»

Для типового состава поезда (5 вагонов) – рисунок 3.3, рекомендуется следующая схемы организации связи представленная на рисунке 3.4. Использование двух независимых сетей: сеть А охватывает вагоны: А и С; сеть В охватывает вагоны В, Е и В. В головных вагонах располагаются передатчики и основные шлюзы для связью с внешними сетями.

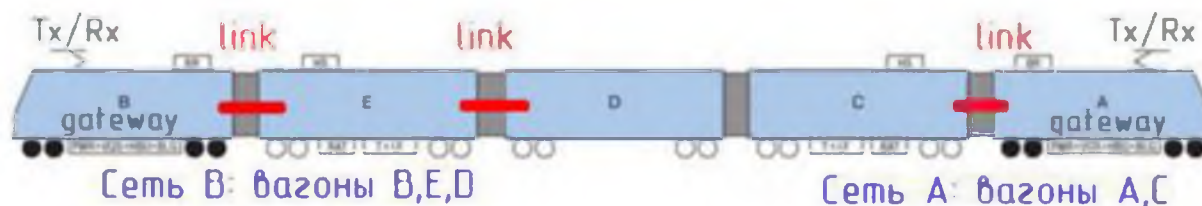


Рисунок 3.4 – Рекомендуемая схема организации связи между вагонами с помощью разъёмных соединений для поездов типа «ЭС2Г»

3.2 Организация системы видеонаблюдения в пассажирских поездах

В настоящее время системы видеонаблюдения в основном используются в общественных местах, включая транспортный домен. Многие исследования и исследования проводятся в этой тематике, чтобы помочь человеку, ответственному за анализ записанных изображений. Самые ранние системы назывались замкнутыми системами телевидения (ССТV), поскольку данные не передавались за пределы контролируемой среды. В настоящее время системы полагаются на IP-камеры, связанные сетью Ethernet. Основная цель построения ССТV состоит в том, чтобы организовать максимальную взаимосвязь и взаимодействие всех систем видеонаблюдения в конкретной среде, например, в общественных местах или в транспортной среде.

Сильные ограничения требуются с точки зрения интеграции, обслуживания и связи. Надежные беспроводные системы широкополосной связи должны быть реализованы для связи систем видеонаблюдения на борту транспортных средств и на земле. Видеонаблюдение может использоваться для наблюдения за объектами железнодорожной инфраструктуры) или для наблюдения за происходящим внутри вагонов.

Сетевое видеонаблюдение помогает обезопасить пассажиров, персонал и имущество на всех видах транспорта. На общественном транспорте все видеокамеры наблюдения, установленные на вокзалах, станциях, поездах и железнодорожных тоннелях, можно подсоединить к диспетчерской. При любом происшествии сотрудники службы безопасности в диспетчерской смогут в реальном времени просмотреть изображение с соответствующей видеокамеры и оперативно принять решение.

В качестве системы видеонаблюдения рекомендуется совместить использование как стандартных широкоугольных камер (рисунок 3.5), так и полусферических камер (рисунок 3.6).

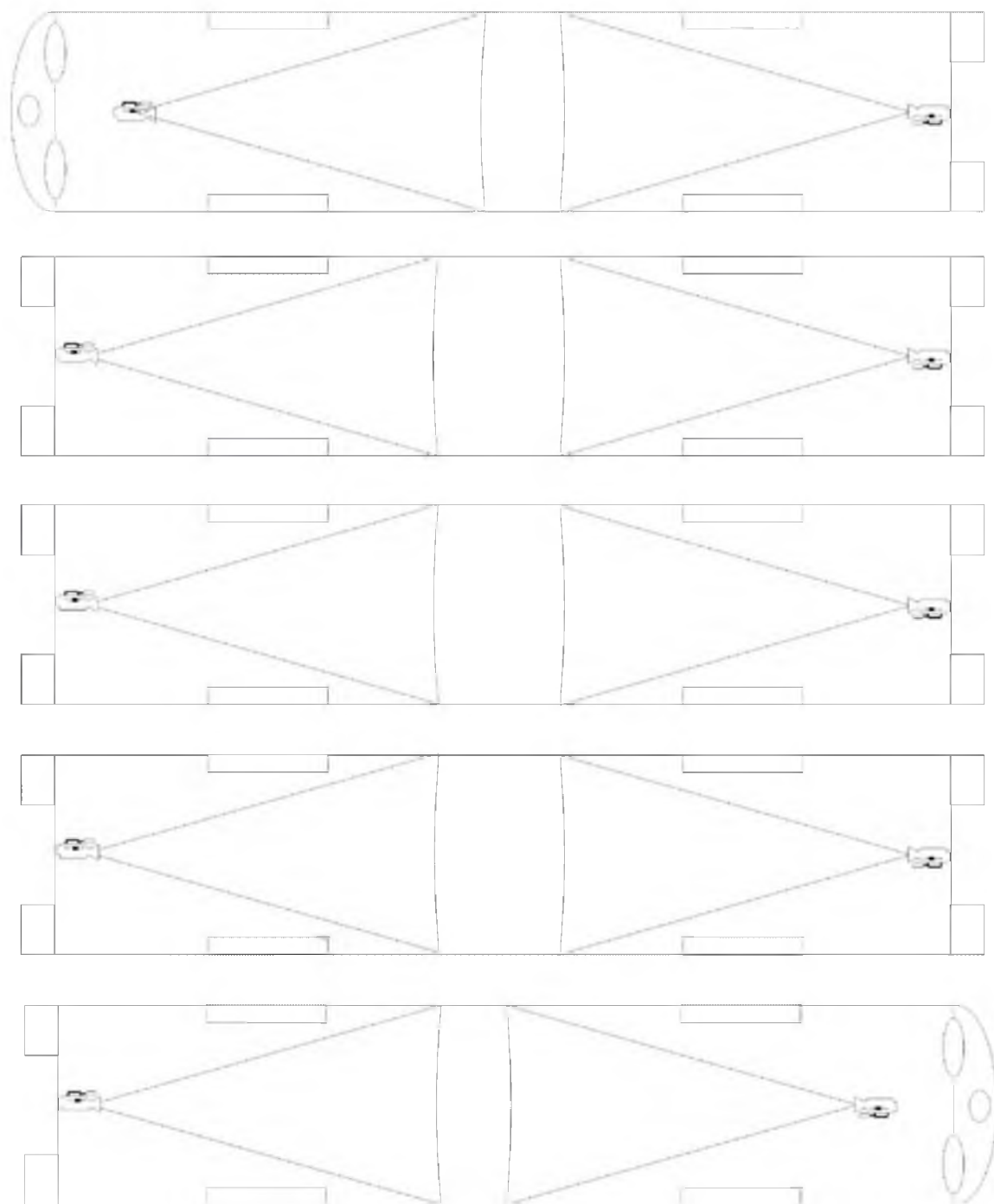


Рисунок 3.5 – Пример схемы использования широкоугольных камер с объективами коридорного типа в поездах типа «ЭС2Г»

Используя специальные камеры коридорного типа позволяет фиксированным/фиксированным купольным видеокерам передавать изображение, ориентированное вертикально. Данный формат оптимизирован для видеонаблюдения в узких и высоких местах, например, в вагонах поездов и позволяет эффективней расходовать место на накопителях и сократить

нагрузку на канал. Например, при использовании данного формата сетевые видеокамеры стандарта HDTV могут передавать изображение с соотношением сторон 9:16. Чтобы получить такое же изображение от фиксированной купольной видеокамеры, нужно сначала повернуть её оптический блок на 90° (или перевернуть на бок, если это обычная фиксированная видеокамера), а затем уже повернуть изображение на 90° в параметрах настройки видеокамеры на ее домашней веб-странице.

Фиксированная купольная сетевая видеокамера - это фиксированная видеокамера куполообразной конструкции. Может комплектоваться варифокальным, варифокальным объективом с моторчиком или объективом с фиксированным фокусным расстоянием. Некоторые модели при этом поддерживают сменную оптику. Такую видеокамеру можно повернуть в любом направлении. Среди главных преимуществ таких видеокамер можно отметить особую конструкцию, не привлекающую к себе повышенного внимания, которая не дает возможности понять, в какую именно сторону видеокамера направлена в данный момент. Кроме того, такая видеокамера имеет антивандальное исполнение. Фиксированные купольные видеокамеры имеют разные виды и классы защиты, например, антивандальное или пылезащищенное исполнение.

Использование полусферических камер (рисунок 3.6) оказывается весьма эффективным в условии ограниченного пространства. В виду того что такой тип камер позволяет охватывать максимум полезного пространства помещений. Аппаратурные искажения по краям получившихся изображений подвергаются обработке. Полусферический объектив обеспечивает хорошую детализацию видеопотока без потери резкости и четкости по всей области кадра.

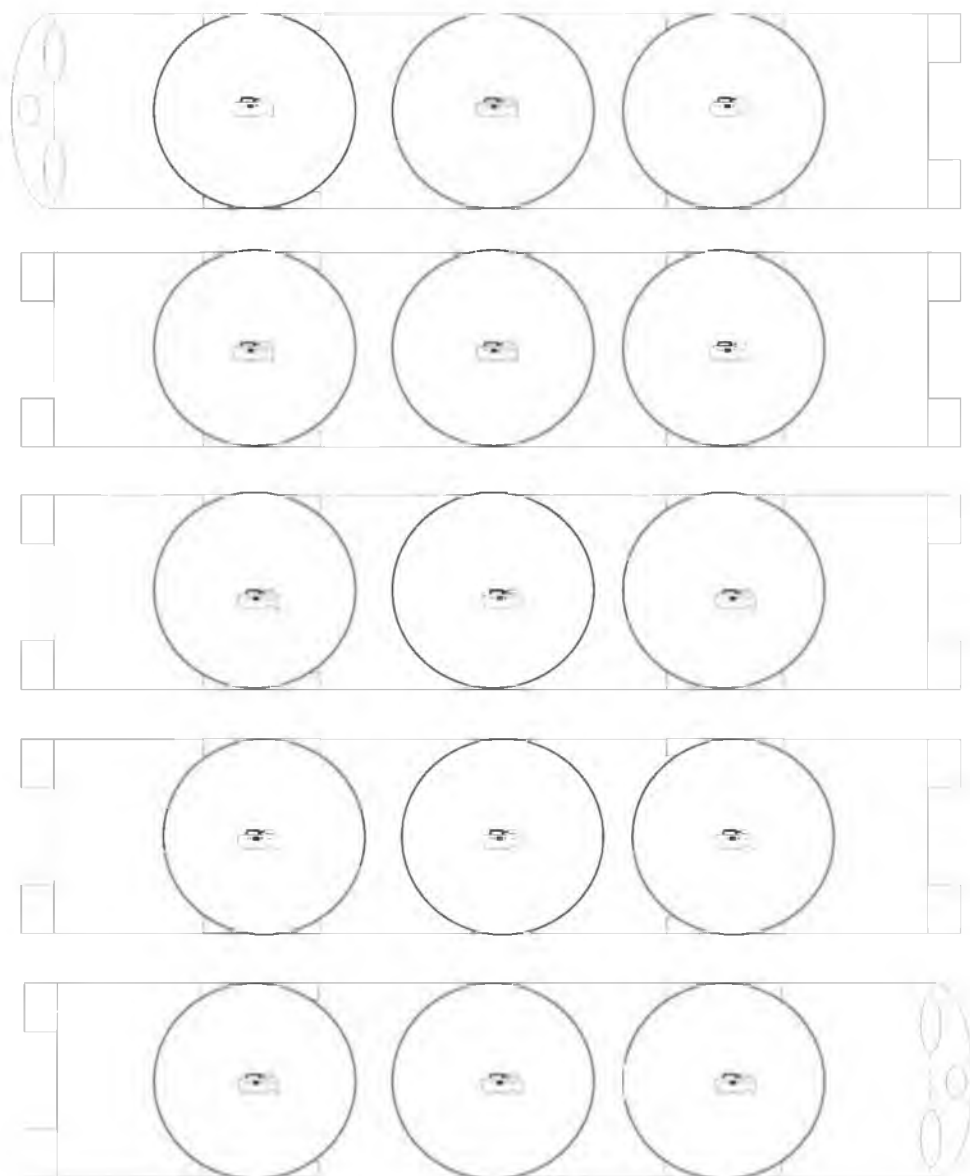


Рисунок 3.6 – Пример схемы использования широкоугольных камер с объективами коридорного типа в поездах типа «ЭС2Г»

Программное обеспечение для просмотра видеоматериалов выполняет интеллектуальную коррекцию изображения, снятого с помощью сверх широкоугольного объектива, восстанавливая нормальные пропорции объектов при просмотре через веб-браузер или программное обеспечение для управления видеопотоком (VMS). При необходимости у пользователя есть возможность увеличить отдельную область кадра. При этом камера продолжает следить за всем пространством и ведет запись, ознакомившись с которой, пользователь может изучить происходившее в тот же момент в

других областях. В целом использование полусферических камер является перспективным направлением в сфере видеонаблюдения.

Большинство программ видеонаблюдения используют для хранения стандартную файловую систему операционной системы Windows, поэтому хранить видеозаписи можно на любом обычном или сетевом накопителе. Программа видеонаблюдения может поддерживать более одного уровня хранения, например, видеозапись может идти на основной жесткий диск (локальный), а весь архив может храниться на локальных дисках, сетевых хранилищах или съемных жестких дисках. Можно самостоятельно выбрать продолжительность хранения видеозаписей на основном жестком диске, прежде чем программа автоматически удалит их или перенесет на накопитель, где хранится весь архив. Кроме того, можно запретить автоматическое удаление видеозаписей, сделанных по событиям. Для этого нужно отметить их или заблокировать.

В зависимости от выбранного разрешения устройства видеонаблюдения могут поддерживать разную частоту кадров. Видеозапись и/или просмотр изображения со всех камер наблюдения всегда с максимальной частотой кадров (25 кадров в секунду при частоте 50 Гц и 30 кадров в секунду при частоте 60 Гц) - это обычно намного больше, чем требуется в большинстве систем видеонаблюдения. В обычной ситуации можно использовать меньшую частоту кадров, например, от одного до четырех кадров в секунду. Таким образом, получится ощутимо сэкономить свободное место на накопителе. А при тревоге, например, при обнаружении движения или поступления сигнала тревоги от внешнего датчика, может передаваться отдельный видеопоток с более высокой частотой кадров.

3.3 Основные результаты и выводы

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы во второй главе магистерской диссертации были разработаны следующие модели:

1. Модель предоставления мультисервисного контента с помощью беспроводных технологий для пассажирских перевозок ОАО РЖД на железнодорожном маршруте Москва-Тверь.

2. Модель видеонаблюдения для пассажирских поездов типа «ЭС2Г» на железнодорожном маршруте Москва-Тверь.

В рамках работы над данными моделями были исследованы особенности передачи данных по стандарту Wi-Fi, приведены схемные решения по организации сети доступа и системы видеонаблюдения, а также даны рекомендации по построению структурированных кабельных систем в вагонах поездов типа «ЭС2Г».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были исследованы особенности предоставления мультисервисного контента при проведении пассажирских перевозок железнодорожным транспортом, приведен анализ и оценка различных вариантов реализации сетевой инфраструктуры. Проведена разработка и исследование модели беспроводного широкополосного доступа для обеспечения мультисервисным контентом пассажирских вагонов на железнодорожном маршруте Москва-Тверь. В рамкой данной работы были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ основных регламентов и технической документацией для реализации беспроводной передачи данных на железных дорогах;

2. Проанализированы особенности пассажирских вагонов с целью разработки схемных решений по размещению сетевого оборудования и кабелей связи;

3. Разработана модель линейно-кабельных сооружений и антенно-фидерных устройств для обеспечения беспроводной связи с пассажирскими составами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь;

4. Разработана и исследована модель беспроводной передачи данных по стандарту LTE в диапазонах 2.6 ГГц и 800 МГц для связи с пассажирскими поездами на железнодорожном маршруте Москва-Тверь;

5. Разработана модель предоставления мультисервисного контента для пассажирских перевозок ОАО РЖД на железнодорожном маршруте Москва-Тверь.

6. Разработана модель видеонаблюдения в поездах типа «ЭС2Г».

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. JuanPabloConti. Hot Spots on Rails. *Communications Engineer*, 3(5):18–21, November 2005.
2. Daniel T Fokum and Victor S Frost. A survey on methods for broadband internet access on trains. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 12(2):171–185, 2010.
3. G. Bianchi, N. Blefari-melazzi, E. Grazioni, S. Salsano, and V. Sangregorio. Internet access on fast trains: 802.11-based on-board wireless distribution network alternatives. In *ISTMobile& Wireless Communications Summit*, pages 15–18, Aveiro, Portugal, June 2003.
4. Christopher J Hansen. WiGiG: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band. *Wireless Communications, IEEE*, 18(6):6–7, 2011.
5. EldadPerahia, Carlos Cordeiro, Minyoung Park, and L. Lily Yang. IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi. In *7th IEEE Consumer Communications andNetworking Conference*, pages 1–5, Las Vegas, January 2010. IEEE.
6. Steven J. Vaughan-Nichols. GigabitWi-Fi Is on ItsWay. *Computer*, 43(11):11–14, November 2010.76. Jrg Ott and Dirk Kutscher. The “Drive-thru” Architecture: WLAN-based Internet Access on the Road. In *59th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, volume 5, pages 2615–2622, May 2004.
7. IEEE Std 802.11ad-2012 (Amendment to IEEE Std 802.). *IEEE Standard for Informationtechnology–Telecommunications and information exchange between systems–Local andmetropolitan area networks–Specific requirements–Part 11: Wireless LAN Medium AccessControl (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Am*, pages 1–628, 2012.
8. AtchareeyaKongbuntad, MonthippaUthansakul, and PeerapongUthansakul. Improved beamformingcode bookforWiGigusingMaximal Ratio Combining. In *The International Conferenceon Information Networking (ICOIN)*, pages 112–115, Phuket, Thailand, February 2014. IEEE.

9. Aimeric Bisognin, Diane Titz, Fabien Ferrero, Romain Pilard, Carlos A. Fernandes, Jorge R. Costa, Christian Corre, Pierino Calascibetta, Jean-Michel Rivire, Alexis Poulain, Christian Badard, Fric Giancesello, Cyril Luxey, Pierre Busson, Daniel Gloria, and Didier Belot. 3D printed plastic 60GHz lens: Enabling innovative millimeterwave antenna solution and system. In *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pages 1–4, Tampa, FL, June 2014.
10. C. H. Chan, K. B. Ng, D. Wang, H. Wong, and S.-W. Qu. Antennas for 60GHz high-speed radio systems. In *IEEE International Workshop on Electromagnetics; Applications and Student Innovation (iWEM)*, pages 1–2, Chengdun China, August 2012.
11. E. Juntunen, A. Tomkins, A. Poon, J. Pham, A. El-Gabaly, M. Fakharzadeh, H. Tawfik, Yat-Loong To, M. Tazlauanu, B. Lynch, and R. Glibbery. A compact antenna-in-package 60-GHz SiGe BiCMOS radio. In *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, pages 287–288, Tampa, FL, June 2014.
12. H. Mopidevi, H. V. Hunerli, Engin Cagatay, N. Biyikli, Marc Imbert, Jordi Romeu, Lluís Jofre, and Bedri Artug Cetiner. Three-Dimensional microfabricated broadband patch antenna for WiGig applications. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 13:828–831, 2014.
13. Kung Bo Ng and Chi Hou Chan. A differentially-fed complementary antenna for WiGig applications. In *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, pages 313–315, Seoul, Korea, November 2013.
14. R. Pilard, F. Giancesello, and D. Gloria. 60 GHz antennas and module development for WiGig applications: Mm-wave antenna-systems convened session. In *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pages 2595–2598, Praha, March 2012.
15. B. Razavi, Z. Soe, A. Tham, J. Chen, D. Dai, M. Lu, A. Khalil, H. Ma, I. Lakkis, and H. Law. A low-power 60-GHz CMOS transceiver for WiGig applications. In *Symposium on VLSI Circuits (VLSIC)*, Kyoto, June 2013.
16. Nobuo Saito, Takayuki Tsukizawa, Naganori Shirakata, Takahito Morita, Kiyoshi Tanaka, Jun Sato, Yu Morishita, Masaki Kanemaru, Ryo Kitamura, Tal

Shima, et al. A fully integrated 60-GHz CMOS transceiver chipset based on WiGig/IEEE 802.11 ad with built-in self calibration for mobile usage. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 48(176). JrgOtt and Dirk Kutscher. The “Drive-thru” Architecture: WLAN-based Internet Access on the Road. In 59th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), volume 5, pages 2615–2622, May 2004.

2):3146–3159, 2013.

17. KentaroIshizu, Masahiro Kuroda, and Hiroshi Harada. Bullet-train Network Architecture for Broadband and Real-time Access. In IEEE Symposium on Computers and Communications, pages 241–248, Aveiro, Portugal, July 2007. IEEE.

18. T. Manabe and H. Hojo. Technologies for railway internet services in japan. In ITST, Kyoto, Japan, November 2010.

19. Masanori Terada and Fumio Teraoka. Providing a high-speed train with a broadband and fault tolerant IPv4/6 NEMO environment. In IEEE Globecom Workshops, pages 1052–1056, Anaheim, US, December 2012.

20. Gaurav Soni and Sandeep Kaushal. Mobile WiMAX technology and its comparison with various competing technologies. *Int. J. Comput. Corporate Res*, 1:1–24, 2011.

21. Marina Aguado, Oscar Onandi, Purificacion Agustin, MariviHiguero, and Eduardo Taquet. WiMAX on rails. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 3(3):47–56, 2008.

22. IftekharaAhmadandHabibiDaryoush. ANovelMobileWiMAXsolution for Higher Throughput. In 16th IEEEInternational Conference on Networks (ICON), pages 1–5, NewDehli, India, December 2008.

23. SayanKumar Ray, Krzysztof Pawlikowski, andHarshaSirisena. Handover inmobileWiMAX networks: The state of art and research issues. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 12(3):376–399, 2010.

24. Takayuki Matsumoto. AddingWiFi and Other Information Services to JR East Trains. In The WiFi on Trains Conference - Train Communications Systems, London, UK, June 2014.

25. Terry Tse. Study of High-Speed Wireless Data Transmissions for Railroad Operation. Technical report, U.S. Department of Transportation, April 2007.
26. Ting Zhou, Hamid Sharif, Michael Hempel, PuttipongMahasukhon, and Song Ci. Performance of IEEE 802.11 b in mobile railroad environments. In Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd, volume 4, pages 2527–2531. IEEE, 2005.
27. PuttipongMahasukhon, Michael Hempel, and Hsiao-Hwa Cheng. BER Analysis for 802.11b Networks under Mobility. In International Conference on Communications (ICC), pages 4722–4727, June 2007.
28. JrgOtt and Dirk Kutscher. The “Drive-thru” Architecture: WLAN-based Internet Access on the Road. In 59th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), volume 5, pages 2615–2622, May 2004.
29. Richard Gass, James Scott, and Christophe Diot. Measurements of In-Motion 802.11 Networking. In 7th Workshop on Mobile Computing Science & Applications (WMCSA), pages 69–74, August 2006.
30. Michal Kowal, SlawomirKubal, Piotr Piotrowski, and Ryszard Zielinski. Operational characteristic of wireless WiMAX and IEEE 802.11 x systems in underground mine environments. International Journal of Electronics and Telecommunications, 56(1):81, 2010.
31. Kazuhiro Yamada. A High Speed Mobile Communication System Implementing Bicasting Architecture on the IP Layer. Technical report, 2012.
32. Bart Lannoo, Didier Colle, Mario Pickavet, and Piet Demeester. Radio-over-fiber-based solution to provide broadband internet access to train passengers. IEEE Communications Magazine, 45(2):56–62, 2007.
33. Manfred Schienbein and Juergen Dangelmeyr. TrainComradiosystem. In Telefunken RACOMS, 2009.
34. Электропоезда Цукало П.В., Ерохин Н.Г. Москва 1986г.
35. Электропоезда постоянного тока Просвирин Б.К. Москва 2001г.
36. Локомотив Бжицкий В.Н. Москва 2012г.

Исходный код моделирование работы в программном комплексе
“Matlab”

```

f0 = 800e6;
ant = yagiUda('Tilt',-90);
show(ant)
view(-220,30)

z = -15;
x = (-250:4:250)*1e3;
y = (-100:4:400)*1e3;

[X,Y] = meshgrid(x,y);
numpoints = length(x)*length(y);
points = [X(:)'; Y(:)'; z*ones(1,numel(X))];

E = EHfields(ant,f0,points); % Units: V/m

Emag = zeros(1,numpoints);
for m=1:numpoints
    Emag(m) = norm(E(:,m)/sqrt(2));
end
Emag = 20*log10(reshape(Emag,length(y),length(x))); % Units: dBV/m
Emag = Emag + 120; % Units: dBuV/m
d_min = min(Emag(:));
d_max = max(Emag(:));
del = (d_max-d_min)/12;
d_min = min(Emag(:));
d_max = max(Emag(:));
del = (d_max-d_min)/12;
d_vec = round(d_min:del:d_max);

```

```

figure
contourf(X*1e-3,Y*1e-3,Emag,d_vec,'showtext','on')
title('Field Strength (dB\muV/m) on flat Earth (1 V tx)')
xlabel('lateral (km)')
ylabel('boresight (km)')
c = colorbar;
set(get(c,'title'),'string','dB\muV/m')

%%
lat = [55.7760277 55.8165467 55.85149304 55.87434781 55.89425984 55.94940407
55.97974127 56.06329156 56.18434373 56.2373401 56.33301538 56.4504439 56.55248161
56.643675 56.716377 56.75677 56.836203];
lon = [37.6554251 37.60293961 37.55111933 37.49914885 37.45133014 37.29834795
37.17356086 37.07686186 36.97001338 36.83123589 36.71186686 36.56378746 36.43719792
36.297369 36.138668 36.040821 35.893021];
h = [152 163 154 161 177 194 209 215 198 206 165 149 139 129 164 175 175];
h=h+15;
az = [130 120 120 120 120 125 125 120 120 125 125 135 135 120 125 120 135];
%%
xyrot = wrapTo180(az - 90);

tx = txsite('Name','Antenna Site', ...
'Latitude',lat, ...
'Longitude',lon, ...
'Antenna',ant, ...
'AntennaHeight',h, ...
'AntennaAngle',xyrot, ...
'TransmitterFrequency',f0);

Z = impedance(tx(1).Antenna,tx(1).TransmitterFrequency);
If = feedCurrent(tx(1).Antenna,tx(1).TransmitterFrequency);
Irms = norm(If)/sqrt(2);
Ptx = real(Z)*(Irms)^2;
for j=1:length(tx)

```

```

tx(j).TransmitterPower = Ptx*8.5;
end
coverage(tx,'Type','efield', ...

'SignalStrengths',9)

sigStrengths = [9 14 19 24 29 36];
coverage(tx,'Type','efield', ...
'SignalStrengths',sigStrengths, ...
'Colormap','parula', ...
'ColorLimits',[9 36])
rxSensitivity = -90; % Units: dBm

rxs = rxsite('Name','Train', ...
'Latitude',56.252601, ...
'Longitude',36.778622, ...
'Antenna',design(dipole,800*10*(6)), ...
'ReceiverSensitivity',rxSensitivity); % Units: dBm

```

76. JrgOtt and Dirk Kutscher. The “Drive-thru” Architecture: WLAN-based Internet Access on the Road. In 59th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), volume 5, pages 2615–2622, May 2004.

```
link(rxs,tx)
```