

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»

На правах рукописи



Лобеев Дмитрий Петрович

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ
СТАНДАРТА LTE-1800 TDD
НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
МАГИСТРАЛЯХ**

Специальность 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Биятдинов Камиль Закирович
доктор технических наук, доцент

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Современное состояние и перспективы развития	11
технологических сетей радиосвязи на железнодорожном транспорте	11
1.2 Системный анализ технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях.....	17
1.3 Анализ актуальных задач проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях	21
1.4 Анализ существующих методов, способов и моделей проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях	23
1.5 Постановка задачи на разработку и внедрение методики, комплекса моделей и научно-технических предложений по проектированию технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях	50
Выводы по первой главе	52
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА И МОДЕЛЬ ВРЕМЕННОЙ синхронизации РЕЖИМОВ РАБОТЫ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ ..	54
2.1 Назначение, состав и схема алгоритма методики	56
2.2 Компоненты методики использования частотного ресурса при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях	67
2.3 Способы применения полосы радиочастот 1785-1805 МГц	73
2.4 Модель временной синхронизации режимов работы базовых в полосе радиочастот шириной 5 МГц при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях.....	83
2.5 Оценка результатов внедрения разработанной методики	104
Выводы по второй главе	107
ГЛАВА 3 ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ И ДРУГИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ В СОВМЕСТНЫХ ЗОНАХ ОБСЛУЖИВАНИЯ.....	108
3.1 Назначение, состав и блок-схема модели	109
3.2 Способ проектирования с применением ширины полосы радиочастоты 10 МГц.....	117
3.3 Способ проектирования с применением ширины полосы радиочастоты 5 МГц.....	125
3.4 Способ проектирования с применением ширины полосы радиочастоты 3 МГц.....	130
3.5 Способ проектирования с применением ширины полосы радиочастоты 1.4 МГц.....	132
3.6 Результат сравнения способов проектирования	139
3.7 Оценка внедрения разработанной модели	145

3.8 Рекомендации по применению модели	147
Выводы по третьей главе	149
ГЛАВА 4 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕШЕНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ.....	151
4.1 Сущность и схемы применения научно-технических предложений.....	151
4.2 Первое научно-техническое предложение: способ компенсации негативного влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях	152
4.3 Второе научно-техническое предложение: применение технологии MIMO для увеличения зоны покрытия базовых станций на высокоскоростных железнодорожных магистралях	166
4.4 Третье научно-техническое предложение: применение моделей распространения радиоволн при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях.....	170
4.5 Четвертое НТП по применению базы данных для расчета дальности радиосвязи по моделям проектирования технологических сетей радиосвязи	177
4.6 Оценка результатов внедрения разработанных научно-технических предложений....	183
4.7 Разработка рекомендаций по комплексному применению результатов диссертационного исследования для повышения качества проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях	187
Выводы по четвертой главе	191
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	193
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	196
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	198
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И КОД ПРОГРАММЫ.....	216
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ.....	227

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Динамичное развитие и совершенствование железнодорожного транспорта Российской Федерации, особенно в сегменте высокоскоростных магистралей, обуславливает необходимость модернизации телекоммуникационной инфраструктуры. Критически важным элементом здесь выступает обеспечение надежной мобильной широкополосной радиосвязи на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

В настоящее время одним из наиболее актуальных и перспективных направлений в этой предметной области является применение широкополосной радиосвязи стандарта LTE, позволяющей консолидировать голос, телеметрию, видеонаблюдение и команды управления в единую сеть. Специально для применения технологии LTE была выделена полоса радиочастот 1785-1805 МГц.

Существующие сети технологической железнодорожной радиосвязи являются аналоговыми либо цифровыми стандартов GSM-R и DMR. Данные стандарты не могут обеспечить выполнение всех требований, предъявляемых к технологическим сетям радиосвязи на высокоскоростных железнодорожных магистралях. Поэтому сегодня усиливается актуальность и значимость своевременной и качественной разработки проектов технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD. При этом до настоящего времени не были разработаны и внедрены в достаточной степени универсальные методологические и технические решения для проектирования технологических сетей радиосвязи (далее – ТСП) стандарта LTE-1800 TDD [51].

Требования к повышению (обеспечению) качества связи определяют необходимость разрешения сложившихся противоречий между выделенным ограниченным частотным диапазоном ТСП стандарта LTE-1800 TDD и требованиями к электромагнитной совместимости (далее – ЭМС), ограничениями по мощности базовых станций (далее – БС) и увеличению скорости передачи данных в зоне обслуживания БС на высокоскоростных железнодорожных магистралях (далее – ВСЖМ).

Таким образом, для разрешения сложившихся противоречий целесообразно сформулировать актуальную научную задачу: на основе анализа условий функционирования технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD, разработать модель и методику повышения качества функционирования TSP, а также научно-технические предложения и решения по снижению уровня взаимных помех при существующих ограничениях для стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях, как взаимосвязанного комплекса методологических, технических и технологических решений, что в современных условиях вносит значительный вклад в развитие и совершенствование сетей связи железнодорожного транспорта Российской Федерации как важнейшей отрасли экономики.

Решение вышеуказанной задачи возможно на основе комплексного и системного подходов с учётом опыта проектирования и специфики функционирования TSP на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области создания и совершенствования TSP занимались многие ученые: М.А. Шнепп-Шнеппе, В.Ю. Бабков, В.Г. Скрынников, А.А. Гриценко, А. М. Тюрликов, А. М. Сергеев, Т. М. Татарникова, В. А. Григорьев, В.О. Тихвинский, С.С. Коган, О. И. Саута, С. В. Беззатеев, Г.Л. Беляев, С. В. Березенко, S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, H. Holma, A. Toskala и др. Однако, результаты этих научных трудов напрямую не применимы при проектировании TSP для высокоскоростных железнодорожных магистралей, вследствие отсутствия моделей и методик проектирования, учитывающих специфику организации связи на железнодорожном транспорте.

Всё вышеизложенное обосновывает актуальность научной задачи и выбор темы диссертационной работы.

Объект исследования — технологические сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Предмет исследования — методика, модели, научно-технические предложения и решения по повышению качества функционирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на

высокоскоростных железнодорожных магистралях на этапе проектирования и оценке качества связи.

Цель диссертационной работы – совершенствование проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD в полосе частот 1785-1805 МГц путём оптимизации использования ограниченного частотного ресурса и увеличения зоны обслуживания базовых станций в условиях высокоскоростного движения при скоростях от 250 до 400 км/ч.

В основе работы положена гипотеза: модели, методика, научно-технические предложения и решения позволят увеличить зону обслуживания базовых станций в выделенной полосе частот 1785-1805 МГц на 40%, а также сократят время проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD (далее – TCP LTE-1800 TDD).

Для достижения поставленной цели, решения научной задачи и проверки правильности гипотезы были поставлены и решены следующие задачи диссертационной работы:

1. Разработка, внедрение и оценка результатов внедрения методики использования частотного ресурса и модели временной синхронизации режимов работы базовых станций при проектировании TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ (далее – Методика).

2. Разработка, внедрение и оценка результатов внедрения обобщенной модели технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания (далее – Модель).

3. Разработка, внедрение и оценка результатов внедрения научно-технических предложений и решений (далее – НТП) по проектированию TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в решении актуальной задачи повышения качества функционирования TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ на этапе проектирования.

В отличие от существующих подходов, ориентированных на типовые

условия развертывания сетей, предложенные результаты учитывают специфические ограничения и особенности ВСЖМ: выделенная полоса 1785–1805 МГц и применение стандарта LTE TDD, экстремально высокие скорости движения (до 400 км/ч) и жесткие требования к пропускной способности. Это позволило получить новые научные и практические результаты:

1. В Методике и модели впервые определены и научно обоснованы процедуры использования выделенной полосы радиочастот, которые, в отличие от универсальных решений, адаптированы к динамике высокоскоростного движения, что обеспечивает нейтрализацию внутренних помех, повышение скорости передачи данных и улучшение ЭМС.

Также, решить задачу территориально-временного разнеса ограниченного частотного спектра возможно методом целочисленного линейного программирования (далее – ЦЛП). Сам метод решения задач ЦЛП давно известен, однако решение задачи распределения частот для TSP LTE-1800 TDD методом ЦЛП является новым научным решением.

2. Разработана обобщенная модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания, которая, в отличие от стандартных конфигураций, учитывает специфику ВСЖМ, позволяя гибко управлять зоной обслуживания и пропускной способностью в условиях ограниченного частотного ресурса.

3. Разработаны НТП по компенсации негативного воздействия эффекта Доплера на ВСЖМ при скоростях до 400 км/ч, а также применению фазированных антенн ММО и расчету дальности радиосвязи, что в совокупности обеспечивает расширение зоны обслуживания базовых станций и повышение качества функционирования TSP в условиях высокоскоростного движения.

Теоретическая значимость результатов заключается в развитии научно-методического аппарата проектирования TSP LTE-1800 TDD в условиях высокоскоростного движения.

Практическая значимость исследования состоит в том, что полученные результаты позволяют существенно повысить эффективность проектирования и эксплуатации TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ. Разработаны рекомендации по комплексному применению результатов диссертационного исследования для повышения качества, сокращения времени проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследования составляют: контент-анализ научных и технических источников, охватывающих область исследования, общесистемный анализ, элементы теории принятия решений, теория распространения радиоволн, теория сигналов, теория вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования на ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика использования частотного ресурса и модель временной синхронизации режимов работы БС при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях, обеспечивающие повышение эффективности применения частотного ресурса в диапазоне частот 1785-1805 МГц методом ЦПП в интересах обеспечения связи на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

2. Обобщенная модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания обеспечивает увеличение площади зоны устойчивой радиосвязи и улучшение электромагнитной совместимости.

3. Научно-технические предложения и решения по проектированию технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях обеспечивают повышение эффективности использования частотного ресурса и снижение негативного влияния эффекта Доплера.

Степень достоверности и апробация результатов

Обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов определяется корректным использованием апробированных методов и моделей, предварительным статистическим анализом результатов оценки эффективности применения Методики, Модели и НТП, непротиворечивостью результатов исследования с практикой проектирования и расчетов радиосетей, а также теоретическими и практическими результатами смежных исследований, согласованностью результатов моделирования. Достоверность положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами внедрения Методики, Модели и НТП.

Апробация работы. Содержание диссертации было доложено и получило одобрение:

- на 9 научных конференциях и семинарах: 78-й и 79-й научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной дню радио, XI Международном форуме о профессиональных сетях и системах связи ProfComm 2024, XXXI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2025), посвященной 130-летию изобретения радио, IV Межвузовской научно-практической конференции на тему: «Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей специального назначения», Всероссийской научной конференции «Опыт и перспективы совершенствования систем связи и акустических испытаний современной техники», Международном симпозиуме «Цифровая парадигма информационно-аналитического обеспечения учетных и финансовых процессов в отраслевых экономиках», Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика совершенствования отечественных систем связи, автоматизации и информационной безопасности», семинарах кафедр «Электрическая связь» и «Информатика и информационная безопасность» ПГУПС.

Исследование выполнялось в период с 2022 по 2026 год.

Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2 и 18 паспорта

специальности 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора состоит в формулировке и обосновании задачи исследования и нахождении рационального пути ее решения, заключающегося в разработке и внедрении Методики, Модели и НТП.

Все научные результаты получены автором самостоятельно.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Научные результаты, полученные в диссертации, доведены до практического применения при проектировании TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ. Они представляют непосредственный интерес в области проектирования радиотехнических и телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта. Результаты диссертационной работы реализованы (внедрены) на предприятиях: АО «НИИ «Масштаб», проектный институт «Гипротрансигнальсвязь» - филиал АО «Росжелдорпроект», ФГКВ ОУ ВПО «ВАС имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» МО РФ, Центральный региональный центр связи- структурное подразделение Центральной станции связи – филиал ОАО «РЖД».

Публикации. Материалы работы изложены в полной мере в 19 публикациях, из них: 13 статей в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданиях (перечень ВАК при Минобрнауки России); 4 акта внедрения результатов диссертационного исследования; 2 результата интеллектуальной деятельности.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 150 источников, и 2 приложений.

Объём работы без приложения составляет 215 страниц.

Общий объём работы с приложением составляет 233 страницы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определены задачи и особенности проектирования ТСП, этапы жизненного цикла ТСП. Проведён анализ технологий стандартов DMR, TETRA, GSM-R и выделены основные их преимущества и недостатки. Научно обоснованы перспективы развития ТСП на ВСЖМ. Определены возможности, перспективы, допущения и ограничения ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ. Проведён анализ существующих методов, способов и моделей проектирования ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ. Выполнена постановка задачи на разработку и внедрение Методики, Модели и НТП по проектированию ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

1.1 Современное состояние и перспективы развития

технологических сетей радиосвязи на железнодорожном транспорте

Технологические сети радиосвязи получили широкое применение в различных сферах, в том числе и на железнодорожном транспорте. Благодаря использованию этих сетей стала доступна передача различных данных, таких как: информационные сигналы, видеотрансляция, местоположение поезда на участке и др. При использовании аналоговых сетей технологической радиосвязи была возможна лишь передача голоса и речи. Эта возможность сохранилась и в цифровых системах [1,102].

Разработка и проектирование технологических сетей радиосвязи ведется по многим стандартам, в частности: DMR и GSM-R. На текущий момент существуют более перспективные стандарты: LTE, 5G [10,11,61,129]. Для железнодорожного транспорта основной упор был сделан на проектирование в сетях связи 4 поколения – LTE.

Основные характеристики радиоинтерфейсов радиоэлектронных средств (РЭС) для технологий DMR и GSM-R представлены в таблицах 1.1 и 1.2 соответственно [7].

Таблица 1.1 – Основные технические характеристики радиоинтерфейсов РЭС
технологической сети связи DMR диапазона 160 МГц

Наименование параметра	Величина параметра		Единица измерения
Полосы частот	151,7125-154,0125 и 154,9875-156,0125		МГц
Шаг сетки частот	12,5		кГц
Тип доступа	TDMA		-
Модуляция	4FSK		-
Мощность передатчика, не более	15		Вт
Относительная нестабильность частоты передатчика, не хуже	$10 * 10^{-6}$		-
Максимальная погрешность частоты	$\pm 2\text{ppm}$		
Ширина полосы излучения передатчика на уровне -30 дБ, не более (при шаге сетки 12,5 кГц)	11,8		кГц
Сопоставление дибитных символов с отклонением 4FSK. Индекс девиации 0,27	Инф. биты		Символ
	0	1	+3
	0	0	+1
	1	0	-1
	1	1	-3
			Девиация 4FSK
			+1,944 кГц
			+0,648 кГц
			-0,648 кГц
			-1,944 кГц

Таблица 1.2 – Технические характеристики РЭС для системы GSM-R

Наименование параметра	Значение параметра	
	Абонентская станция (АС)	Базовая станция (БС)
Рабочий диапазон частот, МГц	ПРД 876-880 ПРМ 921-925	ПРД 921-925 ПРМ 876-880
Тип дуплекса	FDD	
Ширина канала, не более, МГц	3	
Ширина полосы поднесущей, кГц	15	
Минимальный уровень сигнал	92	
Мощность передатчика не более, дБм	33 (2 Вт)	44,8 (30 Вт)
Коэффициент усиления антенны, дБ	2,15	16,5
Чувствительность не хуже, дБм	-102	-104

Для сетей стандарта LTE был выделен частотный диапазон 1785-1805 МГц специально для нужд железнодорожного транспорта. С учетом защитных интервалов по 5 МГц с каждой стороны выделенного частотного диапазона, к использованию будет доступна лишь полоса шириной 10 МГц в диапазоне 1790-1800 МГц [2,4].

Основные характеристики радиоинтерфейсов РЭС в составе технологии организации ТСП в диапазоне 1800 МГц представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные технические характеристики РЭС технологической сети связи для LTE 1800 МГц в полосе радиочастот 1785-1805 МГц

Наименование параметра	Значение параметра	
	Абонентская станция (АС)	Базовая станция (БС)
Метод радиодоступа	ПРД 1790-1800 ПРМ 1790-1800	ПРД 1790-1800 ПРМ 1790-1800
Рабочий диапазон частот, МГц	10	
Ширина рабочей полосы канала, не более, МГц	15	
Тип дуплекса	TDD	
Мощность передатчика не более, дБм	23	46
Коэффициент усиления антенны, дБ	3	18
Чувствительность АС	-95 дБм/ 10 МГц -98 дБм/ 5 МГц	
Чувствительность БС	-100,5 дБм/ 10 МГц -103,5 дБм/ 5 МГц	

При анализе технических характеристик РЭС для сети LTE диапазона 1800 МГц можно сделать вывод о том, что система является наиболее перспективной для железнодорожного транспорта и наиболее реальной для проектирования.

При проектировании технологических сетей железнодорожной радиосвязи должны использоваться методики проектирования, включающие различные способы, алгоритмы и варианты построения многих аспектов, среди них: использование частотного ресурса, выбор оборудования для работы сети,

частотно-территориальное планирование, обеспечение электромагнитной совместимости и др. [5,63].

Многие методики были аналогично построены с учетом применения опыта проектирования технологических сетей железнодорожной радиосвязи стандарта GSM-R. При этом стандарт LTE отличается от стандарта GSM-R тем, что главным критерием успешной работы является обеспечение требуемой скорости передачи данных.

Именно из-за этой особенности некоторые методики не могут применяться для стандарта LTE. Одной из таких методик будет методика оптимизации использования частотного спектра [106].

Важно отметить, что помимо использования методик проектирования должны использоваться различные модели проектирования для специфических условий применения. Например, в случаях пересечения двух технологических сетей радиосвязи, работающих в одном диапазоне частот.

В данном случае использование опыта проектирования систем GSM-R не повлияет на разработку моделей для систем LTE ввиду применения иного типа дуплекса (TDD, в то время как в GSM-R – FDD). [82,124].

Помимо вышеупомянутых проблем, существует проблема возникновения эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях. Возникновение эффекта Доплера несет негативные последствия для работы всей системы:

1. Наличие межканальных помех из-за нарушения ортогональности поднесущих;
2. Ухудшение отношения сигнал/шум + помеха (SINR);
3. Ошибочный выбор схемы модуляции и потеря пропускной способности;
4. Потеря синхронизации и частый Handover;
5. Нарушение пространственной согласованности каналов и др.

Компенсация эффекта Доплера критически важна для обеспечения надежной, высокоскоростной и энергоэффективной работы сетей LTE,

особенно в условиях железнодорожного транспорта. Игнорирование этого явления приводит к деградации сигнала, снижению пропускной способности и ухудшению работы системы.

Перспективные технологические сети радиосвязи обеспечивают революционные возможности, такие как: высокую скорость и надежность передачи данных, низкие задержки управления и др.

Проектирование технологических сетей железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD требует специализированных методик и моделей, учитывающих жесткие требования и сложные условия распространения сигнала [101]. Применение современных подходов (использование MIMO, разработка новых способов компенсации эффекта Доплера и др.) позволит создать надежные и эффективные системы связи.

Таким образом, можно сформулировать **постановку задач** исследования:

1. Разработать и внедрить методику и модель временной синхронизации режимов работы БС при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на ВСЖМ, а также предложить новые способы эффективного использования частотного спектра [51];

2. Разработать обобщенную модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания, работающих в одном частотном диапазоне [108];

3. Предложить новый способ компенсации негативного воздействия эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях;

4. Предложить способы оптимизации существующих решений для технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD.

1.2 Системный анализ технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Определение системы и её основное предназначение.

Система технологической железнодорожной радиосвязи на базе стандарта LTE (Long-Term Evolution) с использованием дуплекса с временным разделением (TDD) в диапазоне 1800 МГц является одной из систем, используемых на железнодорожном транспорте. Среди них: DMR, GSM-R. При этом данная система не является мировым стандартом, а лишь его ответвлением.

Главная цель системы - обеспечение надежной, защищенной и непрерывной цифровой связи для управления движением поездов, координации работы персонала и повышения безопасности на железнодорожном транспорте.

1. Ключевые функции:

I. Голосовая связь: Индивидуальные и групповые вызовы (диспетчер-машинист, машинист-машинист, бригада поезда).

II. Передача данных. Для систем ЕСП (Единая сеть дорог) – передача служебной информации. Для перспективных систем ЖАТ (Железнодорожная автоматика и телемеханика) – передача критически важных данных для управления инфраструктурой (переезды, сигналы, централизация).

III. Видеонаблюдение в кабине и на объектах инфраструктуры.

IV. Передача диагностических данных с поезда (система телеметрии).

V. Является эволюционным развитием и будущей заменой системы GSM-R, обеспечивая поддержку всего спектра железнодорожных услуг следующего поколения.

2. Декомпозиция системы:

Систему можно разбить на следующие основные подсистемы:

I. Подсистема радиодоступа (E-UTRAN - Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network). В нее входят:

Абонентские терминалы (UE - User Equipment) - стационарные и носимые радиостанции у персонала, бортовые модули на локомотивах (включая модули для передачи данных телемеханики и видеонаблюдения);

Базовые станции (eNodeB - evolved Node B) - устанавливаются вдоль железнодорожного полотна для обеспечения непрерывного покрытия. Ключевая особенность – поддержка режима TDD (Time Division Duplex), что означает, что прием и передача данных происходят на одной частоте, но в разные промежутки времени.

II. Подсистема коммутации и управления (EPC - Evolved Packet Core). Состав:

MME (Mobility Management Entity) - управление мобильностью абонентов, сессиями, аутентификацией;

S-GW (Serving Gateway) - маршрутизация и пересылка пользовательских данных;

P-GW (Packet Data Network Gateway) - подключение к внешним сетям (интернет, корпоративные сети РЖД);

HSS (Home Subscriber Server) - центральная база данных абонентов, содержит информацию о профилях и подписках;

PCRF (Policy and Charging Rules Function) - управление политиками качества обслуживания (QoS) и тарификацией.

III. Подсистема управления и обслуживания (OSS/BSS - Operation/Business Support System) - системы для мониторинга работы сети, управления неисправностями, конфигурирования оборудования, биллинга.

IV. Подсистема железнодорожных приложений. В нее входят:

Серверы голосовой связи (IMS - IP Multimedia Subsystem) – предназначены для организации VoIP-звонков, групповых вызовов (GCSE), аварийных вызовов (eCall);

Серверы прикладных задач – выполняют интеграцию с системами АСУЖТ, ЖАТ, ЕСР.

V. Подсистема связи (Транспортная сеть) - оптоволоконные линии связи, проложенные вдоль путей, которые соединяют базовые станции с ядром сети (EPC).

Технологические сети железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD кратко можно представить следующим образом:

Система LTE-R (LTE-1800 TDD):

- Подсистема доступа (UE + eNodeB);

- Подсистема коммутации (EPC: MME, S-GW, P-GW, HSS);
- Подсистема управления (OSS/BSS);
- Подсистема приложений (IMS, Серверы ЖД услуг);
- Транспортная подсистема (Оптоволокно).

3. Синтез и взаимодействие

Рассмотрим ключевые процессы:

Установление голосового вызова (машинист -> диспетчер):

- I. Абонентское устройство (UE) на локомотиве подключается к ближайшей eNodeB.
- II. Запрос на установление вызова через IMS проходит через EPC.
- III. MME и HSS аутентифицируют абонента.
- IV. PCRF гарантирует, что вызову присваивается высший приоритет (QoS).
- V. IMS-сервер маршрутизирует вызов на рабочее место диспетчера.
- VI. При движении поезда система обеспечивает беспроводную передачу обслуживания (Handover) между eNodeB.

4. Передача данных телемеханики:

- I. Датчики на поезде передают данные бортовому LTE-модулю.
- II. Модуль отправляет пакеты данных через eNodeB в S-GW/P-GW.
- III. P-GW направляет трафик в защищенную сеть центров управления.
- IV. На всем пути следования обеспечивается строго заданная задержка (латентность) и надежность передачи, критически важная для систем безопасности.

5. Анализ ключевых особенностей и связей (TDD, приоритизация, надежность)

Использование TDD позволяет гибко распределять пропускную способность канала между нисходящим (DL) и восходящим (UL) потоками в зависимости от потребностей (например, больше ресурсов под видео с камеры на поезде (UL) или под карту для машиниста (DL)).

Не требует парных частотных диапазонов, что упрощает планирование частотного ресурса. Система должна отличать критический трафик (сигнал "стоп", данные ЖАТ) от не критического (обновление ПО). Для этого используются механизмы QoS на всех уровнях сети, обеспечивая приоритетный доступ к ресурсам.

Все ключевые элементы EPC (MME, S/P-GW) дублируются. Специальные схемы развертывания и антенны, ориентированные вдоль пути, обеспечивают непрерывное покрытие.

6. Управление системой

Управление осуществляется через подсистему OSS/BSS, в которой предусмотрены следующие функции:

Функция планирования - размещение базовых станций, планирование частотного ресурса;

Функция контроля - мониторинг состояния всех элементов сети, трафика, качества связи в реальном времени;

Функция регулирования - перераспределение ресурсов, перезагрузка оборудования, обработка аварийных ситуаций;

Функция анализа - сбор и анализ статистики для дальнейшего развития и оптимизации сети.

Перспективы развития. LTE-R является логичным шагом на пути к FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), которая будет использовать технологические принципы 5G для реализации самых сложных сценариев (например, движение поездов с малым интервалом, "виртуальная сцепка"). LTE-R дает развитие в сторону полностью IP-ориентированной сети, где голос – лишь одна из многих услуг.

Проведенный системный анализ показывает, что LTE-1800 TDD является сложной, многоуровневой, целостной системой, специально спроектированной для выполнения критически важных задач железнодорожного транспорта. Её ключевые особенности — гибкость TDD, мощная подсистема управления QoS, высокая надежность и ориентация на пакетную передачу данных — делают её фундаментом для цифровизации железной дороги и перехода к интеллектуальным системам управления движением будущего.

1.3 Анализ актуальных задач проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Как уже было отмечено ранее, существует несколько актуальных задач проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD [43].

1. Разработка методики использования частотного ресурса при проектировании технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD.

Данная методика необходима для проектирования TSP стандарта LTE-1800 TDD поскольку более ранние цифровые системы не предполагали вариантов использования имеющегося частотного спектра и проектировались по шаблону. Теперь следует четко классифицировать варианты использования частотного ресурса для оптимальной работы системы.

Также из-за ограниченного частотного ресурса требуется разработать вариант использования частотного ресурса наиболее подходящий под условия электромагнитной совместимости, который также должен войти в разрабатываемую методику.

2. Разработать обобщенную модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания, работающих в одном частотном диапазоне [103].

Так как прежде таких ситуаций, когда две сети одного диапазона имеют места пересечений, не предполагалось, требуется разработать отдельный способ для каждого варианта используемой ширины полосы частоты, а именно для каналов шириной 1.4 МГц, 3 МГц, 5 МГц и 10 МГц.

Главным показателем работоспособности модели будет являться требуемая скорость передачи данных при взаимном влиянии 4 базовых станций на рассматриваемом участке. В случаях, когда требования по скорости не будут удовлетворены, необходимо будет использовать иную модель проектирования из комплекса моделей, а также будет необходима перенастройка базовых станций [103].

Также необходимо усовершенствовать расчеты для создания модели проектирования [103].

Помимо скорости передачи данных, важным аспектом будет являться электромагнитная совместимость. Она имеет наибольшую степень влияния на пропускную способность системы и поэтому ее учет немаловажен при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD в целом [52].

3. Разработать научно-технические предложения по проектированию технологических сетей радиосвязи и снижению негативного воздействия эффекта Доплера.

При анализе существующих способов компенсации негативного воздействия эффекта Доплера было выявлено, что существующие способы имеют ряд существенных недостатков в области применения их для высокоскоростного железнодорожного транспорта. В частности, может дополнительно расходоваться каналный ресурс LTE. Поскольку данный ресурс ограничен по Решению ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г., необходимо предложить альтернативный способ решения проблемы негативного влияния эффекта Доплера на объекты железнодорожного транспорта.

В виду сложности проектирования радиосетей стандарта LTE-1800 TDD необходимо несколько упростить задачу выбора модели по распространению радиоволн.

Данная задача может быть решена путем внедрения какого-либо критерия, который позволит оптимизировать выбор модели распространения радиоволн для диапазона 1785-1805 МГц стандарта LTE.

Необходимо предложить конструктивный способ упрощения задач проектирования TCP LTE-1800 TDD с применением усовершенствованного оборудования или использованием оптимальных способов проектирования, которые позволят улучшить некоторые показатели, критичные для работоспособности и надежности технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD.

1.4 Анализ существующих методов, способов и моделей проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Радиотехнические системы, предназначенные для передачи информации (сообщений), служат для обмена данными на расстоянии посредством электромагнитных колебаний. Сюда относятся системы связи, радиовещания и телевидения. Иными словами, в данном контексте радиотехническую систему правомерно рассматривать как разновидность транспортной системы [21, 133].

В настоящее время при разработке новых радиотехнических систем критически важно понимать их устройство и внутренние взаимосвязи. Невозможно просто разработать и внедрить систему без предварительного тестирования, расчёта сетевой нагрузки, оценки пропускной способности, настройки оборудования и компонентов, на которых будет функционировать создаваемая система. Необходимо чётко представлять всю концепцию системы — от момента зарождения идеи до полного прекращения её эксплуатации. Для этого, прежде всего, требуется провести анализ жизненного цикла системы и определить наиболее существенные и ключевые этапы применительно к конкретным условиям, в которых система будет создаваться и в дальнейшем использоваться [21, 22].



Рисунок 1.4.1 – Модель жизненного цикла транспортной системы

На рисунке 1.4.1 приведена типовая модель жизненного цикла транспортной системы. Все этапы можно свести к следующим группам: 1) выявление угроз и оценка сопряжённых с ними рисков; 2) воплощение системы сначала в проектной документации, затем в виде аппаратно-программного комплекса; 3) использование системы по прямому назначению и её вывод из эксплуатации. Эти группы фиксируют, кто отвечает за безопасность системы: заказчик — за начальные этапы, подрядчики (проектировщики и изготовители) — за создание, заказчик — снова за эксплуатацию и техническое обслуживание. На каждом этапе жизненного цикла необходимо решать задачи верификации (проверка готовности перейти к следующему этапу) и валидации (проверка того, насколько система реально способна соответствовать требованиям по назначению) [21, 23].

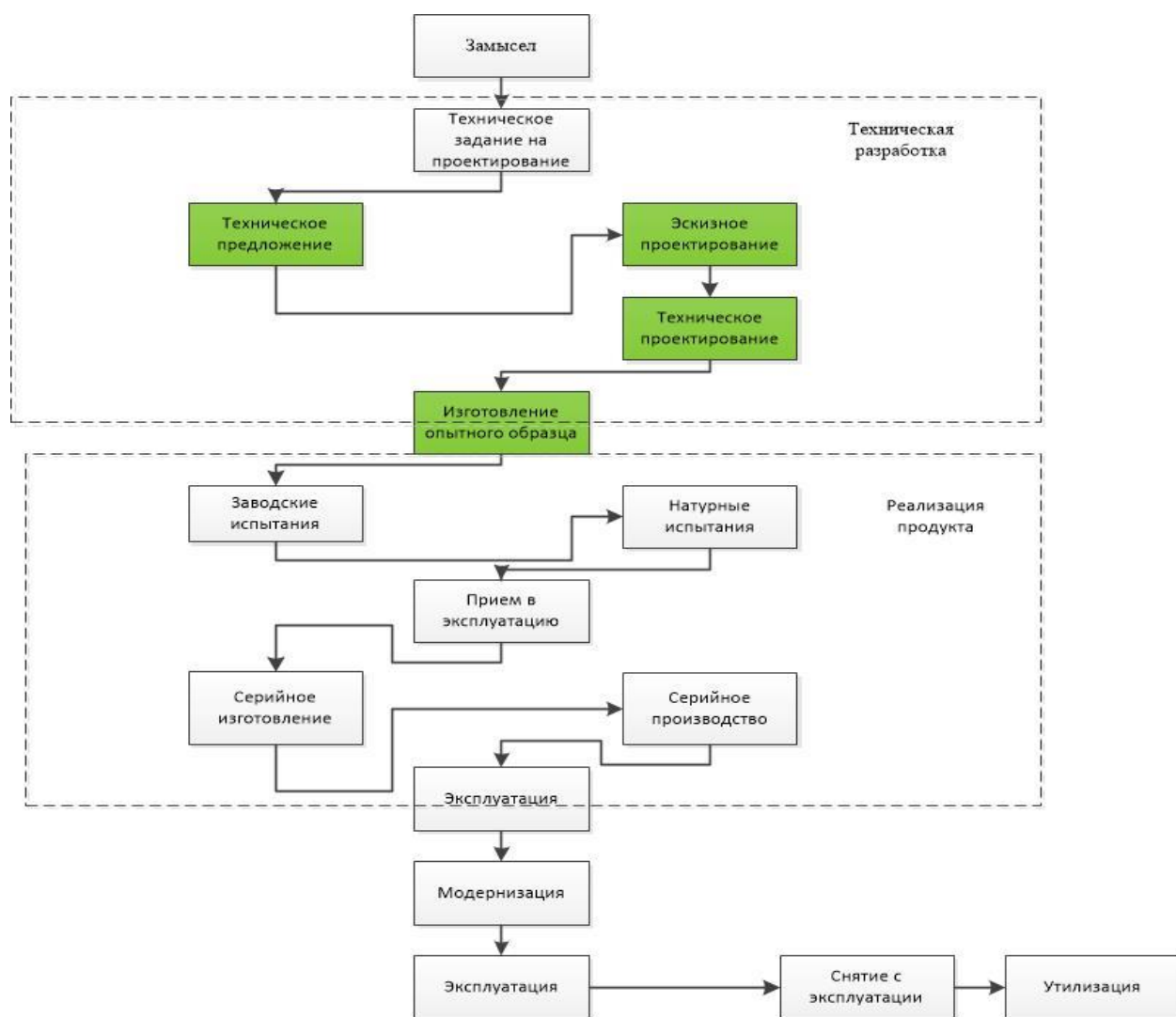


Рисунок 1.4.2 – Модель жизненного цикла радиотехнической системы

С позиции специфики проектирования технологических сетей радиосвязи и создания новой радиотехнической системы, наиболее значимыми являются этапы: техническое предложение, эскизное проектирование, техническое проектирование, изготовление опытного образца (рис. 1.4.2). Остальные этапы жизненного цикла с точки зрения проектирования технологических сетей радиосвязи либо менее важны, либо логически вытекают из перечисленных ключевых этапов [24, 38].

На этапе технического предложения, опираясь на техническое задание (ТЗ), уточняется постановка задачи и детализируются требования заказчика. Здесь же выполняются все необходимые системотехнические расчёты, подтверждающие выполнимость требований ТЗ с учётом имеющихся ограничений (стандарты, международные соглашения, условия размещения и эксплуатации, технические и экономические ресурсы и т.п.). Завершается данный этап созданием документа под названием «Техническое предложение».

Системотехнические расчёты — это разработка структурной схемы проектируемой системы и всех необходимых вычислений по этой схеме. Такие расчёты ведутся на основе системообразующих уравнений, т.е. уравнений, связывающих основные характеристики системы в целом. К числу системообразующих относятся основное уравнение радиосвязи (уравнение дальности в радиолокации) и другие. Системотехнические расчёты должны проводиться с учётом возможных ограничений, в роли которых могут выступать действующие стандарты и нормы [21].

В данном разделе производится анализ исходных данных, устанавливается их полнота, непротиворечивость и осуществимость. Кроме того, в рамках этого раздела ведётся поиск прототипов — то есть аналогичных технических решений, которые, возможно, отличаются техническими характеристиками, но могут быть использованы при условии достаточности исходных данных. В этом же разделе осуществляется поиск возможных путей решения поставленной задачи: рассматриваются варианты структурных схем, варианты использования системообразующих соотношений и т.д.

На этапе **эскизного проектирования** анализируются все возможные способы решения задачи с оценкой их приемлемости по техническим, экономическим, технологическим и прочим соображениям. Вырабатывается один или несколько критериев оценки, на основании которых выбирается оптимальная система. Проводятся расчёты технических характеристик системы в целом и её структурных узлов с применением системообразующих уравнений.

Начало этапа эскизного проектирования связано с выбором метода проектирования. Например, если на этапе технического предложения при анализе имеющихся прототипов выяснится, что уже существует система того же назначения с характеристиками, близкими к проектируемой, и если есть возможность воспользоваться готовой разработкой (юридическая, наличие всей требуемой информации и т.д.), то проектирование целесообразно вести методом экстраполяции. Таким образом, метод экстраполяции предполагает создание новой системы на основе уже существующей.

Результат этапа - эскизный проект, дающий общее представление о системе и принципе её действия.

При согласовании результатов проектирования структурных узлов в некоторых случаях может возникнуть необходимость вернуться на стадию формирования ТЗ на разработку.

На этапе **технического проектирования** проводится более углублённая разработка структурной и функциональных схем, определяются конкретные требования к каждому структурному и функциональному узлу, разрабатываются принципиальные схемы устройств, осуществляются поузловое и цельное макетирование отдельных узлов и испытания макетов.

Результатом данного этапа является технический проект — комплект конструкторских документов, содержащих окончательные схемные и конструкторские решения, а также разработанные технологические приёмы и технологическую оснастку, то есть всю необходимую документацию для организации изготовления опытного образца.

Далее осуществляется **изготовление опытного образца**, причем, как правило, на том предприятии, где предполагается серийное производство, после чего проводятся заводские испытания.

Правильная оценка данных этапов позволяет создать наиболее жизнеспособную модель радиотехнической системы, которая будет отвечать требованиям и специфике цифровой технологической радиосвязи. Именно поэтому всегда следует уделять большое внимание жизненному циклу транспортной системы. Радиотехнические системы, как и многие другие, входят в комплекс транспортных систем. Детальное изложение расчётов и обоснований принимаемых технических решений помогает проникнуться физическим смыслом действия проектируемых систем, понять суть системного подхода к выбору, обоснованию и расчёту технических характеристик радиотехнической системы по заданному набору параметров во всём их многообразии и противоречивости требований. В процессе жизненного цикла целесообразность, или практическая достижимость целей создания системы, сначала возрастает, последовательно проходя периоды становления и развития, а затем снижается, проходя периоды регресса и модернизации. В ходе модернизации какое-то время удаётся поднимать целесообразность до приемлемого уровня, но затем система настолько устаревает, что затраты на модернизацию дают слишком малый эффект, и система гибнет (снимается с эксплуатации и утилизируется). Следовательно, задача анализа жизненного цикла и выделения этапов, наиболее значимых для построения новой технологической сети радиосвязи, является основополагающей при изучении вопросов проектирования технологических сетей радиосвязи.

Системы DMR, GSM-R, TETRA

В настоящее время в качестве технологических сетей радиосвязи на железнодорожном транспорте эксплуатируются три системы: GSM-R, TETRA и DMR [132]. Среди экспертов нет единого мнения о том, какая из них наиболее предпочтительна для использования в сетях технологической цифровой радиосвязи.

Стоимость оборудования зачастую играет решающую роль при формировании проекта. Зона покрытия базовой станции TETRA обычно в два-три раза меньше, чем у DMR, поэтому для охвата той же территории системе TETRA потребуется больше сайтов. В итоге средняя система TETRA оказывается в 3-5 раз дороже варианта на DMR для одного и того же объекта [15, 25, 30, 53].

DMR же безоговорочно обеспечивает 6.25 кГц на канал. К системам DMR предъявляются более жёсткие требования к надёжности связи на большой площади покрытия, при этом меньше внимания уделяется абонентской ёмкости.

TETRA — открытый стандарт, разработанный Европейским институтом стандартов систем телекоммуникаций (ETSI Standard 300 392). Его основной целью было описание серии открытых интерфейсов, которые позволяют независимым производителям разрабатывать совместимое базовое и абонентское оборудование [53].

В качестве типа цифровой модуляции выбран $\pi/4$ DQPSK (дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция), относящаяся к модуляции с непостоянной огибающей (not constant-envelope); для передачи сигнала с таким типом требуются устройства с линейной характеристикой. В противном случае возникают боковые полосы, создающие помехи соседним каналам. Максимальная скорость передачи данных — 36 кбит/сек, распределённых по четырём временным слотам на каждой несущей.

Речевой сигнал сжимается вокодером ACELP, выходной поток данных составляет 4.567 кбит/сек. После коррекции с помощью FEC скорость передачи возрастает до 7.2 кбит/сек — это информационная ёмкость одного временного слота. Полезная нагрузка в канале может варьироваться от 2.4 кбит/сек для трафика с высокой степенью защиты в одном слоте до 28.8 кбит/сек для незащищённых данных при полностью занятом канале.

Система TETRA, как уже отмечалось, является транкинговой и отличается от конвенциональных систем прежде всего автоматическим

распределением ограниченного числа каналов среди большого количества пользователей.

Бесшовное переключение между базовыми станциями (handover) требует их размещения вплотную друг к другу с перекрытием зон. Магистральная сеть системы должна иметь достаточную полосу пропускания для обеспечения высокой скорости передачи данных и сигнализации, а также быстродействующее коммутационное оборудование [53].

Стандарт TETRA предусматривает:

1. расстояние между БС до 83 км;
2. большее сжатие кодека;
3. большее количество модуляторов;
4. увеличение скорости передачи до 500 кбит/сек в полосе 150 кГц;
5. взаимодействие с мобильными телесистемами 2.5G/3G.

В системах TETRA необходимо постоянное присутствие управляющего канала. Если уровень сигнала от базовой станции падает до определённого порога, мобильный терминал начинает искать другую БС с более сильным сигналом. Уровень порога может зависеть от многих факторов: требуемого сервиса, характера окружающего ландшафта, ожидаемой скорости транспортного средства и т.д. Типовое значение порога в условиях малой застройки устанавливается на уровне 18 дБ выше чувствительности и обычно составляет -87 дБм [53].

DMR – открытый стандарт (ETSI TS 102 361) который был разработан рабочей группой ведущих специалистов компаний-производителей радиокоммуникационного оборудования. При этом данный стандарт должен был обеспечить плавный переход от аналоговых систем к цифровым [53].

Все оборудование DMR — репитеры и радиостанции — может работать как в цифровом, так и в аналоговом режимах, сохраняя характеристики радиоинтерфейсов:

1. традиционной голосовой ЧМ связи с канальной сигнализацией
2. голосовой связи и передачи данных с цифровой модуляцией 4FSK

3. с максимальной скоростью 9600 кбит/сек.

Переключение между режимами происходит автоматически: ретранслятор самостоятельно определяет тип принимаемого сигнала — аналоговый или цифровой — и на основе этого меняет свои настройки. (Рисунок 1.4.3).

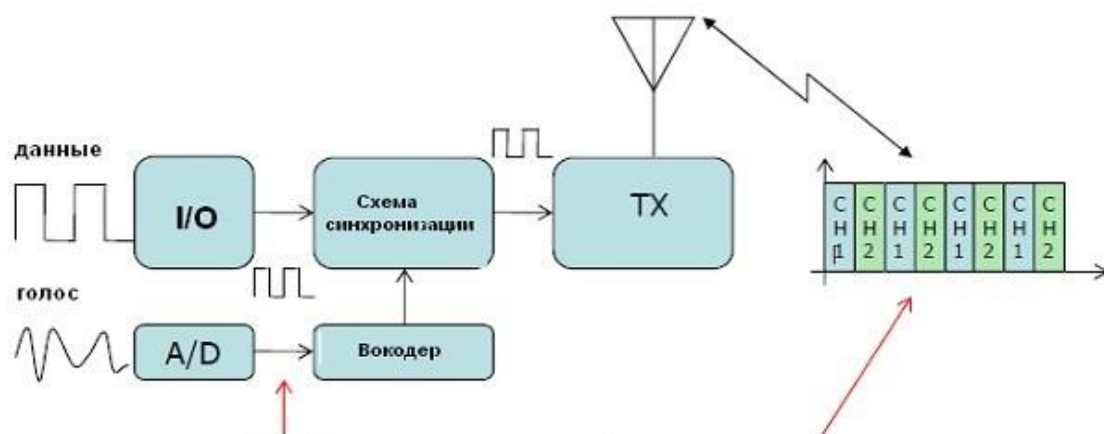


Рисунок 1.4.3 – Обработка голоса и данных и формирование сигнала

Стандарт DMR обеспечивает обработку как поступающих данных, так и речевого трафика. Голосовой сигнал оцифровывается, сжимается и разбивается на пакеты. Передача производится по двум временным слотам TDMA (Time division Multiple Access), в частотном канале шириной 12.5кГц. Совокупность временных слотов одного порядка формирует отдельный независимый логический канал. Таким образом, в одной несущей частоте в DMR информация может передаваться одновременно по двум логическим каналам. (Рисунок 1.4.4).

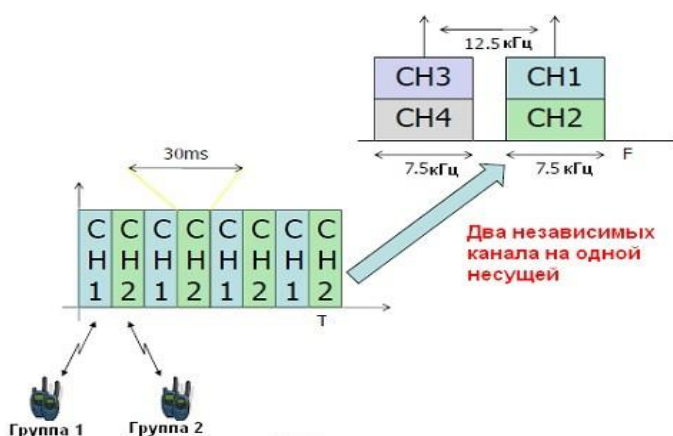


Рисунок 1.4.4 – Слоты TDMA и частотные каналы

Системы DMR могут сосуществовать с обычными аналоговыми системами, расположенными на соседних каналах без взаимного влияния.

Спектральная эффективность составляет 6.25 кГц на канал, как и в системах TETRA, что вдвое выше, чем в аналоговых системах. Однако при работе в прямом режиме без ретранслятора отсутствует возможность межслотовой синхронизации, и это преимущество теряется [122].

В DMR применяется модуляция типа FSK (4-уровневая частотная манипуляция), оптимально подходящая для данного стандарта. Каждая пара бит информации определяет частотный сдвиг относительно несущей частоты [89].

Обеспечиваемая спектральная эффективность определяется шириной полосы на один коммуникационный канал, коэффициентом повторного использования частот (frequency re-use factor), способом доступа к каналу и др.

DMR имеет более высокую спектральную эффективность благодаря отсутствию управляющего канала, который отнимает часть ресурса под протокол [122].

Систему TETRA имеет смысл устанавливать в целях обеспечения высокотехнологичной связью на небольших территориях с высокой плотностью абонентов. Если таких задач не стоит, то предпочтительнее развернуть систему DMR [53].

GSM-R

Стандарт GSM был принят Международным союзом железных дорог (МСЖД) в 1993 году в качестве базового для железнодорожной системы цифровой связи. Однако поскольку данный стандарт не обладал сервисами, необходимыми для профессиональных систем, в 1993 году МСЖД направил в ETSI запрос на реализацию дополнительных свойств ASCII. Они включают расширенные многоуровневые приоритеты, резервирование, услуги широковещательного речевого оповещения и речевого группового вызова. Наряду с ASCII для удовлетворения требований железных дорог к услугам поездной и маневровой радиосвязи, передачи данных для управления

движением поездов, телеуправления и т.д. должны быть реализованы функциональная адресация, адресация в зависимости от текущего местоположения и обработка вызовов с высоким приоритетом [28, 29, 83].

За счет применения полос шириной 4 МГц в диапазонах 876—880 МГц для нисходящей и 921—925 МГц для восходящей связи на европейском уровне удастся удовлетворить потребности железнодорожных служб и освободить занятые ими ранее диапазоны. Система радиосвязи GSM-Railway (GSM-R) разработана на основе сотового стандарта GSM [20].

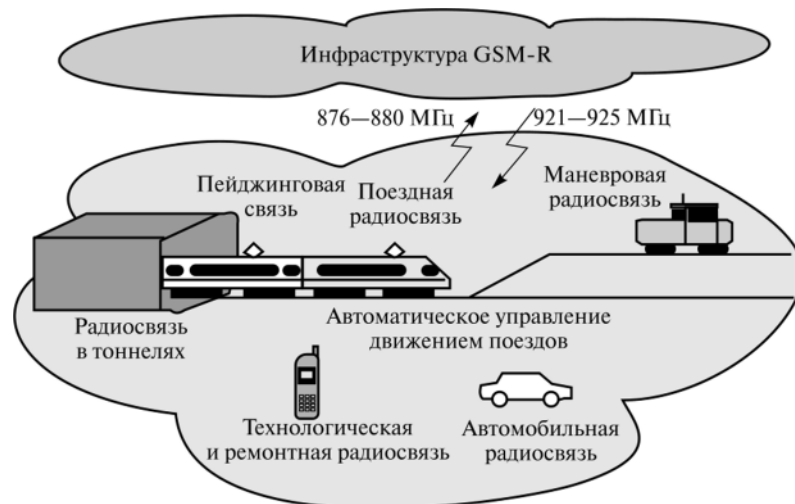


Рисунок 1.4.5 – Инфраструктура GSM

Создание системы GSM-R во многом обусловлено результатами работ в рамках МСЖД над проектом создания ERTMS/ETCS — Европейской системы управления движением поездов и обеспечения его безопасности. Уровни 3 и 4 системы предусматривают использование сети радиосвязи на основе GSM-R. В системе ERTMS/ETCS предусмотрены четыре уровня, позволяющие реализовывать различные эксплуатационные программы в зависимости от степени оснащённости линии напольным оборудованием.

Уровень 1 обеспечивает регулирование скорости поезда в зависимости от передаваемых с пути на поезд данных, сформированных на основе показаний напольных сигналов.

Уровень 2 представляет собой законченную систему управления движением поездов и обеспечения безопасности движения без использования напольных сигналов, но с сохранением жесткого деления линии на блок-

участки. Напольные устройства определяют местоположение поездов и контролируют их полносоставность [20].

Уровни 3 и 4 соответствуют законченной системе управления движением поездов и обеспечения безопасности движения без использования напольных сигналов и с подвижными блок-участками. Определение местоположения поезда и контроль его полносоставности осуществляется бортовыми устройствами.

Все уровни совместимы друг с другом как в функциональном, так и в техническом отношении, т.е. поезд, оборудованный системой более низкого уровня, может обращаться на линии, оборудованной системой более высокого уровня. Система уровней 1 и 2 может быть доведена до уровней 3 и 4 путем добавления модулей расширения [20,78,81].

Систему GSM-R можно разделить на подсистемы: бортовая; стационарная; центр управления.

Задачи, решаемые подсистемами:

1. центр управления берет на себя управление маршрутами и обеспечивает поездам бесконфликтное назначение участков пути (регулирование порядка следования поездов);

2. бортовые устройства выдают задания стационарным устройствам в соответствии с назначенными им маршрутами и контролируют движение поездов;

3. стационарные устройства выполняют в свою очередь функции управления и контроля стрелок, подходов к пассажирским платформам и переездам.

Каждая из подсистем имеет свой доступ к сети радиосвязи и способна взаимодействовать с другими подсистемами. Распределение функций обеспечения безопасности между несколькими подсистемами потребовало формирования единой базы данных [20].

Сеть GSM-R состоит из сот, расположенных вдоль железной дороги или на территории станции. Каждая сота оснащается одним или несколькими (в

зависимости от нагрузки) приёмопередатчиками. Каждый контроллер базовой станции привязан к определённым номерам сот. Контроллеры базовых станций соединены с центром управления MSC, который устанавливает внешние соединения и обеспечивает интерфейс с другими сетями [14, 36].

На железнодорожном транспорте распространение радиосигналов происходит в особых условиях: переменная скорость поездов, движение между опорами контактной сети, пересечённая местность, тоннели, мосты. Это может приводить к потерям связи из-за эффекта Доплера, многолучевого распространения, теневого эффекта. В результате отражений от близких препятствий, что особенно характерно для железной дороги, радиосигнал на входе приёмной антенны подвижной станции представляет собой сумму многих сигналов с разными амплитудами и фазами. Эффект сложения может быть разным — от взаимного ослабления до резонанса. При высоких скоростях движения поезда также возможны кратковременные пропадания связи. При низких скоростях длительность потерь может быть очень большой. Например, при скорости 30 км/ч время потери может достигать 8 мс, что для стандартной скорости передачи в GSM означает приём около 70 ошибочных бит. Для компенсации этих явлений в GSM применяются перемежение и блочное кодирование [144].

Используемая модуляция — GMSK (гауссовская манипуляция с минимальным сдвигом). GSM-R — это TDMA (множественный доступ с временным разделением). Передача данных осуществляется периодическими кадрами TDMA (с периодом 4,615 мс) для каждой несущей частоты (физического канала). Каждый кадр TDMA разделён на 8 временных интервалов, называемых логическими каналами (длиной 577 мкс каждый), несущих 148 бит информации.

GSM-R - предоставляет такие функции, как групповые вызовы (VGCS), голосового вещания (VBS), соединений на основе местоположения и упреждения вызовов в случае возникновения чрезвычайной ситуации. Это

поддерживает такие приложения, как отслеживание грузов, видеонаблюдение в поездах и на станциях, а также службы информирования пассажиров.

Расстояние между базовыми станциями составляет 7–15 км (4,3–9,3 мили). Это обеспечивает высокую степень резервирования, а также более высокую доступность и надёжность [144–146, 148].

Важнейшим эффектом от использования сети GSM-R является увеличение пропускной способности пути. В настоящее время расстояние между поездами определяется заданным числом свободных блоков (Fixed block signalling). В сети GSM-R реализован новый метод CBTC (Communication Based Train Control): расстояние между поездами определяется заданным числом перемещающихся блоков (Moving block signalling), что позволяет (1) управлять безопасным расстоянием между следующими друг за другом поездами и (2) увеличивать пропускную способность путей до 40%.

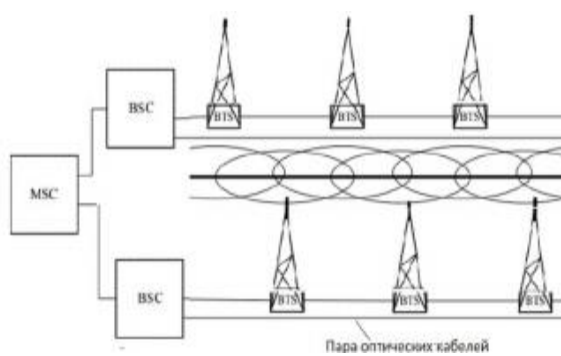


Рисунок 1.4.6. – Новый метод CBTC

На рисунке 1.4.6 показаны три основных узла мобильной сети GSM-R (в сети GSM они выполняют те же функции):

1. BTS - Базовая приемо-передающая станция обеспечивает радиосвязь в определенной зоне;

2. BSC - Контроллер базовой станции выполняет множество функций: управление распределением каналов; контроль соединения и регулировка их очередности; модуляция и демодуляция сигналов; кодирование и декодирование сообщений; кодирование речи; адаптацию скорости передачи речи, данных и сигналов вызова; управление очередностью передачи сообщений персонального вызова;

3. MSC - Центральный коммутатор подвижной связи (аналог крупного телефонного узла) обслуживает группу зон и обеспечивает все виды соединений с мобильными станциями.

Таким образом, были проанализированы существующие в настоящее время системы цифровой технологической радиосвязи разных поколений [147]. Их анализ является важным пунктом при создании нового поколения технологических сетей радиосвязи. На сегодняшний день данные системы являются устаревшими и не могут предоставить те функции, которые наиболее востребованы сейчас. Но и списывать их со счетов нельзя — резерв всегда необходим.

Методы множественного доступа в радиоинтерфейсе LTE

Главными отличительными особенностями LTE являются усовершенствованная сетевая архитектура SAE (System Architecture Evolution), новая технология радиодоступа, основанная на мультиплексировании с ортогональным частотным разделением каналов OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), и технология мультиантенных систем MIMO (Multi-Input Multi-Output). [58,80].

Сетевая архитектура SAE обеспечивает более высокие скорости передачи данных, сравнительно малые временные задержки, универсальность по отношению к различным системам доступа и полностью ориентирована на передачу данных, в том числе и речи, по IP-протоколам. Сетевая архитектура отличается меньшим числом сетевых элементов и, как следствие, значительным уменьшением времени задержки пакетов в сети. Впоследствии SAE стали называть развитой пакетной системой EPS (Evolved Packet System) [75,91].

Составными элементами EPS являются усовершенствованная сеть радиодоступа E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) и опорная IP-сеть EPC (Evolved Packet Core). Опорная сеть EPC обеспечивает гибкий доступ различных радиосетей как стандартов 3GPP (UMTS/HSPA, Femtocell, LTE, WLAN 3GPP), так и других стандартов non-3GPP [65,66].

Сеть радиодоступа E-UTRAN содержит новые сетевые элементы: в плоскости пользователя (User Plane) – базовую станцию eNodeB (Evolved Node B – eNB) и шлюз SGW (Serving Gateway); в плоскости управления (Control Plane) – узел управления мобильностью MME (Mobility Management Entity). Базовые станции связаны друг с другом в радиосети посредством интерфейса X2 [12,92].

Радиоинтерфейс системы LTE определен в спецификациях и технических отчетах 3GPP серии 36 (Rel'8). Здесь же определены основные требования к радиоинтерфейсу с учетом новых решений [126,127,128,130].

В LTE в основе методов множественного доступа лежит ортогональное многочастотное мультиплексирование OFDM, однако в нисходящем и восходящем каналах применение OFDM различно. В нисходящем канале эта технология используется не только для передачи сигнала, но и для организации множественного доступа (OFDMA), т.е. для мультиплексирования абонентских каналов. При этом OFDM-символы передаются параллельно, а в восходящих каналах при SC-FDMA- последовательно. Также отмечалось, что такое решение обеспечивает меньшее отношение максимального и среднего уровней мощности в передатчике по сравнению с обычной модуляцией OFDM, в результате чего повышается энергетическая эффективность абонентских устройств и упрощается их конструкция, поскольку существенно снижаются требования к усилительным элементам передатчика [93,94,95].

OFDMA

Метод радиодоступа OFDMA сочетает в себе ортогональное многочастотное (OFDM) и временное (TDMA) мультиплексирование каналов, при котором каждый пользовательский канал, состоящий из совокупности параллельно излучаемых поднесущих частот, последовательно занимает определенную часть спектра на своем выделенном временном интервале. При этом количество поднесущих частот в каждом пользовательском канале может динамически изменяться [56,100].

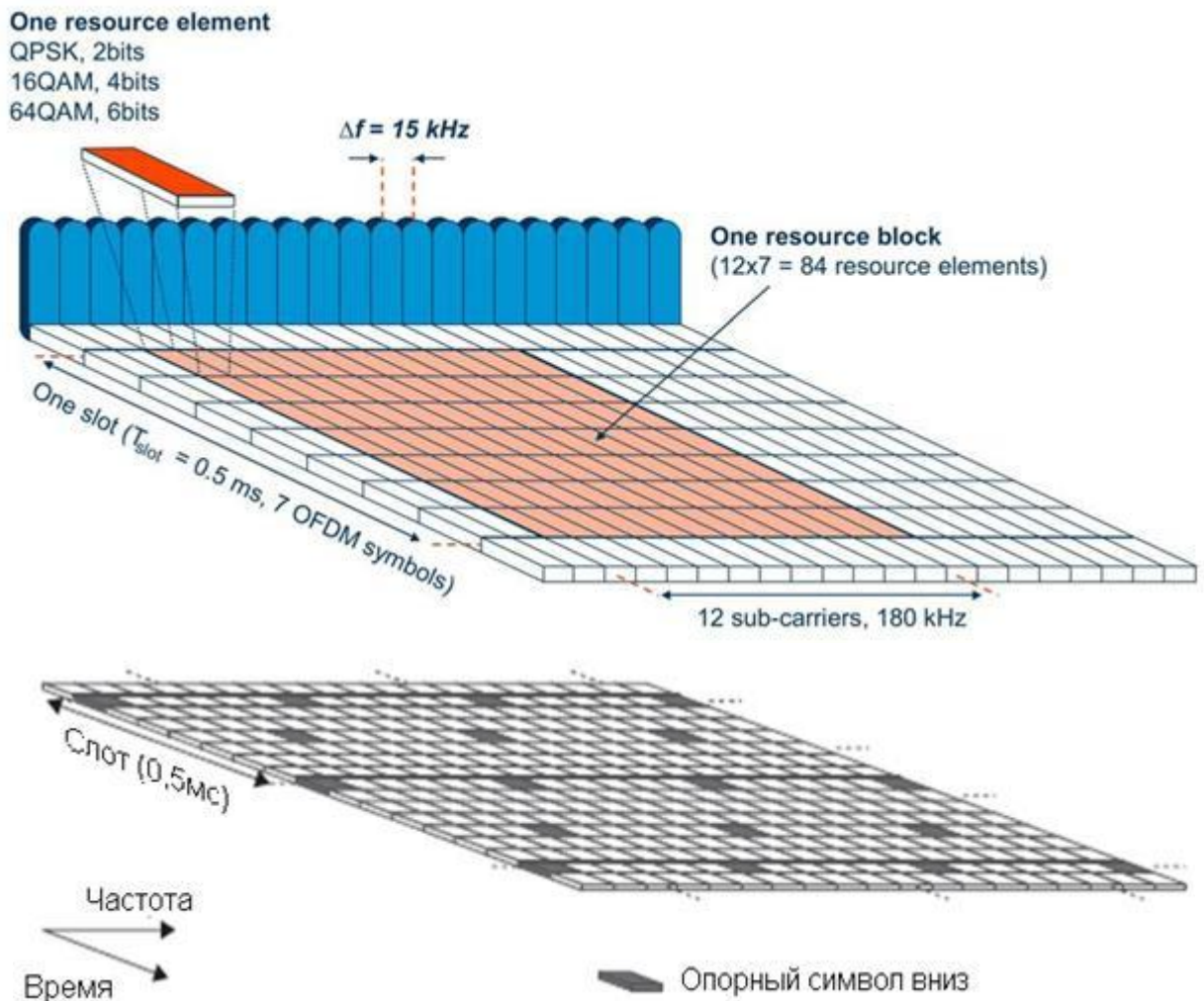


Рисунок 1.4.7 – Распределение OFDMA

Существующий каналный ресурс состоит из **ресурсных блоков (РБ)**, каждый из которых включает 12 расположенных рядом поднесущих, занимающих полосу 180 кГц и одного временного слота (7 или 6 OFDM-символов на интервале 0,5 мс). Каждый OFDM-символ представляет собой **ресурсный элемент (РЭ)**, параметрами которого являются 2 значения: $\{k, l\}$, где k - номер поднесущей, а l - номер символа в ресурсном блоке. Во время передачи по линии «вниз» в каждом блоке находится $12 \times 7 = 84$ ресурсных элементов, некоторые из которых применяют для отправки опорных символов (Рисунок 1.4.7). Выделяемый каналный ресурс определяют количеством ресурсных блоков или групп ресурсных блоков [52,125].

В LTE принята стандартная ширина спектра каждой поднесущей, равная $\Delta f = 15 \text{ кГц}$ (таков же и шаг между поднесущими частотами), что

соответствует длительности OFDMA-символа $T_s = 66.7$ мкс. Таким образом, каждый модулированный символ передаваемых данных занимает полосу 15 кГц в течение всего периода OFDMA-символа. В начале следующего OFDMA-символа вставляется защитный интервал, содержащий циклический префикс (CP). Благодаря параллельной передаче, символы данных имеют ту же длину, что и OFDMA-символы.

Значение циклического префикса TCP равно $160T_s \approx 5.2$ мкс перед первым символом и $144T_s \approx 4.7$ мкс- перед остальными символами. Возможен также вариант применения расширенного циклического префикса $512T_s \approx 16.7$ мкс. Пример структуры слота на физическом уровне представлен на рисунке 1.4.8 [52].

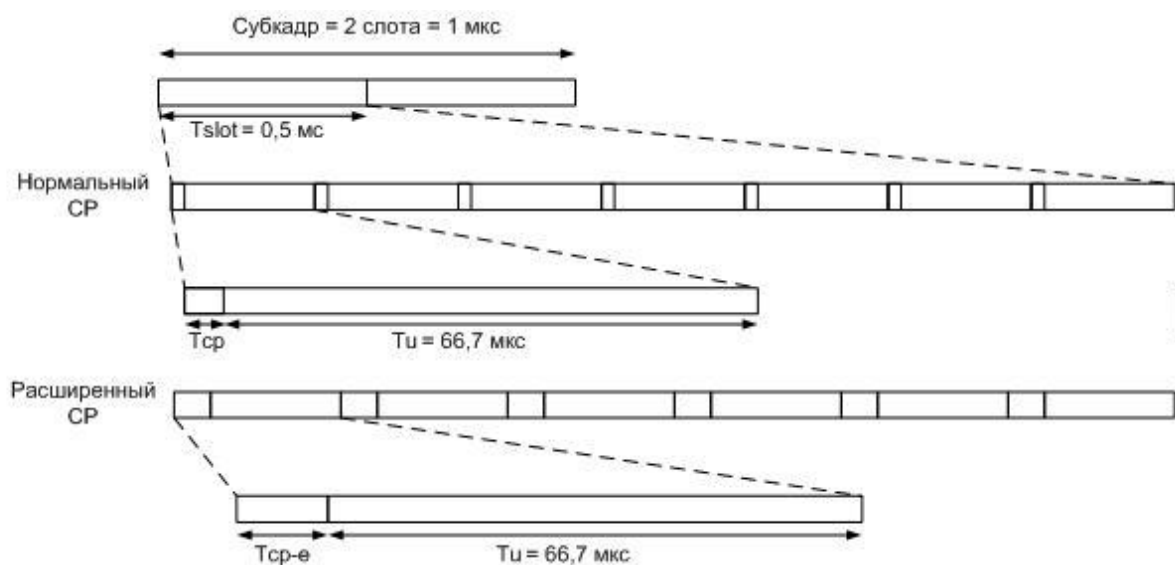


Рисунок 1.4.8 – Структура слота на физическом уровне

Метод OFDMA позволяет закреплять отдельные поднесущие частоты за разными пользователями. В зависимости от требуемой скорости передачи данных планировщик базовой станции назначает каждому пользователю на время сеанса связи несколько наборов ресурсных элементов с соответствующим количеством поднесущих частот и их распределением в частотной области радиоканала. Расписание о таких назначениях передается по служебным нисходящим каналам. Упомянутый набор ресурсных элементов называют в LTE ресурсным блоком.

Таким образом, при OFDMA каждому пользователю назначается своя ортогональная частотная область требуемого размера в пределах организованного частотного канала соответствующей ширины. Этим и обеспечивается разделение пользовательских каналов в LTE в нисходящем направлении.

SC-FDMA

Необходимость снижения высокого уровня пик-фактора PAR в абонентском терминале заставила отказаться от метода OFDMA в восходящих каналах LTE. В стандартах 3GPP была принята для этого случая новая технология радиодоступа SC-FDMA. По своей сути радиодоступ по этой технологии осуществляется подобно методу OFDMA также на базе частотного разделения каналов (FDMA), но имеет принципиальное отличие. Это отличие состоит в том, что на таком же интервале длительности SC-FDMA-символа, что и при OFDMA ($T_s = 66.7$ мкс), модулированные символы данных передаются не одновременно на параллельных поднесущих частотах, а последовательно. Это означает следующее. Во-первых, как и при OFDMA, ширина спектра одной поднесущей при SC-FDMA составляет 15 кГц. Во-вторых, длина модулированных символов данных должна быть в M раз короче длительности интервала SC-FDMA-символа, а скорость их следования - в M раз выше, здесь M -количество модулированных символов данных, передаваемых на интервале длительности SC-FDMA-символа. В-третьих, для передачи коротких символов требуется более широкая полоса пропускания, т.е. каждый модулированный символ данных занимает всю требуемую полосу частот $M \times 15$ кГц и передается одновременно на всех M поднесущих частотах. Пример распределения канального ресурса приведен на Рисунке 1.3.9.

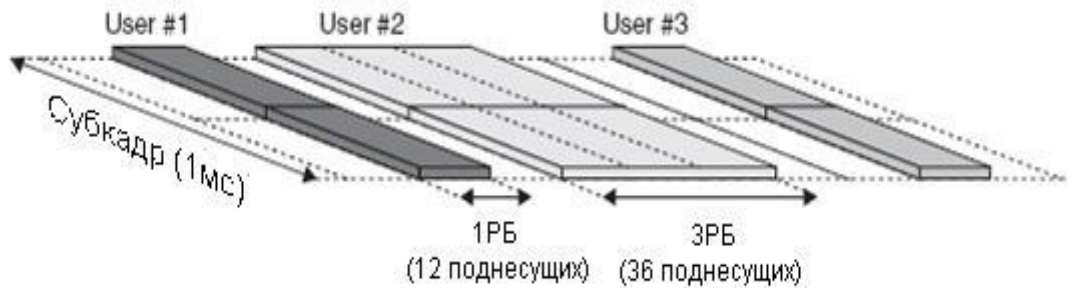


Рисунок 1.4.9 – Распределение канального ресурса на линии «вверх»

Помимо описанных выше особенностей SC-FDMA, главное и принципиальное отличие этого метода состоит в том, что каждый из упомянутых сигналов формируется посредством процедуры прямого дискретного преобразования Фурье (DFT- Discrete Fourier Transform). В результате такого преобразования каждый из M сигналов в частотной области содержит столько же поднесущих частот. Это означает, что каждый модулированный символ данных передается одновременно на M поднесущих частотах, но в течение более короткого интервала времени, равного $\frac{T_s}{M} = 66,7 \frac{\text{мкс}}{M}$. По этой причине технология радиодоступа SC-FDMA получила альтернативное название распределенной OFDM с дискретным преобразованием Фурье (DFT-SOFDM – Discrete Fourier Transform Spread OFDM) [55,98,99].

SC-FDMA обеспечивает снижение уровня PAR в передатчике абонентского терминала за счет созданного постоянства амплитуды и фазы всех передаваемых символов на каждой поднесущей частоте на протяжении всего интервала длительности символа SC-FDMA. Такое постоянство достигается в процессе дискретного преобразования Фурье (DFT) за счет выбора соответствующей дискретизации модулированных символов данных. В результате этого изменяющийся во времени символ SC-FDMA, состоящий из M последовательных символов данных, представляется в частотной области M меняющимися во времени поднесущими частотами. Следовательно, постоянный характер каждой поднесущей частоты совместно с циклическим

префиксом обеспечивает устойчивость к разбросу задержки сигнала, вызванной многолучевостью в радиоканале.

Тип дуплекса LTE

Временной дуплекс TDD (Time Division Duplex) стандартизован 3GPP как дополнение к радиointерфейсу LTE FDD. Его стандартизация мотивирована несколькими факторами: [120]

1. Более низкая потребность в радиочастотном спектре, что дает возможность внедрять LTE, когда отсутствует необходимый для FDD («парный») частотный ресурс (альтернатива FDD);

2. Необходимость постепенной миграции к LTE радиointерфейсов IMT-2000 с временным дуплексом IMT-TC (UTRA TDD) и TD-SCDMA (китайский стандарт).

В основу стандартизации было положено требование о максимальном сохранении решений, которые были заложены в основу FDD. Вследствие этого режим TDD имеет свои особенности только на физическом уровне радиointерфейса LTE.

Одной из главных особенностей TDD является прерывистость передачи, вызванная сменой ее направлений (DL/UL). В радиointерфейсе LTE стандартизованы семь конфигураций передач DL/UL.

В отличие от фреймовой структуры FDD, где пилотные сигналы размещены рядом в пределах одного суб-фрейма, в структуре FS2 для TDD два опорных сигнала помещены в суб-фреймы. В этой структуре суб-фреймы с номерами 0 и 5 всегда выделяются для передачи в Downlink, поскольку переносят сигналы синхронизации для реализации соответствующей конфигурации передачи DL/UL. В передаваемой вместе с ними служебной информации содержатся сведения о планируемой конфигурации. Кроме того, суб-фреймы с номерами 1 и 6 являются специальными и служат в качестве временной точки смены направления передачи только с DL на UL. При обратном переключении такая временная точка отсутствует. В указанных суб-фреймах передаются также пилотные сигналы DwPTS (Downlink Pilot Time

Slot), UpPTS (Uplink Pilot Time Slot) и выделяется защитный временной интервал GP (Guard Period). Причем при конфигурациях с периодом смены направления передачи 10 мс суб-фрейм с номером 6 теряет свойство временной точки переключения DL/UL [74,76,79,84].

Общая длительность пилотных сигналов DwPTS, UpPTS и защитного временного интервала GP постоянна и равна длительности суб-фрейма, т.е. 1 мс. Однако в рамках специального суб-фрейма длительность каждого из перечисленных его компонентов может перераспределяться в зависимости от требований по совместимости с другими системами TDD, к примеру, с UTRA TDD. Следовательно, точка переключения направлений передач согласовывается между двумя взаимодействующими системами.

Особенности радиоканала в технологических сетях радиосвязи

С развитием высокоскоростного железнодорожного транспорта всё острее встаёт задача обеспечения высокой скорости передачи данных и надёжности радиоканала. Система LTE выбрана из-за малых задержек и высокой скорости, но у неё есть недостаток: высокая вероятность сбоя при хэндовере. Для повышения надёжности предложена оптимизированная схема хэндовера: высокоскоростной поезд принимает сигналы от двух базовых станций, получая разнесение в зонах перекрытия, что улучшает качество приёма [13].

В современных системах (включая LTE) применяется MIMO, дающая значительный выигрыш в пропускной способности и надёжности по сравнению с аналогами.

Сети технологической железнодорожной радиосвязи предъявляют более жёсткие требования к надёжности, чем обычные сотовые сети. Поэтому важно рассмотреть организацию хэндовера, выбор конфигурации временного дуплекса (TDD) и использование MIMO для повышения надёжности и пропускной способности. Результаты позволят сделать выводы о применении этих технологий на железных дорогах [13].

Handover

Процедура хэндовера в 3GPP LTE (рис. 1.3.10) начинается с того, что пользовательское оборудование (UE) периодически измеряет опорные символы (RS) — мощность (RSRP) и качество (RSRQ). При выполнении условий UE отправляет отчёт обслуживающему eNB. В отчёте указана целевая сота. Обслуживающий eNB через интерфейс X2 согласовывает подготовку хэндовера (HO) с целевым eNB, включая управление допуском. После успешной подготовки UE получает команду HO и разрывает связь с обслуживающей сотой. Далее UE синхронизируется и получает доступ к целевому eNB по каналу RACH (возможно, с выделенной преамбулой). После синхронизации целевой eNB выдаёт грант на восходящую линию, а UE подтверждает завершение HO. Сигнальные сообщения относятся к протоколу RRC [13,149,150].

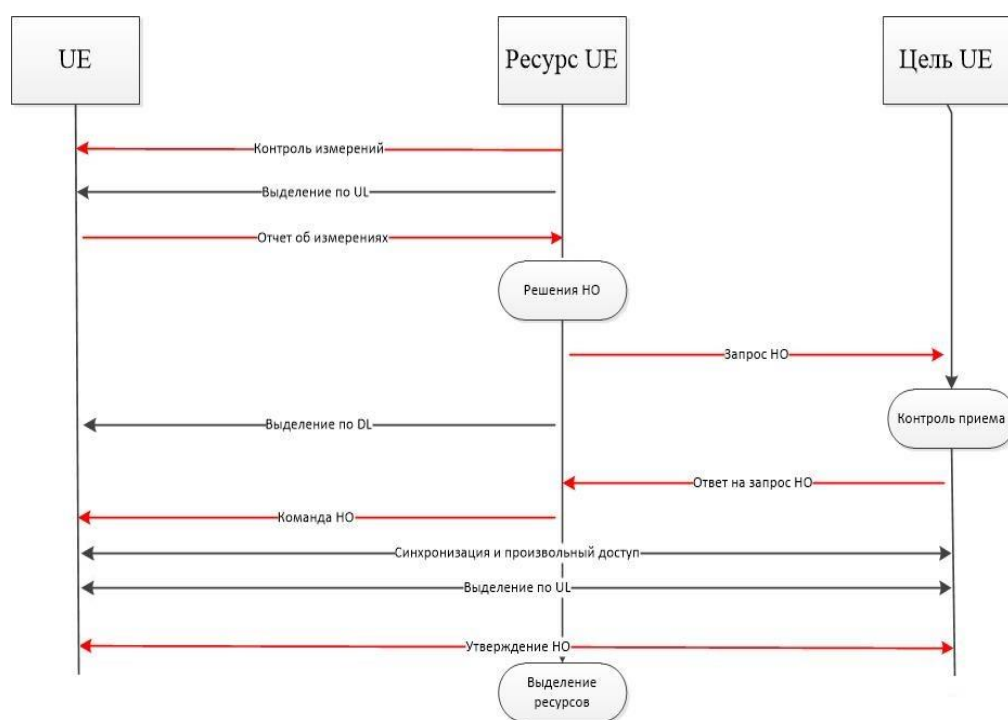
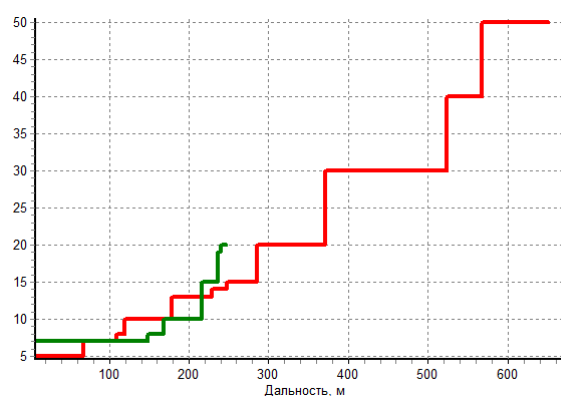


Рисунок 1.4.10 – Процедура хэндовера

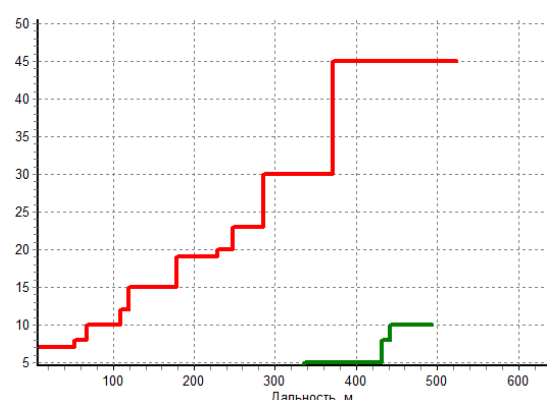
Выбор конфигурации TDD

Очевидно, что конфигурация TDD определяет распределение пропускной способности между «нисходящей линией» (DL) и «восходящей линией» (UL). Неудачный выбор может сократить дальность связи. На рис. 1.4.11 показано,

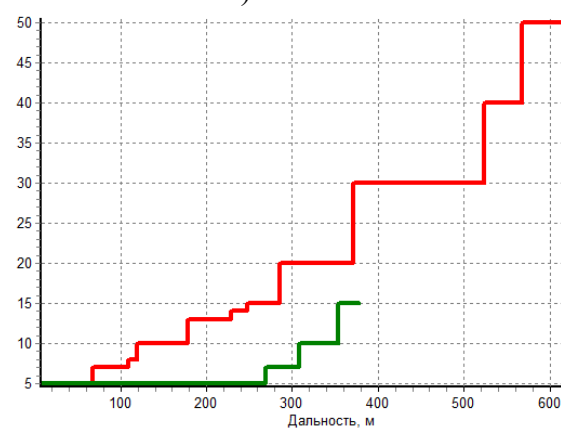
сколько ресурсных блоков требуется для скоростей 2 Мбит/с (DL, красный) и 1 Мбит/с (UL, зелёный) при разных конфигурациях. Оптимальной по критерию «дальность обслуживания» (максимальное расстояние, где обе скорости достижимы) является конфигурация «1» (4:4:2) — дальность около 500 м. При этом на UL используется лишь 10 из 50 ресурсных блоков, то есть остаётся резерв пропускной способности для абонентов с высокой нагрузкой на UL (например, видеокамер) [13].



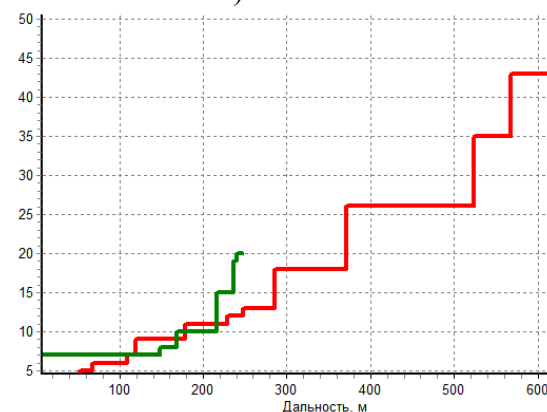
А) 6:2:2



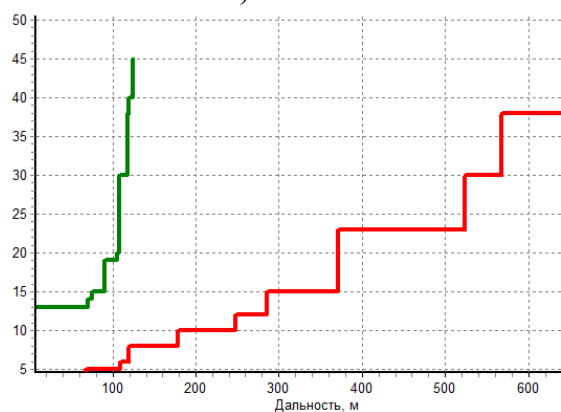
Б) 4:4:2



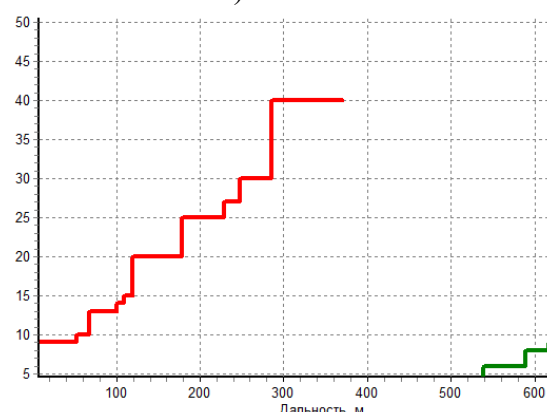
В) 6:3:1



Г) 7:2:1



Д) 8:1:1



Е) 3:5:2

Рисунок 1.4.11 – Число выделяемых РБ (т.е. объем используемой пропускной способности сектора БС сети LTE) для поддержания скорости 2 МБит/с на линии "вниз" (красная линия) и 1 МБит/с на линии вверх (зеленая линия)

CoMP

В рамках 3GPP стандартизирована схема скоординированной многоточечной передачи и приема CoMP (Coordinated Multi-Point Transmission/Reception). Эта схема рассматривается для LTE в качестве важного метода для повышения скорости передачи данных на краю ячейки, а также увеличения зоны покрытия и повышения эффективности системы в целом. Также CoMP относится к методам уменьшения помехового вмешательства смежных ячеек в сети LTE. Также в LTE существуют другие методы, такие как: рандомизация помех от соседних сот ICIR (Inter cell interference randomization), их компенсация (Inter cell interference cancellation) и координация ICIC (Inter cell interference coordination). Смысл координации: при OFDM помеховое влияние от смежных сот наступает, когда несколько сигналов излучаются в определенный момент времени в общей полосе частот. Это может происходить, когда в соседних сотах используется один и тот же ресурсный блок. Такое событие предсказуемо и может быть скоординировано за счет планирования доступного частотного ресурса на краю соты или ограничения мощности передачи в смежной соте в определенной частотной области канала.

Зона обслуживания и зона покрытия базовой станции

Зона покрытия – зона, в которой станция подвижной службы создает полезную напряженность поля, равную или превышающую величину минимальной используемой напряженности поля, определенной для конкретных условий приема [39].

Зона обслуживания – зона, в которой станция подвижной службы создает полезную напряженность поля, равную или превышающую величину используемой напряженности поля, определенную для конкретных условий приема с учетом появления помех от других РЭС [39].

Расчет зон покрытия БС выполняется для определения местоположения АС при проведении расчетов ЭМС АС с другими РЭС при условии равновероятного нахождения АС в любой точке зоны действия соответствующей БС.

Расчет зоны покрытия содержит следующие этапы:

1. Расчет радиуса зоны покрытия БС.

2. Расчет зоны покрытия БС путем определения массива точек, соответствующих нахождению АС в зоне покрытия БС, для следующих двух случаев:

Когда БС рассматривается как РЭС-источник сигнала, а АС- РЭС-рецептор сигнала (БС→АС);

Когда АС рассматривается как РЭС-источник сигнала, а БС- РЭС-рецептор сигнала (АС→БС) [39].

Первый этап.

Для расчета радиуса зоны покрытия БС r_{tBC} используются исходные данные о БС. Для расчета максимального радиуса действия АС r_{tAC} используются типовые характеристики и условия использования АС. Радиус расчета зоны покрытия r_{tAC} определяется по формуле:

$$r_{здBC} = \min(r_{tBC}, r_{tAC}), \quad (1.1)$$

где $\min$ – функция определения минимума для указанных в скобках величин [39].

Радиус зоны покрытия БС r_{tBC} определяется по формуле:

$$r_{tBC} = 10^{\frac{Y_{tBC}}{20}}, \quad (1.2)$$

где $Y_{tBC} = EIRPP_{tBC} + KU_{rAC} - A_{rAC} - 32,45 - 20 * \lg(f_{tBC}) - S_{rminAC}$,

где:

$EIRPP_{tBC}$ - ЭИИМ полезного сигнала на выходе излучающей антенны БС, дБВт;

KU_{rAC} - коэффициент усиления антенны АС, дБи;

A_{rAC} - коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника АС, дБ;

f_{tBC} - центральная частота передача БС, МГц;

S_{rminAC} - реальная чувствительность приемника АС, дБВт [39].

Максимальный радиус зоны покрытия БС r_{tAC} определяется по формуле:

$$r_{tBC} = 10^{\frac{Y_{tBC}}{20}}, \quad (1.3)$$

где $Y_{tAC} = EIRPP_{tAC} + KU_{rBC} - A_{rBC} - 32,45 - 20 * \lg(f_{tAC}) - S_{rminBC}$,

где:

$EIRPP_{tAC}$ - ЭИИМ полезного сигнала на выходе излучающей антенны АС, дБВт;

KU_{rBC} - коэффициент усиления антенны БС, дБи;

A_{rBC} - коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника БС, дБ;

f_{tAC} - центральная частота передача АС, МГц;

S_{rminBC} - реальная чувствительность приемника РЭС-рецептора помех, дБВт [39].

Полученный предельный радиус зоны покрытия БС $r_{зДБС}$ в километрах пересчитывается в градусы по широте и долготе для задания зоны расчета.

При этом учитывается, что величина одного градуса по широте не изменяется для поверхности Земли. Величина одного градуса по долготе уменьшается при движении от экватора к полюсам Земли.

Первоначально выполняется перевод радиуса из километров в градусы по широте по формуле [39]:

$$\Delta\varphi_{BC} = r_{tBC} * \frac{2\pi * R_3}{360}, \quad (1.4)$$

где $\Delta\varphi_{BC}$ - отступ от координат БС по широте, градус;

R_3 - радиус Земли (R_3 - 6372,795 км), км [39].

Затем выполняется расчет отступа по долготе $\Delta\lambda_{BC}$ в градусах с учетом минимальной величины длины градуса по долготе в рассматриваемом радиусе по формуле [39]:

$$\Delta\lambda_{BC} = \frac{r_{tBC} * \frac{360}{2\pi * R_3}}{\cos((\varphi_{BC} + \Delta\varphi_{BC}) * \frac{\pi}{180})}, \quad (1.5)$$

где φ_{BC} – широта БС, градус;

$\Delta\lambda_{BC}$ - отступ радиуса действия по долготе, градус;

Cos – функция косинуса, значение рассчитываемого параметра задается в радианах [39].

Второй этап.

1. Расчет зоны покрытия БС, когда БС рассматривается как РЭС-источник сигнала, а АС – как РЭС-рецептор сигнала (БС→АС)

На данном этапе важно соблюдать условие: $S_{rAC} \geq S_{rminAC}$. Уровень полезного сигнала в точке расчета определяется:

$$S_{rAC} = EIRPP_{BC} - G_{tr} + KU_{rAC} - A_{rAC} - LosS_{trBC} - Fade_{rAC}, \quad (1.6)$$

где: $EIRPP_{BC}$ - ЭИИМ полезного сигнала на выходе излучающей антенны, дБВт;

G_{tr} - ослабление сигнала передающей антенны в направлении получателя полезного сигнала по сравнению с максимум излучения, дБ;

KU_{rAC} - коэффициент усиления антенны приемника, дБи;

A_{rAC} - коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника, дБ;

$LosS_{trBC}$ - медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала, дБ;

$Fade_{rAC}$ - запас на замирание сигнала, дБ [39,102].

2. Расчет зоны покрытия БС, когда АС рассматривается как РЭС-источник сигнала, а БС – как РЭС-рецептор сигнала (АС→БС)

В данном этапе необходимо чтобы точка расчета попадала в зону покрытия БС при соблюдении условия: $S_{rBC} \geq S_{rminBC}$.

Уровень полезного сигнала в точке расчета определяется по формуле [39]:

$$S_{rBC} = EIRPS_{AC} - G_{rt} + KU_{rBC} - A_{rBC} - LosS_{trAC} - Fade_{rBC}, \quad (1.7)$$

где: $EIRPS_{AC}$ - ЭИИМ полезного сигнала на выходе излучающей антенны, дБВт;

KU_{rBC} - коэффициент усиления антенны приемника, дБи;

A_{rBC} - коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника, дБ;

$LosS_{trAC}$ - медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала, дБ;

$Fade_{rBC}$ - запас на замирание сигнала, дБ [39,102].

1.5 Постановка задачи на разработку и внедрение методики, комплекса моделей и научно-технических предложений по проектированию технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Вышеизложенные материалы первой главы диссертации обосновывают необходимость применения нового подхода при проектировании TSP LTE-1800 на ВСЖМ в связи с недостаточностью требований в национальных стандартах и сводах правил, ГОСТах, документах в области стандартизации. В частности:

1. отсутствуют требования к проектированию комплекса систем передачи данных по радиосвязи для скоростей свыше 400 км/ч на высокоскоростных магистралях;
2. ограниченность частотного ресурса в сетях LTE ввиду ограничений, связанных с Решением ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г [101];
3. низкая степень изученности влияния эффекта Доплера на скоростях свыше 400 км/ч для высокоскоростных магистралей;
4. отсутствие регламентирующих документов по проектированию TSP при совместной работе двух смежных систем, работающих в одном стандарте LTE-1800 TDD и в одном частотном диапазоне;
5. необоснованное использование и отсутствие опорного документа по применению моделей распространения радиоволн при проектировании радиотехнических систем на железнодорожном транспорте;
6. неоптимальное использование имеющегося оборудования для проектных решений по созданию перспективных цифровых сетей связи и др.

Таким образом, содержание первой главы обосновало и подготовило постановку задачи диссертационного исследования на разработку и внедрение новых методики, модели и научно-технических предложений по проектированию TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ с целью рационального решения задачи исследования.

Согласно классификации, показанной в таблице 1.4, в диссертационном

исследовании были улучшены выделенные параметры.

Важно отметить, что исходя из классификации параметров, предъявляемых при проектировании технологических сетей LTE, не все параметры подлежали изменению. Например, параметры мощности передатчиков БС и АС не изменялись и были приняты 10 Вт и 0.2 Вт соответственно.

Таблица 1.4 – Классификация параметров, рассматриваемых в диссертации

Параметр	Значения				
Мощность БС	1	10	20		40
Ширина полосы частоты	1.4	3	5		10
Количество абонентов	1	2	3		6
Мощность АС	0.2	1	2		5
Схема дуплекса	FDD	TDD	½ FDD		
Схема MIMO	1x2	2x1	2x2		4x4
Модуляция	QPSK	16QAM	64QAM		
Тип БС	Макросоты	Микросоты	Пикосоты	Фемтосоты	Малые соты

Выводы по первой главе

В главе были рассмотрены ключевые аспекты проектирования ТСП на железнодорожном транспорте, а также проанализировано сегодняшнее состояние систем радиосвязи.

Так, при правильной оценке данных этапов возможно создание наиболее жизнеспособной модели радиотехнической системы, которая будет удовлетворять требованиям и специфике цифровой технологической радиосвязи.

Были проанализированы ныне существующие сети цифровой технологической радиосвязи разных поколений. Их анализ является немаловажным пунктом при создании нового поколения ТСП. На сегодняшний момент, данные системы являются устаревшими и не могут дать тех функций, которые наиболее востребованы сегодня.

Проведен анализ наиболее перспективного на сегодняшний момент стандарта LTE-1800 TDD, в котором выделены преимущества по сравнению с более ранними стандартами, а также определены недостатки стандарта.

При рассмотрении аспектов устройства радиоканалов выявлены детали, которые позволят рассчитать наиболее качественный радиоканал, удовлетворяющий всем требованиям ТСП LTE-1800 TDD.

Рассмотрены технологии, применимые к стандарту LTE-1800 TDD с целью оптимизации некоторых показателей (энергетические показатели).

В результате проведенного исследования определена необходимость создания вариантов решения существующих проблем при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на ВСЖМ путем создания моделей и методик проектирования этих систем.

Проведен анализ объекта и предмета исследования с целью выявления проблем и нахождения путей их решения.

Поставлены задачи исследования, направленные на выполнение цели диссертационной работы, включающую создание и внедрение методики проектирования ТСП LTE-1800 TDD, разработку комплекса моделей

проектирования TSP LTE-1800 TDD в местах пересечения с другими сетями радиосвязи, работающих в одном частотном диапазоне, а также подготовку научно-технических предложений в интересах повышения эффективности использования частотного ресурса путем оптимизации проектных решений по выбору модели распространения радиоволн и конструктивных проектных решений по выбору усовершенствованного типа оборудования. Также необходимо предложить новый способ компенсации негативного воздействия эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях при скорости движения поездов свыше 400 км/ч.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА И МОДЕЛЬ ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

Одной из основных задач совершенствования ТСП является повышение эффективности использования спектра. В связи с этим для эффективного использования радиочастотного спектра и обеспечения надежной и качественной связи абонентов в зонах действия ТСП, актуальной задачей является оптимальное, с точки зрения обеспечения радиопокрытия, частотно-территориальное планирование радиосетей. В силу специфики частотного диапазона и ограниченности частотного ресурса, эта задача существенно отличается от задач частотно-территориального планирования сетей фиксированной радиосвязи.

Так как на железнодорожном транспорте на данный момент не существует определенной методики проектирования ТСП LTE-1800 TDD, а также способов оптимального использования частотного спектра в диапазоне 1800 МГц, необходимо разработать методику (далее – Методика) использования частотного ресурса при проектировании ТСП LTE-1800 TDD.

Таким образом можно сформулировать назначение создаваемой Методики: рациональное использование частотного ресурса при проектировании ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ и выполнение требований по обеспечению необходимой дальности радиосвязи и ЭМС в условиях влияния различных радиопомех [51,106].

При разработке Методики возможны следующие допущения: при отсутствии требований по пропускной способности к сети связи, возможно применение любой модели МСЭ-R.

Ограничения при разработке Методики: существуют ограничения по использованию всего спектра частоты (1785-1805 МГц), необходимой скорости передачи (не менее 2 Мбит/с по DL и 1 Мбит/с по UL), строгим расположением базовых станций в полосе отвода железнодорожной магистрали, а также самым

принципиальным ограничением является Решение ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г., которое регламентирует использование ширины полосы частоты для стандарта LTE в полосе 1785-1805 МГц, выделенным на нужды железнодорожного транспорта [2,3].

Также, поскольку данная методика применима к высокоскоростному железнодорожному транспорту и может быть применима на высокоскоростных магистралях, существенным ограничением будут являться работоспособность и безотказность Методики на скоростях свыше 400 км/ч [6,20].

В данных условиях важным критерием является ограниченность площадки проектирования с точки зрения компенсации негативного влияния эффекта Доплера (более подробно рассматривается в главе 4.2) и предотвращения отказов работы системы при обеспечении движения поездов.

Методика разработана для применения при проектировании ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ моделей МСЭ-R и Модели, разработанной автором.

В Методике для обеспечения ЭМС разработана модель временной синхронизации режимов работы БС. Физический смысл модели: БС с нечетными номерами (1, 3, 5 и т.д.) на момент времени t_1 работают на передачу. Соответственно, БС с четными номерами – на прием [42].

2.1 Назначение, состав и схема алгоритма методики

Выше уже было отмечено что Методика предназначена для эффективного использования частотного ресурса при проектировании TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

При ее создании были решены следующие задачи:

1. Создание алгоритма анализа проектных условий с учетом:
 - Топографии местности (городская застройка, открытое пространство и др.);
 - Помеховой обстановки (включая пересечения со смежными TSP);
 - Нормативных ограничений.
2. Разработка системы расчета параметров сети:
 - Потерь в антенно-фидерных трактах (АФТ);
 - Коэффициента ошибок передачи;
 - Зон обслуживания базовых станций и Handover.
3. Внедрение ветвящейся логики выбора режимов работы (этапы V-VIII) в зависимости от:
 - требуемой пропускной способности;
 - необходимости георезервирования ядра;
 - уровня электромагнитных помех и др.
3. Обзор существующих решений и их ограничения.

Современные методы проектирования решают частные задачи, но не предлагают комплексного подхода:

- Частотное планирование не учитывает динамику движения поездов;
- Модели ЭМС игнорируют специфику пересечения сетей;
- Расчет зон покрытия часто абстрагируются от реального рельефа местности. Предлагаемая методика устраняет данные недостатки за счет:

1. Интеграции географических частотных и аппаратных параметров;
2. Жесткой привязки к стандарту ГОСТ Р 55892-2018;
3. Адаптации под сценарии «сложной обстановки ЭМС» [101].

Структура Методики показана на рисунке 2.1.1.

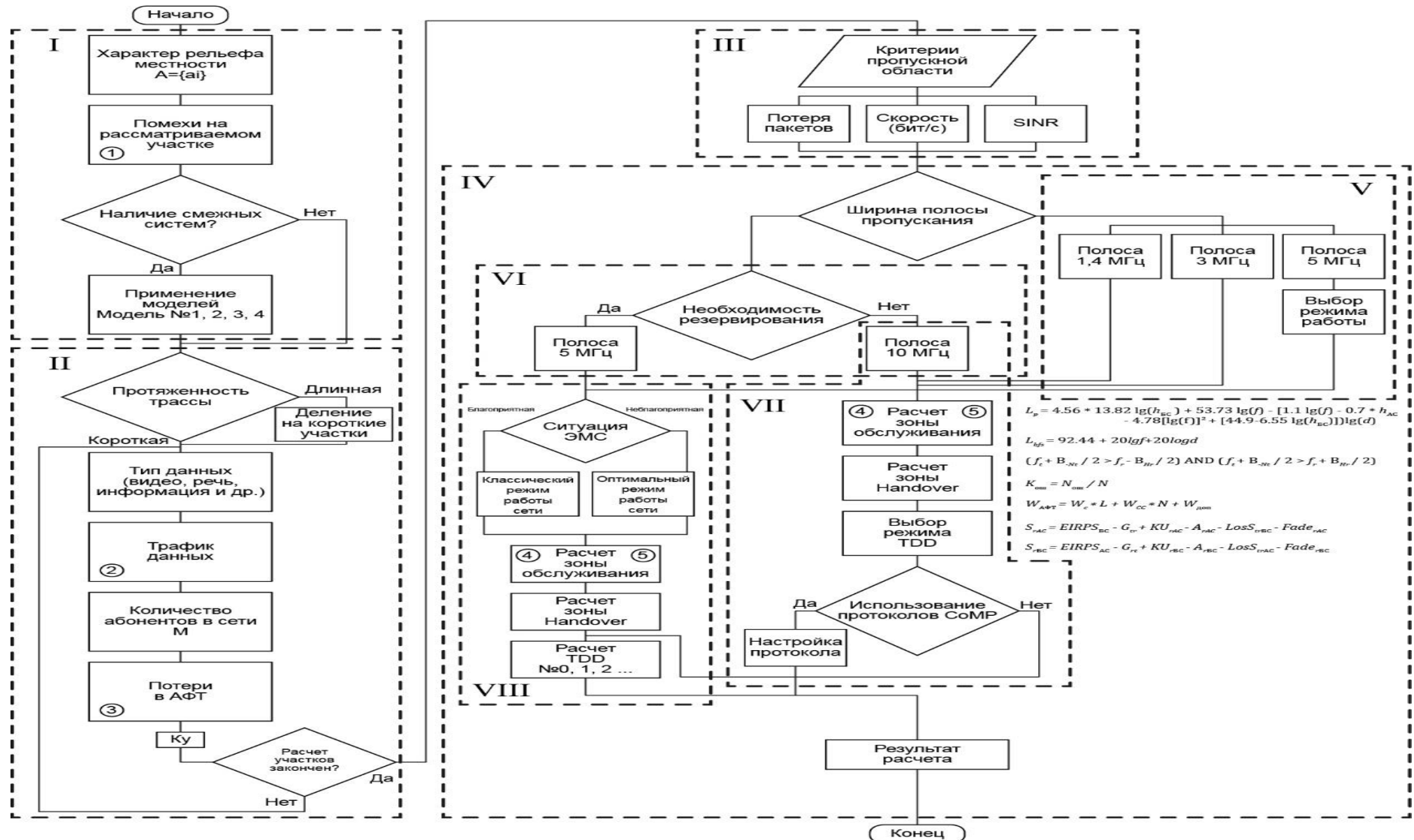


Рисунок 2.1.1 – Алгоритм методики

Методику можно разделить на 8 отдельных этапов, в свою очередь включающих в себя несколько отдельных шагов.

Среди них:

I этап – анализ проектируемого участка;

II этап – анализ исходных данных, предъявляемых к проектируемой сети;

III этап – предварительный расчет критериев пропускной способности;

IV этап – выбор ширины полосы частоты с последующим выбором режима работы сети.

Следующие этапы могут варьироваться в зависимости от данных, полученных в результате I-IV этапов [101].

V этап – выбор ширины полосы пропускания, с последующим выбором режима работы и расчетом зон обслуживания и Handover;

VI этап – выбор ширины полосы пропускания, с последующими операциями по настройке сети;

VII этап – расчеты зоны обслуживания, зоны Handover, выбором режима TDD по результатам которых формируется методика;

VIII этап – выбор режима работы сети в зависимости от ситуации ЭМС с последующим расчетом зоны обслуживания, зоны Handover, выбором режима TDD по результатам которых формируется методика.

Далее рассмотрим более подробно каждый из этапов.

I этап – анализ проектируемого участка – включает в себя следующие операции: анализ характера рельефа местности, анализ и расчет помех на рассматриваемом участке, а также наличие точек пересечения со смежными сетями, работающих в этом же частотном диапазоне (рис. 2.1.2) [101].

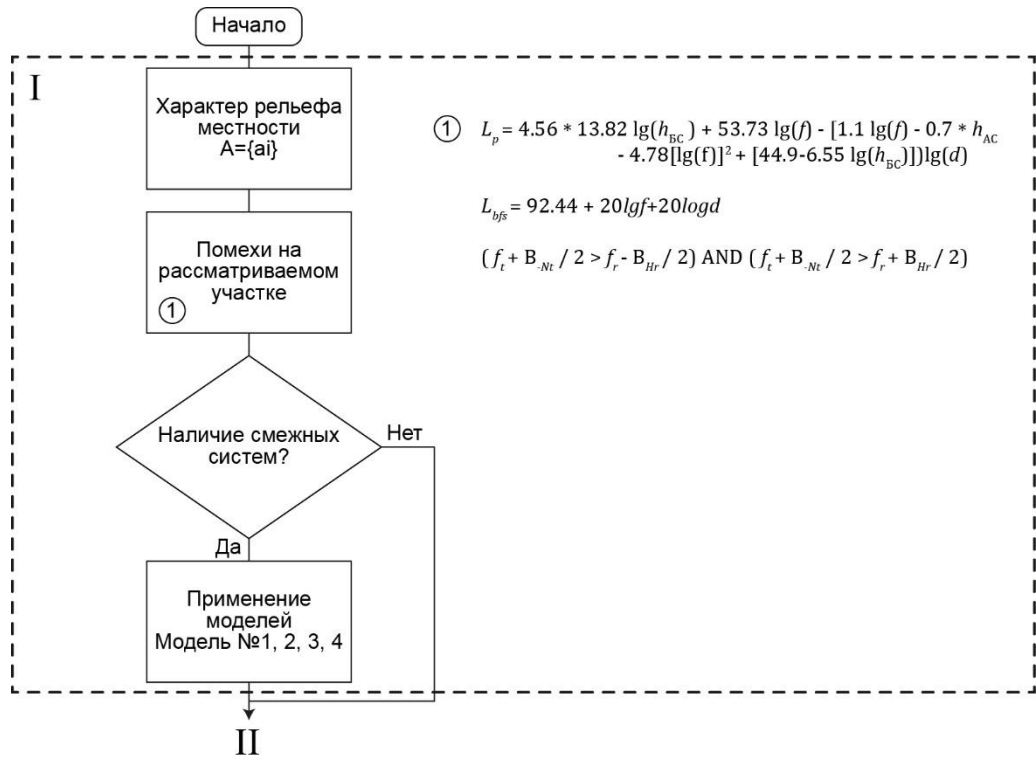


Рисунок 2.1.2 – Схема алгоритма I этапа

Анализ характера рельефа местности подразумевает собой выделение конкретной трассы и применение коэффициента в зависимости от типа трассы: городская застройка, сельская местность, свободное пространство и др. В зависимости от типа трассы применяется поправочный коэффициент: для городской застройки используются следующие формулы [101]:

$$L_p = 4.56 - 13.82 \lg(h_{БС}) + 53.73 \lg(f) - [1.1 \lg(f) - 0.7 * h_{АС} - 4.78[\lg(f)]^2 + [44.9 - 6.55 \lg(h_{БС})] \lg(d)] \quad (2.1)$$

где $h_{БС}$ – высота базовой станции;

f – частота радиоволны;

$h_{АС}$ – высота абонентской станции;

d – протяженность трассы.

$$L_{бfs} = 92.44 + 20\lg f + 20\log d \quad (2.2)$$

На данном этапе производится отбор РЭС по частотному критерию. В качестве РЭС потенциальных источников помех выбираются все РЭС, использующие передающие полосы частот, пересекающиеся с приемными полосам частот рецептора помех по формуле:

$$\left(f_t + \frac{B_{-Nt}}{2} > f_r - \frac{B_{Hr}}{2}\right) AND \left(f_t - \frac{B_{-Nt}}{2} < f_r + \frac{B_{Hr}}{2}\right) \quad (2.3)$$

где B_{-Nt} – ширина спектра помехи с учетом маски спектра по уровню -60 дБ, -50 дБ, 40 дБ и др.;

f_t - центральная частота передачи РЭС-источника помех, МГц;

B_{Hr} - полоса пропускания РЭС-рецептора помех, МГц;

f_r - центральная частота приема РЭС-рецептора помех, МГц.

Данные формулы уже включены в поправочные коэффициенты в зависимости от характера рельефа местности, которые формируются исходя из влияния помех на рассматриваемом участке. [31-34].

Также помехи могут вноситься от смежных сетей, работающих в местах пересечений двух диапазонов. Чтобы избежать потерь пропускной способности и обрывов каналов связи, была разработана Модели проектирования ТСП в местах пересечения со смежными ТСП LTE-1800 TDD. Данной модели посвящена глава 3.

Исходя из работы сети в той или иной ширине полосы пропускания смежной системы выбирается необходимая модель проектирования. При отсутствии смежных систем необходимо определить протяженность проектируемой трассы. Здесь могут быть варианты протяженности трассы: длинная (более 10 км) и короткая (до 10-15 км). Исходя из задания на проектировании необходим сбор исходных данных. Сбор исходных данных предусмотрен **этапом номер II**.

В данном этапе первоначально необходимо узнать тип данных, которые необходимо будет передавать в проектируемой сети (рис. 2.1.3). Как правило, основными типами являются голос и речь, данные, информационный сигналы (ИС). Но также могут применяться: видеопередача, местоположение поезда на участке, аудиотрансляция и др [101].

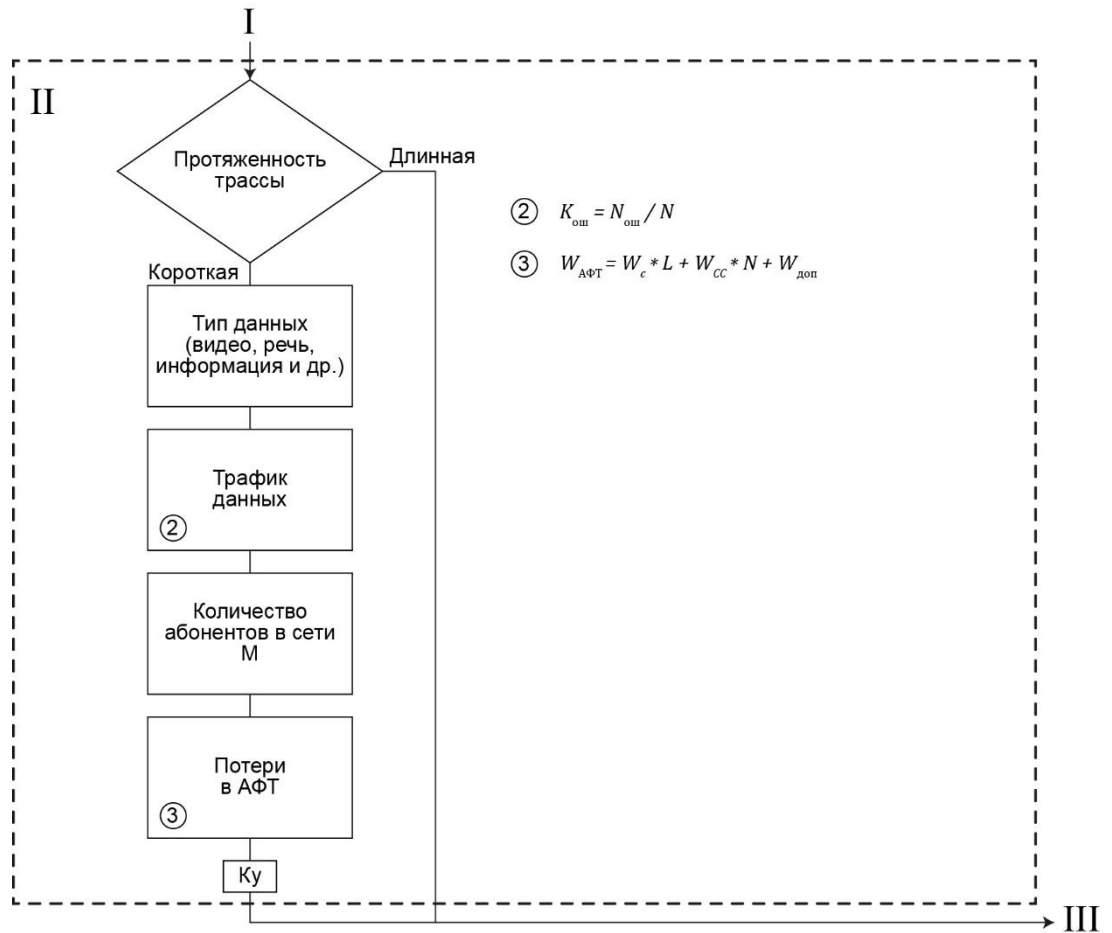


Рисунок 2.1.3 – Схема алгоритма II этапа

Исходя из типа передаваемых данных необходимо знать трафик передаваемых данных, т.е. рассчитать коэффициент ошибок в зависимости от объема данных. Это можно рассчитать по формуле

$$K_{\text{ош}} = \frac{N_{\text{ош}}}{N} \quad (2.4)$$

где $N_{\text{ош}}$ – количество ошибок;

N – количество переданной информации.

Зная тип и трафик данных, необходимо получить данные о количестве абонентов, которые будут зарегистрированы в сети, после чего можно рассчитать потери в антенно-фидерном тракте (АФТ) [101].

Для расчета потерь в АФТ применяются стандартные формулы. Среди них

$$W_{\text{АФТ}} = W_c * L + W_{\text{сс}} * N + W_{\text{доп}} \quad (2.5)$$

где W_c – погонное затухание сигнала в кабеле на рабочей частоте, дБ/м;

L – длина кабеля, м;

W_{CC} – потери в разъеме, дБ;

N – количество разъемов, шт;

$W_{доп}$ – потери в дополнительном антенно-фидерном тракте, дБм.

При этом важно ориентироваться на оборудование, которое будет использовано при проектировании ТСР, так как у любого оборудования будут свои поправочные коэффициенты, которые будут влиять на изменение параметров расчета. К примеру – коэффициент усиления антенны [69,101].

После получения и формирования исходных данных необходимо провести предварительный расчет критериев пропускной способности. Это будет происходить в следующем этапе Методики [101].

III этап является одним из ключевых. В нем выделяются 4 критерия: скорость передачи данных, потеря пакетов, отношение сигнал/помеха+шум и ширина полосы пропускания (рисунок 2.1.4).

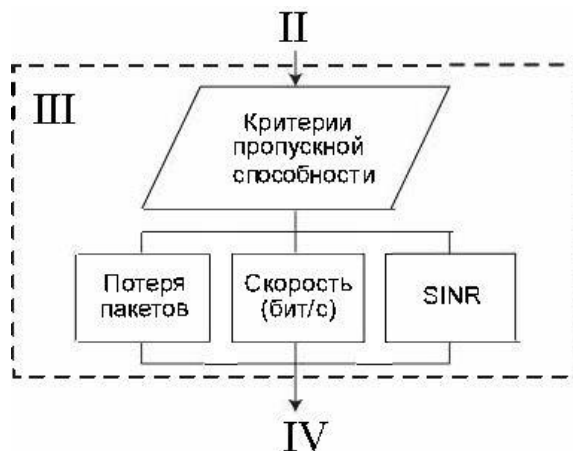


Рисунок 2.1.4 – Схема алгоритма III этапа

Скорость передачи данных для технологии LTE – главная особенность, поскольку именно из-за неё данная технология является самой перспективной при проектировании.

При оценивании пропускной способности важно знать процент потери пакетов, которые не были доставлены при передаче.

Также весомым критерием является отношение сигнал/помеха+шум (SINR). Положительное значение SINR означает что уровень полезного сигнала

выше уровня шума и наоборот, отрицательное значение SINR будет означать преимущество уровня шума над уровнем полезного сигнала. Чем выше значение SINR, тем лучше качество сигнала.

Ключевым критерием для данной Методики является ширина полосы пропускания. Согласно стандарта LTE возможно 6 вариантов используемой полосы: 1.4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц и 20 МГц. Но ввиду ограничений по Решению ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г. возможно использовать полосы шириной не более 10 МГц. Здесь уже возможны различные варианты, которые последуют в следующих этапах [101].

IV этап включает в себя несколько этапов так как является основополагающим при реальном проектировании TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ. В зависимости от требуемых критериев пропускной способности, исходных данных и длины проектируемой трассы, необходимо сделать выбор ширины используемой полосы частоты.

Важно отметить, что этапы **V, VI, VII, VIII** зависят лишь от выбора, сделанного в результате предыдущих этапов и не могут выполняться одновременно. Именно поэтому они включены в общий **IV этап** (рис. 2.1.5) [101].

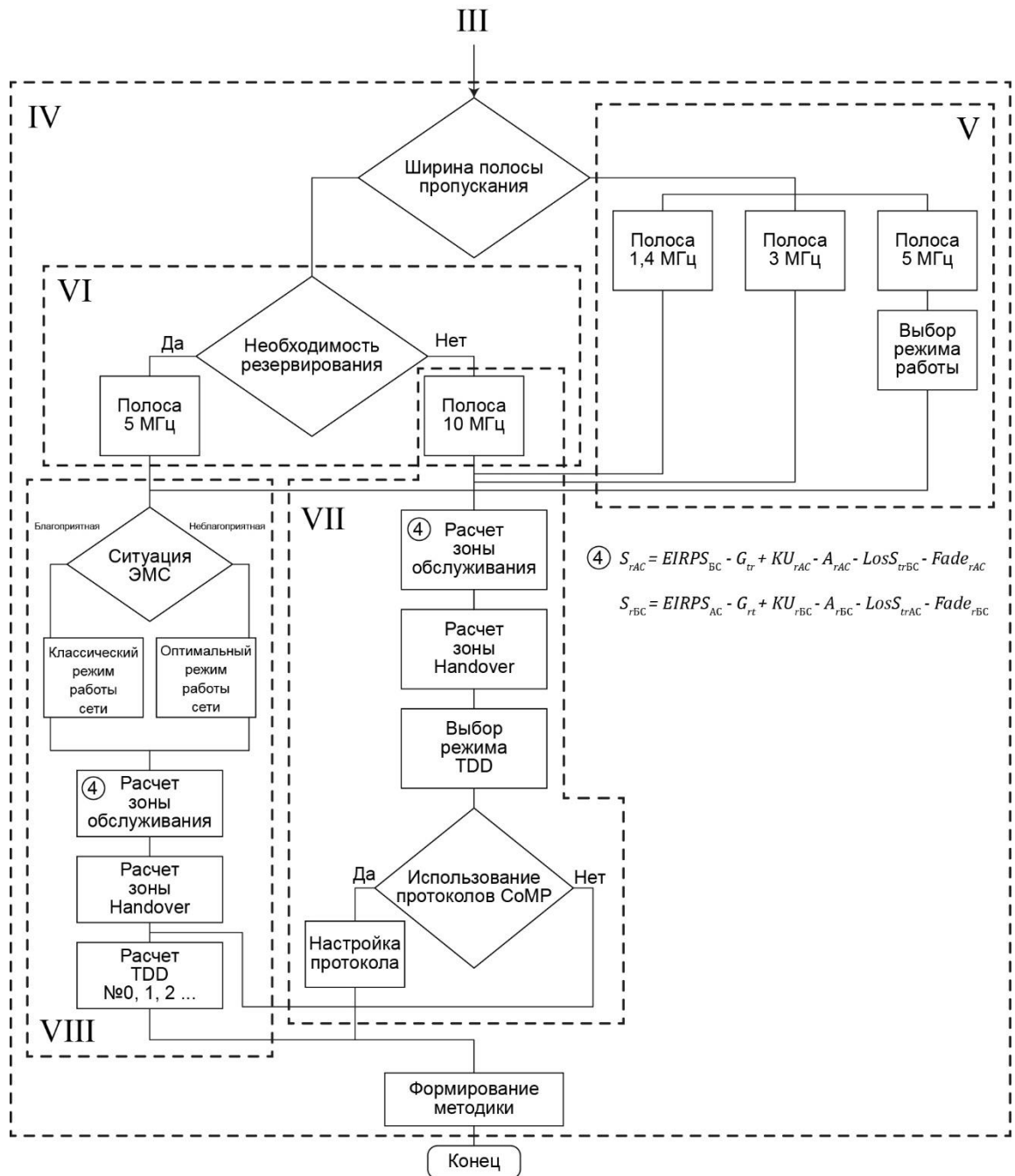


Рисунок 2.1.5 – Схема алгоритма IV-VIII этапов

В случае если проектируемый участок не требует высоких скоростей передачи данных и обладает стандартными требованиями по типу и объему данных, мы можем перейти к **V этапу** и выбрать один из вариантов ширины полосы частоты, таких как 1.4 МГц, 3 МГц или 5 МГц. После выбора ширины полосы частоты последует расчет зоны обслуживания базовой станции (подробно в главе 1.3), зоны Handover (подробно в главе 1.3), выбор варианта конфигурации TDD. Подробно данные процессы описаны в главе 1.3. Как правило, на ВСЖМ необходимо проектировать более «сложные» трассы,

обладающие повышенными скоростями передачи данных и нагрузкой на сеть, данные варианты ширины полосы частоты будут наименее задействованы при проектировании [101].

Одним из условий проектирования TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ является необходимость георезервирования ядра сети. Исходя из требований технического задания по обеспечению георезервирования возможно использование полосы шириной либо 5 МГц, либо 10 МГц. Данный выбор производится на **VI этапе** Методики и также является ключевым при создании системы технологической радиосвязи. В зависимости от использования георезервирования ядра и, соответственно, выбора используемой ширины полосы частоты последует переход на следующий этап Методики [101].

При использовании полосы шириной 10 МГц (георезервирование ядра не требуется) следует **VII этап**. В него включены: расчет зоны обслуживания базовых станций, расчет Handover, выбор режима конфигурации TDD. При этом данный этап может включать использование и технологии скоординированной многоточечной передачи CoMP. Подробно о данной технологии в главе 1.3. После вывода об использовании/неиспользовании технологии выполняется настройка базовой станции с учетом данной технологии [101].

В случае необходимости георезервирования ядра сети и использования полосы шириной 5 МГц необходимо оценить ситуацию электромагнитной совместимости (ЭМС) на проектируемом участке.

Если ситуация ЭМС благоприятная (нет поражающих факторов и внутренних помех системы), то мы используем классический режим работы сети в двух полосах по 5 МГц, работающих либо только на передачу, либо только на прием.

Но в случае, если ситуацию ЭМС критична (большое количество мешающих факторов), то необходимо использовать «оптимальный» режим работы сети. Данный режим является усовершенствованным способом классического режима работы сети и является «ключевой особенностью»

данной Методики проектирования. Оптимальный режим позволит «разнести» прием и передачу от базовых станций, что существенно снизит помехи в системе и позволит увеличить дальность радиосвязи на обслуживаемом участке. Более подробно данный режим описывается в главе 2.4.

После выбора режима работы сети следует расчет зоны обслуживания базовых станций, расчет Handover и выбор конфигурации TDD [101].

Данные процессы происходят на **VIII этапе** Методики.

После прохождения всех восьми этапов, делается вывод о формировании Методики и внедрении её в эксплуатацию [101].

2.2 Компоненты методики использования частотного ресурса при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Сеть LTE по своей природе адаптивна: начальная конфигурация и настройка существенно влияют на скорости передачи в зонах покрытия после развёртывания. Поэтому исходные параметры должны точно соответствовать предполагаемым условиям и специфике работы. Однако при выборе оптимальной полосы частот для проектирования необходимо учитывать электромагнитную совместимость (ЭМС). LTE как адаптивная система способна самостоятельно решать возникающие проблемы ЭМС. Под «проблемой ЭМС» здесь понимается ситуация, когда на входе приёмника абонентской или базовой станции на узкополосных несущих принимаемого ресурсного блока (одного или нескольких) образуются дополнительные совпадающие несущие от другого передатчика этой же радиосети. Особенно остро эта проблема стоит при развёртывании сетей на железной дороге [3, 52, 111, 113–116].

Условия применения и основные характеристики технологической сети железнодорожной радиосвязи LTE в полосе 1785–1805 МГц определены Решением ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г. Стандарт LTE предусматривает 6 вариантов полос частот, но Решение ГКРЧ ограничивает ширину полосы не более 10 МГц. Следовательно, возможны варианты: 1,4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц.

На физическом уровне в стандарте LTE применяют технологию OFDMA-мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов - с модуляцией QPSK, 16QAM, 64QAM. При этом максимальное количество поднесущих частот в рабочей полосе достигает 2048. Передача по радиоканалу производится кадрами длительностью 10 мс [52,112,117].

Кадры LTE делятся на два типа: с частотным дуплексом (FDD) и с временным дуплексом (TDD). Поскольку Решение ГКРЧ предписывает TDD,

далее рассматривается структура кадра с временным дуплексом [52, 85, 120].

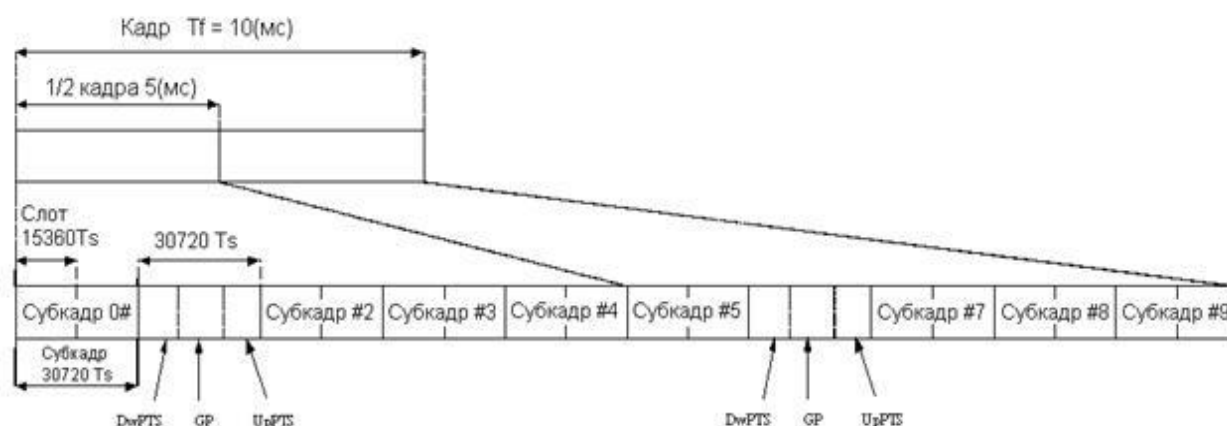


Рисунок 2.2.1 – Структура кадра при временном дуплексе

Кадр длиной 10 мс включает в себя 10 субкадров длиной 1 мс, содержащих: передачу вниз (D), передачу вверх (U), а также специальные субкадры (S), в состав которых входят три поля: UpPTS- поле передачи вверх, DwPTS- поле передачи вниз и GP- защитный интервал. Стандартом LTE определены следующие конфигурации, представленные в Таблице 2.1:

Таблица 2.1 – Конфигурации кадра при TDD

№	Конфигурация субкадров									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Поскольку между поднесущими расстояние составляет $\Delta f = 15$ кГц, длина OFDM-символа равна $\frac{1}{\Delta f} \approx 66,7$ мкс. Слот длительностью 0,5 мс состоит из 6 или 7 OFDM-символов в зависимости от циклического префикса (обычный CP: 5,2 мкс перед первым символом, 4,7 мкс перед остальными; расширенный CP: 16,7 мкс). Структура слота показана на рис. 2.2.2 [52].

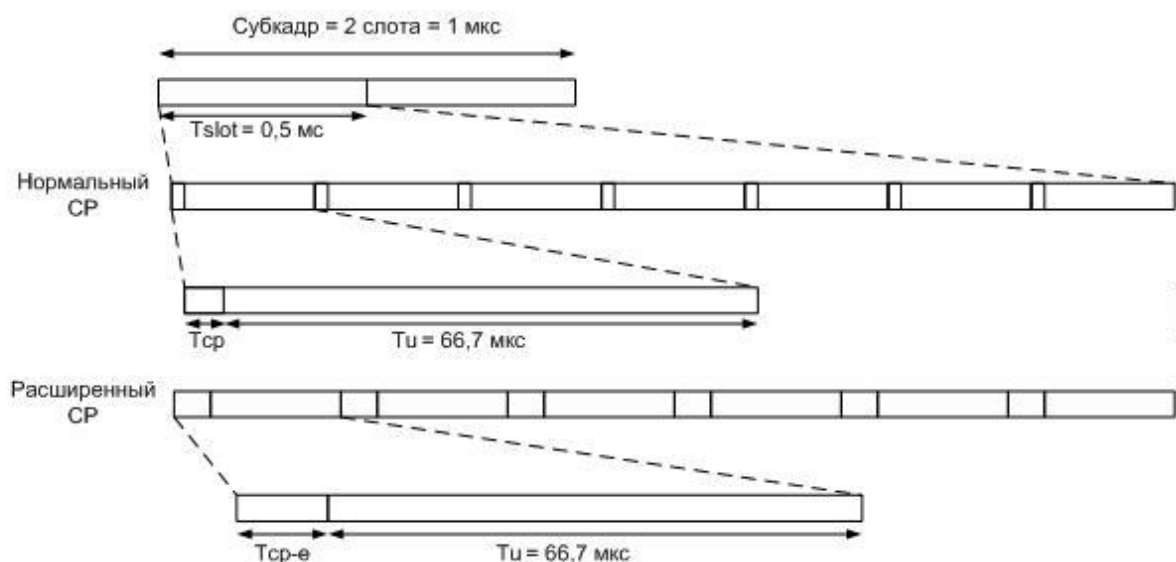


Рисунок 2.2.2 – Структура слота на физическом уровне

Основной информационный носитель — ресурсный блок (РБ). Пропускная способность сектора базовой станции LTE определяется числом доступных РБ. Максимальное число РБ для каждой полосы приведено в табл. 2.2. Предполагая модуляцию 64QAM (6 бит на ресурсный элемент), можно оценить предельную пропускную способность. Например, для полосы 10 МГц (50 РБ, нормальный CP) — 50,4 Мбит/с. Эти значения не учитывают потери на кодирование и служебную информацию (20–30%), а также потери на TDD (10–20%). В таблице также приведены мощность теплового шума (КТВ) и пропускная способность для обоих типов CP [52].

Таблица 2.2 – Зависимость числа РБ от ширины полосы пропускания

Полоса, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число РБ макс.	6	15	25	50	75	100
Число поднесущих макс	72	180	300	600	900	1200
Эффективная полоса (В), МГц	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Мощность теплового шума (КТВ) в полосе В, дБм	- 113	- 109	- 107	-104	-102	-101
Пропускная способность, МБит/с						
- нормальный префикс	6,05	15,12	25,2	50,4	75,6	100,8
- расширенный префикс	5,2	12,96	21,6	43,2	64,8	86,4

Теоретические значения SINR для разных модуляций и скоростей кодирования FEC даны в табл. 2.3. Здесь же введен запас на практическую

реализацию (Implementation Margin - IM). Результирующее значение SINR, используемое при расчетах, должно включать значение запаса IM [52].

Таблица 2.3 – Значение SINR для разных видов модуляции

Модуляция	№	FEC	SINR, дБ	IM, дБ	SINR+IM, дБ
QPSK	0	1/8	-5,1	2,5	-2,6
	1	1/5	-2,9		-0,4
	2	1/4	-1,7		0,8
	3	1/3	-1,0		1,5
	4	1/2	2,0		4,5
	5	2/3	4,3		6,8
	6	3/4	5,5		8,0
	7	4/5	6,2		8,7
16QAM	8	1/2	7,9	3	10,9
	9	2/3	11,3		14,3
	10	3/4	12,2		15,2
	11	4/5	12,8		15,8
64QAM	12	2/3	15,3	4	19,3
	13	3/4	17,5		21,5
	14	4/5	18,6		22,6

В технологии OFDMA весь спектр разбивается на ортогональные поднесущие (72, 180, 300, 600, 900 или 1200). Каждая поднесущая может иметь свою модуляцию (QPSK, 16QAM, 64QAM). Множественный доступ обеспечивается выделением разных групп поднесущих разным пользователям в кадре [52, 100].

Достоинство OFDMA — устойчивость к многолучевому распространению. Недостатки: высокая чувствительность к синхронизации по частоте и высокий пик-фактор (PAPR), что снижает эффективность усилителя мощности, критично для мобильных терминалов. Поэтому в восходящем канале LTE используется SC-FDMA (множественный доступ с одной несущей и частотным разделением). Отличие — дополнительное преобразование Фурье, дающее сигнал с меньшим PAPR. Модуляции в UL те же: QPSK, 16QAM, 64QAM.

Канальный ресурс

Ресурсный блок = 12 поднесущих (180 кГц) × слот (0,5 мс). В нисходящем канале в РБ 84 ресурсных элемента (7×12). Они представлены на Рисунке 2.2.3.

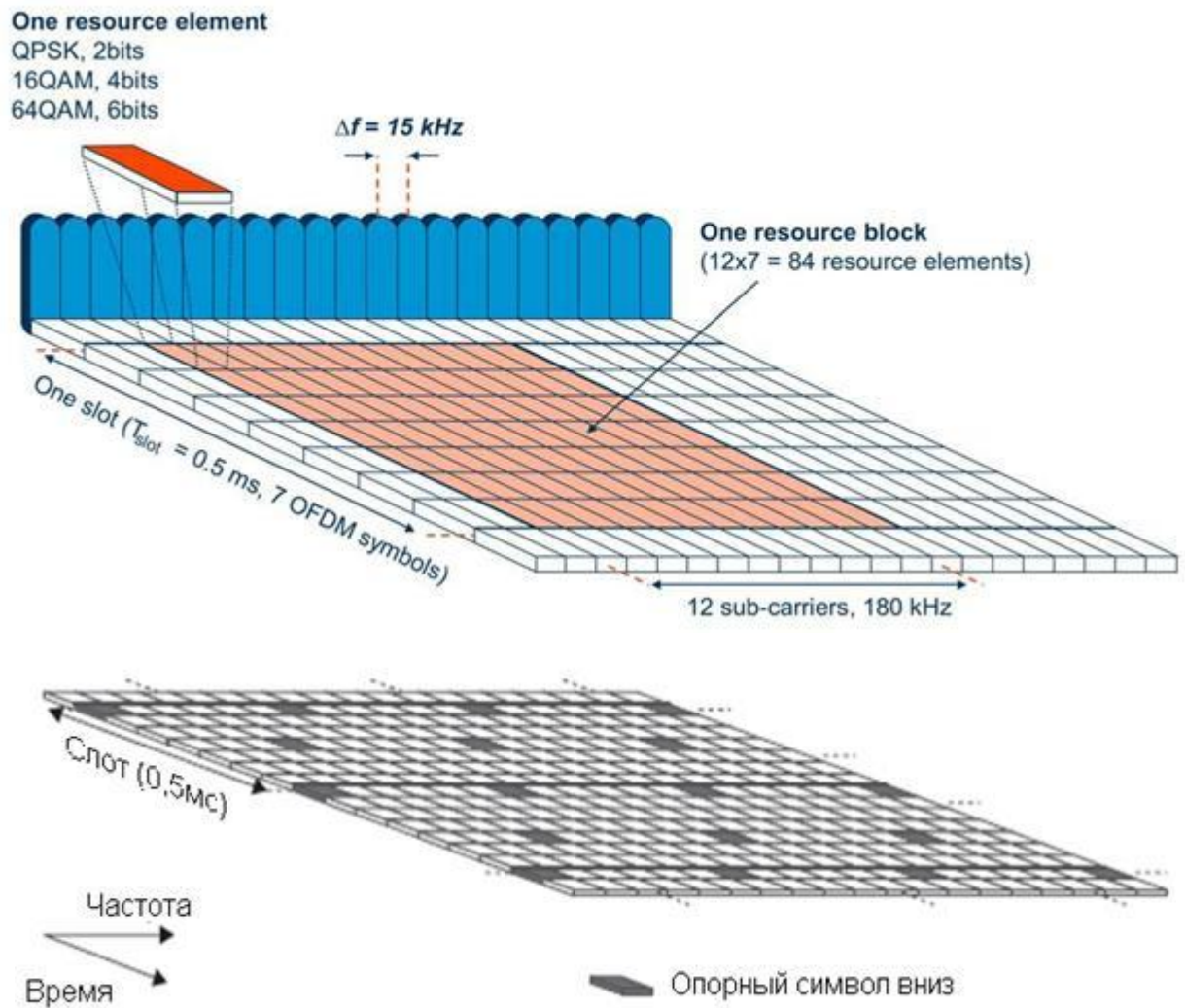


Рисунок 2.2.3 – Структура ресурсного блока при передаче «вниз»

Часть элементов — опорные символы, необходимые для демодуляции и оценки канала. Во время передачи по линии «вниз» на базовой станции могут функционировать до 4-х антенн. Для базовых станций с 4 антеннами каждой антенне отведены свои опорные символы (рис. 2.2.4) [52, 54].

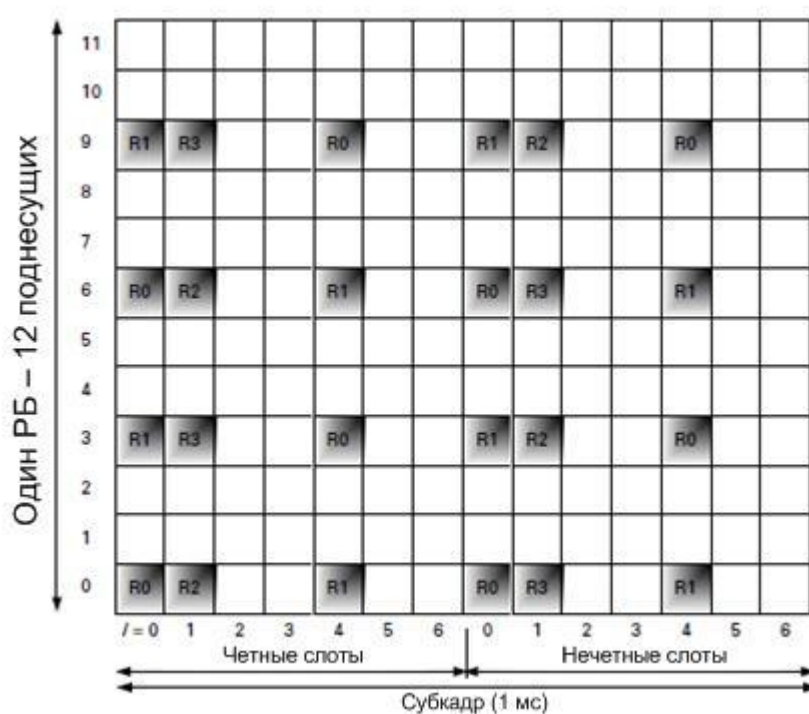


Рисунок 2.2.4 – Расположение опорных символов в ресурсном блоке во время передачи по линии «вниз» (DL)

В восходящем канале используется SC-FDMA, распределение ресурса аналогично [52,54]. Пример распределения канального ресурса приведен на Рисунке 2.2.5.

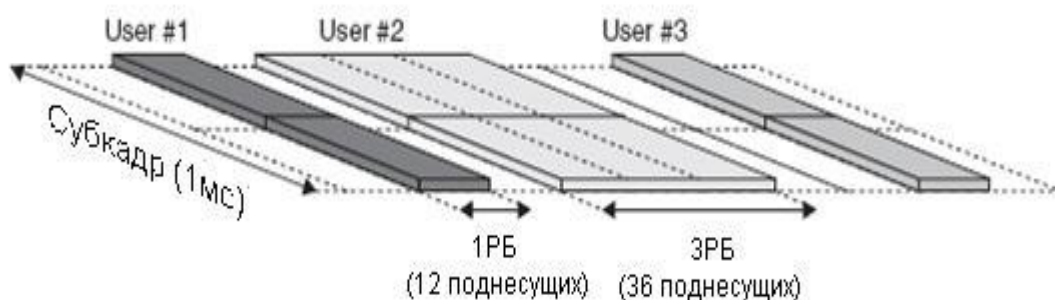


Рисунок 2.2.5 – Распределение канального ресурса на линии «вверх»

2.3 Способы применения полосы радиочастот 1785-1805 МГц

Полоса 10 МГц

Как уже отмечалось ранее, сеть может работать в одном диапазоне из набора частот: 1.4 МГц, 3 МГц, 5 МГц и 10 МГц. Выбор зависит от условий участка.

Использование максимально доступной полосы из набора частот имеет некоторые особенности: максимальная пропускная способность, минимальный энергозапас, наименьшая дальность, возможность перераспределения субкадров и использования всей полосы одним абонентом, высокая чувствительность к помехам.

Моделирование при работе всех БС на одной частоте (рис. 2.3.1) показывает деградацию зон и обрывы связи [3,106]. При загрузке сети работа данного модуля приведет к следующей ситуации:

- а) Для снижения помех смежные сектора используют разные половины полосы (по 5 МГц) что ведет к падению пропускной способности.
- б) Помехи от ближайших БС заставляют LTE разбивать полосу на более узкие, соответственно дополнительная потеря скорости.
- в) Растёт служебный трафик между БС что рассматривается как снижение информационной скорости.
- г) Необходимость применения и настройки протоколов IC-IC или CoMP для оптимальной работы сети [3,45,50].

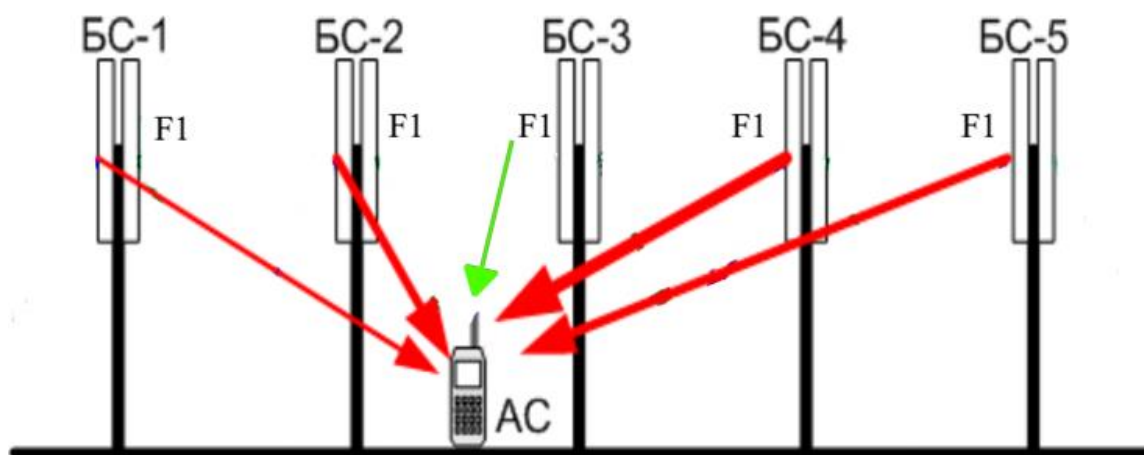


Рисунок 2.3.1 – Работа системы в полосе 10 МГц

Полоса 5 МГц

Преимущества с точки зрения ЭМС: большая дальность (чем при 10 МГц), подавление интерференции, энергозапас, возможность индивидуальной настройки субкадров TDD, резервирование на границах зон. Недостаток: меньшая пропускная способность.

Следует отметить, что при работе системы LTE в диапазоне 1800 МГц на железнодорожном транспорте, все БС сети могут работать только в 2 режимах: только «на прием» или только «на передачу» [3,52,106]. Полоса 5 МГц даёт два частотных номинала, упрощая ЭМС.

Для иллюстрации приведён расчёт без учёта рельефа (конфигурация субкадра «0»). На рис. 2.3.2 показана скорость DL при работе только одной БС — все условия выполнены. На рис. 2.3.3 — скорость DL при работе всех БС на передачу: зона обслуживания существенно сокращена из-за влияния соседних секторов. На большей части территории используется модуляция QPSK, резко снижающая пропускную способность [3].

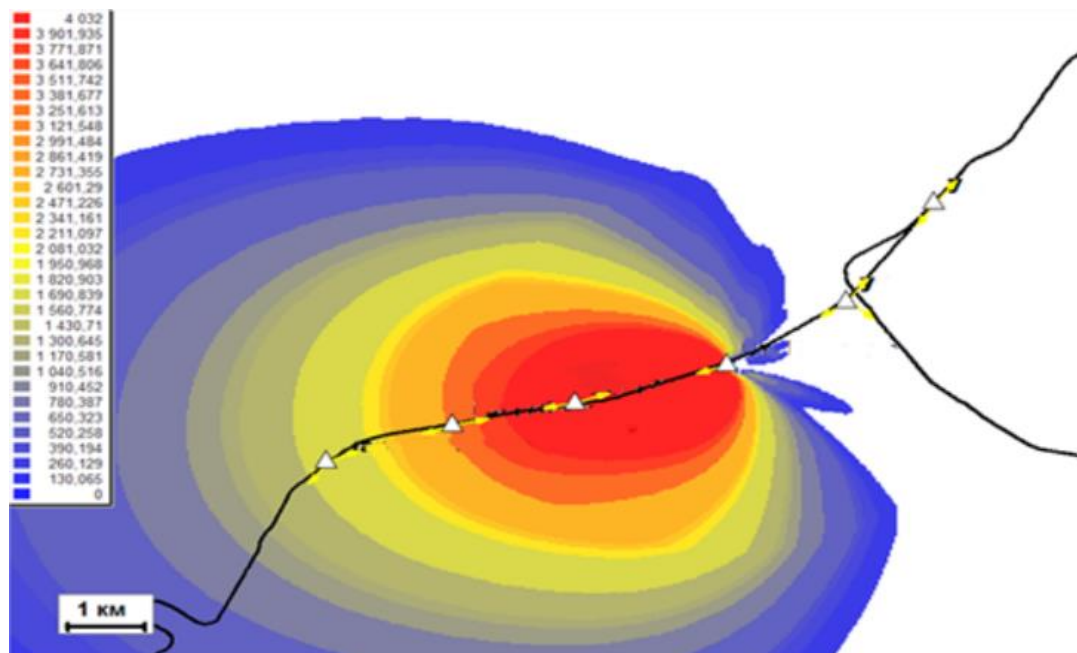


Рисунок 2.3.2 – Работа системы в полосе 5 МГц при работе только «на прием»

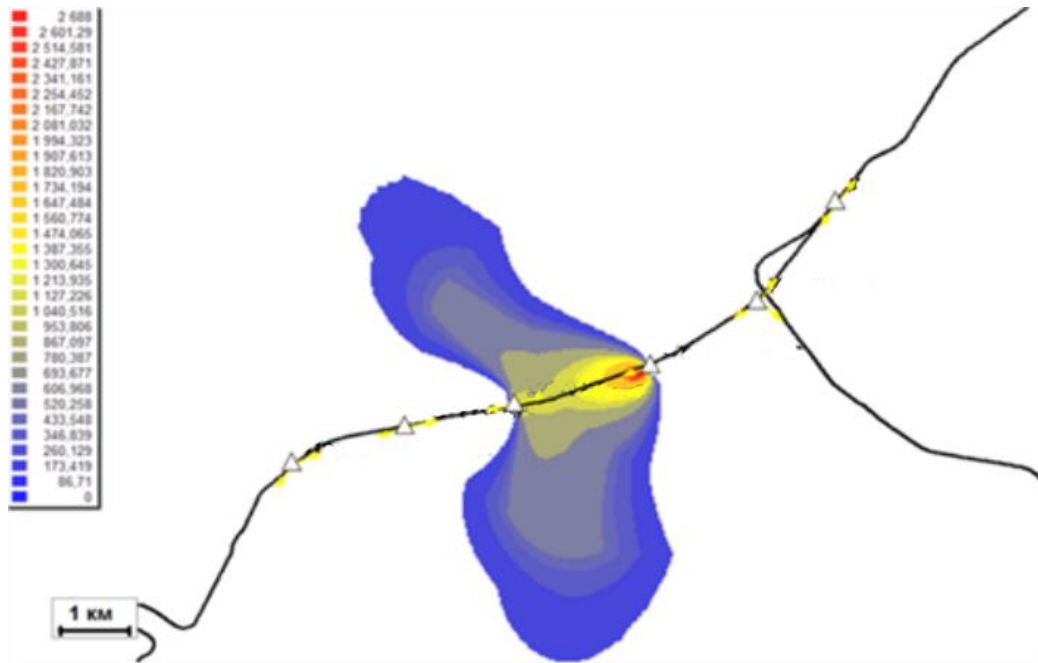


Рисунок 2.3.3 – Работа системы в полосе 5 МГц при работе только «на передачу»

Полосы 3 МГц и 1.4 МГц

Обеспечивают большую дальность, но наименьшую пропускную способность, недостаточную для передачи объёмных данных [106]. Позволяют разбивать систему на группы частот, что благоприятно для ЭМС (рис. 2.3.4). Этот метод применим лишь в частных случаях — например, при сложной ЭМС-обстановке или пересечениях с другими ТСП [45].

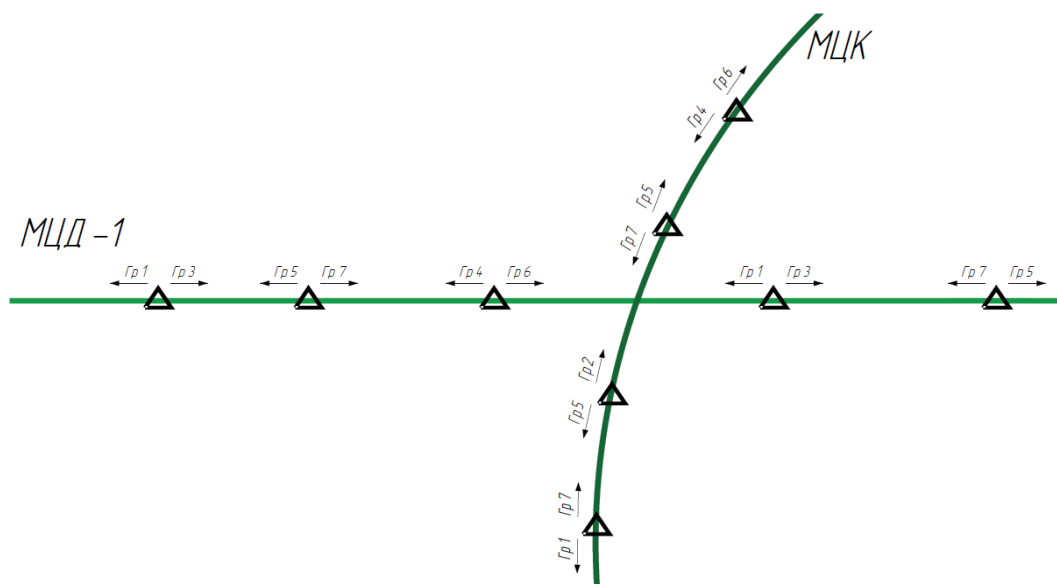


Рисунок 2.3.4 – Распределение частот по группам

Для работы системы в диапазоне 1500-2000 МГц при протяженности трассы 1-20 км, высоте антенны БС 30-200 м и высоте антенны АС 1-10 м применяется модель распространения COST231-Хата [43].

Далее будут приведены формулы для расчета значений средних потерь сигнала L_p для разных рельефов местности: L_p [дБ]; d [км]; f [МГц]; $h_{БС}$ [м]; $h_{АС}$ [м].

Значение L_p для «большого города» рассчитывается по формуле:

$$L_p = 48,5 - 13,82 \lg(h_{БС}) + 35,41 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{АС} + [44,9 - 6,55 \lg(h_{БС})]\lg(d) \quad (2.6)$$

Значение L_p для «среднего города и пригородного центра» с умеренной плотностью посадки деревьев:

$$L_p = 45,5 - 13,82 \lg(h_{БС}) + 35,41 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{АС} + [44,9 - 6,55 \lg(h_{БС})]\lg(d) \quad (2.7)$$

Значение L_p для «пригорода»:

$$L_p = 29,03 - 13,82 \lg(h_{БС}) + 44,57 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{АС} - 2,39 [\lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55 \lg(h_{АС})]\lg(d) \quad (2.8)$$

Значение L_p для «сельской местности»:

$$L_p = 9,56 - 13,82 \lg(h_{БС}) + 53,73 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{АС} - 4,78 [\lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55 \lg(h_{БС})]\lg(d) \quad (2.9)$$

Значение L_p для «свободного пространства»:

$$L_p = 4,56 - 13,82 \lg(h_{БС}) + 53,73 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{АС} - 4,78 [\lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55 \lg(h_{БС})]\lg(d) \quad (2.10)$$

Исходя из требований по обеспечению процента по времени и месту необходимо учитывать и Рекомендации МСЭ-R Р.1812 для расчета распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб «из пункта в зону» [43].

Основные потери передачи в свободном пространстве определяются выражением:

$$L_{bfs} = 92.44 + 20\log f + 20\log d \text{ дБ} \quad (2.11)$$

Корректировка, учитывающая влияние многолучевости и фокусировки в течение p и β_0 процентов времени, соответственно, описываются выражениями:

$$E_{sp} = 2.6 \left(1 - e^{-\frac{d_{It} + d_{Ir}}{10}} \right) * \log \left(\frac{p}{50} \right) \text{ дБ}, \quad (2.12)$$

$$E_{s\beta} = 2.6 \left(1 - e^{-\frac{d_{It} + d_{Ir}}{10}} \right) * \log \left(\frac{\beta_0}{50} \right) \text{ дБ}. \quad (2.13)$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой прямой видимости), которые не превышаются в течение $p\%$ времени, следующим образом:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \text{ дБ} \quad (2.14)$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, следующим образом:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs} + E_{s\beta} \text{ дБ}. \quad (2.15)$$

Дальнейшие формулы аналогичны формулам в Рекомендации МСЭ-R. P.1812 [9,43].

Оптимизация использования частотного спектра в диапазоне 1785–1805 МГц для линейно расположенных базовых станций — классическая задача частотно-территориального планирования. Учитывая требование резервирования через двойное радиопокрытие, стандартное жёсткое разделение каналов не подойдёт, так как оно оставляет «мёртвые зоны» на границах сот.

Данную задачу возможно решить с помощью метода целочисленного линейного программирования (ЦЛП). Сам метод решения ЦЛП давно известен, однако решение задачи оптимизации ограниченного частотного спектра методом ЦЛП – решение нетривиальное.

Для работы в этом сегменте потребуется режим TDD где приём и передача идут в одной полосе, но разделены по времени. Это упрощает задачу, так как не требует парного спектра.

Требование двойного радиопокрытия означает, что зона обслуживания соседних станций должна перекрываться, и оборудование абонента в этой зоне должно иметь возможность выбора канала (хендовер).

Учитывая линейное расположение (вдоль железной дороги) и ограниченный спектр в 10 МГц, оптимальным решением будет использование двухчастотной схемы с частичным переиспользованием.

При линейном расположении основные помехи создают две соседние станции (слева и справа). Станции через одну находятся дальше и создают меньшие помехи.

Двойное покрытие обеспечивается за счёт того, что границы сот перекрываются, но работают на разных частотах.

Для LTE минимально стабильная ширина полосы, обеспечивающая хорошую помехоустойчивость, составляет 5 МГц. 5 МГц достаточно для достижения скоростей ~2 Мбит/с даже с учётом служебного трафика.

Разделим 10 МГц на два неперекрывающихся канала по 5 МГц: Канал А (1790–1795 МГц) и Канал Б (1795–1800 МГц).

Базовые станции (БС) располагаются линейно: БС1, БС2, БС3, БС4, БС5.

БС1, БС3, БС5: Канал А

БС2, БС4: Канал Б

Чтобы абонент всегда имел запасной канал, зона покрытия каждой станции должна перекрываться с зоной соседней. При такой частотной схеме перекрытие происходит между станциями, работающими на разных каналах.

Абонент между БС1 и БС2 находится в зоне перекрытия. Он видит БС1 (Канал А) и БС2 (Канал Б).

Если связь с БС1 ухудшается, абонент переключается (хендовер) на БС2, не испытывая помех от БС1, так как они работают на разных частотах.

Результатом является достижение резервирования 1+1 для абонентов на стыках сот, а внутри сот покрытие обеспечивает одна станция.

Так как используется TDD, все базовые станции должны быть синхронизированы по времени, чтобы избежать коллизий «передача-приём».

Планирование мощности: необходимо рассчитать мощность передачи так, чтобы зона перекрытия (двойного покрытия) составляла не менее 15-20% от радиуса соты, но при этом станция БС2 (Канал Б) не создавала помех приёмнику БС1 (Канал А) за счёт разноса частот.

Это решение позволяет эффективно использовать ограниченный ресурс в 10 МГц для 5 станций с соблюдением всех заявленных требований.

Данную задачу можно решить с помощью задачи раскраски графа (рис. 2.3.5).

Задача распределения частот для базовых станций сводится к раскраске графа: вершины — станции, рёбра — потенциальные помехи (соседние станции), цвета — частотные каналы. Для линейного расположения из 5 станций граф является простым путём, который двудолен, поэтому достаточно 2 цветов. Код, реализующий раскраску и сопоставляющий цвета конкретным частотам, представлен в Приложении А.

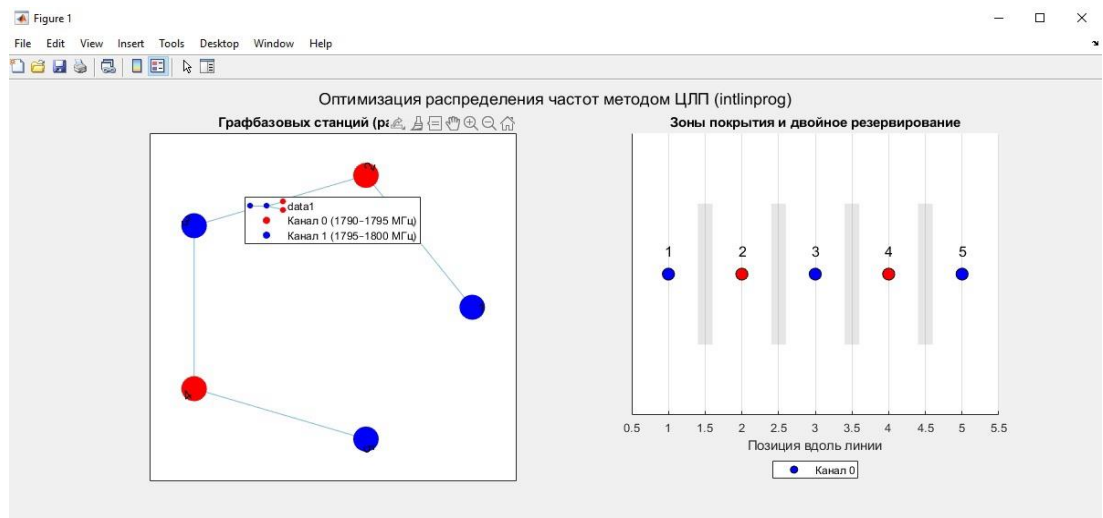


Рисунок 2.3.5 – Распределение частот методом ЦЛП

Математически, поставленную задачу можно сформулировать следующим образом: требуется найти допустимое назначение $\{x_{i,k}\}$, удовлетворяющее всем ограничениям, с минимальным значением целевой функции. Решение задачи определяет:

1. Минимальное число частотных каналов, необходимое для развертывания сети;

2. Конкретное распределение каналов по БС, обеспечивающее требуемую пропускную способность, двойное радиопокрытие и ЭМС.

Таким образом, математическая постановка задачи оптимального распределения частотного ресурса представляет собой задачу целочисленного линейного программирования (ЦЛП) с булевыми переменными, минимизирующую число используемых каналов при интерференционных ограничениях, заданных графом конфликтов E , построенным на основе моделей распространения радиоволн, требований к скорости передачи и резервированию сети.

Для учёта всех назначений методики (скорость, ЭМС, зона обслуживания) предлагается аддитивная целевая функция с весовыми коэффициентами:

$$\Phi = \alpha_1 * F_1 + \alpha_2 * (-F_2) + \alpha_3 * (-F_3) + \alpha_4 * F_4 \quad (2.16)$$

где $F_1 = \sum_{k=1}^K y_k$ - число используемых каналов (минимизация количества каналов);

F_2 - суммарная пропускная способность сети (максимизация скорости);

F_3 - уровень внутрисистемных помех (максимизация, т.к. помехи берутся со знаком минус);

F_4 - зона обслуживания БС (максимизация расстояния);

$\alpha_i > 0$ – весовые коэффициенты (зависят от ширины полосы частоты).

Пропускная способность для каждой БС на канале k :

$$C_{i,k} = B_k * \log_2(1 + SINR_{i,k}) \quad (2.17)$$

где B_k – ширина канала, МГц.

Суммарная пропускная способность сети:

$$F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K x_{i,k} * C_{i,k} \quad (2.18)$$

Необходимо максимизировать F_2 .

Уровень помех для БС на канале k от соседней БС j :

$$I_{i,k} = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^K x_{j,m} * \delta_{k,m} * P_{\text{ПОМ}}(i,j), \quad (2.19)$$

где $\delta_{k,m}=1$, если $k = m$ (т.е. соседние БС используют одинаковый канал),
иначе 0;

$P_{\text{ПОМ}}(i, j)$ - мощность помехи от БС j к БС i .

Общий уровень внутрисистемных помех:

$$F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K x_{i,k} * I_{i,k}. \quad (2.20)$$

Необходимо минимизировать F_3 .

Зона обслуживания БС в прямом/ обратном направлении:

$$S_{rAC}^{(i)} = EIRP_{BC}^{(i)} - G_{tr}^{(i)} + KU_{rAC}^{(i)} - A_{rAC}^{(i)} - Loss_{trBC}^{(i)} - Fade_{rAC}^{(i)}. \quad (2.21)$$

Обобщенная зона обслуживания:

$$F_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min(S_{rAC}^{(i)}, S_{rBC}^{(i)}) \quad (2.22)$$

Необходимо максимизировать F_4 .

Дополнительные скоростные ограничения, влияющие на целевую функцию:

$$\sum_k x_{i,k} * C_{i,k}^{(DL)} \geq 2 \frac{\text{Мбит}}{c}, \quad \sum_k x_{i,k} * C_{i,k}^{(UL)} \geq 2 \frac{\text{Мбит}}{c}. \quad (2.23)$$

Таким образом, итоговая формулировка задачи звучит следующее:
необходимо найти наборы $x_{i,k}$, y_k и параметры сети, минимизирующие:

$$\Phi = \alpha_1 \sum_{k=1}^K y_k - \alpha_2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K x_{i,k} * C_{i,k} + \alpha_3 \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K x_{i,k} * I_{i,k} - \alpha_4 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min(S_{rAC}^{(i)}, S_{rBC}^{(i)}) \quad (2.24)$$

Задачу оптимального распределения методом ЦЛП математически можно описать следующей формулой (2.25):

$$\min \sum_{k=1}^K y_k \quad (2.25)$$

При ограничениях:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K x_{i,k} &= 1, i = 1, \dots, N, \\ x_{i,k} + x_{j,k} &\leq 1, (i, j) \in E, k = 1, \dots, K, \\ x_{i,k} &\leq y_k, i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K, \\ x_{i,k} &\in \{0,1\}, y_k \in \{0,1\}. \end{aligned}$$

где N – количество базовых станций;

K – максимально доступное количество каналов;

E – множество пар станций, между которыми запрещено использовать одинаковый канал;

i, j – индексы базовых станций (нумерация станций);

k – индекс частотного канала (нумерация каналов).

Решением является не просто перебор, а «жадный алгоритм», который быстро осуществляет поиск наилучшего решения, удовлетворяющего заданным условиям, тем самым представляя наиболее оптимальное распределение ограниченного частотного спектра по имеющимся БС. При этом данное решение учитывает все ограничения, применяемые к стандарту LTE-1800 TDD, а также к диапазону 1800 МГц и проектируемой сети.

Результат работы программы:

Оптимальное решение найдено.

Минимальное количество необходимых каналов: 2

Распределение каналов по станциям:

БС1 -> Канал 0 (1790–1795 МГц)

БС2 -> Канал 1 (1795–1800 МГц)

БС3 -> Канал 0 (1790–1795 МГц)

БС4 -> Канал 1 (1795–1800 МГц)

БС5 -> Канал 0 (1790–1795 МГц)

Проверка ограничений:

Все соседние станции используют разные каналы. Интерференция исключена.

--- Обеспечение требуемых скоростей ---

2.4 Модель временной синхронизации режимов работы базовых в полосе радиочастот шириной 5 МГц при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Необходимо сделать обоснованный выбор использования ширины полосы частоты для того, чтобы построить TSP LTE-1800 TDD. Сеть должна удовлетворять следующим параметрам:

1. Необходимость обеспечения по месту и времени – 95%;
2. Обеспечить резервирование системы с двойным радиопокрытием;
3. Ограничение передачи информации по нисходящему каналу – не менее 2 Мбит/с, по восходящему каналу – не менее 1 Мбит/с;
4. Тип передаваемой информации – голос, речь, информационно-управляющие сигналы, данные о локомотиве [52].

Следуя алгоритму, изначально необходимо собрать данные об участке.

Участок проектирования характеризуется следующим:

1. Тип трассы – линейная;
2. Протяженность – 8 км;
3. Характер местности – сельская местность;
4. Смежные TSP отсутствуют.

После сбора данных об участке, необходимо сформировать данные об оборудовании, используемом на участке, и характере системы.

Изначально, при постановке задачи были заложены: тип данных, а именно: голос, речь, информационно-управляющие сигналы, данные о локомотиве.

Зададимся следующими параметрами:

1. Трафик данных – низкий;
2. Количество абонентов сети – 1 АС;
3. Потери в АФТ – не более 1.5 дБ;
4. Мощность – не более 40 Вт;
5. Коэффициент усиления антенны – не более 18 дБ;

6. Эффект Доплера – не критичен ввиду низких скоростей движения АС на всем участке.

Таким образом, на всем протяжении участка необходимо передавать голос и речь, информационно-управляющие сигналы и данные о локомотиве со скоростью не менее 2 Мбит/с по нисходящей линии и 1 Мбит/с по восходящей линии, с учетом низкого трафика движения в системе.

Исходя из этих критериев по пропускной способности, мы можем использовать полосы шириной 1.4 МГц, 3 МГц или 5 МГц [52].

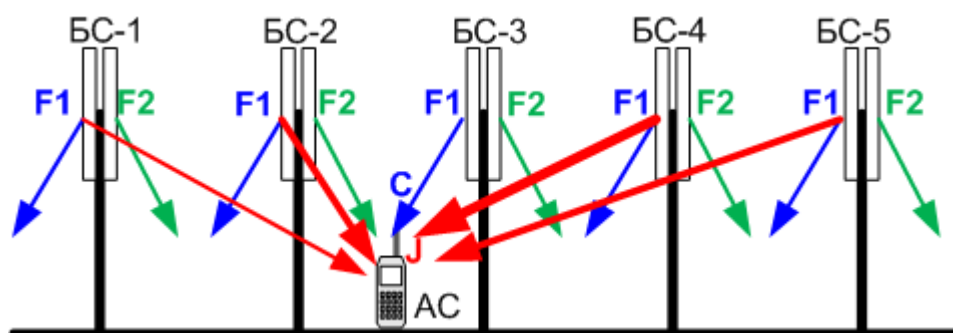
Поскольку изначально к сети предъявляются повышенные требования, остановим выбор на полосе шириной 5 МГц. Далее необходимо сделать обоснованный выбор режима работы сети.

На экспериментальном участке линейно располагаются 5 базовых станций в полосе частот 1800 МГц.

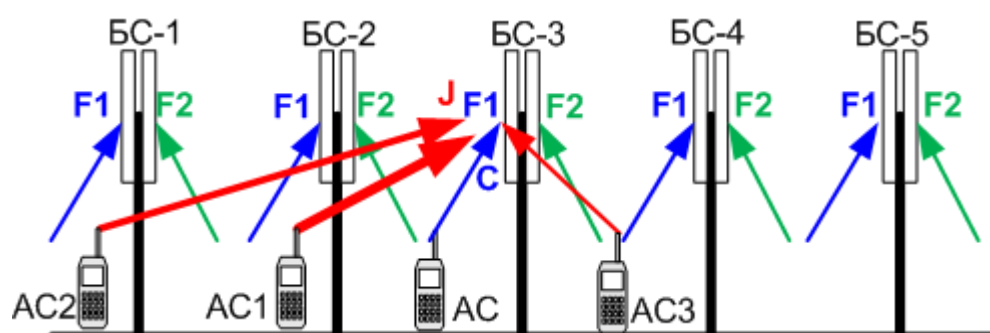
Проведем анализ основных источников и направлений прихода помех.

Стандартный режим работы БС LTE: все БС синхронно работают либо только «на приём», либо только «на передачу» [52,57].

В момент времени t_1 все БС передают (рисунок 2.4.1а). АС принимает сигнал (С) от «левого» сектора БС3 на частоте F1. На вход приёмника АС поступают помехи (J) от других секторов, работающих на этой же частоте. Наибольшую мощность имеет излучение от сектора БС-4, но и другие сонаправленные секторы значимы.



а) момент времени t_1 , когда все БС работают "на передачу"



б) момент времени t_2 , когда все БС работают "на прием"

Рисунок 2.4.1 – Источники помех при стандартном режиме работы БС

В следующий момент времени t_2 все БС переходят в приём. Сигналом для приёмника БС-3 служит излучение АС на обслуживаемом участке. При этом работа других АС создаёт помехи [52].

Проведем сравнительный анализ качественных характеристик работы сети LTE при различных режимах и условиях. Расчёт выполнен на «гладкой сфере» с конфигурацией радиокадра №0 (благоприятной для обратного канала) [52,60,62]. При выключенных других БС (рис. 2.4.2) требуемая скорость DL (2 Мбит/с) обеспечивается почти на двух перегонах, вплоть до БС2. При включении всех БС в стандартном режиме (рис. 2.4.3) зона обслуживания сокращается в разы: скорость >2 Мбит/с не покрывает и половины участка. Максимальное SINR ≈ 18 дБ, тогда как для 64QAM необходимо >19 дБ, поэтому её использование маловероятно [52,64,118].

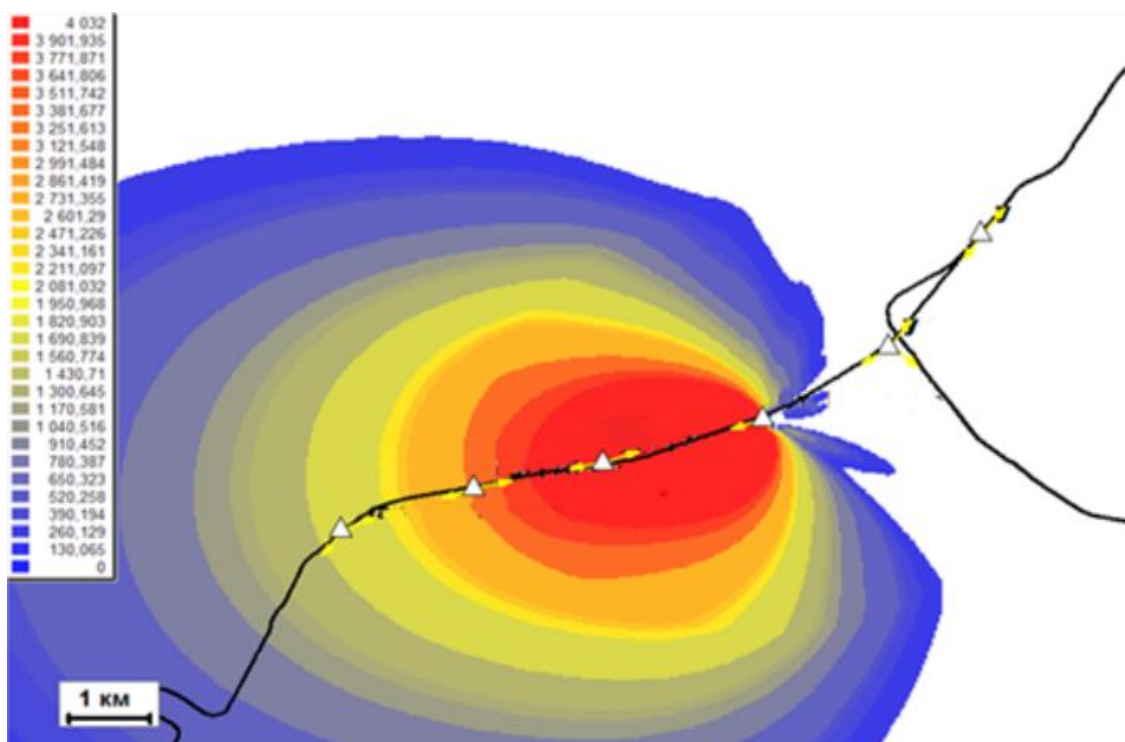


Рисунок 2.4.2 – Скорость передачи в прямом направлении (Down) на носимые АС без учета помех от других БС, конфигурация кадра №0

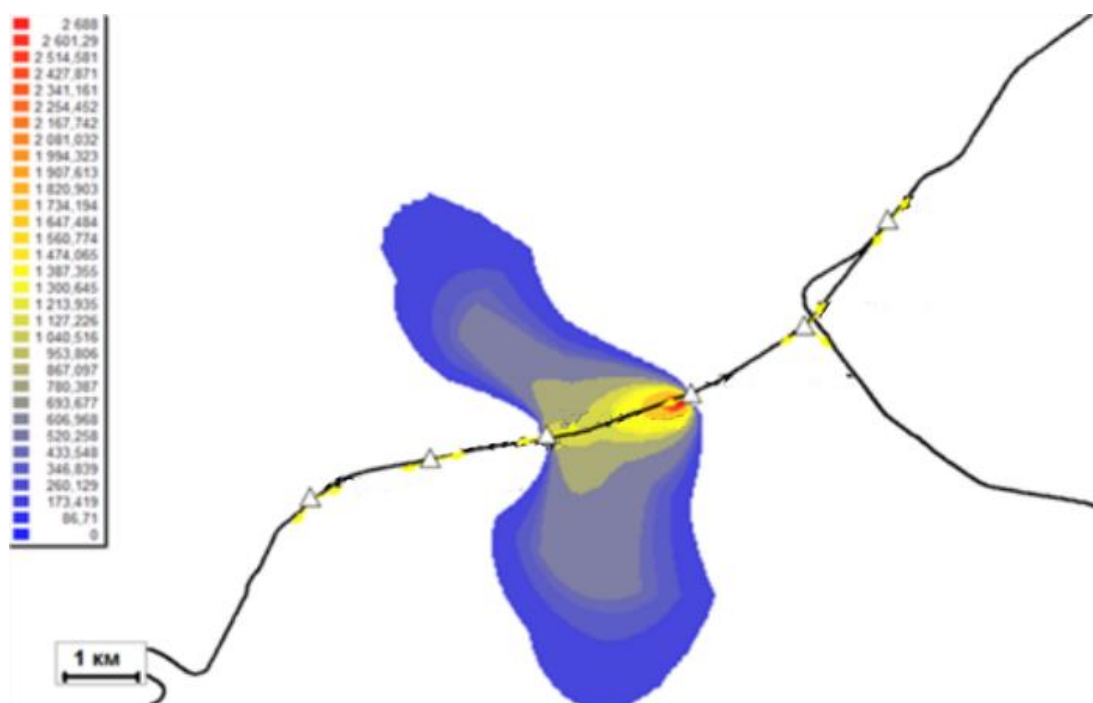


Рисунок 2.4.3 – Скорость передачи в прямом направлении (Down) на носимые АС с учетом помех от других БС, конфигурация кадра №0

В качестве примера, на Рисунке 2.4.4 представлена карта распределения доступных видов модуляции на линии вниз при учете внутрисистемных помех (зеленый цвет - 16 QAM, синий цвет - QPSK). Из рисунка видно, что на большей части зоны обслуживания будет использована модуляция QPSK, что существенно снижает пропускную способность системы.



Рисунок 2.4.4 – Карта распределения доступных видов модуляции на линии вниз при учете внутрисистемных помех (зеленый цвет - 16 QAM, синий цвет - QPSK)

Поскольку требование ≥ 2 Мбит/с на DL не выполняется, переходят к конфигурации №1 (равные возможности для UL и DL). При конфигурации №1 (рис. 2.4.5) на всём перегоне обеспечивается скорость DL ≥ 2 Мбит/с [52]. Однако на линии «вверх» (рис. 2.4.6) пропускная способность снижается, но требование ≥ 1 Мбит/с выполняется для обоих вариантов [52,106].

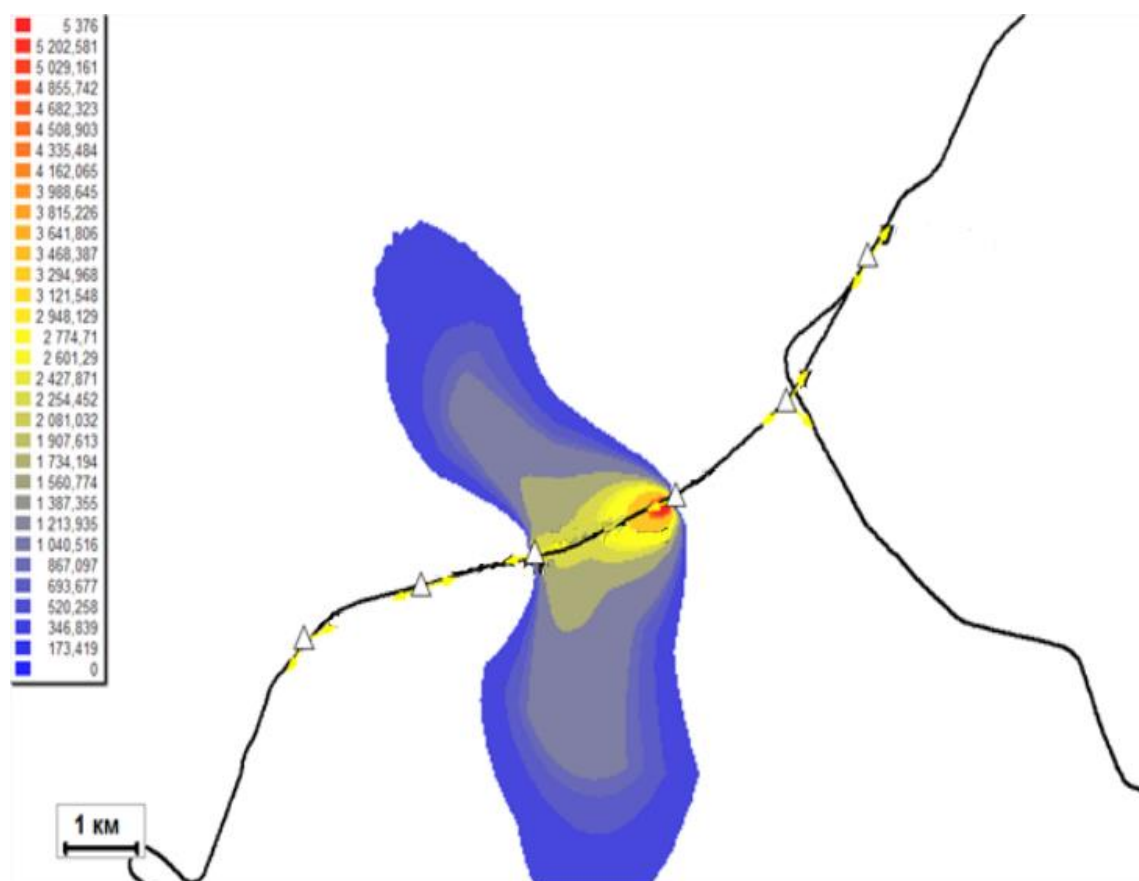


Рисунок 2.4.5 – Скорость передачи в прямом направлении (Down) на носимые АС с учетом помех от других БС, конфигурация кадра №1

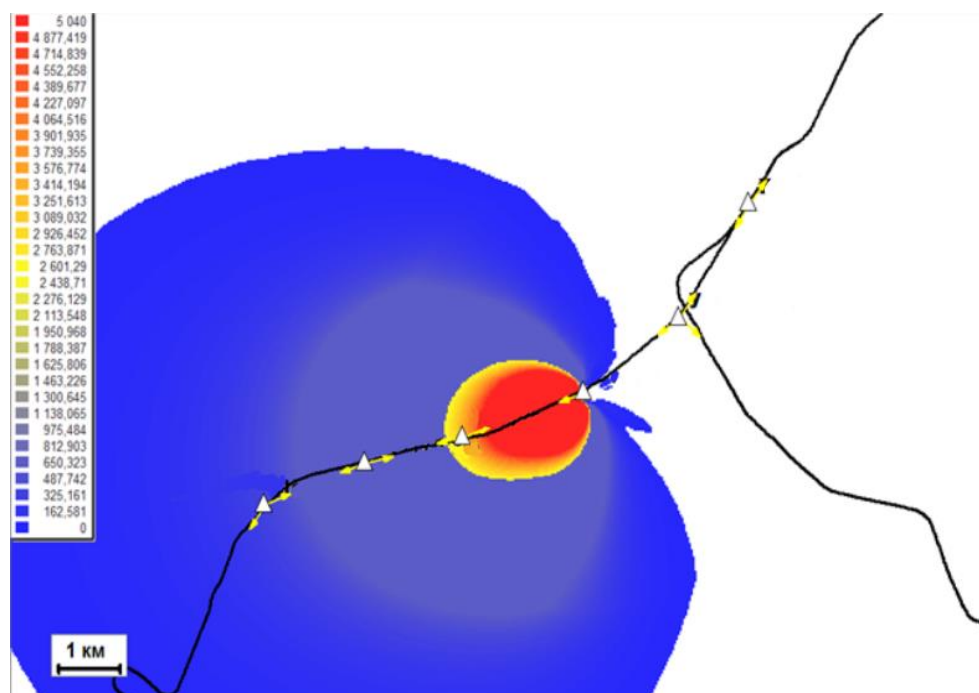
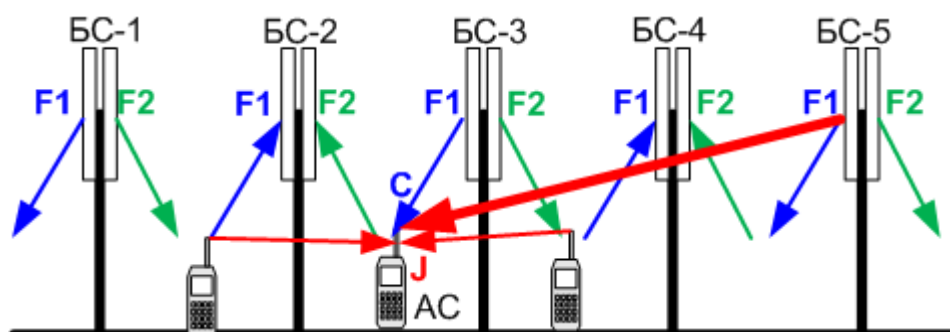


Рисунок 2.4.6 – Скорость передачи в обратном направлении (Up), носимые АС, конфигурация кадра №1

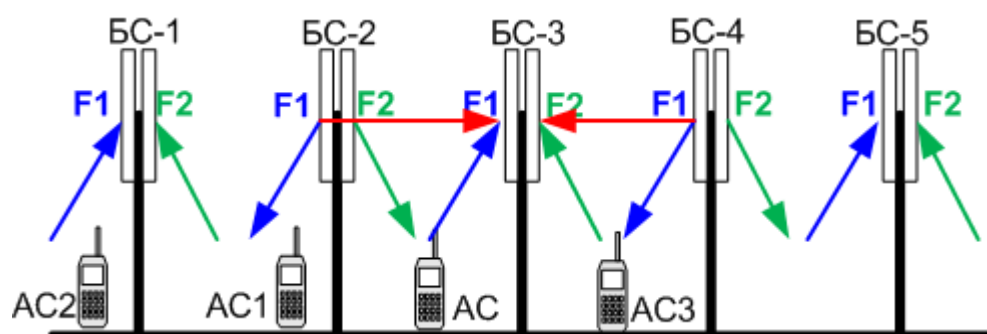
Основная проблема классического режима — внутрисистемные помехи, ограничивающие использование высокоэффективных сигнально-кодовых конструкций. Частичное решение — чередование работы «на передачу» и «на приём» между станциями. В оптимальном режиме (с точки зрения ЭМС) в момент t_1 чётные БС передают, нечётные принимают, в t_2 — наоборот [67-68].

Поясняющая картинка представлена на Рисунке 2.4.7. Как видно из рисунка 2.4.7а, основную составляющую помехи на линии "вниз" будет создавать сонаправленный сектор БС-5, которая расположена через одну БС-4. Источниками помех могут быть также и абонентские станции, расположенные на соседних участках [52].

На линии "вверх" помеху создают две смежные БС (Рисунок 2.4.7б). Однако, излучение БС-4 попадает в задние лепестки приемной антенны, где ослабление может достигать 30 дБ и выше. Равно как и излучение другой смежной БС-2 ослаблено примерно на такую же величину, так как рецептор помехи расположен с обратной стороны от направления ее электрической оси.



а) момент t_1 , четные БС работают "на передачу", нечетные - "на прием"



б) момент t_2 , четные БС работают "на прием", нечетные - "на передачу"

Рисунок 2.4.7 – Источники помех при оптимальном режиме работы БС

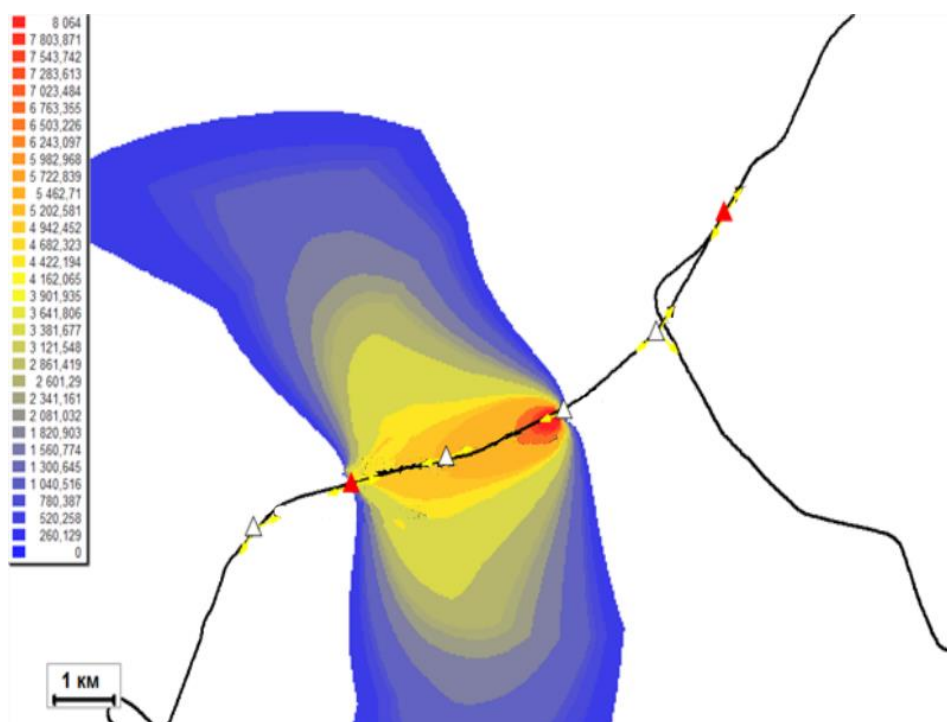


Рисунок 2.4.8 – Карта распределения пропускной способности на линии "вниз" с учетом помех, конфигурация кадра №1

Сравнение режимов (рис. 2.4.8) показывает, что при оптимальном режиме пропускная способность линии «вниз» возрастает почти вдвое [52,119].

Для реализации такого частотно-временного плана необходимо использовать конфигурацию радиокadra №1. В частности, на Рисунке 2.4.9 показан пример работы двух смежных БС с вариантом конфигурации №1 и синхронизацией режимов приема/передачи.

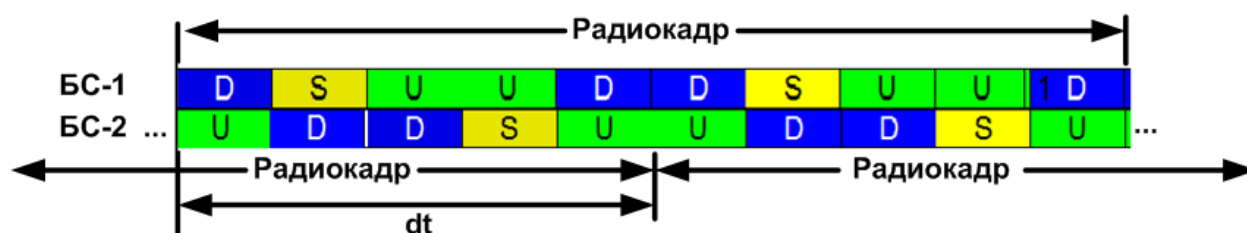


Рисунок 2.4.9 – Временная синхронизация режимов работы БС

Из рисунка 2.4.9 видно, что для реализации частотно-временного плана достаточно обеспечить относительный сдвиг радиокadров смежных БС на величину половины его длительности. Если длительность радиокadra 10 мс, то потребный сдвиг составит 5 мс. При этом циклы приема и передачи на

смежных БС будут разные. Исключение составляет субкадр S со специальными полями, но чередование минимизирует последствия [52].

Таким образом, для нашего случая рекомендовано использовать оптимальный режим с конфигурацией №1. При невозможности — стандартный синхронный режим (все БС одновременно на приём или передачу).

После выбора режима работы и определения конфигурации субкадра TDD, необходимо просчитать зону Handover (НО). Подробный процесс расчета зоны НО описан в главе 1.3.

Исходя из вышеперечисленного, сделан обоснованный выбор используемой ширины полосы частоты для данного участка.

Далее необходимо создать модель временной временной синхронизации режимов работы базовых станций, основанную на принципах, описанных ранее.

Структура модели и схема алгоритма представлена на рис. 2.4.10.

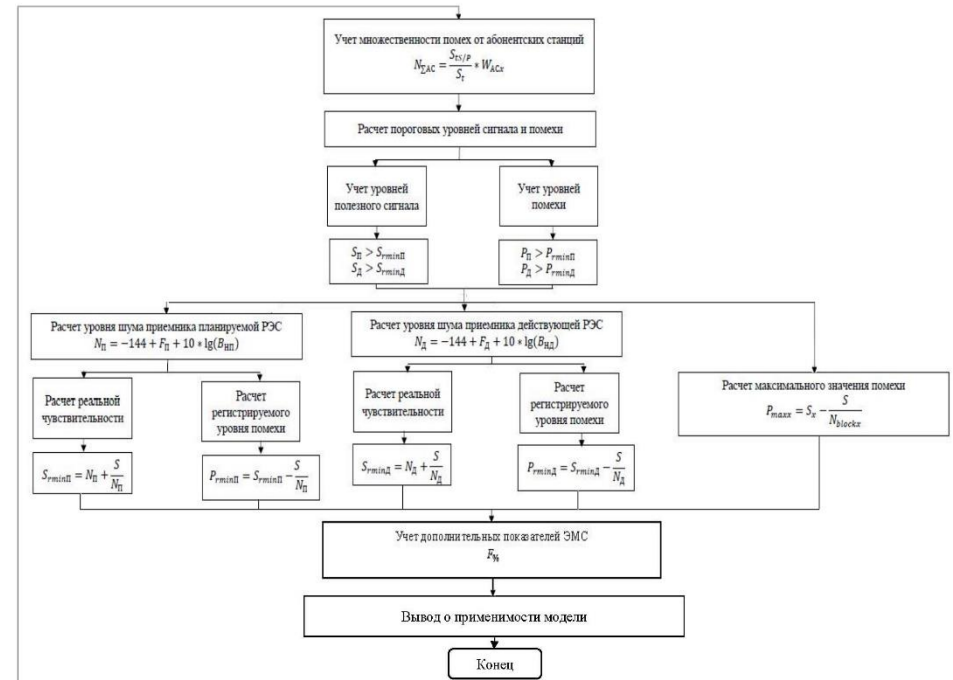
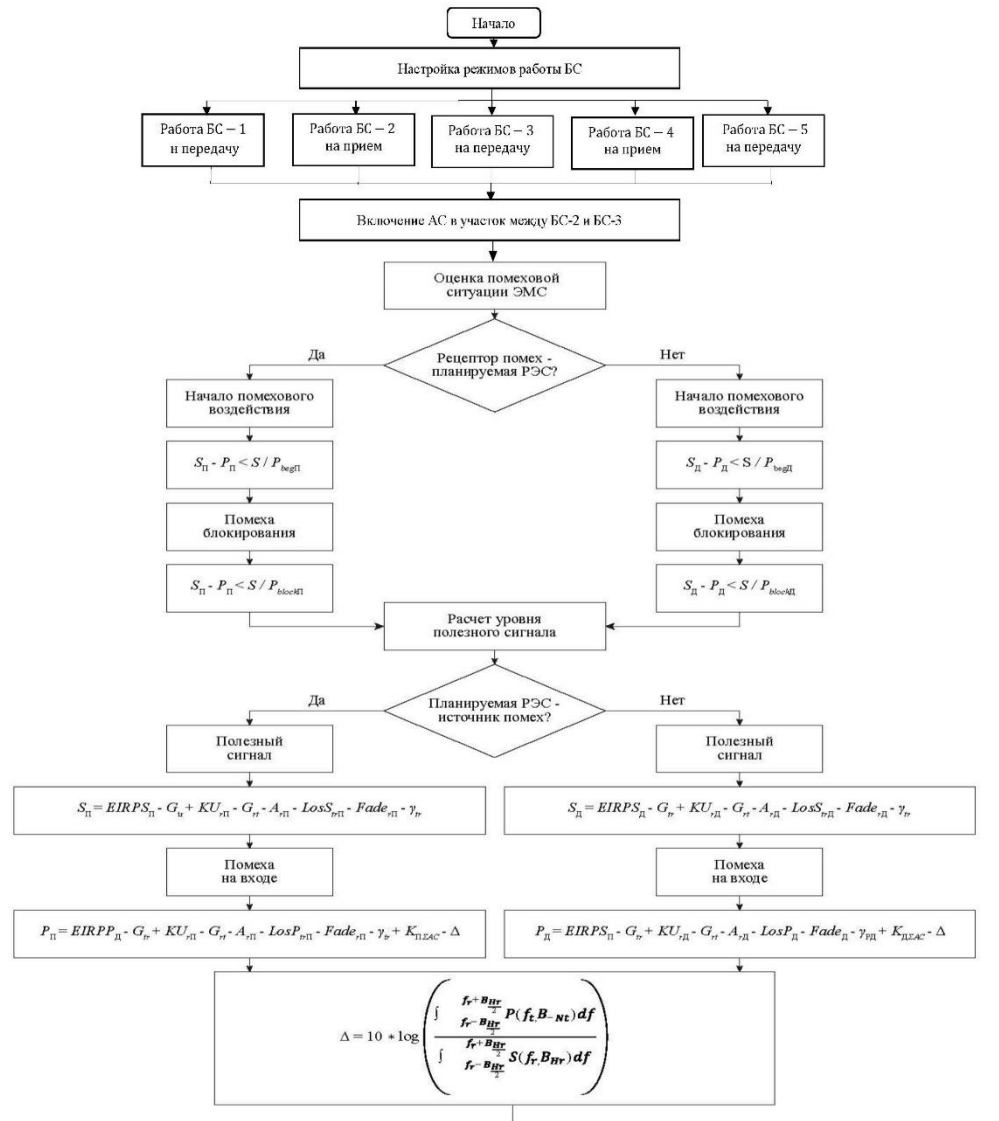


Рисунок 2.4.10 – Схема алгоритма модели временной синхронизации режимов работы БС

В модели, для расчета показателей ЭМС применяются следующие формулы и алгоритмы.

P_{Π} - максимальный уровень помехи на входе приемника планируемой БСп (здесь и далее Π является нижним индексом, обозначающим планируемую БС) от дополнительной БС- БСд. (здесь и далее Δ является нижним индексом, обозначающим дополнительную БС);

S_{Π} - уровень полезного сигнала на входе приемника планируемой БС;

P_{Δ} - максимальный уровень помехи на входе приемной дополнительной БСд от планируемой БСп;

S_{Δ} - уровень полезного сигнала на входе приемника дополнительной БСд.

Так как в нашем случае используются две БС (планируемая и дополнительная), то помеховые ситуации могут возникать на обеих БС [39,102]. Помеховые ситуации определяются следующими неравенствами:

А) начало помехового воздействия:

1) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСп определяется неравенством:

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{beg\Pi}}, \quad (2.26)$$

где:

$\frac{S}{P_{beg\Pi}}$ - защитное отношение сигнал/помеха для планируемой БС, или минимальная величина отношения полезного сигнала к мешающему на входе приемника, которая позволяет получить установленное качество приема полезного сигнала на выходе приемника, дБ.

2) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСд определяется неравенством:

$$S_{\Delta} - P_{\Delta} < \frac{S}{P_{beg\Delta}}, \quad (2.27)$$

где:

$\frac{S}{P_{beg\Delta}}$ - защитное отношение сигнал/помеха для дополнительной БС, или минимальная величина отношения полезного сигнала к мешающему на входе

приемника, которая позволяет получить установленное качество приема полезного сигнала на выходе приемника, дБ [39,102].

Б) блокирование связи помехой:

1) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСП определяется неравенством:

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{block\Pi}}, (2.28)$$

где:

$\frac{S}{P_{block\Pi}}$ - блокирующее защитное отношение сигнал/помеха для планируемой РЭС, при котором, помеха существенно ухудшает качество, затрудняет или неоднократно прерывает работу службы радиосвязи, дБ.

2) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСД определяется неравенством:

$$S_{\Delta} - P_{\Delta} < \frac{S}{P_{block\Delta}}, (2.29)$$

где:

$\frac{S}{P_{block\Delta}}$ - блокирующее защитное отношение сигнал/помеха для дополнительной РЭС, при котором существенно ухудшается качество, затрудняется или неоднократно прерывается работа службы радиосвязи, дБ [39,102].

Расчет уровня полезного сигнала на входе приемника

Для расчета уровня полезного сигнала на входе приемника БСП применяется следующая формула:

$$S_{\Pi} = EIRPS_{\Pi} - G_{tr} + KU_{r\Pi} - G_{rt} - A_{r\Pi} - LosS_{tr\Pi} - Fade_{r\Pi} - \gamma_{tr}, (2.30)$$

где:

$EIRPS_{\Pi}$ - эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) полезного сигнала на выходе излучающей антенны БСП, дБВт;

G_{tr} - ослабление сигнала передающей антенны в направлении получателя полезного сигнала по сравнению с максимумом излучения, дБ;

$KU_{r\Pi}$ - коэффициент усиления антенны приемника БСП, дБи;

G_{rt} - ослабление приемной антенны в направлении источника сигнала по сравнению с максимумом усиления принимаемого сигнала, дБ;

$A_{r\Pi}$ - коэффициент ослабления сигнала в АФТ БСП приемника, дБ;

$LosS_{tr\Pi}$ - медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала БСП, дБ;

$Fade_{r\Pi}$ - энергетический запас на замирание сигнала, дБ;

γ_{tr} - уровень поляризационных потерь между передатчиком и приемником, если и передатчик, и приемник имеют заданную поляризацию антенн (иначе равен нулю), дБ [39,102].

Для помеховой ситуации, когда рецептором помех является дополнительная БСД применяется формула:

$$S_d = EIRPS_d - G_{tr} + KU_{rd} - G_{rt} - A_{rd} - LosS_{trd} - Fade_{rd} - \gamma_{tr}, \quad (2.31)$$

где:

$EIRPS_d$ - $EIRPS_d$ – ЭИИМ полезного сигнала на выходе излучающей антенны БСД, дБВт;

KU_{rd} - коэффициент усиления антенны приемника БСД, дБи;

A_{rd} - коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника БСД, дБ;

$LosS_{trd}$ - медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала БСД, дБ;

$Fade_{rd}$ - энергетический запас на замирание сигнала для БСД, дБ.

Расчет уровня помехи на входе приемника [39,102].

Для помеховой ситуации, когда рецептором помех является планируемая БС (БСП), максимальный уровень помехи на входе приемника планируемой БСП определяется по формуле:

$$P_{\Pi} = EIRPP_d - G_{tr} + KU_{r\Pi} - G_{rt} - A_{r\Pi} - LosP_{tr\Pi} - Fade_{r\Pi} - \gamma_{tr} + K_{\Pi\Sigma AC} - \Delta \quad (2.32)$$

где:

$EIRPP_d$ - ЭИИМ источника помех на выходе излучающей антенны БСД, дБВт;

$LosP_{tr\Pi}$ - медианное ослабление помехи в пространстве при распространении от источника сигнала БСП, дБ;

$K_{\Pi\Sigma AC}$ - поправочный коэффициент на групповую помеху по количеству помеховых источников для планируемой БС (применяется в случае, когда БС входит в сеть фиксированного беспроводного доступа), дБ;

Δ - поправка уровня помехи по разносу полос частот (процесс корректировки уровня принимаемого сигнала для снижения помех от соседних каналов, которые возникают при близком расположении частот несущих) приемника и помехи, дБ [39,102].

Для помеховой ситуации, когда рецептором помех является дополнительная БС, максимальный уровень помехи на входе приемной дополнительной БСд определяется по формуле:

$$P_d = EIRPP_{\Pi} - G_{tr} + KU_{r_d} - G_{rt} - A_{r_d} - LosP_d - Fade_d - \gamma_{PD} + K_{\Pi\Sigma AC} - \Delta \quad (2.33)$$

где:

$EIRPP_{\Pi}$ - ЭИИМ источника помех на выходе излучающей антенны БСП, дБВт;

$LosP_d$ - медианное ослабление помехи в пространстве при распространении от источника сигнала БСд, дБ;

$K_{\Pi\Sigma AC}$ - поправочный коэффициент на групповую помеху по количеству помеховых РЭС для дополнительной БС (применяется в случае, когда БС входит в сеть фиксированного беспроводного доступа), дБ.

Расчет поправок уровня помехи по разносу частот полезного сигнала и помехи Δ выполняется путем расчета интегральной помехи в полосе приема РЭС-рецептора помехи с учетом процента перекрытия амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приемника и маски излучения необходимой ширины полосы излучения (НШПИ) передатчика по формуле:

$$\Delta = 10 * \log \left(\frac{\int_{f_r - \frac{B_{Hr}}{2}}^{f_r + \frac{B_{Hr}}{2}} P(f_t, B_{-Nt}) df}{\int_{f_r - \frac{B_{Hr}}{2}}^{f_r + \frac{B_{Hr}}{2}} S(f_r, B_{Hr}) df} \right), \quad (2.34)$$

где:

B_{Nt} - ширина спектра помехи с учетом маски спектра по уровню минус 60 дБ, минус 50 дБ, минус 40 дБ и др., МГц;

f_t - центральная частота передачи РЭС-источника помех, МГц;

B_{Hr} - НШПИ РЭС-рецептора помех, МГц;

f_r - центральная частота приема РЭС-рецептора помех, МГц;

$P(f_t, B_{Hr})$ - АЧХ РЭС-рецептора помех в полосе излучения (НШПИ) РЭС-источника помех;

$S(f_r, B_{Hr})$ - АЧХ РЭС-рецептора помех в полосе излучения (НШПИ) РЭС-приемника [39,102].

В помеховой ситуации, когда помеховая РЭС является абонентской станцией и в зоне действия БС может функционировать несколько помеховых АС, уровень помехи возрастает за счет множественности РЭС-источников помех. Для учета множественности РЭС-источников помех в расчетных формулах применяются поправочные коэффициенты на групповую помеху по количеству помеховых РЭС:

- $K_{\Sigma AC}$ для помеховой ситуации, когда РЭС_п или АС РЭС_п является РЭС-рецептором помех;

- $K_{\Sigma AC}$ для помеховой ситуации, когда РЭС_д или АС РЭС_д является РЭС-рецептором помех

Данные коэффициенты определяется технологией радиосвязи РЭС-источника помех и определяются одинаково для РЭС_п или РЭС_д.

Количество одновременно функционирующих АС в зоне создания помех может существенно превышать нормируемое значение. Значение коэффициентов представлено в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Рекомендуемые значения поправочных коэффициентов множественной помехи от АС $K_{\Sigma AC}$ для различных технологий

№	Технология	$K_{\Sigma AC}$, дБ
1	LTE, НШПИ = 5 МГц	14
2	LTE, НШПИ = 10 МГц	17
3	LTE, НШПИ = 20 МГц	20
4	IMT-2020	14...24
5	GSM	8
6	UMTS	8
7	TETRA	8
8	ФБД	8
9	РЭС ШБД ЖД	8

Поправочный коэффициент $K_{\Sigma AC}$ для технологии LTE рассчитан исходя из допущения, что на одного абонента распределен один ресурсный блок. В зависимости от НШПИ количество ресурсных блоков будет отличаться, к примеру, для LTE НШПИ = 20 МГц количество ресурсных блоков равно 100, следовательно, поправочный коэффициент выражается как $10\log(100) = 20$ дБ [39].

Если прогнозируемое максимальное количество одновременно функционирующих АС $N_{\Sigma AC}$ отличается от максимально допустимого, то целесообразно провести расчет максимального количества одновременно функционирующих АС по формуле [39]:

$$N_{\Sigma AC} = \frac{S_{tS/P}}{S_t} * W_{ACx} \quad (2.35)$$

где:

$S_{tS/P}$ – площадь зоны действия РЭС-источника помех, из которой могут создаваться помехи РЭС-рецептору помех от АС, км²;

S_t – общая площадь зоны, где функционирует АС РЭС-источника помех, км²;

W_{ACx} – прогнозируемое количество АС в зоне действия БС РЭС-источника помехи в заданном частотном диапазоне, шт.

Минимальный уровень полезного сигнала и минимальный уровень помехи применяются при расчетах для исключения из расчетов помеховых ситуаций, когда уровень полезного сигнала будет меньше минимально допустимого значения уровня сигнала либо уровень помехи будет ниже минимально допустимого уровня помехи. Данные величины определяются реальной чувствительностью приемника РЭС-рецептора помехи и защитным отношением «сигнал/шум» [39].

Выполняется расчет следующих величин:

- минимального уровня полезного сигнала на входе планируемой РЭС, в помеховой ситуации, когда РЭС_П или АС РЭС_П является РЭС-рецептором помехи $S_{rminП}$, дБВт;
- минимального уровня полезного сигнала на входе действующей РЭС, в помеховой ситуации, когда РЭС_Д или АС РЭС_Д является РЭС-рецептором помехи $S_{rminД}$, дБВт;
- минимального уровня помехи на входе планируемой РЭС, в помеховой ситуации, когда РЭС_П или АС РЭС_П является РЭС-рецептором помехи $P_{rminП}$, дБВт;
- минимального уровня помехи на входе действующей РЭС, в помеховой ситуации, когда РЭС_Д или АС РЭС_Д является РЭС-рецептором помехи $P_{rminД}$, дБВт.

При расчетах значений уровней полезного сигнала $S_{П}$ и $S_{Д}$ учитываться должны только те уровни, для которых выполняются неравенства [39]:

$$S_{П} > S_{rminП} \quad (2.36)$$

$$S_{Д} > S_{rminД} \quad (2.37)$$

При расчетах значений уровней помехи $P_{П}$ и $P_{Д}$ учитываться должны только те уровни, для которых выполняются неравенства:

$$P_{П} > P_{rminП} \quad (2.38)$$

$$P_d > P_{rminд} \quad (2.39)$$

Для помеховой ситуации, когда РЭС_П или АС РЭС_П является РЭС-рецептором помехи, применяются следующие выражения для расчетов $S_{rminП}$ и $P_{rminП}$.

Расчет уровня шума приемника планируемой РЭС $N_{П}$ осуществляется по формуле:

$$N_{П} = -144 + F_{П} + 10 * \lg(B_{НП}) \quad (2.40)$$

где:

$F_{П}$ – коэффициент шума приемника, дБ (по умолчанию равен 5);

$B_{НП}$ – полоса пропускания приемника, МГц.

Реальная чувствительность приемника планируемой РЭС $S_{rminП}$ (минимально допустимый уровень сигнала) рассчитывается по формуле:

$$S_{rminП} = N_{П} + \frac{S}{N_{П}} \quad (2.41)$$

где:

$S/N_{П}$ – защитное отношение сигнал/шум, дБ.

Регистрируемый уровень помехи на входе приемника планируемой РЭС $P_{rminП}$ определяется по формуле:

$$P_{rminП} = S_{rminП} - \frac{S}{N_{П}} \quad (2.42)$$

где:

$P_{rminП}$ – минимальный регистрируемый уровень помехи РЭС-рецептора помехи, дБВт;

$S_{rminП}$ – реальная чувствительность приемника РЭС-рецептора помехи, дБВт;

$S/N_{П}$ – защитное отношение сигнал/шум РЭС-рецептора помехи, дБ.

Для помеховой ситуации, когда РЭС_Д или АС РЭС_Д является РЭС-рецептором помехи, применяются следующие выражения для расчетов $S_{rminд}$ и $P_{rminд}$. [39].

Расчет уровня шума приемника действующей РЭС $N_{Д}$ осуществляется по формуле:

$$N_{Д} = -144 + F_{Д} + 10 * \lg(B_{НД}) \quad (2.43)$$

где:

F_d – коэффициент шума приемника, дБ (по умолчанию равен 5);

$B_{нд}$ – полоса пропускания приемника, МГц.

Реальная чувствительность приемника действующей РЭС $S_{rminд}$ (минимально допустимый уровень сигнала) рассчитывается по формуле:

$$S_{rminд} = N_d + \frac{S}{N_d} \quad (2.44)$$

где:

S/N_d – защитное отношение сигнал/шум, дБ [39].

Регистрируемый уровень помехи на входе приемника действующей РЭС $P_{rminд}$ определяется по формуле:

$$P_{rminд} = S_{rminд} - \frac{S}{N_d} \quad (2.45)$$

где:

$P_{rminд}$ – минимальный регистрируемый уровень помехи РЭС-рецептора помехи, дБВт;

$S_{rminд}$ – реальная чувствительность приемника РЭС-рецептора помехи, дБВт;

S/N_d – защитное отношение сигнал/шум РЭС-рецептора помехи, дБ [39].

Максимальное значение помехи P_{maxx} определяется уровнем, при котором помеха достигает блокирующего значения. Максимальное значение помехи может применяться для систем фиксированной связи, когда известно значение уровня полезного сигнала на входе приемника.

Максимальное значение помехи P_{maxx} , определяется по формуле

$$P_{maxx} = S_x - \frac{S}{N_{blockx}} \quad (2.46)$$

где:

S_x – уровень полезного сигнала на входе приемника, дБВт;

S/N_{blockx} – блокирующее защитное отношение, дБ.

Дополнительные показатели ЭМС

Дополнительные показатели ЭМС позволяют определить направления действий для уменьшения или ликвидации помеховых воздействий либо

определить возможное появление помех при изменении конфигурации радиосети [39].

Для помеховой ситуации, когда РЭС_П или АС РЭС_П является РЭС-рецептором помехи, к дополнительным показателям относятся:

1) процент частотного диапазона $F_{\%S/N\Pi}$, в котором выполняется условие (то есть помеха регистрируется и снижает или может снизить качество связи при уменьшении уровня полезного сигнала):

$$P_{\Pi} > P_{rmin\Pi} \quad (2.47)$$

2) процент частотного диапазона $F_{\%S/P\Pi}$, в котором не выполняется следующее неравенство (категории помех «помеха недопустимая», уровень помехи превышает уровень S/P_{Π}) [39]:

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{\Pi}} \quad (2.48)$$

где:

S_{Π} – уровень полезного сигнала на входе приемника РЭС-рецептора помех, дБВт;

P_{Π} – уровень помехи на входе приемника РЭС-рецептора помех, дБВт;

S/P_{Π} – защитное отношение сигнал/помеха, дБ [39].

3) процент частотного диапазона $F_{\%S/PBlock\Pi}$, в котором не выполняется следующее неравенство (категория помехи «помеха блокирующая»):

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{N_{\Pi}} \quad (2.49)$$

где:

S_{Π} – уровень полезного сигнала на входе приемника РЭС-рецептора помех, дБВт;

P_{Π} – уровень помехи на входе приемника РЭС-рецептора помех, дБВт;

S/N_{Π} – защитное отношение сигнал/шум, дБ [39].

Для помеховой ситуации, когда РЭС_Д или АС РЭС_Д является РЭС-рецептором помехи, к дополнительным показателям относятся:

1) процент частотного диапазона $F\%S/N_D$, в котором выполняется условие (то есть помеха регистрируется и снижает или может снизить качество связи при уменьшении уровня полезного сигнала):

$$P_D > P_{rminD} \quad (2.50)$$

2) процент частотного диапазона $F\%S/P_D$, в котором не выполняется следующее неравенство (категории помех «помеха недопустимая», уровень помехи превышает уровень S/P_D):

$$S_D - P_D < \frac{S}{P_D} \quad (2.51)$$

где:

S_D – уровень полезного сигнала на входе приемника РЭС-рецептора помех, дБВт;

P_D – уровень помехи на входе приемника РЭС-рецептора помех, дБВт;

S/P_D - защитное отношение сигнал/помеха, дБ.

3) процент частотного диапазона $F\%S/P_{BlockD}$, в котором не выполняется следующее неравенство (категория помехи «помеха блокирующая»):

$$S_D - P_D < \frac{S}{N_D} \quad (2.52)$$

где:

S_D – уровень полезного сигнала на входе приемника РЭС-рецептора помех, дБВт;

P_D – уровень помехи на входе приемника РЭС-рецептора помех, дБВт;

S/N_D - защитное отношение сигнал/шум, дБ.

Таким образом, в модели учтены все немаловажные показатели и параметры ЭМС сети для решения проблемы внутрисистемной ЭМС и временной синхронизации режимов работы БС [39].

После расчетов по формулам (2.26 – 2.52) можно сделать вывод о состоянии ЭМС для данной ситуации и оптимизации использования частотного спектра в диапазоне 1785-1805 МГц.

2.5 Оценка результатов внедрения разработанной методики

Методика использования частотного ресурса была направлена на повышение эффективности эксплуатации ограниченного диапазона 1785–1805 МГц в условиях движения свыше 400 км/ч при строгих требованиях к надёжности, пропускной способности и ЭМС. Отсутствие стандартизированных подходов к проектированию таких сетей потребовало создания комплексного алгоритма. Ниже приведены результаты его внедрения.

1. Ключевые достижения и решенные проблемы

Внедрение систематизировало и автоматизировало проектирование, дав следующие результаты:

1.1. Комплексный учет специфики железнодорожного транспорта.

Методика объединила в едином алгоритме ранее разрозненные факторы:

Динамика движения: расчёт зон обслуживания и хэндовера (НО) адаптирован к высоким скоростям, минимизирован эффект Доплера, обеспечен бесперебойный роуминг.

Линейность структуры сети: в отличие от сотовых сетей, специфика линейного расположения базовых станций вдоль путей и связанные с этим интерференционные проблемы заложены в расчёты (этапы I, VII, VIII).

Нормативные ограничения: жёсткая привязка к Решению ГКРЧ №18-46-02 исключает недопустимые конфигурации (например, полосы 15 или 20 МГц) уже на IV этапе [51].

1.2. Оптимизация использования частотного спектра и решение проблем ЭМС.

Ключевой результат – улучшение ЭМС за счёт ветвящейся логики выбора режима (этапы IV–VIII).

Сравнение режимов:

Полоса 10 МГц: низкая применимость из-за роста внутрисистемных помех, деградации покрытия и сложных протоколов (ICIC, CoMP), увеличивающих служебный трафик.

Полоса 5 МГц (Классический режим): стабильная работа, но зона покрытия ограничена, на большей части перегона используется QPSK из-за помех от соседних БС (Рис. 2.4.3, 2.4.4).

Полоса 5 МГц (Оптимальный режим): ключевой результат. Асинхронный режим смежных БС (чётные/нечётные работают в противофазе) повысил пропускную способность на линии «вниз» почти вдвое (Рис. 2.4.8) за счёт снижения интерференции, что позволило применять более эффективные модуляции (16QAM, 64QAM) на большей площади [51].

Сужение полосы снижает КТВ (тепловой шум), давая энергетический запас; в сочетании с чередованием UL/DL это увеличивает дальность связи (при меньшей ёмкости на несущую). Тезис подтверждён радиофизикой и практиками LTE (36.211).

1.3. Повышение точности расчетов и предсказуемости результатов.

Формализованный алгоритм (этапы I–III) заменил абстрактные модели:

Учет реального рельефа: модели COST-231-Хата, МСЭ-R Р.1812 для разных типов местности повысили точность прогнозирования зон покрытия.

Анализ помеховой обстановки: интеграция моделей пересечений со смежными системами (Глава 3) позволяет выявлять конфликты до развёртывания.

Расчет потерь и запасов: расчёт потерь в АФТ, энергобюджета и SINR для разных модуляций (Таблица 2.3) обеспечил доступность связи 95% [51].

2. Практическая ценность и экономический эффект

Снижение рисков проектирования: пошаговый алгоритм с критериями решений устраняет субъективизм и ошибки.

Экономия частотного ресурса: оптимальный режим 5 МГц обеспечивает пропускную способность, близкую к режиму 10 МГц, но без проблем ЭМС, используя вдвое меньшую полосу.

Повышение надежности системы: учёт высоких скоростей и помеховое моделирование дают запас надёжности, критичный для систем безопасности.

Внедрение подтвердило, что методика – не просто теория, а работающий инструмент, который:

1. Комплексно решает проблемы частотно-территориального планирования, ЭМС и высокоскоростного хэндовера.

2. Значительно повышает эффективность использования дефицитного частотного спектра за счет внедрения оптимального режима работы сети.

3. Соблюдает нормативные требования.

4. Позволяет проводить точное и обоснованное проектирование сетей ТСП, гарантирующее их надежную и бесперебойную работу на скоростях свыше 400 км/ч.

Таким образом, результаты внедрения доказывают достижение заявленной цели – оптимального использования частотного ресурса при обеспечении надёжной и качественной связи на высокоскоростных железнодорожных магистралях [51].

Выводы по второй главе

Одним из наиболее важных этапов при проектировании участков технологической сети радиосвязи является этап частотно-территориального планирования. В ходе планирования выбираются: окончательная структура (конфигурация) сети, места размещения базовых станций, рассчитывается возможность обеспечения радиопокрытия с заданным качеством связи, разрабатывается частотный план распределения радиоканалов для базовых станций, выполняется адаптация плана к условиям территориальных и частотных ограничений проектируемой зоны обслуживания, формируются зоны обслуживания для каждой базовой станции и сети в целом, оцениваются и минимизируются внутрисистемные помехи. Часто при планировании проверяется внешняя электромагнитная совместимость планируемой системы с РЭС других систем и возможность обеспечения требуемой емкости сети для обслуживания абонентской нагрузки.

Соответственно, для частотно-территориального планирования сетей беспроводного широкополосного доступа необходимо знать и применять методику выбора оптимальной ширины полосы частоты для передачи данных поскольку она будет основополагающей для дальнейшего планирования сети. Данная методика показывает применимость той или иной ширины полосы частоты для стандарта LTE-1800 TDD в необходимых случаях.

Также была представлена модель временной синхронизации режимов работы БС как составляющая оптимального режима работы сети в полосе 5 МГц.

Его суть заключается в синхронном режиме работы базовых станций: в отличие от Классического режима работы сети в полосе 5 МГц, где все базовые станции могут работать одновременно только на прием или только на передачу, в Оптимальном режиме все базовые станции работают попеременно на прием и на передачу. Благодаря данной функции возможно упростить задачу электромагнитной совместимости, увеличить дальность радиосвязи, оптимизировать ограниченный частотный ресурс для стандарта LTE-1800 TDD.

ГЛАВА 3 ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ И ДРУГИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ В СОВМЕСТНЫХ ЗОНАХ ОБСЛУЖИВАНИЯ

При создании высокоскоростных магистралей, работающих в ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ, могут возникать ситуации, когда две и/или более магистралей будут иметь места пересечений.

На данный момент не существует универсального решения как проектировать данные места пересечений, поскольку данная ситуация является нетиповой [108].

В связи с этим необходимо разработать обобщенную модель (далее – Модель) технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания на частоте 1785-1805 МГц.

Как уже отмечалось ранее, система может работать в одном диапазоне из набора частот: 1.4 МГц, 3 МГц, 5 МГц и 10 МГц.

Вся система на протяженном участке может быть спроектирована в одной ширине полосы частоты, но в ситуации пересечения со смежной ТСП возможны иные варианты проектирования конкретного участка.

Основным критерием в данном случае будут являться ширина используемой полосы частоты и скорость передачи данных как основополагающий критерий технологии LTE.

Исходя из условий, применяемых на проектируемом участке, необходимо сделать обоснованный выбор именно той ширины полосы частоты, которая наиболее пригодна [16,27,108].

Таким образом, можно сформулировать назначение Модели: проектирование ТСП LTE-1800 TDD путём обоснованного выбора и реализации 4 (четырёх) способов применения разных номиналов ширины полосы частот (10 МГц, 5 МГц, 3 МГц и 1.4 МГц) для обеспечения требуемой скорости передачи, уровня сигнала, обеспечения ЭМС, непрерывности связи,

обеспечения (или увеличения) зоны обслуживания БС в местах пересечения с другими сетями радиосвязи.

3.1 Назначение, состав и блок-схема модели

Математическая постановка задачи: определено множество ширин полос частот (способов), доступных для использования в местах пересечения сетей:

$$\mathbf{B} = \{\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3, \mathbf{B}_4\} = \{10 \text{ МГц}, 5 \text{ МГц}, 3 \text{ МГц}, 1.4 \text{ МГц}\}$$

Для каждого способа заданы:

1. Параметры физического уровня LTE (количество ресурсных блоков, длительность ресурсного элемента и др.);
2. Эффективная скорость кодирования FEC;
3. Коэффициент распределения субкадров TDD для нисходящей и восходящей линий;
4. Мощность шума для полосы B;
5. Коэффициент шума NF, запас на реализацию IM;
6. Поправочный коэффициент K(B) для расчета дальности;
7. Требования к синхронности.

В соответствии с назначением модели – обеспечение требуемой скорости, уровня сигнала, ЭМС, непрерывности связи и увеличения зоны обслуживания в местах пересечения сетей – критерием выбора является минимизация ширины полосы при выполнении всех ограничений. Следовательно, **целевая функция:**

$\mathbf{b}^* = \mathit{argmin}_{\mathbf{b} \in \mathbf{B}} \{\mathbf{b} \text{ ограничения}\}$ (приоритет – минимальная ширина полосы из допустимых по ограничениям).

Если ни один из способов не удовлетворяет всем ограничениям, задача считается не имеющей решения.

Решением является выбор способа $\mathbf{b}^* \in \mathbf{B}$ (и соответствующей конфигурации TDD), удовлетворяющего всем ограничениям и минимизирующего целевую функцию.

Наиболее подробно описать целевую функцию возможно следующим способом:

Этап 1 – отбор способов, удовлетворяющих жестким ограничениям:

$$B_{\text{доп}} = \left\{ b \in B \mid \begin{array}{l} \vartheta_{DL}(b) \geq 2, \vartheta_{UL}(b) \geq 1, \\ R(b) \geq R_{\text{треб}}, \\ \text{ЭМС-ограничения выполнены (включая синхронный режим для } b=10,5) \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Этап 2 – выбор наилучшего способа из $B_{\text{доп}}$ по обобщенному критерию:

$$b^* = \underset{b \in B}{\operatorname{argmax}} \left[\alpha * \frac{\vartheta_{DL}(b) + \vartheta_{UL}(b)}{3} + \beta * \frac{R(b)}{R_{\text{треб}}} - \gamma * \frac{I(b)}{I_{\text{доп}}} \right] \quad (3.2)$$

Где α, β, γ – веса, а нормировка приведена к безразмерному виду.

Для способов $b = 10, 5$ МГц обязателен синхронный режим. Его можно описать:

$$F_{\text{синх}}(b) = F(b) + M * (1 - \text{flag}_{\text{синх}}(b)), \quad (3.3)$$

где M – большое число, $\text{flag}_{\text{синх}}(b) = 1$ если синхронный режим реализован.

Итоговая постановка:

$$B_{\text{доп}} = \{b \in B \mid \vartheta_{DL}(b) \geq 2, \vartheta_{UL}(b) \geq 1, R(b) \geq R_{\text{треб}}, \text{ ЭМС выполнено} \}$$

$$b^* = \underset{b \in B_{\text{доп}}}{\operatorname{argmax}} \left(\omega_1 \frac{\min(\vartheta_{DL}(b), \vartheta_{UL}(b))}{2} + \omega_2 \frac{R(b)}{R_{\text{треб}}} - \omega_3 \frac{I(b)}{I_{\text{доп}}} \right) \quad (3.4)$$

При $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1, \omega_i > 0$

В случае пустого $B_{\text{доп}}$ - требуется изменение параметров ТСП.

Ранее было сформулировано назначение Модели: проектирование ТСП LTE-1800 TDD путём обоснованного выбора и реализации 4 (четырёх) способов применения разных номиналов ширины полосы частот (10 МГц, 5 МГц, 3 МГц и 1.4 МГц) для обеспечения требуемой скорости передачи, уровня сигнала, обеспечения ЭМС, непрерывности связи, обеспечения (или увеличения) зоны обслуживания БС в местах пересечения с другими сетями радиосвязи. Краткая схема использования и назначения Модели представлена на рисунке 3.1.

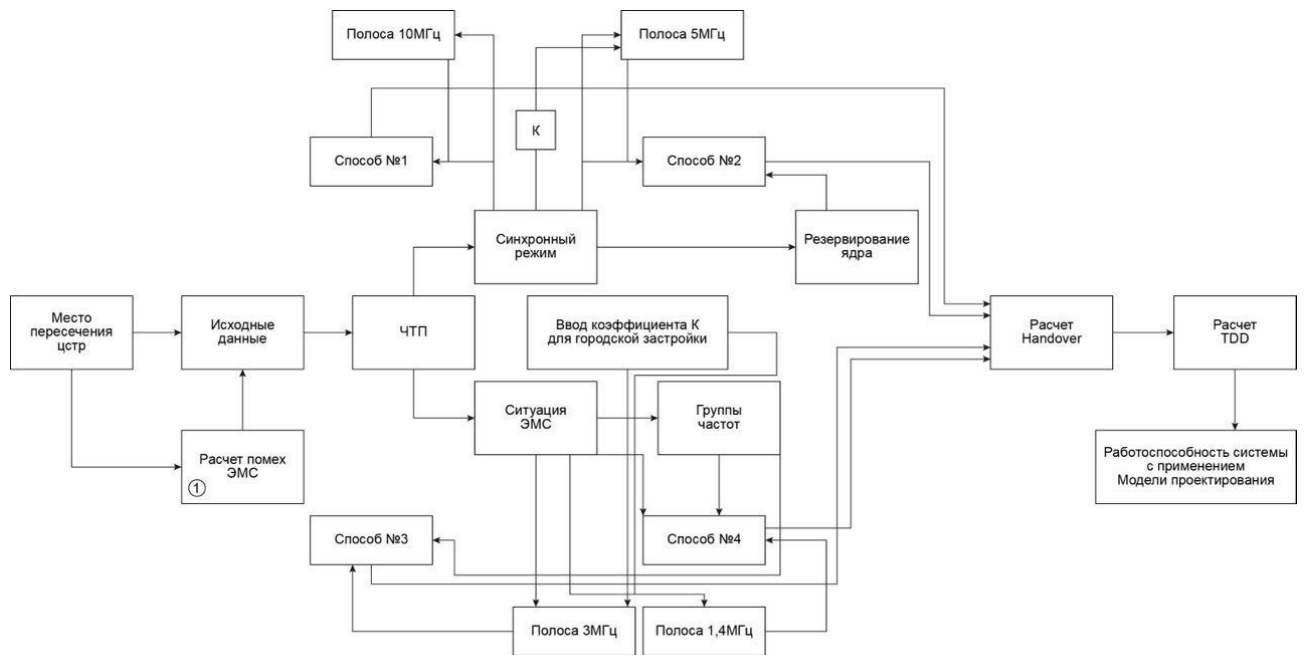


Рисунок 3.1 – Блок-схема Модели с применением способов использования ширины полосы

При пересечении двух железнодорожных трасс, работающих в одном диапазоне 1800 МГц и стандарте LTE-1800 TDD, необходимо построить модель места пересечения двух технологических сетей радиосвязи (ТСР). Для этого требуются исходные данные каждой сети: скорость передачи, ширина полосы, тип и объём трафика, задержки пакетов и др. При получении данных важно рассчитать помехи ЭМС в зоне пересечения.

Расчет показателей ЭМС выполняется для каждой пары анализируемых базовых станций. Для оценки ЭМС рассчитываются показатели ЭМС (такие как, максимальный уровень помехи на входе, уровень полезного сигнала) в сравнении с их пороговыми значениями, определенными при разработке БС на заводе-изготовителе, на основании чего делается вывод о наличии помехи [102,111,118,119,121].

Для оценки ЭМС рассчитываются:

P_{Π} - максимальный уровень помехи на входе приемника планируемой БСп (здесь и далее п является нижним индексом, обозначающим планирующую БС) от дополнительной БС- БСд. (здесь и далее д является нижним индексом, обозначающим дополнительную БС);

S_{Π} - уровень полезного сигнала на входе БС_П;

$P_{\text{Д}}$ - максимальный уровень помехи на входе приемной дополнительной БСД от планируемой БСП;

$S_{\text{Д}}$ - уровень полезного сигнала на входе приемника дополнительной БСД [102].

Так как в нашем случае используются две БС (планируемая и дополнительная), то помеховые ситуации могут возникать на обеих БС [102].

Помеховые ситуации определяются следующими неравенствами:

А) начало помехового воздействия:

1) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСП определяется неравенством:

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{\text{beg}\Pi}}, \quad (3.5)$$

где:

$\frac{S}{P_{\text{beg}\Pi}}$ - защитное отношение сигнал/помеха для планируемой БС, или минимальная величина отношения полезного сигнала к мешающему на входе приемника, которая позволяет получить установленное качество приема полезного сигнала на выходе приемника, дБ.

2) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСД определяется неравенством:

$$S_{\text{Д}} - P_{\text{Д}} < \frac{S}{P_{\text{beg}\text{Д}}}, \quad (3.6)$$

где:

$\frac{S}{P_{\text{beg}\text{Д}}}$ - защитное отношение сигнал/помеха для дополнительной БС, или минимальная величина отношения полезного сигнала к мешающему на входе приемника, которая позволяет получить установленное качество приема полезного сигнала на выходе приемника, дБ [102].

Б) блокирование связи помехой:

1) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСП определяется неравенством:

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{block\Pi}}, (3.7)$$

где:

$\frac{S}{P_{block\Pi}}$ – блокирующее защитное отношение сигнал/помеха для планируемой РЭС, при котором, помеха существенно ухудшает качество, затрудняет или неоднократно прерывает работу службы радиосвязи, дБ.

2) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСд определяется неравенством:

$$S_{\Delta} - P_{\Delta} < \frac{S}{P_{block\Delta}}, (3.8)$$

где:

$\frac{S}{P_{block\Delta}}$ – блокирующее защитное отношение сигнал/помеха для дополнительной РЭС, при котором существенно ухудшается качество, затрудняется или неоднократно прерывается работа службы радиосвязи, дБ.

Расчет уровня полезного сигнала на входе приемника [102].

Для БСп:

$$S_{\Pi} = EIRPS_{\Pi} - G_{tr} + KU_{r\Pi} - G_{rt} - A_{r\Pi} - LosS_{tr\Pi} - Fade_{r\Pi} - \gamma_{tr}, (3.9)$$

где:

$EIRPS_{\Pi}$ – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) полезного сигнала на выходе излучающей антенны БСп, дБВт;

G_{tr} – ослабление сигнала передающей антенны в направлении получателя полезного сигнала по сравнению с максимумом излучения, дБ;

$KU_{r\Pi}$ – коэффициент усиления антенны приемника БСп, дБи;

G_{rt} – ослабление приемной антенны в направлении источника сигнала по сравнению с максимумом усиления принимаемого сигнала, дБ;

$A_{r\Pi}$ – коэффициент ослабления сигнала в АФТ БСп приемника, дБ;

$LosS_{tr\Pi}$ – медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала БСп, дБ;

$Fade_{r\Pi}$ – энергетический запас на замирание сигнала, дБ;

γ_{tr} - уровень поляризационных потерь между передатчиком и приемником, если и передатчик, и приемник имеют заданную поляризацию антенн (иначе равен нулю), дБ [102].

Для БСд применяется формула:

$$S_d = EIRPS_d - G_{tr} + KU_{r_d} - G_{rt} - A_{r_d} - LosS_{tr_d} - Fade_{r_d} - \gamma_{tr}, \quad (3.10)$$

где:

$EIRPS_d$ - EIRPSД – ЭИИМ полезного сигнала на выходе излучающей антенны БСд, дБВт;

KU_{r_d} - коэффициент усиления антенны приемника БСд, дБи;

A_{r_d} - коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника БСд, дБ;

$LosS_{tr_d}$ - медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала БСд, дБ;

$Fade_{r_d}$ - энергетический запас на замирание сигнала для БСд, дБ.

Расчет уровня помехи на входе приемника [102].

Для помеховой ситуации, когда рецептором помех является планируемая БС (БСП), максимальный уровень помехи на входе приемника планируемой БСП определяется по формуле:

$$P_{\Pi} = EIRPP_d - G_{tr} + KU_{r_{\Pi}} - G_{rt} - A_{r_{\Pi}} - LosP_{tr_{\Pi}} - Fade_{r_{\Pi}} - \gamma_{tr} + K_{\Pi\Sigma AC} - \Delta \quad (3.11)$$

где:

$EIRPP_d$ - ЭИИМ источника помех на выходе излучающей антенны БСд, дБВт;

$LosP_{tr_{\Pi}}$ - медианное ослабление помехи в пространстве при распространении от источника сигнала БСП, дБ;

$K_{\Pi\Sigma AC}$ - поправочный коэффициент на групповую помеху по количеству помеховых источников для планируемой БС (применяется в случае, когда БС входит в сеть фиксированного беспроводного доступа), дБ;

Δ - поправка уровня помехи по разносу полос частот (процесс корректировки уровня принимаемого сигнала для снижения помех от соседних

каналов, которые возникают при близком расположении частот несущих) приемника и помехи, дБ [102].

Для помеховой ситуации, когда рецептором помех является дополнительная БС, максимальный уровень помехи на входе приемной дополнительной БС определяется по формуле:

$$P_{\text{Д}} = EIRPP_{\text{П}} - G_{tr} + KU_{\text{рД}} - G_{rt} - A_{\text{рД}} - LosP_{\text{Д}} - Fade_{\text{Д}} - \gamma_{\text{рД}} + K_{\text{дΣАС}} - \Delta \quad (3.12)$$

где:

$EIRPP_{\text{П}}$ - ЭИИМ источника помех на выходе излучающей антенны БСП, дБВт;

$LosP_{\text{Д}}$ - медианное ослабление помехи в пространстве при распространении от источника сигнала БСД, дБ;

$K_{\text{дΣАС}}$ - поправочный коэффициент на групповую помеху по количеству помеховых РЭС для дополнительной БС (применяется в случае, когда БС входит в сеть фиксированного беспроводного доступа), дБ [102].

Расчет поправок уровня помехи по разносу частот полезного сигнала и помехи Δ выполняется путем расчета интегральной помехи в полосе приема РЭС-рецептора помехи с учетом процента перекрытия амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приемника и маски излучения необходимой ширины полосы излучения (НШПИ) передатчика по формуле:

$$\Delta = 10 * \log \left(\frac{\int_{f_r - \frac{B_{\text{Hr}}}{2}}^{f_r + \frac{B_{\text{Hr}}}{2}} P(f_t, B_{\text{Nt}}) df}{\int_{f_r - \frac{B_{\text{Hr}}}{2}}^{f_r + \frac{B_{\text{Hr}}}{2}} S(f_r, B_{\text{Hr}}) df} \right), \quad (3.13)$$

где:

B_{Nt} - ширина спектра помехи с учетом маски спектра по уровню минус 60 дБ, минус 50 дБ, минус 40 дБ и др., МГц;

f_t - центральная частота передачи РЭС-источника помех, МГц;

B_{Hr} - НШПИ РЭС-рецептора помех, МГц;

f_r - центральная частота приема РЭС-рецептора помех, МГц;

$P(f_t, B_{Hr})$ - АЧХ РЭС-рецептора помех в полосе излучения (НШПИ) РЭС-источника помехи;

$S(f_r, B_{Hr})$ - АЧХ РЭС-рецептора помех в полосе излучения (НШПИ) РЭС-приемника [102].

Дальнейшие расчеты помех ЭМС для РЭС выполняются по формулам, аналогичным формулам, описанным в главе 1.3 (формулы 1.3-1.7) [37,39,40].

После расчета помех ЭМС и получения исходных данных, необходимо произвести частотно-территориальное планирование сети (ЧТП).

ЧТП – выбор размещения БС и использования спектра для гарантированной связи. Задачи: определение зоны обслуживания, выбор площадки, разработка частотного плана, обеспечение качества, оптимизация сети. Применяется разработанная Модель. Если требуется полоса 10 МГц – используется способ №1. Если полоса 10 МГц нецелесообразна – вводится поправочный коэффициент К для городской застройки и применяются способы №2–№4 [102].

После применения и внедрения одного из способов, в зависимости от результатов ЧТП, следует операция расчета зоны хэндовер по формуле:

$$r_{HO} = 2 * r - 0.15 * r, \text{ км} \quad (3.14)$$

где r - длина зоны обслуживания в месте пересечения, км;

$0.15*r$ - зона перекрытия 15% перегона, км.

После расчета зоны хэндовер, необходимо правильно выбрать конфигурацию субкадра TDD.

После настройки конфигурации TDD делается вывод о применимости Модели в данном месте пересечения двух смежных ТСР, работающих в стандарте LTE-1800 TDD [102].

3.2 Способ проектирования с применением ширины полосы радиочастоты 10 МГц

На данный момент существуют проектные решения для полосы 10 МГц в «линейном» расположении базовых станций (БС). Но в случаях пересечения ТСП LTE-1800 TDD решений нет. В связи с этим требуется разработать способ проектирования сети в месте пересечения со смежной ТСП, работающих в полосе 10 МГц. В связи с ограниченностью частотного ресурса необходимо рассмотреть вариант использования в разрабатываемом способе синхронного режима работы сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD [44,45,47,59].

Подробный алгоритм создания Модели проектирования ТСП LTE-1800 TDD в месте пересечения со смежной ТСП LTE-1800 TDD, работающих в одном частотном диапазоне и при одинаковой ширине полосы частоты 10 МГц (способ №1) представлен на рисунке 3.2.1.

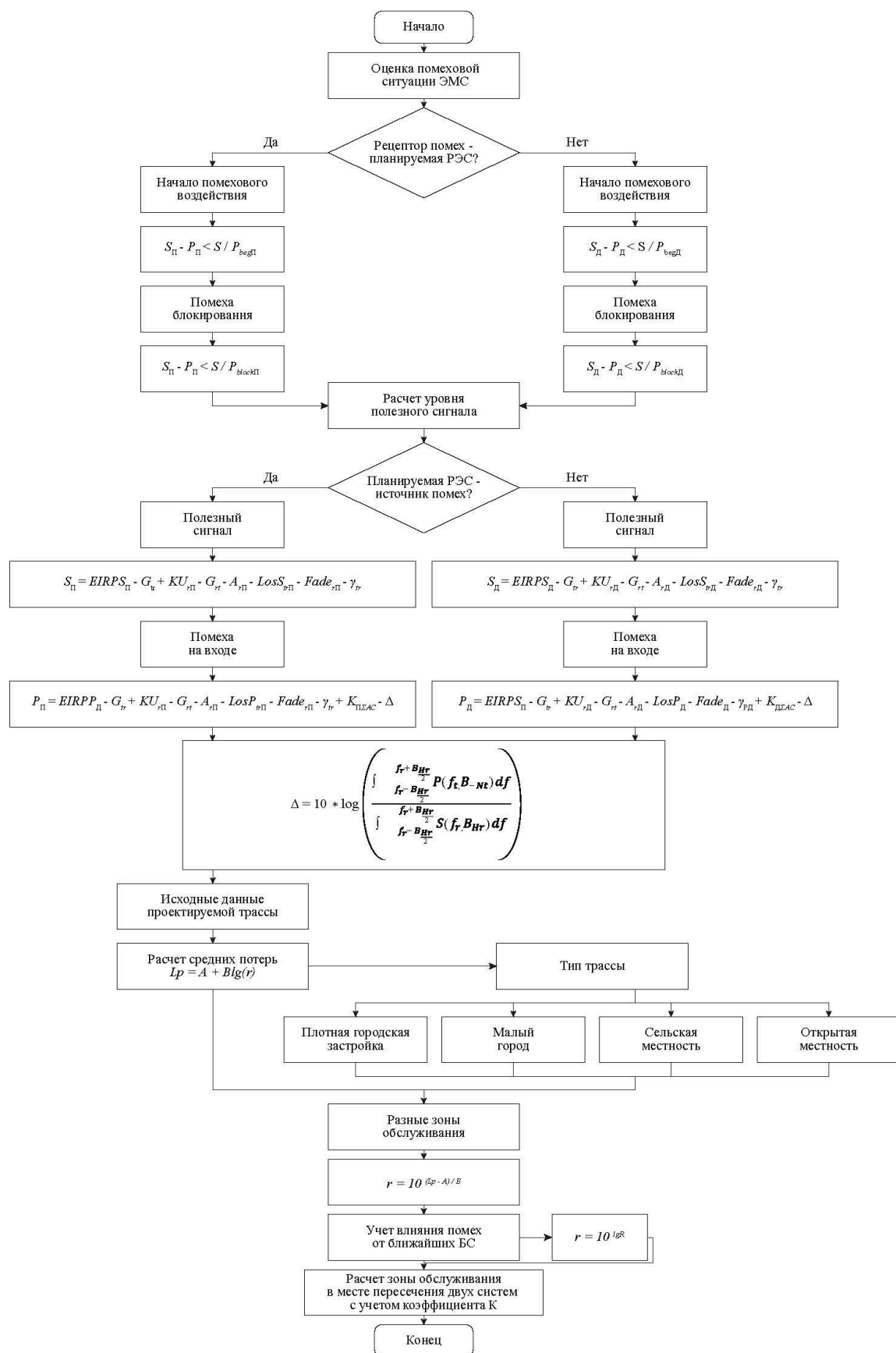


Рисунок 3.2.1 – Схема алгоритма Модели с применением способа №1
(10 МГц)

Изначально необходимо оценить помеховую ситуацию ЭМС для всех базовых станций, расположенных в месте пересечения, а также для 4 ближайших к ним (всего 8 БС) [108]. Помеховая ситуация ЭМС рассчитывается по формулам:

А) начало помехового воздействия:

1) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСП определяется неравенством:

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{beg\Pi}}, \quad (3.15)$$

2) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСД определяется неравенством:

$$S_{\text{Д}} - P_{\text{Д}} < \frac{S}{P_{beg\text{Д}}}, \quad (3.16)$$

Б) блокирование связи помехой:

1) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСП определяется неравенством:

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{block\Pi}}, \quad (3.17)$$

2) помеховая ситуация, когда рецептором помех является БСД определяется неравенством:

$$S_{\text{Д}} - P_{\text{Д}} < \frac{S}{P_{block\text{Д}}} \quad (3.18)$$

Важно понимать, что при помеховых ситуациях возможны 2 варианта: когда рецептором помех является планируемая БС или абонентская станция планируемой БС, а также когда рецептором является дополнительная БС или абонентская станция дополнительной БС. Ниже представлены формулы для расчета уровня полезного сигнала на входе приемника обеих ситуаций [108].

Расчет уровня полезного сигнала на входе приемника [39]

$$S_{\Pi} = EIRPS_{\Pi} - G_{tr} + KU_{r\Pi} - G_{rt} - A_{r\Pi} - LosS_{tr\Pi} - Fade_{r\Pi} - \gamma_{tr}, \quad (3.19)$$

$$S_{\text{Д}} = EIRPS_{\text{Д}} - G_{tr} + KU_{r\text{Д}} - G_{rt} - A_{r\text{Д}} - LosS_{tr\text{Д}} - Fade_{r\text{Д}} - \gamma_{tr}, \quad (3.20)$$

$$P_{\Pi} = EIRPP_{\text{Д}} - G_{tr} + KU_{r\Pi} - G_{rt} - A_{r\Pi} - LosP_{tr\Pi} - Fade_{r\Pi} - \gamma_{tr} + K_{\Pi\Sigma AC} - \Delta \quad (3.21)$$

$$P_D = EIRPP_{\Pi} - G_{tr} + KU_{rD} - G_{rt} - A_{rD} - LosP_D - Fade_D - \gamma_{PD} + K_{\Sigma AC} - \Delta \quad (3.22)$$

$$\Delta = 10 * \log \left(\frac{\int_{f_r - \frac{B_{Hr}}{2}}^{f_r + \frac{B_{Hr}}{2}} P(f_t, B_{-Nt}) df}{\int_{f_r - \frac{B_{Hr}}{2}}^{f_r + \frac{B_{Hr}}{2}} S(f_r, B_{Hr}) df} \right), \quad (3.23)$$

После того, как рассчитана помеховая ситуация ЭМС для 8 БС в месте пересечения двух ТСП LTE-1800 TDD, необходимо рассчитать дальность радиосвязи каждой БС в месте пересечения [108].

В качестве исходных данных для создания модели были выбраны:

1. Полоса частот 1785- 1805 МГц;
2. Ширина канала полосы частоты – 10 МГц;
3. Режим конфигурации субкадра TDD – 0;
4. Требуемые скорости – 2 Мбит/с по нисходящему каналу (DL) и 1 Мбит/с по восходящему каналу (UL);
5. Высота подвеса антенн БС – 20 метров [45].

Расчет дальности радиосвязи выполняется следующим образом:

1. Расчет средних потерь на трассе.

В зависимости от типа трассы применяются следующие формулы [108]:

$$L_p = 48,5 - 13,82 \lg(h_{\text{БС}}) + 35,41 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{\text{МС}} + [44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}})] \lg(r) - \text{для плотной городской застройки}; \quad (3.24)$$

$$L_p = 45,5 - 13,82 \lg(h_{\text{БС}}) + 35,41 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{\text{МС}} + [44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}})] \lg(r) - \text{для среднего города}; \quad (3.25)$$

$$L_p = 9,56 - 13,82 \lg(h_{\text{БС}}) + 53,73 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{\text{МС}} - 4,78 [\lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}})] \lg(r) - \text{для сельской местности}; \quad (3.26)$$

$$L_p = 4,56 - 13,82 \lg(h_{\text{БС}}) + 53,73 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{\text{МС}} - 4,78 [\lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}})] \lg(r) - \text{для открытой местности}. \quad (3.27)$$

В общем виде данные выражения можно представить как:

$$L_p = A + B \lg(r) \quad (3.28)$$

Таким образом, радиус зоны обслуживания БС r может быть выражен:

$$r = 10^{(L_p - A)/B} \quad (3.29)$$

После расчета дальности радиосвязи всех восьми БС следует назначение одной частоты для каждой БС и установка минимальной требуемой скорости [108].

Также важно отметить что влияние от БС-1, БС-4, БС-5 и БС-8 будет носить «мешающий» характер, так как они не входят в синхронную сеть на пересечении и будут создавать помехи для БС-2, БС-3, БС-6 и БС-7.

С учетом всех вышеперечисленных факторов будет получена зона обслуживания в месте пересечения двух ТСП LTE-1800 TDD с учетом коэффициента для ширины полосы 10 МГц по формуле:

$$lgR = (10P_{\Pi} + 30 - \alpha_{\text{пер}} - l * \alpha_l + K_y - 69.55 - 26.16 \log f_{\text{нес}} + 13.82h_{\text{БС}} + a(h_2) + 2^{\log \frac{f_{\text{нес}}}{28}} + 5.4 - K - A * D - P_{\text{пор}} + K_y) / (44.9 - 6.55 \log h_{\text{БС}})), \quad (3.30)$$

где:

P_{Π} - мощность передатчика, Вт;

$\alpha_{\text{пер}}$ -затухание передающего тракта, дБ;

l - длина фидера, м;

α_l - затухание фидера, дБ/м;

K_y - коэффициент усиления антенны, дБи;

$f_{\text{нес}}$ - несущая частота, МГц;

$h_{\text{БС}}$ - высота подвеса антенны, м;

K - поправочный коэффициент (в зависимости от ширины полосы частоты), дБ;

A - затухания, включающие потери на свободное пространство, потери в кабеле, потери при подключении антенн, дБ;

D - расстояние между приемником и передатчиком (с учетом рельефа местности), км [51].

$$r = 10^{lgR} \quad (3.31)$$

Далее промоделируем работу сети и рассмотрим более подробно зоны обслуживания для каждой из БС, расположенных в месте пересечения [35,45].

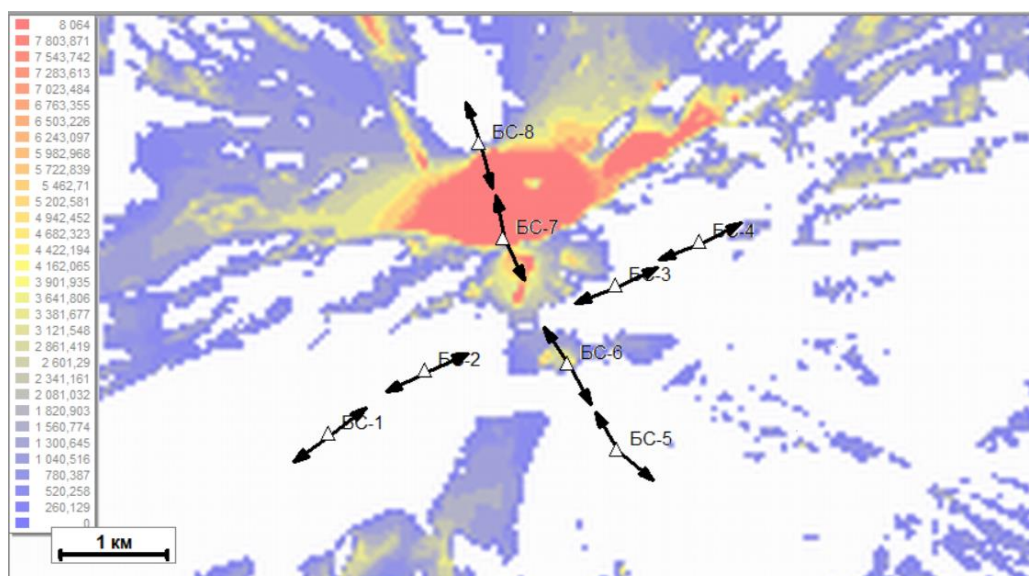


Рисунок 3.2.2 – Зона обслуживания и пропускная способность для БС-7

Как видно из рис. 3.2.2, зона обслуживания для БС-7 с учетом влияния помех обеспечивает радиопокрытие с необходимыми скоростями на участке пересечения [45].

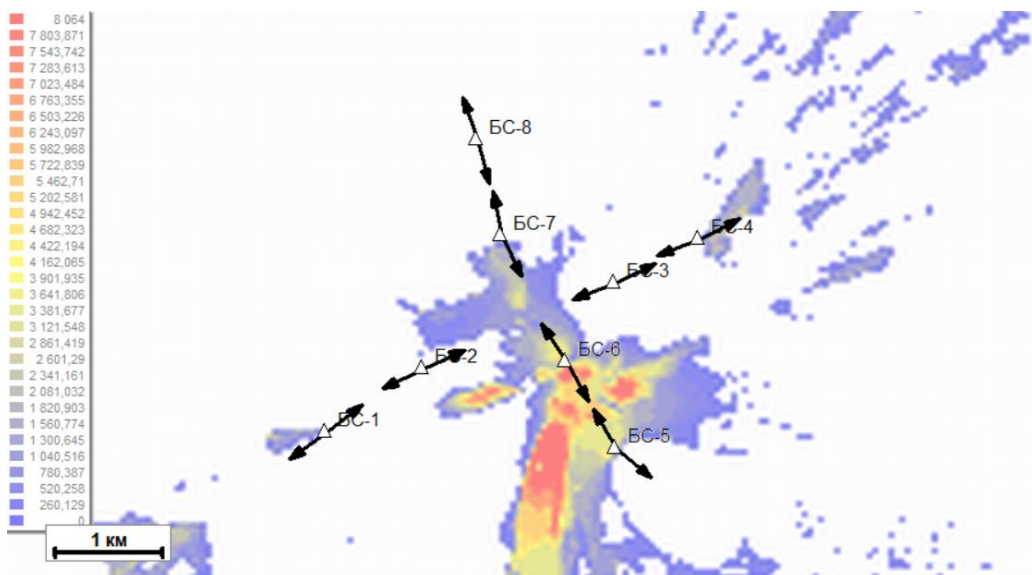


Рисунок 3.2.3 – Зона обслуживания и пропускная способность для БС-6

По полученным данным также можно сделать вывод об обеспечении необходимых скоростей на участке пересечения. По рис. 3.2.3 видно, что большая часть территории будет обеспечиваться при модуляции QPSK [45].

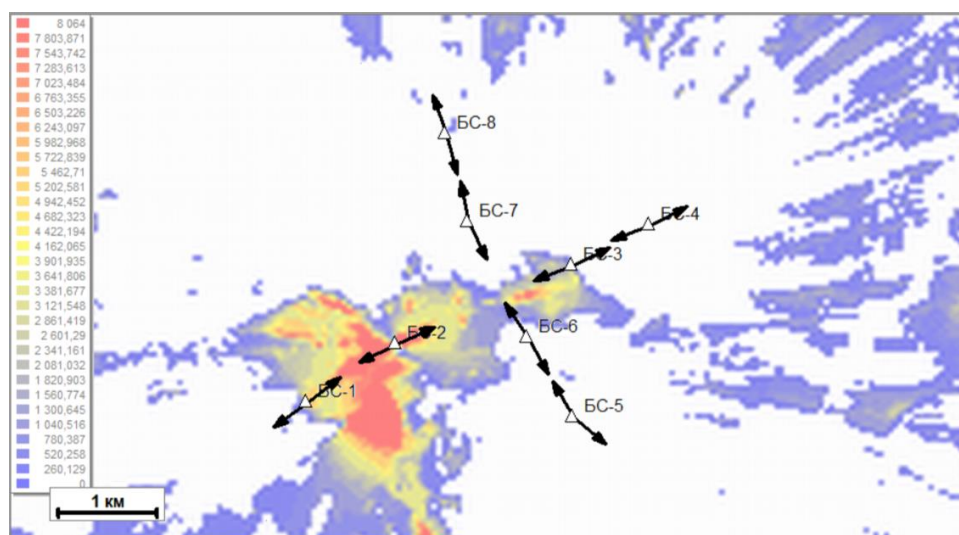


Рисунок 3.2.4 – Зона обслуживания и пропускная способность для БС-2

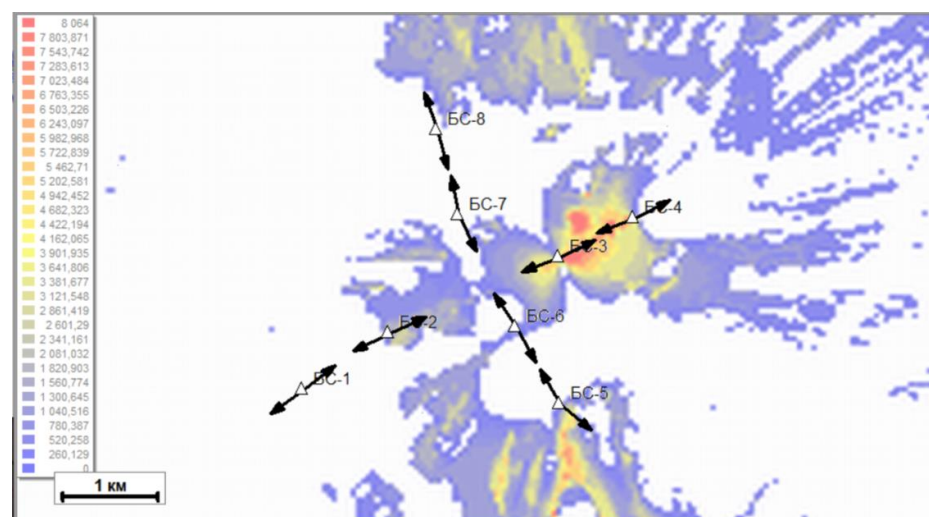


Рисунок 3.2.5 – Зона обслуживания и пропускная способность для БС-3

Аналогично были получены зоны обслуживания для БС-2 и БС-3. По рис.3.2.4 и рис.3.2.5 видно, что на участке обеспечиваются заданные скорости.

Поскольку наша система работает в полосе 10 МГц, то все БС будут настроены на прием/передачу в одной частоте [4]. Данная ситуация приводит к деградации зоны обслуживания ввиду сильных воздействий помех на БС. Влияние помех может привести к потере пропускной способности и, соответственно, к обрыву канала связи [45].

Математический расчет данной Модели с применением способа №1 представлен в Приложении А.

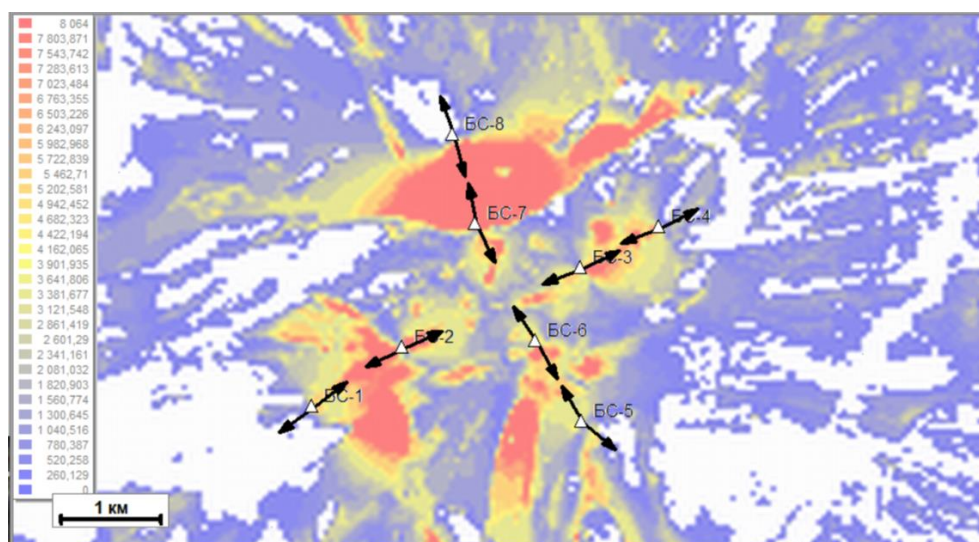


Рисунок 3.2.6 – Расчет скорости по Модели с применением способа №1

На рис. 3.2.6 видно, что при влиянии помех на участке пересечения двух систем, работающих в стандарте LTE-1800 TDD в полосе 10 МГц, не будут обеспечиваться требуемые скорости (как по линии «вниз», так и по линии «вверх») что для технологии LTE является первостепенной задачей [5,45].

Также, можно промоделировать работу системы в «синхронном» режиме работы, но для этого необходимо перенастроить базовые станции в 2 полосы по 5 МГц. Данный режим подразумевает синхронизацию всех БС сети по времени передачи, т.е. БС будут чередовать режим работы поочередно. Более подробно данный режим будет описан позже.

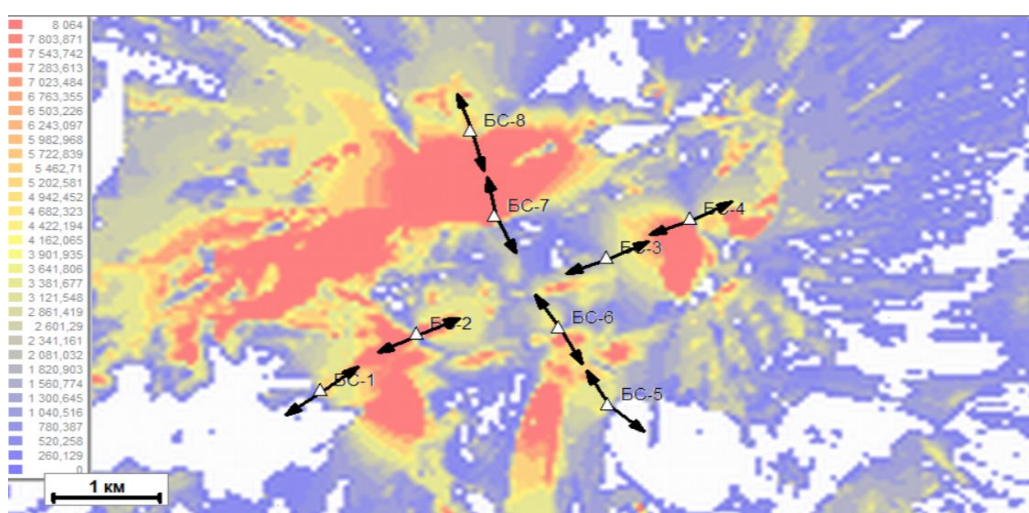


Рисунок 3.2.7 – Расчет скорости по Модели с шириной полосы 10 МГц, с перенастройкой в месте пересечения БС в 2 полосы по 5 МГц в «синхронном» режиме работы

3.3 Способ проектирования с применением ширины полосы радиочастоты 5 МГц

Данный способ применим в ситуациях, когда по результатам ЧТП было получено, что на данном участке целесообразно применять канал с шириной полосы 5 МГц.

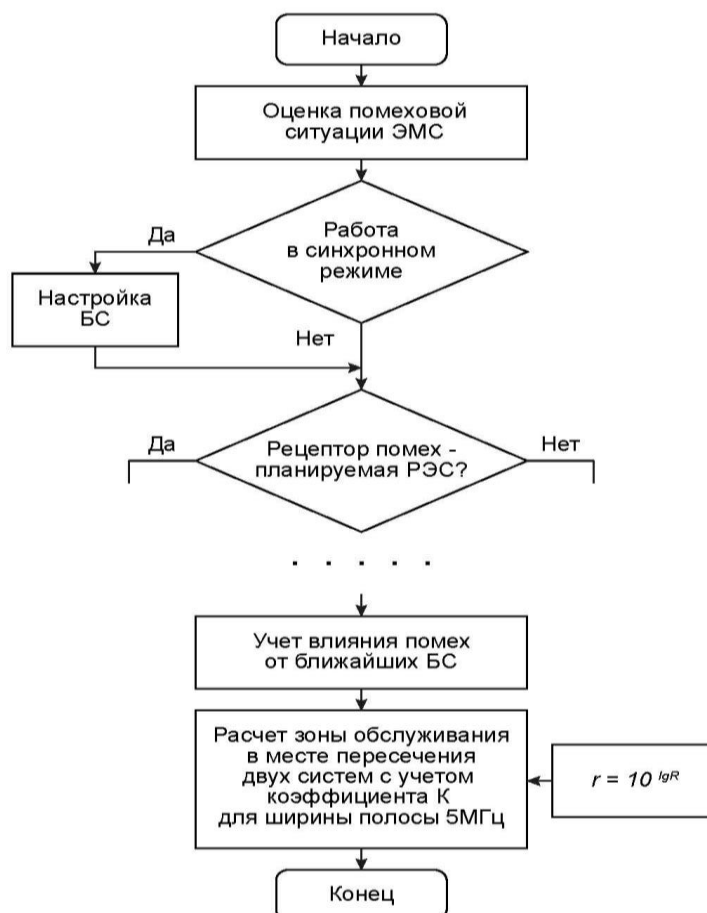


Рисунок 3.3.1 – Схема алгоритма работы Модели с применением способа №2

Способ №2 строится аналогично способу №1, но при этом имеет несколько особенностей построения (рис.3.3.1).

1. Возможность применения синхронного режима работы базовых станций.

Подробно про синхронный режим работы сети было описано в главе 2. Стоит отметить, что применение синхронного режима позволит «разгрузить ситуацию ЭМС», но при этом произойдет снижение пропускной способности,

поскольку часть ресурса (в данном случае часть ресурсных блоков) будет тратиться на обеспечение работы данного синхронного режима [106].

Также сеть может работать и в классическом режиме.

2. При расчете зоны обслуживания в месте пересечения двух ТСР применяется коэффициент K для ширины полосы частоты 5 МГц. Он учтен в формуле (3.27). Соответственно, при применении другого значения коэффициента будет изменен радиус зоны обслуживания и зона Handover. [102,103,107].

Представим пример расчета зоны обслуживания для способа проектирования с использованием ширины полосы 5 МГц в классическом режиме работы сети [103].

Исходные данные:

$P_{\text{п}}$ - мощность передатчика = 20 Вт;

$\alpha_{\text{пер}}$ -затухание передающего тракта = 7 дБ;

l - длина фидера = 50 м;

α_l - затухание фидера = 0,04дБ/м;

K_y - коэффициент усиления антенны = 12 дБи;

$f_{\text{нес}}$ - несущая частота = 1800 МГц;

$h_{\text{БС}}$ - высота подвеса антенны = 25 м;

K - поправочный коэффициент (в зависимости от ширины полосы частоты) = 5 дБ;

A - затухания, включающие потери на свободное пространство, потери в кабеле, потери при подключении антенн = 1,65 дБ;

D - расстояние между приемником и передатчиком (с учетом рельефа местности) = 9,59 км [101].

$$\begin{aligned}
lgR &= (10P_{\Pi} + 30 - \alpha_{\text{пер}} - l * \alpha_l + K_y - 69.55 - 26.16 \log f_{\text{нec}} + 13.82 h_{\text{BC}} \\
&+ a(h_2) + 2^{\log \frac{f_{\text{нec}}}{28}} + 5.4 - K - A * D - P_{\text{пор}} + K_y) / (44.9 \\
&- 6.55 \log h_{\text{BC}})) \\
&= (10 * 20 + 30 - 7 - 50 * 0.04 + 12 - 69.55 - 26.16 \log 1800 \\
&+ 13.82 * 25 + 10.125 + 2^{\log \frac{1800}{28}} + 5.4 - 5 - 1.65 * 9.59 - (-92) \\
&+ 12) / 44.9 - 6.55 \log 25 = 0.175
\end{aligned}$$

Отсюда получаем радиус зоны обслуживания $r = 10^{lgR} = 1,5$ км [108,109].

Рассчитаем зоны обслуживания в месте пересечения двух ТСР с применением способа проектирования №2 (5 МГц).

Важно отметить, что все исследования проводились для полосы 5 МГц и конфигурации субкадра TDD №1.

Зоны обслуживания, построенные аналогично для способа №1 в главе 3.2, представлены на рисунках 3.3.2-3.3.5.

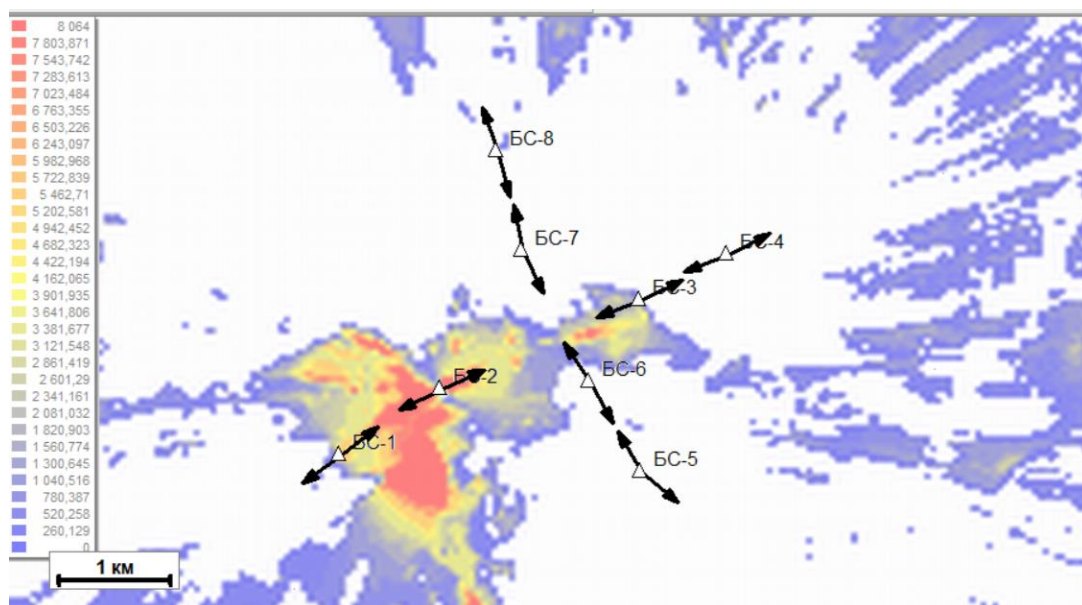


Рисунок 3.3.2 – Зона обслуживания БС-2

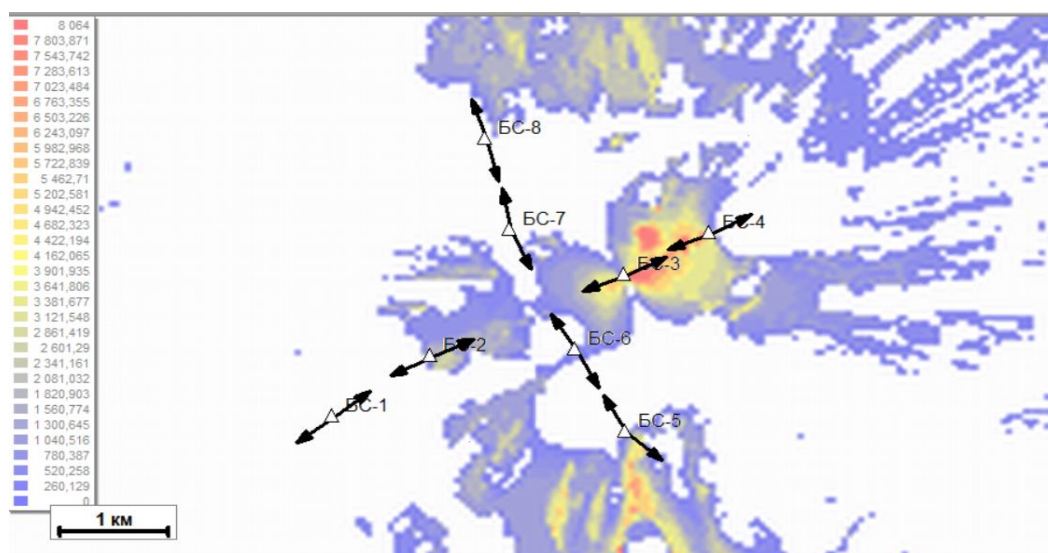


Рисунок 3.3.3 – Зона обслуживания БС-3

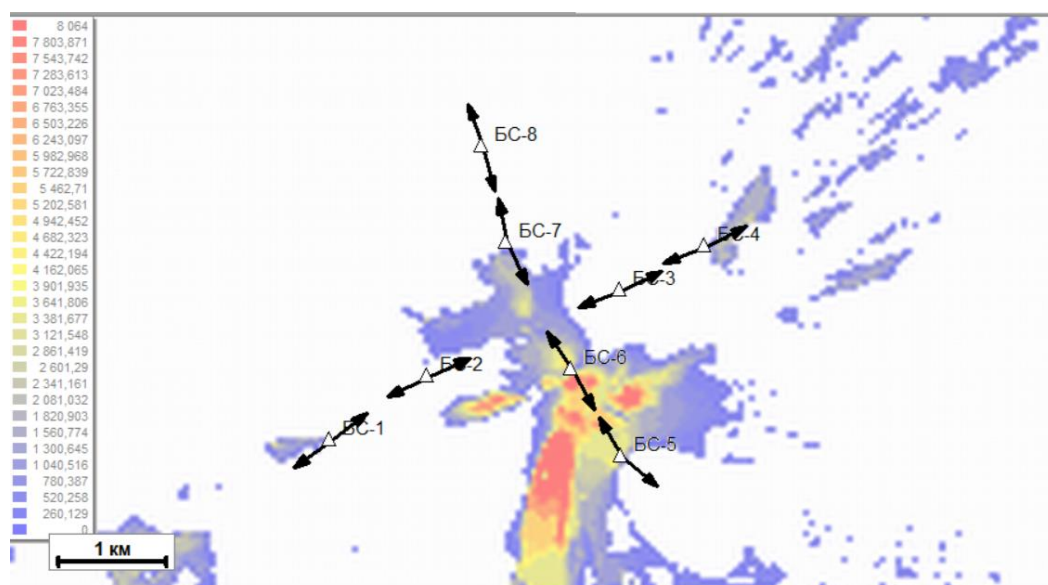


Рисунок 3.3.4 – Зона обслуживания БС-6

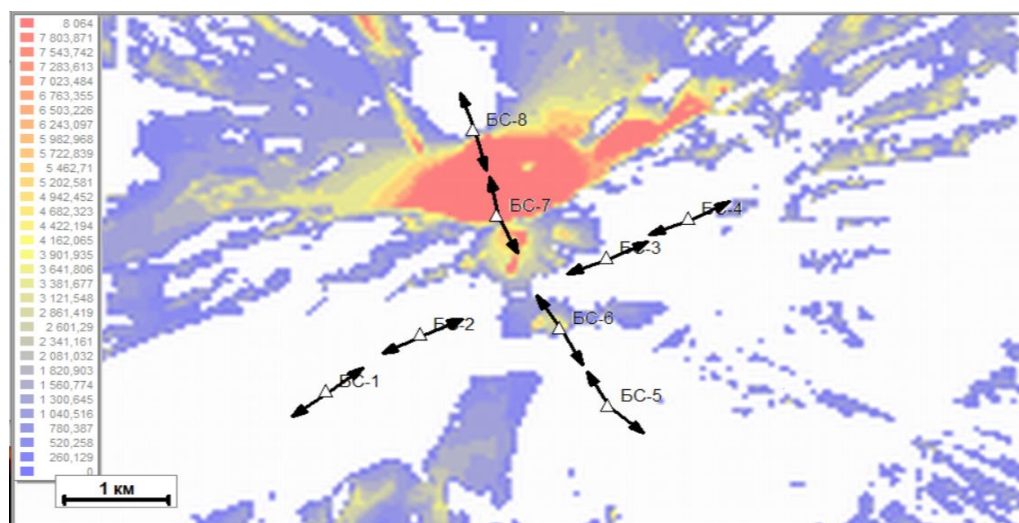


Рисунок 3.3.5 – Зона обслуживания БС-7

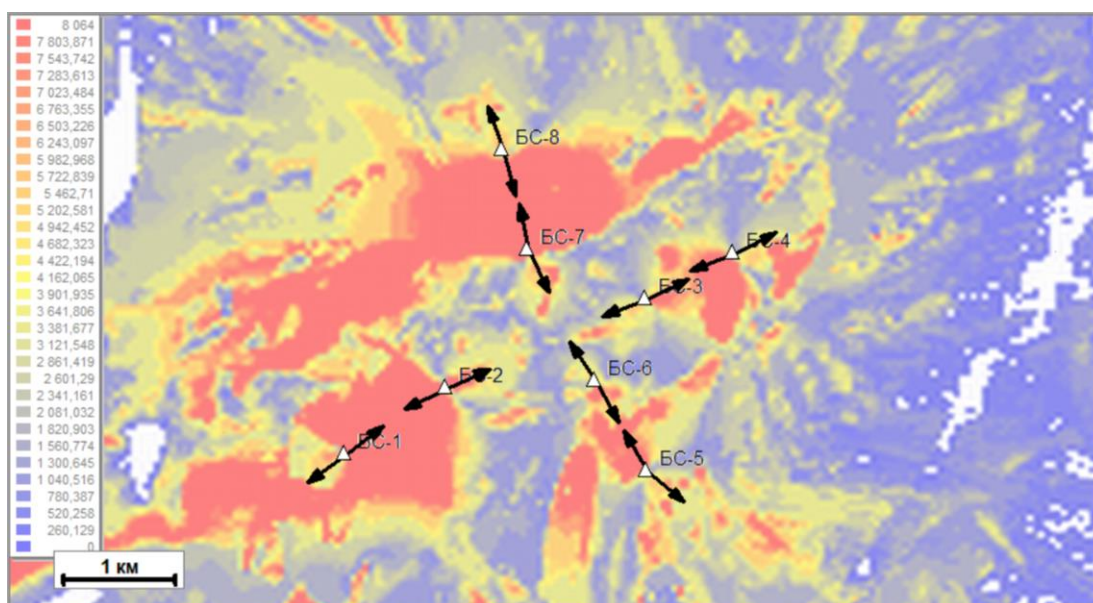


Рисунок 3.3.6 – Зона обслуживания в месте пересечения с применением
Модели №2 (5 МГц)

Как видно из Рисунка 3.3.6, на всем протяжении места пересечения двух смежных TSP LTE-1800 TDD, обеспечивается радиосвязь. При этом не на всех участках обеспечиваются требования по скорости в 2 Мбит/с.

Поэтому результаты, полученные данным способом, не соответствует заданным требованиям и способ не применим для конкретной ситуации. При этом в иных случаях Модель применима по необходимости.

3.4 Способ проектирования с применением ширины полосы радиочастоты 3 МГц

Данный способ имеет схожую структуру, как и в предыдущих способах (№1 и №2), но имеет важную особенность.

Краткий алгоритм работы показан на рисунке 3.4.1.

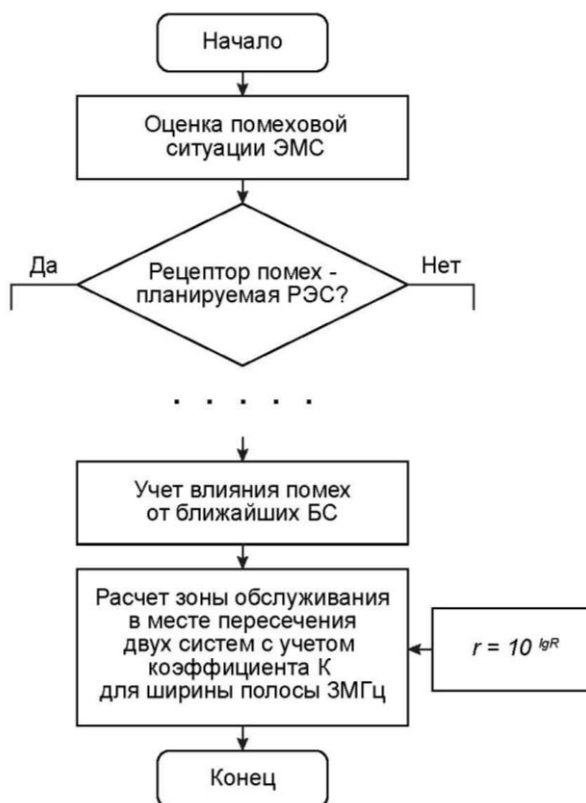


Рисунок 3.4.1 – Схема алгоритма работы Модели с применением способа проектирования №3 (3 МГц)

В структуре Модели возможно разделение на 3 группы частоты по 3 МГц (в соответствии с Решением ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г. о выделении полосы с шириной не более 10 МГц). Данная опция позволит упростить расчеты помех с точки зрения ЭМС.

Остальные расчеты проводятся аналогично расчетам по Модели с 1 способом (10 МГц).

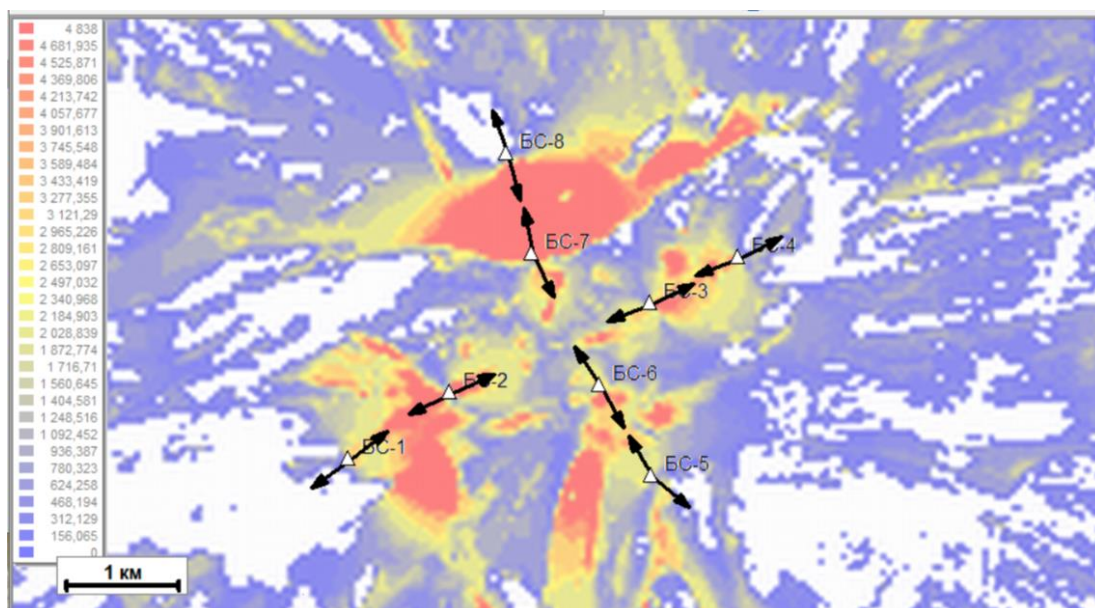


Рисунок 3.4.2 – Пропускная способность места пересечения с способа №3 (3 МГц)

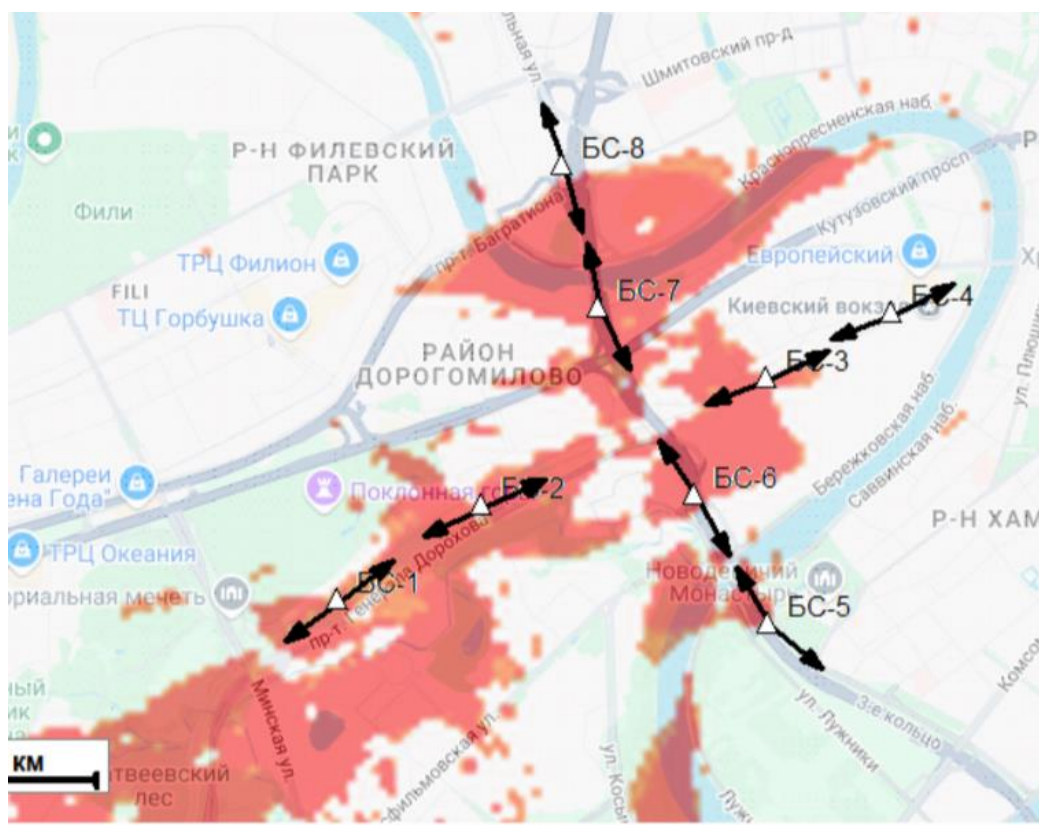


Рисунок 3.4.3 – Зона обслуживания базовых станций в месте пересечения

3.5 Способ проектирования с применением ширины полосы радиочастоты 1.4 МГц

При выборе номинала в 1.4 МГц в Модели будет наблюдаться более высокая дальность радиосвязи, но наименьшая пропускная способность, которая не позволит передавать объемные данные по радиоканалу.

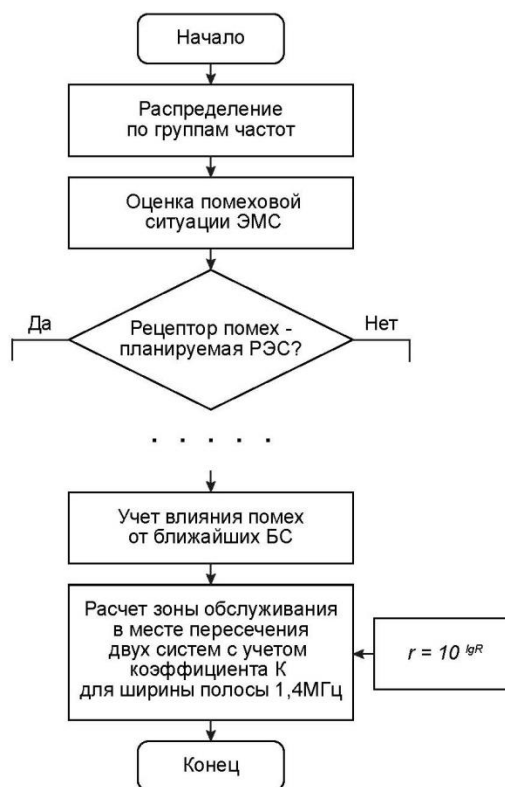


Рисунок 3.5.1 – Схема алгоритма работы Модели с применением способа №4 (1.4 МГц)

Схематично, алгоритм способа можно представить аналогично алгоритму способу №1, но с использованием особенностей для данного номинала частоты (1.4 МГц). Алгоритм работы представлен на рисунке 3.5.1.

Использование данного номинала позволит «разбивать» систему на группы частот, что благоприятно с точки зрения электромагнитной совместимости (ЭМС). Пример показан на рисунке 3.5.2.

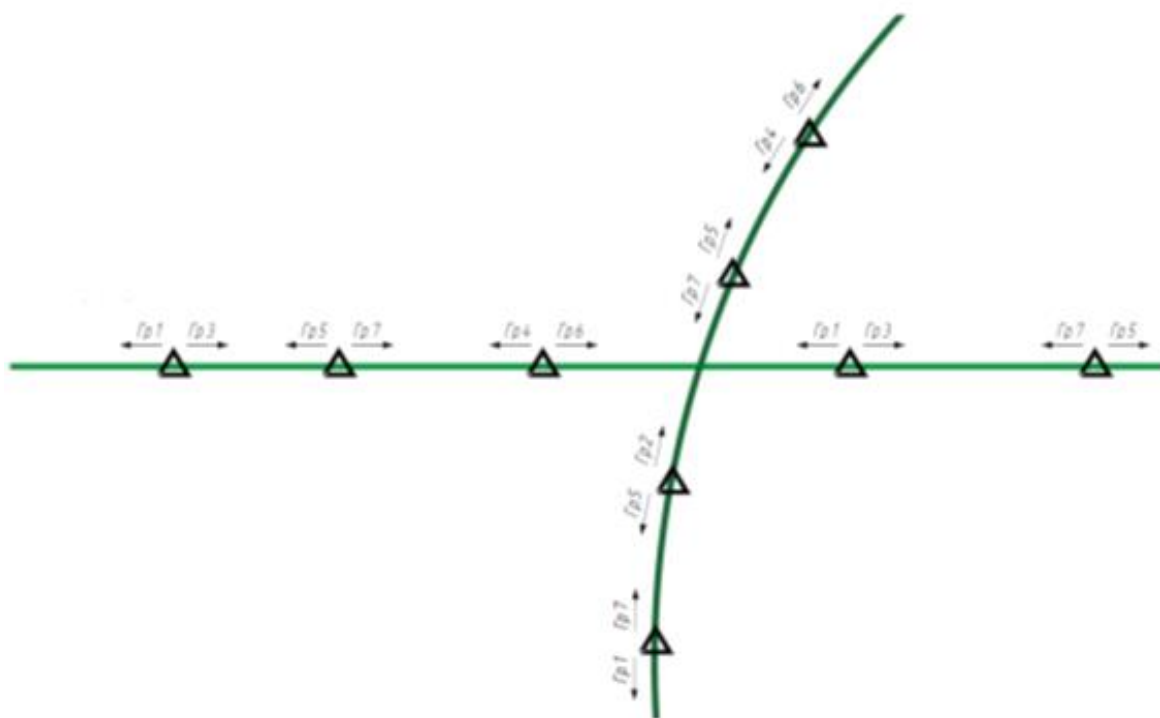


Рисунок 3.5.2 – Распределение частот по группам

Необходимо провести моделирование ситуации, когда высокоскоростной объект будет проходить участок, в котором пересекаются 2 отдельные системы, работающие в одном стандарте LTE-1800 TDD и в одной полосе частот.

Для этого для Модели был выбран способ проектирования №4 (ширина полосы частот 1.4 МГц). Также, предполагается использовать вариант конфигурации субкадра TDD№1 (распределение по нисходящей линии, восходящей линии и специальному слоту соответственно 4:4:2). Скорость на участке необходимо обеспечить до 2 Мбит/с по нисходящей линии и до 1 Мбит/с на восходящей линии. Высота подвеса антенн БС – 20 метров [47].

Карта распределения пропускной способности для четырех БС представлена на рисунке 3.5.3.

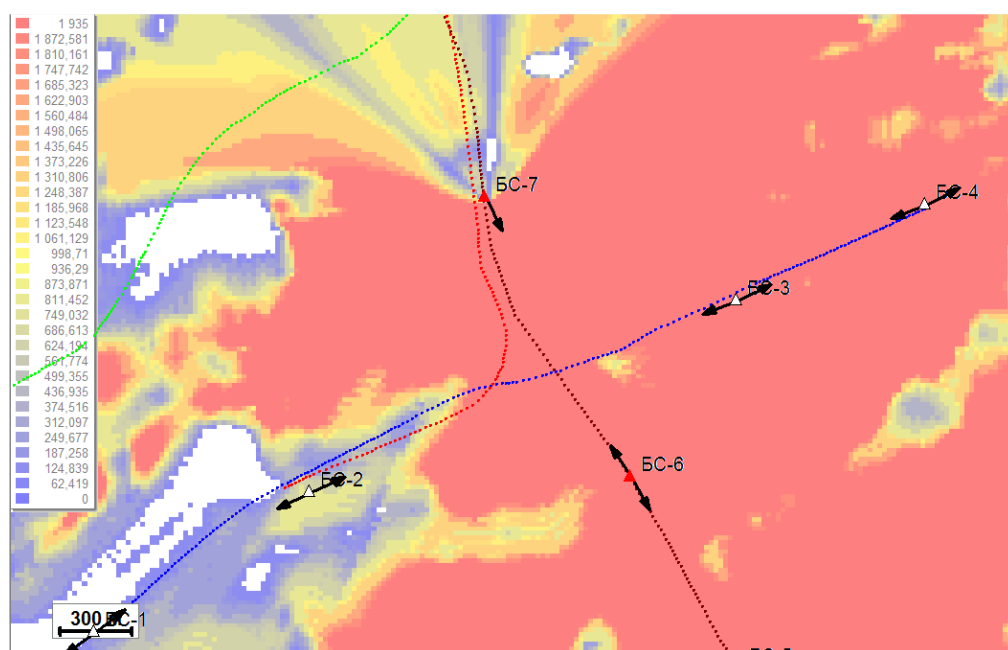


Рисунок 3.5.3 – Карта распределения пропускной способности на линии вниз для БС-7

Далее покажем только ту зону, где обеспечиваются требуемые скорости передачи по нисходящей линии (до 2 Мбит/с) для данного участка (рис. 3.5.4).

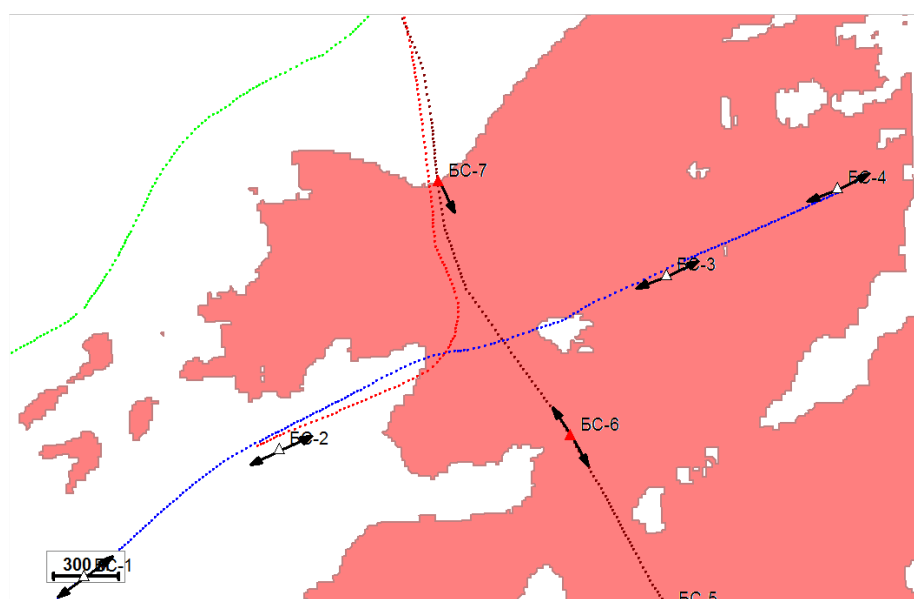


Рисунок 3.5.4 – Зона обслуживания для БС-7

Для БС-6 стоит отметить, что угол наклона составляет -3 градуса. На рисунке 3.5.5 хорошо видно, что по углу места размер луча маленький, а по азимуту – большой.

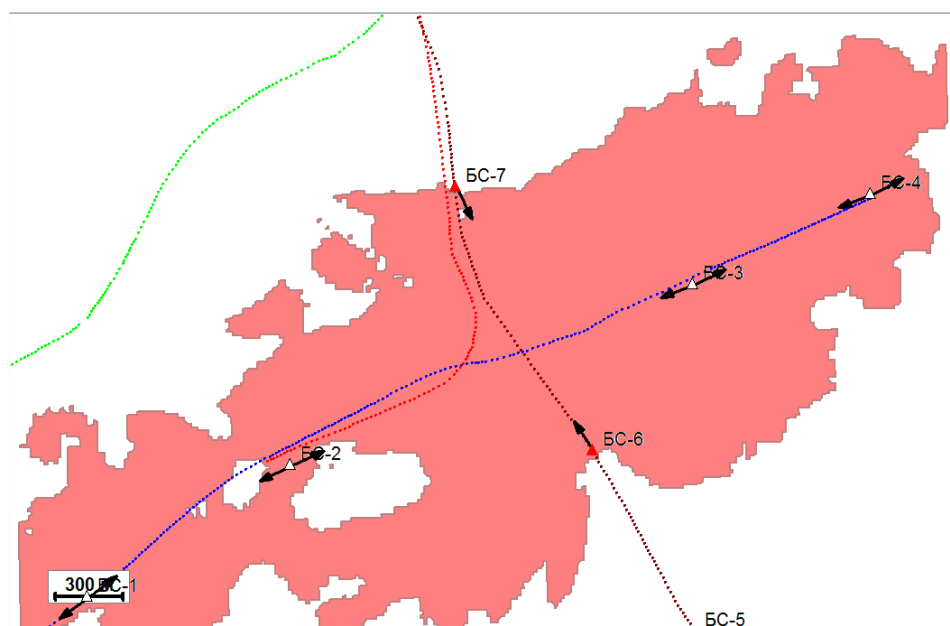


Рисунок 3.5.5 – Зона обслуживания для БС-6

Зоны обслуживания, где обеспечиваются требуемые скорости передачи на линии вниз для БС-2 и БС-3 показаны на рисунках 3.5.6 и 3.5.7 соответственно.

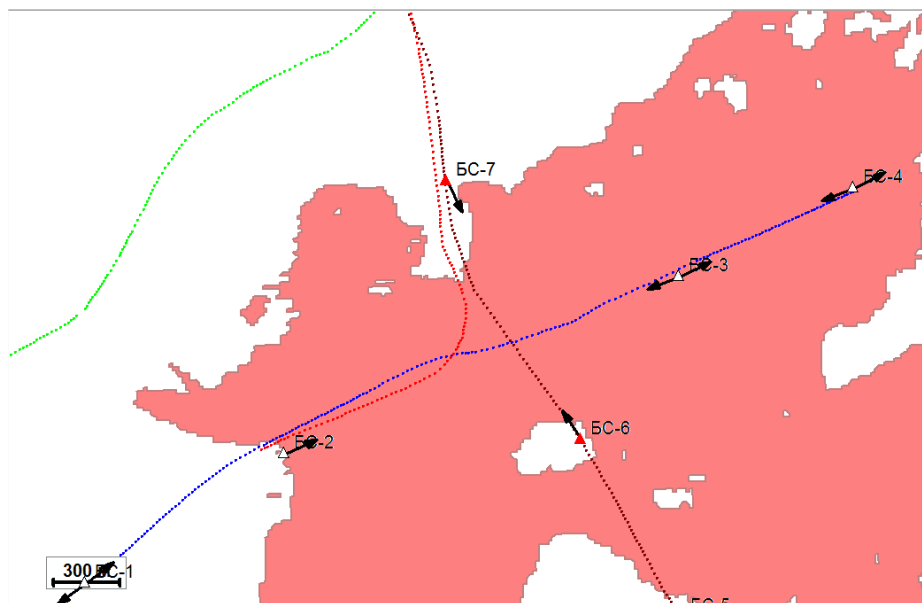


Рисунок 3.5.6 – Зона обслуживания для БС-2

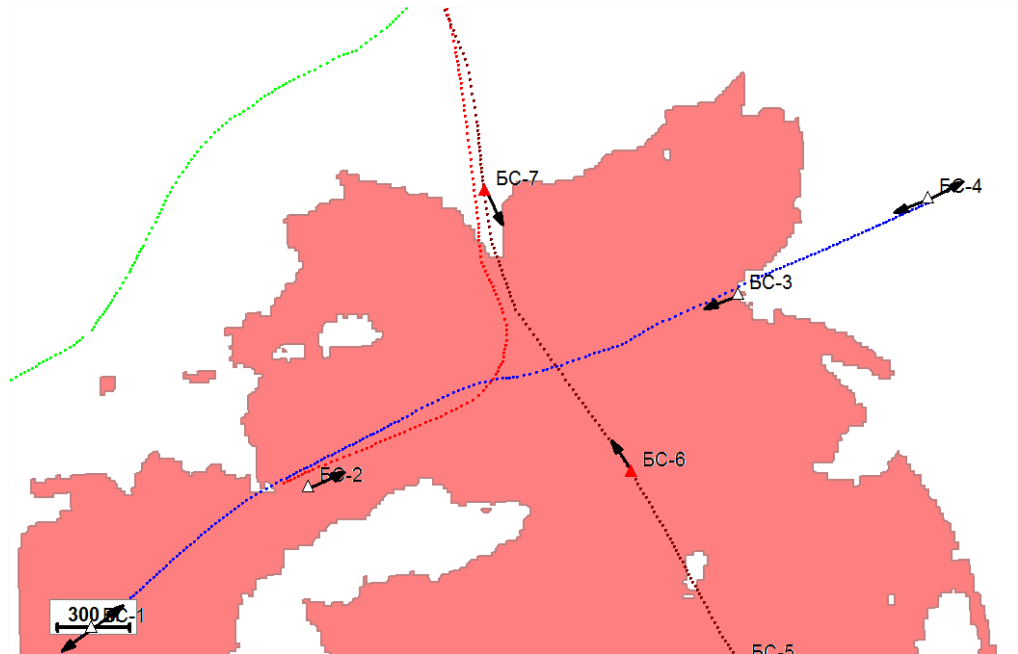


Рисунок 3.5.7 – Зона обслуживания для линии вниз на БС-3

При моделировании работы системы в полосе 1.4 МГц мы можем реализовать группы частот (в данном случае – 7 частот).

Следовательно, за одной из наших четырех базовых станций на пересечении будет повтор частоты.

Например, БС-4 работает одним сектором в направлении к БС-3 на такой же частоте, как и БС-3 в сторону пересечения с траекторией движения высокоскоростного объекта.

В таком случае будет действовать помеха на БС-3 от БС-4. Данная ситуация приведет к деградации зоны обслуживания.

В свою очередь это означает, что требования по пропускной способности не будут удовлетворены и произойдет обрыв связи. Данная ситуация показана на рисунке 3.5.8.

При рассмотрении распределения пропускной способности для БС-3 при воздействии помехи от БС -4 можно отметить, что скорость на отдельных участках не превышает отметки 300 кбит/с. Поясняющая иллюстрация к Модели представлена на рисунке 3.5.9.

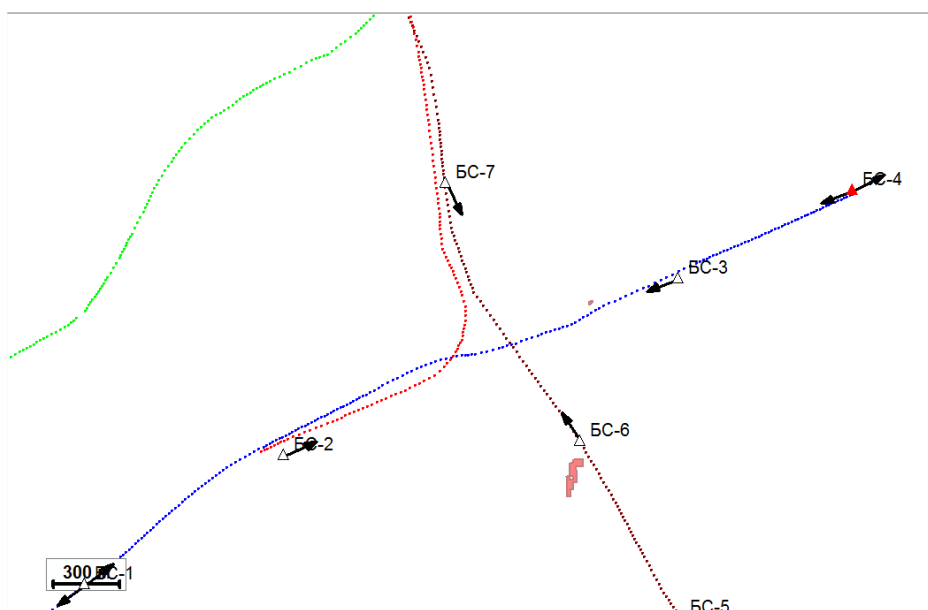


Рисунок 3.5.8 – Зона обслуживания, где обеспечивается скорость до 2 Мбит/с на линии вниз для БС-3 при воздействии помехи от БС-4

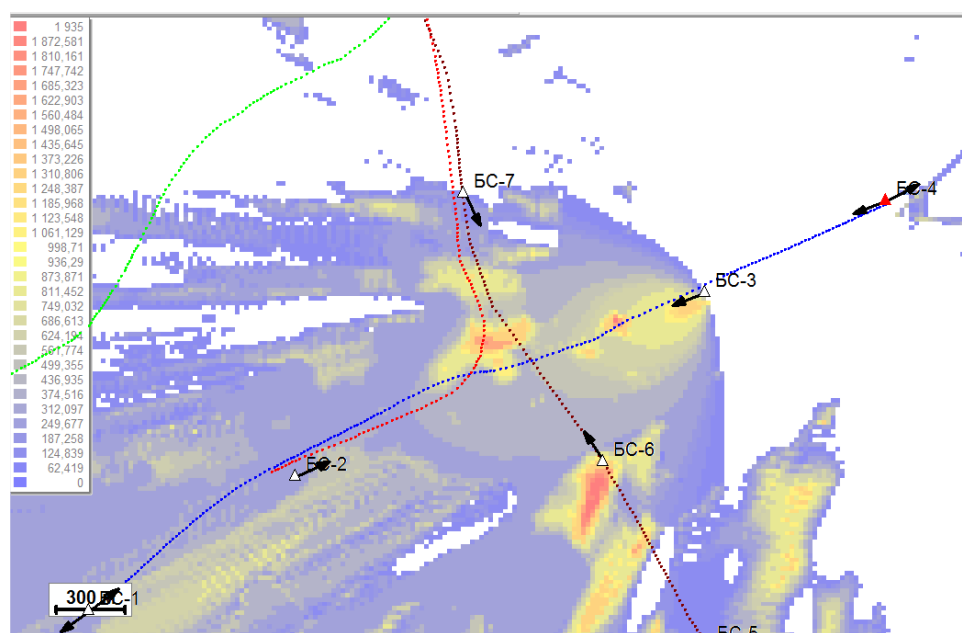


Рисунок 3.5.9 – Карта распределения пропускной способности для БС-3 при влиянии помехи от БС-4

Таблица 3.1 – Расчет для рабочей полосы 1,4 МГц

Модуляция	Ресурсные блоки	Ресурсных элементов	Продолжительность ресурсного элемента, с	Бит на символ	Скорость общая, Мбит/с	FEC	Скорость UL TDD№0, Мбит/с	Скорость UL TDD№1, Мбит/с	Скорость DL TDD№0, Мбит/с	Скорость DL TDD№1, Мбит/с	мощность шума для полосы 1,4 МГц, дБм	SINR отношение сигнал/шум, дБ	IM запас на реализацию, дБ	NE, коэф. шума	Уровень, дБ
QPSK0	6	84	0,0005	2	2,016	0,13	0,15	0,10	0,05	0,10	-113	-5,1	2,5	7	-108,6
QPSK1	6	84	0,0005	2	2,016	0,20	0,24	0,16	0,08	0,16	-113	-2,9	2,5	7	-106,4
QPSK2	6	84	0,0005	2	2,016	0,25	0,30	0,20	0,10	0,20	-113	-1,7	2,5	7	-105,2
QPSK3	6	84	0,0005	2	2,016	0,33	0,40	0,27	0,13	0,27	-113	-1	2,5	7	-104,5
QPSK4	6	84	0,0005	2	2,016	0,50	0,60	0,40	0,20	0,40	-113	2	2,5	7	-101,5
QPSK5	6	84	0,0005	2	2,016	0,67	0,81	0,54	0,27	0,54	-113	4,3	2,5	7	-99,2
QPSK6	6	84	0,0005	2	2,016	0,75	0,91	0,60	0,30	0,60	-113	5,5	2,5	7	-98
QPSK7	6	84	0,0005	2	2,016	0,80	0,97	0,65	0,32	0,65	-113	6,2	2,5	7	-97,3
16QAM8	6	84	0,0005	4	4,032	0,50	1,21	0,81	0,40	0,81	-113	7,9	3	7	-95,1
16QAM9	6	84	0,0005	4	4,032	0,67	1,61	1,08	0,54	1,08	-113	11,3	3	7	-91,7
16QAM10	6	84	0,0005	4	4,032	0,75	1,81	1,21	0,60	1,21	-113	12,2	3	7	-90,8
16QAM11	6	84	0,0005	4	4,032	0,80	1,94	1,29	0,65	1,29	-113	12,8	3	7	-90,2
64QAM12	6	84	0,0005	6	6,048	0,67	2,42	1,61	0,81	1,61	-113	15,3	4	7	-86,7
64QAM13	6	84	0,0005	6	6,048	0,75	2,72	1,81	0,91	1,81	-113	17,5	4	7	-84,5
64QAM14	6	84	0,0005	6	6,048	0,80	2,90	1,94	0,97	1,94	-113	18,6	4	7	-83,4

3.6 Результат сравнения способов проектирования

Краткий алгоритм выбора способа представлен на рисунке 3.6.1.

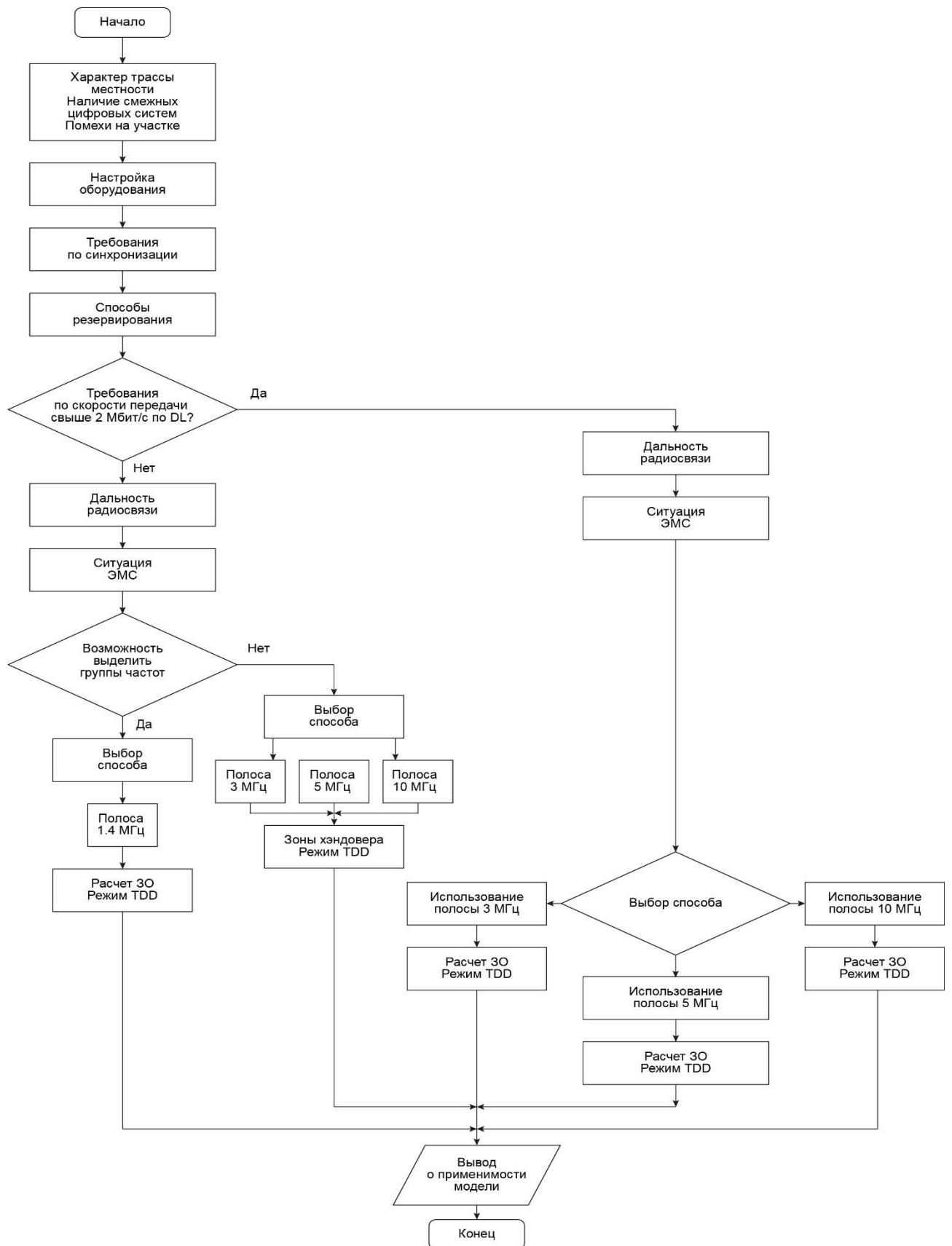


Рисунок 3.6.1 – Краткий алгоритм выбора способа проектирования

На данный момент предполагается, что место пересечения двух TSP LTE-1800 TDD будет в городе Москва.

Поскольку ситуация с электромагнитной совместимостью и ограничением частотного спектра довольно тяжелая, то к системам будут применяться следующие исходные технические требования: DL=UL=2 Мбит/с, TDD №1 (4:4:2), загрузка 100%, Р приёмника = –120 дБм, С/І= –20 дБ, шум ВС=5 дБ, АС=7 дБ [103].

Требуется провести исследование применимости каждого способа проектирования из модели комплексного проектирования TSP LTE-1800 TDD [103].

Способ №1 (полоса 10 МГц)

Работа во всём диапазоне 1790–1800 МГц (с учётом защитных интервалов 5 МГц с каждого конца по Решению ГКРЧ №18-46-02). Из-за помех от других ВС и внешних факторов радиосвязь в месте пересечения почти отсутствует. Способ неприменим [103]. Зона обслуживания представлена на рисунке 3.6.2.

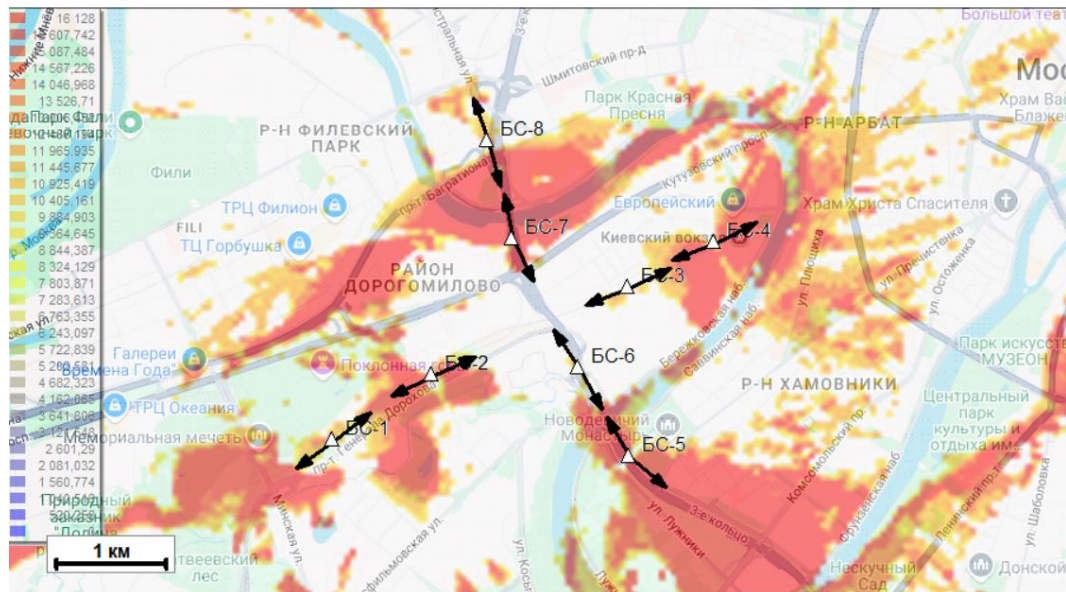


Рисунок 3.6.2 – Зона обслуживания для способа проектирования №1 с применением ширины полосы 10 МГц

Способ №2 (полоса 5 МГц)

Используются два номинала частот: 1790–1795 и 1795–1800 МГц. Наблюдаются лишь небольшие зоны возможной связи, результат неудовлетворительный. Способ также неприменим [103].

Промоделируем работу Модели для исходной ситуации (рисунок 3.6.3).

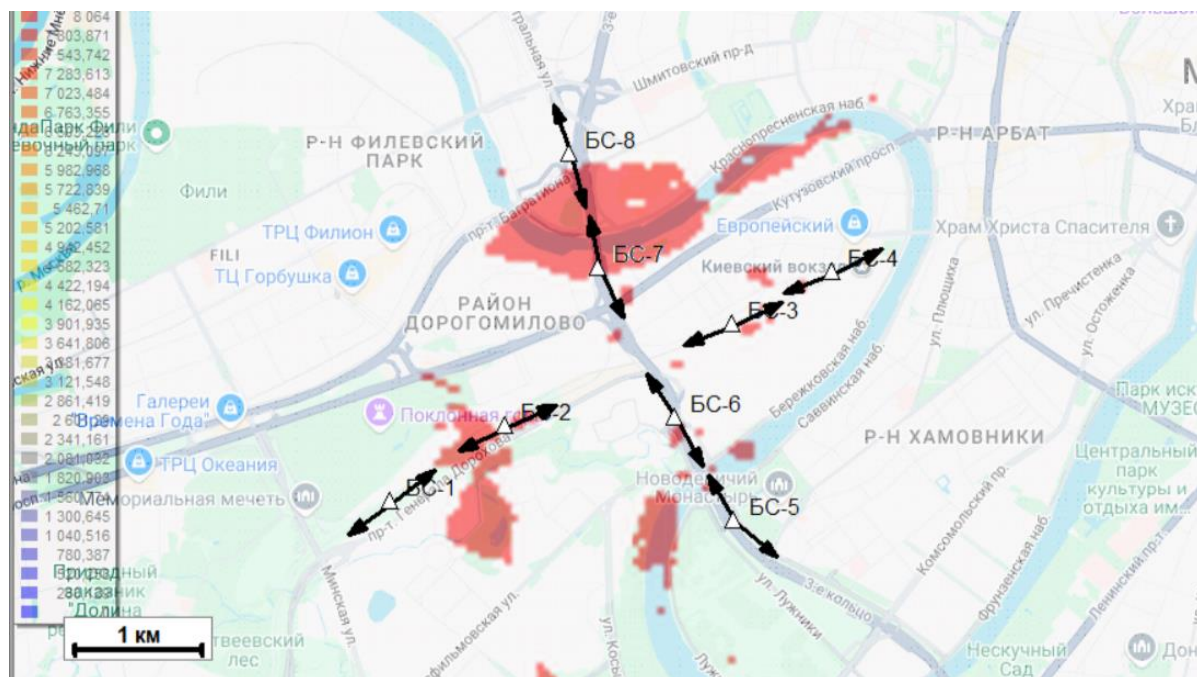


Рисунок 3.6.3 – Зона обслуживания для способа проектирования №2 с применением ширины полосы 5 МГц

Далее необходимо рассмотреть работу способа №3 с применением ширины полосы частоты 3 МГц.

Полоса разбивается на три номинала: 1790–1793, 1793–1796, 1796–1799 МГц. Рис. 3.6.4 показывает улучшение покрытия, но радиосвязь доступна не на всём участке пересечения. Видно влияние «мешающей» частоты из группы, присвоенной БС-7. Способ неприменим полностью [103].

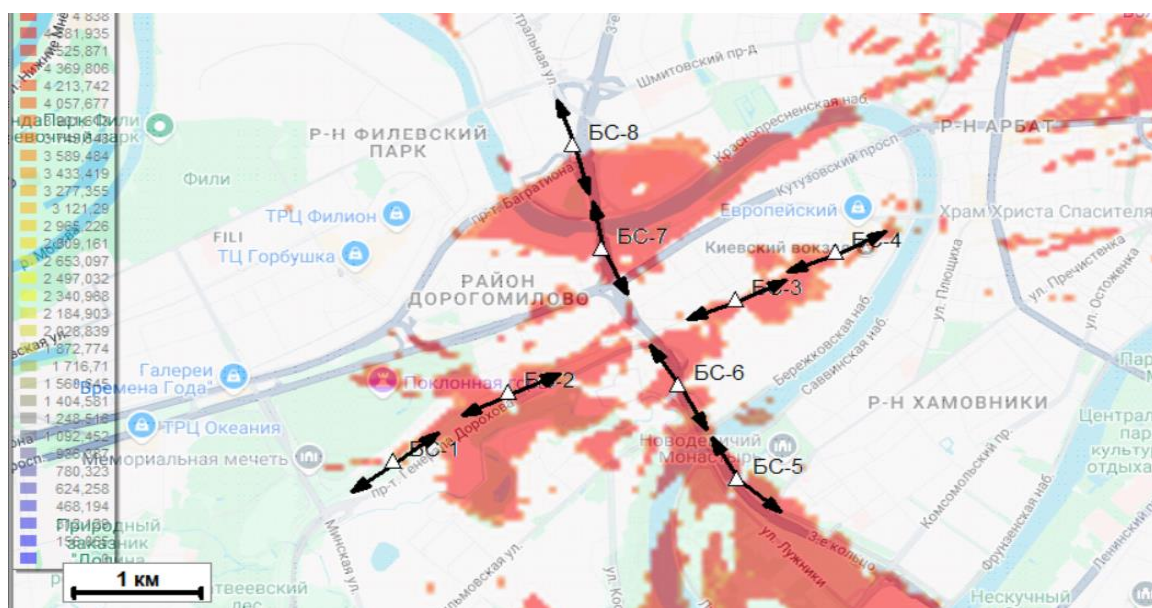


Рисунок 3.6.4 – Зона обслуживания для способа проектирования №3 с применением ширины полосы 3 МГц

В связи с этим, необходимо рассмотреть способ проектирования №4 с применением ширины полосы частоты 1.4 МГц.

Распределение на 7 групп: 1790–1791,4; 1791,4–1792,8; 1792,8–1794,2; 1794,2–1795,6; 1795,6–1797; 1797–1798,4; 1798,4–1799,8 МГц. Рис. 3.6.5 демонстрирует, что на всём участке пересечения обеспечивается радиосвязь со скоростью 2 Мбит/с.

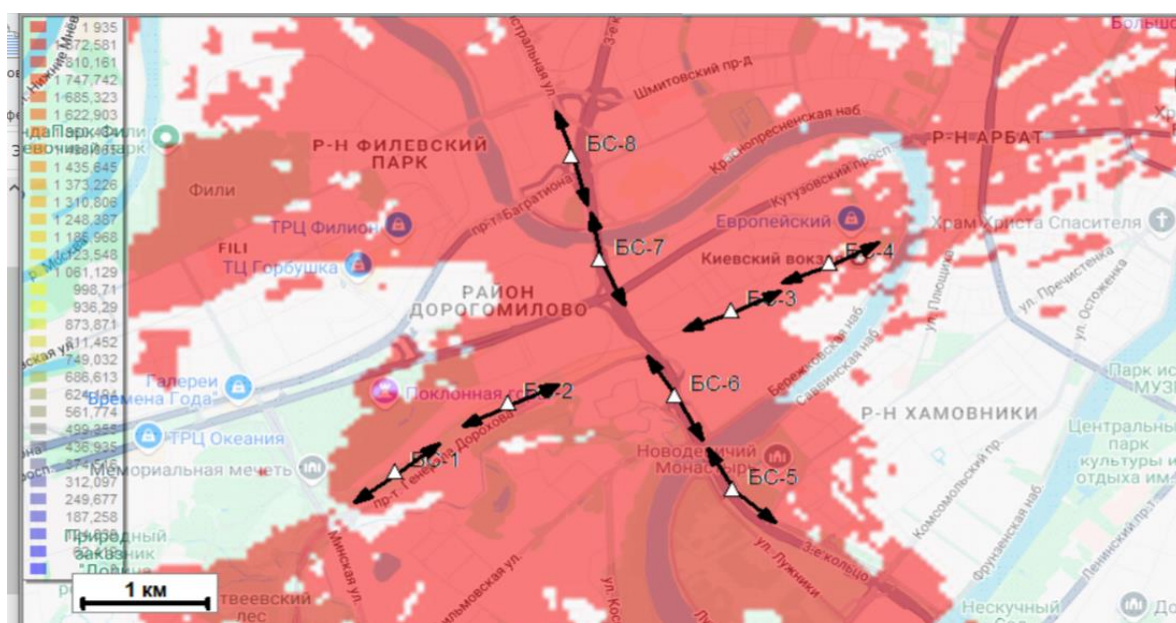


Рисунок 3.6.5 – Зона обслуживания для способа проектирования №4 с применением ширины полосы 1.4 МГц

В связи с этим можно сделать вывод, что для заявленных исходных технических данных и конкретного местоположения места пересечения ТСР LTE-1800 TDD применима Модель с использованием способа проектирования с применением ширины полосы частоты 1.4 МГц (№4) [73,77,103].

Модель для синхронного режима

В синхронном режиме ближайшие БС передают одинаковый контент, не создавая помех абонентской станции [103]. Для места пересечения (8 станций) можно синхронизировать две БС на одной линии, но две другие БС со второй линии создадут сильные помехи. Необходимо синхронизировать все четыре БС «внутреннего круга», особенно сектора, направленные в точку пересечения. Остальные сектора остаются источниками помех.

Синхронный режим затретен по частотному ресурсу и применим только для полос 5 или 10 МГц (не для 1,4 и 3 МГц) [103].

Промоделируем работы системы в месте пересечения с применением способа с шириной полосы пропускания 10 МГц (рисунок 3.6.6).

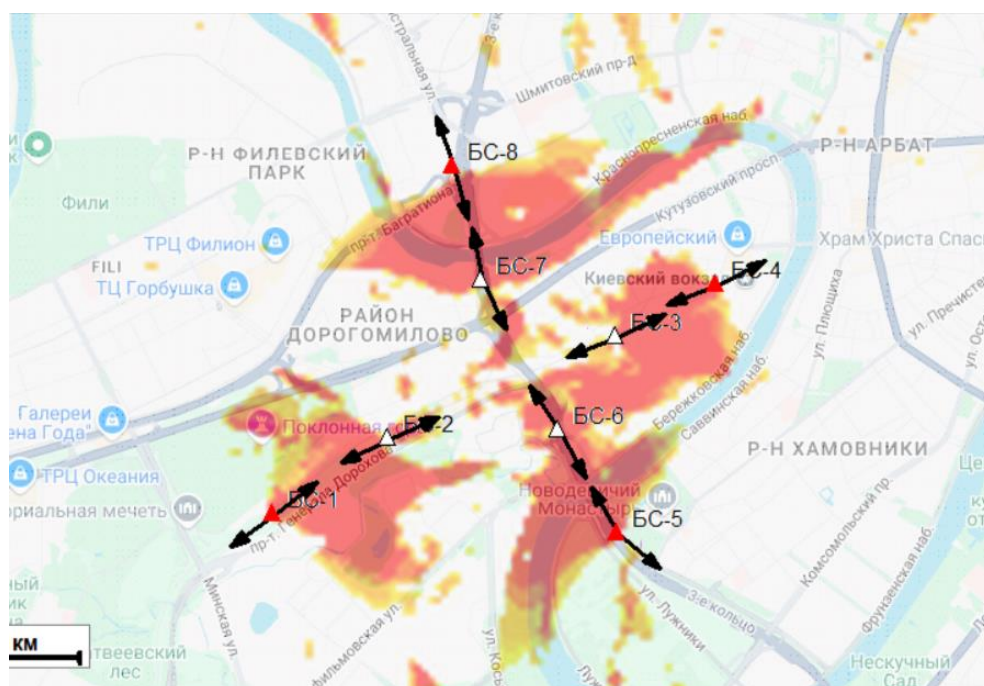


Рисунок 3.6.6 – Зона обслуживания для способа проектирования с использованием ширины полосы 10 МГц в синхронном режиме работы

Как видно из рисунка, применение синхронного режима улучшает зону покрытия радиосвязи по сравнению с ситуацией, когда использовалась Модель

проектирования со способом использования ширины полосы 10 МГц без синхронного режима [103].

При этом, по-прежнему не вся территория места пересечения обеспечивается стабильной радиосвязью.

Соответственно, применение Модели не целесообразно.

Остается рассмотреть работу сети с использованием Модели для ширины полосы 5 МГц в синхронном режиме.

Выполним моделирование работы системы (рисунок 3.6.7).

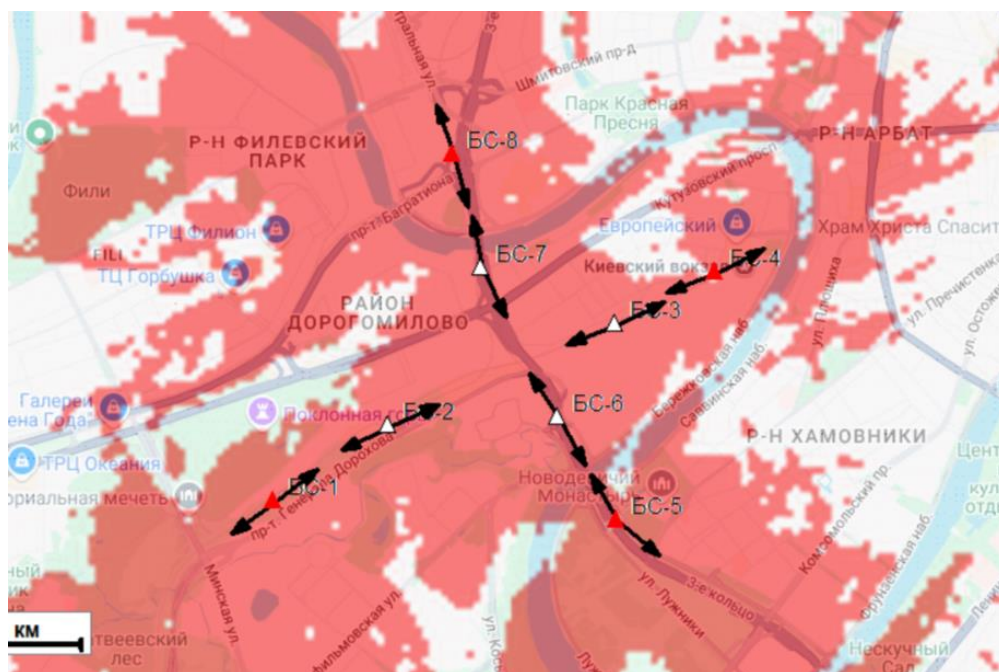


Рисунок 3.6.7 – Зона обслуживания для способа проектирования с применением ширины полосы 5 МГц в синхронном режиме работы сети

Всё место пересечения соответствует требованиям, зона покрытия обеспечена. Данная модель применима [103].

3.7 Оценка внедрения разработанной модели

Внедрение Модели устранило критический пробел проектирования высокоскоростных ЖД – отсутствие стандартизированных решений для зон пересечения двух и более ТСП в одном диапазоне (1785-1805 МГц) и стандарте LTE-1800 TDD. Результаты подтвердили её эффективность как универсального инструмента для непрерывной качественной связи в сложных условиях [103,108]

Модель систематизировала ранее неформализованный процесс, обеспечив:

1.1. Универсальный алгоритм для нетиповых ситуаций.

Модель предоставила отсутствовавший ранее структурированный пошаговый алгоритм (рис. 3.1) для анализа и проектирования зон пересечения. Внедрение показало:

1. чёткую последовательность: сбор данных → расчёт ЭМС → частотно-территориальное планирование → выбор ширины полосы → расчёт зон обслуживания и Handover → настройка;

2. комплексный расчёт ЭМС для кластера из 8 ближайших БС (рис. 3.2.1), что критически важно для оценки помеховой обстановки. Формулы (3.1–3.20) для оценки начала помехового воздействия и блокирования связи позволили перейти от качественных оценок к точным количественным [51,108].

1.2. Сравнительный анализ и обоснованный выбор оптимального решения.

Возможность сравнения четырёх способов (№1–4) и выбора наилучшего для конкретных условий.

1.3. Повышение точности и обоснованности проектных решений [51,108].

Формализованный алгоритм с моделями COST-231 Хата (3.21–3.24) и формулами для зон обслуживания (3.27) и Handover (3.10) заменил эмпирику точными расчётами, обеспечив прогнозирование покрытия до развёртывания (подтверждено испытаниями) [103,108].

2. Практическая ценность и экономический эффект

Снижение рисков и стоимости проектов: модель выявляет проблемы ЭМС на этапе проектирования, предотвращая дорогостоящую переделку; выбор оптимального способа исключает инвестиции в неработоспособные конфигурации.

Гарантия соблюдения ТЗ: обеспечивается выполнение ключевых требований: непрерывность связи, скорость не менее 2/1 Мбит/с, надёжность на сложнейших участках.

Универсальность и адаптивность: модель представляет собой гибкий инструмент. Алгоритм выбора (рис. 3.6.1) адаптирует решение под конкретные условия (уровень внешних помех, требуемую пропускную способность, возможность синхронизации БС) [51,108].

Внедрение разработанной Обобщенной модели доказало ее высокую эффективность и практическую значимость. Модель – не теоретическое исследование, а действующий инструмент, который:

1. Ликвидирует пробел в методологии проектирования, предоставляя структурированный алгоритм для работы со сложными узлами пересечения.

2. Обеспечивает обоснованный выбор решения из четырех возможных вариантов в зависимости от конкретных условий проекта, минимизируя риски и оптимизируя затраты.

3. Повышает надежность и отказоустойчивость всей системы технологической связи на критически важных участках железнодорожной инфраструктуры [103,108].

Таким образом, результаты внедрения подтверждают, что Модель достигает заявленной цели – обеспечения непрерывной и качественной связи в местах пересечения TSP LTE-1800 TDD.

3.8 Рекомендации по применению модели

Внедрение разработанной модели обеспечивает значительные улучшения по нескольким ключевым направлениям по сравнению с эмпирическими или несистематизированными подходами [108].

1. Кардинальное улучшение электромагнитной совместимости

Системный анализ помех: Модель заменяет интуитивные оценки на строгий математический расчет взаимного влияния БС пересекающихся сетей. Формулы (3.1-3.20) позволяют количественно оценить уровень помех для всех пар БС в кластере (до 8 станций), прогнозируя как начало помехового воздействия, так и блокирование связи. Проблемы ЭМС выявляются и устраняются на этапе проектирования за счет выбора оптимальной ширины полосы и частотного плана, а не дорогостоящими переделками после построения сети.

2. Гарантированное выполнение технических требований

Обеспечение сквозной скорости: Модель напрямую увязывает выбор конфигурации с выполнением ключевого требования к пропускной способности (не менее 2 Мбит/с DL / 1 Мбит/с UL). Формализованный расчет зон обслуживания (3.27) и зон хэндовера (3.10) с учетом реального рельефа и всех помеховых факторов позволяет добиться стабильного покрытия и бесперебойного перехода (Handover) между сотами в сложной эфирной обстановке, что критически важно для безопасности движения.

3. Оптимизация использования дефицитного частотного спектра

Несмотря на уменьшение ширины канала, за счет кардинального улучшения отношения сигнал/помеха (SINR) система может работать на более эффективных схемах модуляции (16QAM, 64QAM) на большей территории, компенсируя потерю в пиковой скорости стабильностью работы.

4. Стандартизация и ускорение процесса проектирования

Модель заменяет разрозненные методики и индивидуальный опыт инженеров единым, верифицируемым и воспроизводимым алгоритмом. Это снижает риски человеческой ошибки и обеспечивает одинаково высокое

качество проектов разных исполнителей.

Четкая пошаговая структура модели (анализ → расчет ЭМС → ЧТП → выбор способа → настройка) минимизирует время на принятие решений и исключает необходимость пробных попыток и переделок.

5. Повышение надежности и отказоустойчивости системы

Модель специально разработана для работы в наихудшем сценарии — при пересечении двух сетей с одинаковым стандартом и в одном частотном диапазоне. Это обеспечивает повышенный запас надежности и предсказуемости поведения сети в любой ситуации.

Встроенный механизм оценки помеховой обстановки позволяет адаптировать конфигурацию сети под конкретные условия местности (город, пригород, открытая площадка) и уровень внешних помех.

6. Экономическая эффективность

Снижение капитальных затрат (CAPEX) - предотвращение ошибок проектирования на ранней стадии позволяет избежать дорогостоящего демонтажа и перенастройки оборудования, уже установленного в поле.

Снижение операционных затрат (OPEX) - построение сети с правильной архитектуры с первого раза минимизирует затраты на последующую оптимизацию и устранение проблем, а также снижает риски простоев из-за нарушений связи.

Таким образом, использование данной модели переводит проектирование критических узлов инфраструктуры из области эмпирики и предположений в область точной инженерии, основанной на расчетах и доказательствах. Главное улучшение — это предсказуемость и гарантированность результата: сеть, спроектированная по данной модели, будет стабильно работать в месте пересечения, выполняя все предъявляемые к ней технические и эксплуатационные требования.

Выводы по третьей главе

В соответствии с задачей научной работы и для теоретического обеспечения решения задачи исследования разработана Обобщенная модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания

При разработке модели проектирования необходимо создать наиболее жизнеспособную, с точки зрения пропускной способности сети, модель.

Так было разработано несколько способов, работающих при разной ширине полосы частоты стандарта LTE-1800 TDD.

Способ №1 (10 МГц). Внедрение подтвердило теоретические опасения. Несмотря на максимальную потенциальную пропускную способность, режим показал полную неработоспособность в условиях пересечения из-за катастрофических взаимных помех, приводящих к деградации покрытия и невыполнению требований по скорости (Рис. 3.2.6, 3.6.2).

Способ №2 (5 МГц). Показал ограниченную применимость. Внедрение выявило, что даже использование двух номиналов частот (1790-1795 и 1795-1800 МГц) лишь частично улучшает ситуацию с ЭМС. Требуемые скорости (2/1 Мбит/с) обеспечиваются лишь на части перегона (Рис. 3.6.3). Однако был обнаружен позитивный эффект от использования данного способа в синхронном режиме (Рис. 3.6.7), что расширяет область его применения при возможности синхронизации БС.

Способ №3 (3 МГц). Продемонстрировал улучшение ситуации с ЭМС за счет большего частотного разнеса (3 номинала). Зона покрытия увеличилась, но осталась недостаточной для полного покрытия узла пересечения в условиях высокой внешней помеховой обстановки (Рис. 3.6.4).

Способ №4 (1.4 МГц). Внедрение доказало, что именно этот способ является наиболее универсальным и надежным для сложных условий пересечения. Разбиение на 7 частотных групп (1790-1791.4, ..., 1798.4-1799.8 МГц) кардинально снизило взаимные помехи. В результате на всем участке

пересечения обеспечивается стабильная радиосвязь с требуемыми скоростями (Рис. 3.6.5), несмотря на меньшую теоретическую пропускную способность.

Разработан алгоритм выбора способа проектирования в зависимости от задачи проектирования и частотно-территориального плана сети.

В результате моделирования работы модели было получено, что наиболее пригодна Модель с применением способа проектирования с шириной полосы частоты 1.4 МГц. При ее использовании наблюдаются требуемые скорости по нисходящей и восходящей линиям, наибольшая дальность радиосвязи, а также наилучшая электромагнитная обстановка.

При работе Модели со способами проектирования в полосах с шириной канала 10 МГц, 5 МГц и 3 МГц, наблюдаются худшие условия по электромагнитной обстановке и дальности радиосвязи, чем при работе Модели со способом проектирования с шириной полосы 1.4 МГц.

Рассмотрена и промоделирована работа Модели в синхронном режиме.

Также Модель комплексного проектирования была усовершенствована путем введения коэффициента K для применения в различных ситуациях для того или иного способа проектирования исходя из исходных данных для проектирования.

При этом важно отметить, что Модель применима только для высокоскоростных железнодорожных магистралей, проектируемых для стандарта LTE-1800 TDD.

Таким образом, получена и внедрена наилучшая Модель комплексного применения способов проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях в местах пересечения с другими сетями связи, работающая в полосе 1.4 МГц.

ГЛАВА 4 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕШЕНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

4.1 Сущность и схемы применения научно-технических предложений

Научно-технические предложения и решения по проектированию ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ направлены на повышение эффективности использования частотного ресурса, применение фазированных антенных решеток с целью улучшений показателей технических аспектов сетей стандарта LTE-1800 TDD, а также разработке способа снижения негативного влияния эффекта Доплера на высокоскоростных магистралях [51,70,71,72].

Рассмотрим подробно каждое из предложений и выполним оценку улучшений значений показателей по внедрению научно-технических предложений, а также необходимо сделать рекомендации по внедрению научно-технических предложений.

4.2 Первое научно-техническое предложение: способ компенсации негативного влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях

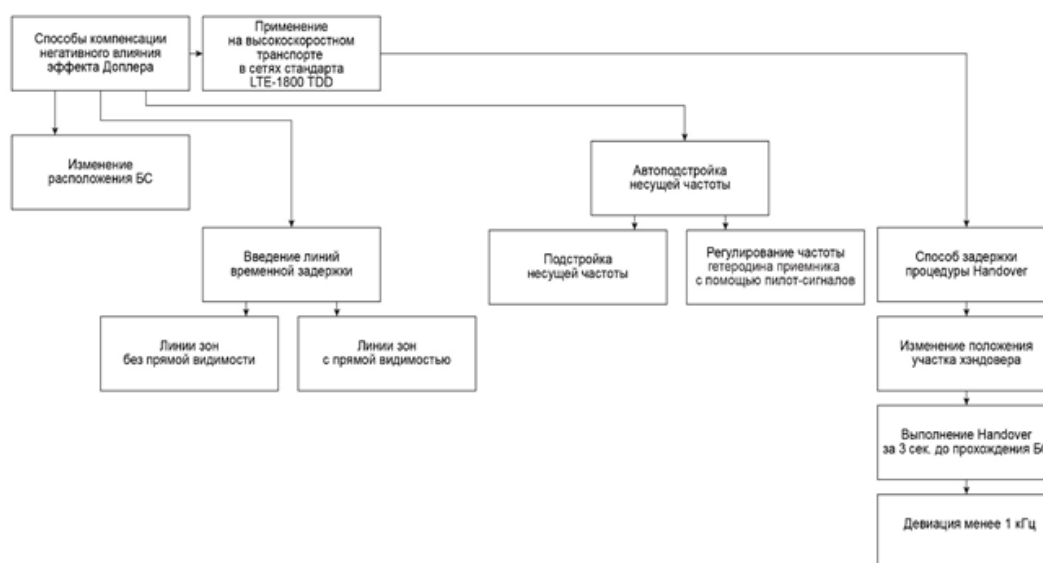


Рисунок 4.2.1 – Схема способов компенсации негативного влияния эффекта Доплера

Доплеровский сдвиг частоты (ДСЧ) обусловлен относительным движением между терминалом и базовой станцией (БС). Этот эффект особенно ярко проявляется в высокоскоростных сценариях, что может вызывать чередование фаз символов данных и ухудшать точность демодуляции данных. Максимальное значение ДСЧ в восходящей линии связи будет в два раза больше частоты Доплера (f_d) после того, как терминал зафиксируется на частоте нисходящего сигнала [17, 46].

Доплеровский сдвиг частоты, вызванный движением абонентской станции относительно базовой станции, негативно сказывается на качестве радиосигнала, особенно при скорости движения поездов свыше 400 км/ч. Этот эффект может привести к ухудшению демодуляции данных, ограниченности зон покрытия и увеличению времени перехода между базовыми станциями (хэндовер). Без компенсации эффекта Доплера на скоростях свыше 400 км/ч может сложиться такая ситуация, которая приведет к обрыву каналов связи. Это можно расценивать как нарушение обеспечения безопасности движения

поездов, что недопустимо в любых ситуациях и является критическим моментом [42,46].

Основной особенностью радиоканалов широкополосной радиосвязи LTE является применение технологии OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) [1-2].

Технология OFDM предполагает передачу широкополосного сигнала посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих вида

$$S_k(t) = a_k \sin[2\pi(f_0 + k\Delta f)] \quad (4.1)$$

Преимуществами технологии OFDM являются способность борьбы с межсимвольной интерференцией и узкополосными помехами, а также возможность использования различных схем модуляции для различных поднесущих и др.

Недостатки технологии OFDM:

1. Синхронизация по времени и частоте;
2. Чувствительность к эффекту Доплера.

Каждая поднесущая модулируется посредством 4-позиционной квадратурной фазовой (QPSK), 16- или 64- позиционной квадратурной фазово-амплитудной модуляции (QAM16 или QAM64). Соответственно, один символ на одной поднесущей содержит 2, 4 или 6 бит [46]. Модель радиосигнала QAM в общем виде описывается выражением:

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_p t) + Q(t) \sin(2\pi f_p t), \quad (4.2)$$

где $I(t)$ — синфазная составляющая комплексной огибающей радиосигнала, $Q(t)$ — её квадратурная составляющая, f_p — частота поднесущей [3].

При этом на практике особую актуальность приобретает направление по разработке и внедрению различных способов противодействия возникновению эффекта Доплера в TSP LTE-1800 TDD на железнодорожном транспорте при разных модуляциях сигнала на высоких скоростях (свыше 400 км/ч) [48,49].

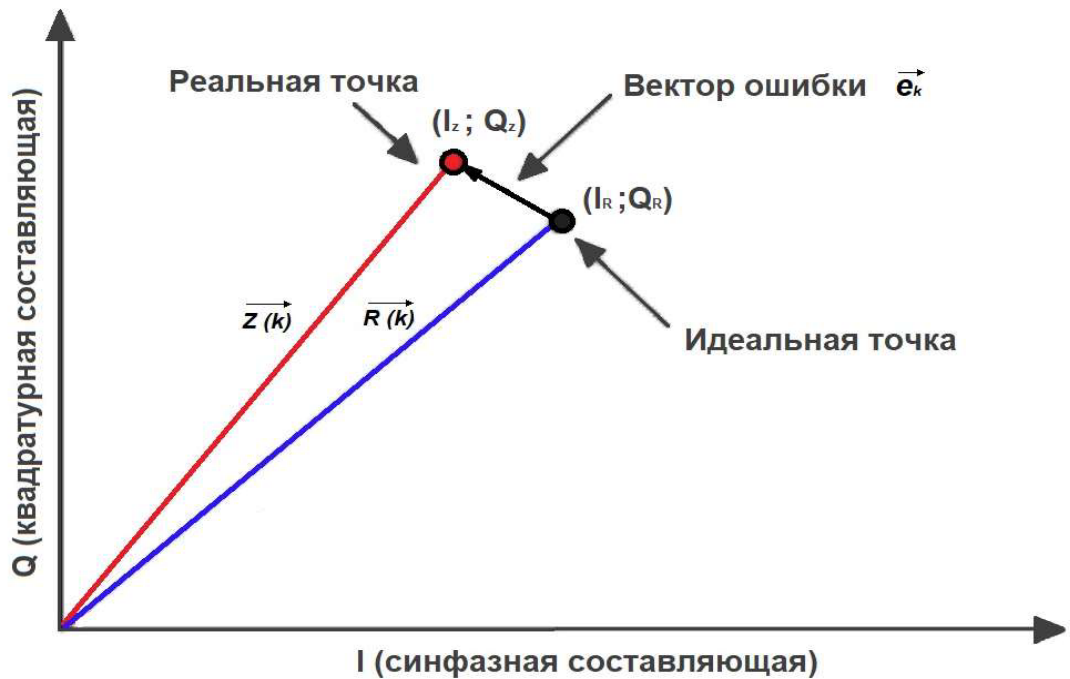


Рисунок 4.2.2 – Графическое представление вектора ошибки для точки сигнального созвездия

Возможность успешной демодуляции символов поднесущей на приемной стороне определяется по величине вектора ошибки $\vec{e}$.

На рис. 4.2.2 представлена графическая интерпретация вектора ошибки, показывающего величину отклонения реального измеренного вектора $Z(k)$ точки сигнального созвездия от идеального положения точки с опорным вектором $R(k)$. Q_R, I_R и Q_Z, I_Z – проекции на синфазную и квадратурную ось опорного вектора и реального вектора точки сигнального созвездия соответственно [46].

Величину вектора ошибки можно выразить следующим образом:

$$\vec{e}_k = \sqrt{(Q_R - Q_Z)^2 + (I_R - I_Z)^2} \quad (4.3)$$

Величина вектора ошибки $\vec{e}_k$ для успешной демодуляции символов поднесущей не должна превышать половины длины кодового расстояния d между соседними точками сигнального созвездия.

Расстояние d между соседними точками в системе квадратурной фазово-амплитудной модуляции QAM и QPSK, с нормированной к единице пиковой амплитудой и числом уровней L может быть представлено в виде:

$$d = \frac{\sqrt{2}}{L-1} \quad (4.4)$$

Число уровней L для модуляций QPSK, QAM16, QAM64 составляет соответственно 2, 4 и 6. Кодовое расстояние d для модуляций QPSK, QAM16 и QAM64 составляет соответственно $\frac{2}{\sqrt{2}}$, $\frac{\sqrt{2}}{3}$ и $\sqrt{2}/5$.

Таким образом, постановка задачи исследования будет заключаться в разработке способа компенсации негативных влияний доплеровского сдвига частоты в технологических сетях радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях. Способ разработать с учётом особенностей обеспечения радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на железнодорожном транспорте. Далее в основной части приведено краткое содержание этапов решения задачи исследования.

QPSK модуляция строится на основе кодирования двух бит передаваемой информации одним символом. При этом символьная скорость в два раза ниже скорости передачи информации.

На рис. 4.2.3 на векторной диаграмме модуляции QPSK показано влияние эффекта Доплера (теоретическое) на позицию дибита (11) при сближении приемного передающего устройства.



Рисунок 4.2.3 – Влияние эффекта Доплера на позицию точки сигнального созвездия «11» на векторной диаграмме модуляции QPSK (теоретическое) с указанием кодового расстояния d и предельных границ значений величины вектора ошибки (не более $\frac{1}{\sqrt{2}}$)

В 16-позиционной QAM (QAM16) существует по четыре сигнальных значения для каждой из квадратурных компонент I и Q. Этим достигаются шестнадцать значений суммарного сигнала.

Зная, что $16 = 2^4$, получаем, что в QAM16 одним символом могут быть переданы четыре бита. Это означает, что символьная скорость в таком виде модуляции получается в четыре раза меньше битовой, т.е. равна $\frac{1}{4}$ от битовой скорости. Таким образом, указанный тип модуляции позволяет организовать спектрально более эффективную передачу данных, чем при модуляции QPSK. [42].

На рис. 4.2.4 на векторной диаграмме модуляции QAM16 показано влияние эффекта Доплера (теоретическое) на позицию точки сигнального созвездия «1000» при сближении приемного передающего устройства [46].

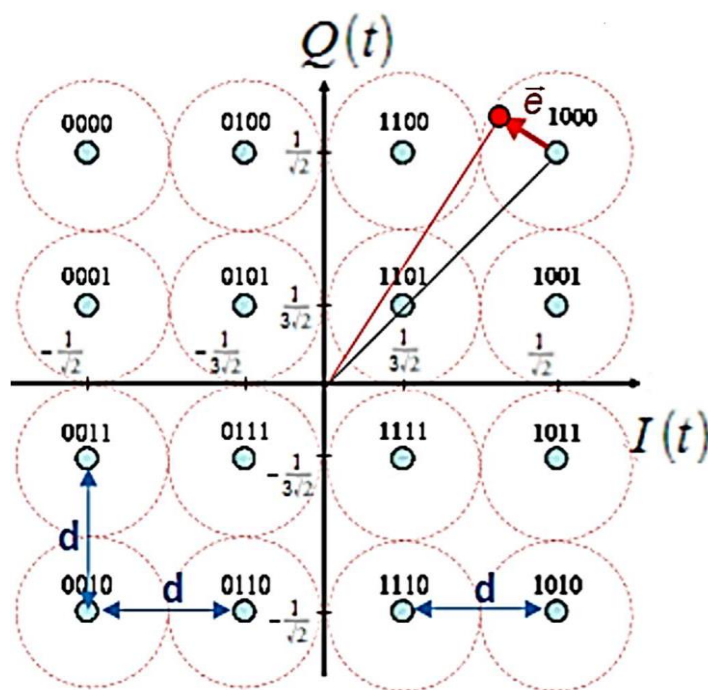


Рисунок 4.2.4 – Влияние эффекта Доплера на позицию точки сигнального созвездия «1000» на векторной диаграмме модуляции QAM16 (теоретическое) с указанием кодового расстояния d и предельных границ значений величины

вектора ошибки (не более $\frac{1}{3\sqrt{2}}$)

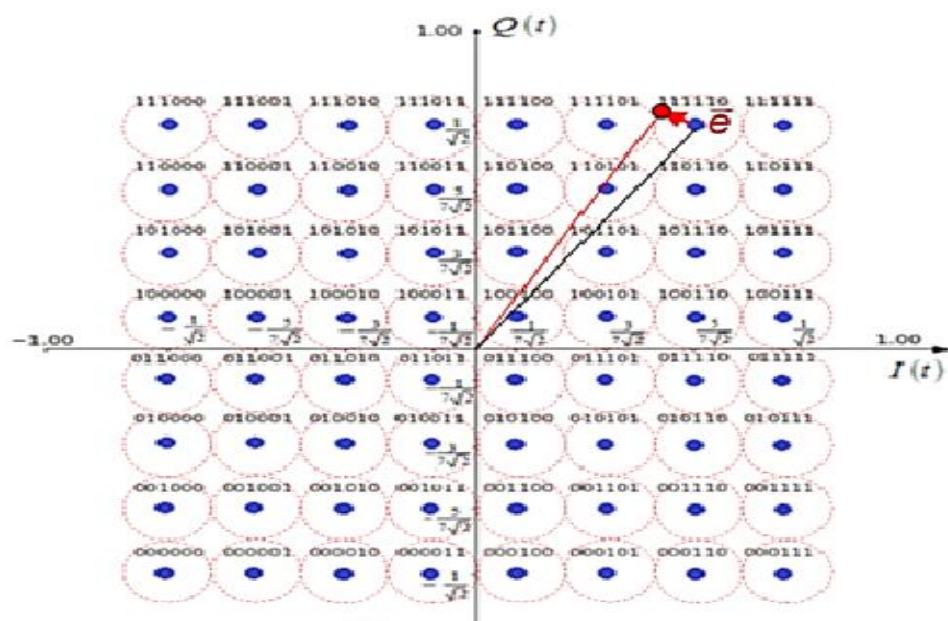


Рисунок 4.2.5 – Влияние эффекта Доплера на позицию точки сигнального созвездия «111110» на векторной диаграмме модуляции QAM64 (теоретическое) с указанием кодового расстояния d и предельных границ значений величины вектора ошибки (не более $\frac{1}{5\sqrt{2}}$).

В 64-позиционной QAM (QAM64) одним символом могут быть переданы 6 бит.

На рис. 4.2.5 на векторной диаграмме модуляции QAM64 показано влияние эффекта Доплера (теоретическое) на позицию точки сигнального созвездия «111110» при сближении приемного передающего устройства.

Значения синфазной Q_z и квадратурной I_z составляющих для каждой точки сигнального созвездия с учетом влияния эффекта Доплера определяется по формулам:

$$Q_z = \sqrt{Q_R^2 + I_R^2} \frac{\sin(\pi\varepsilon)}{\pi\varepsilon} \cos(\arctan\left(\frac{Q_R}{I_R}\right) + \pi\varepsilon) \quad (4.5)$$

$$I_z = \sqrt{Q_R^2 + I_R^2} \frac{\sin(\pi\varepsilon)}{\pi\varepsilon} \sin(\arctan\left(\frac{Q_R}{I_R}\right) + \pi\varepsilon) \quad (4.6)$$

где ε – нормализованное смещение частоты, определяемое как Доплеровское смещение частоты f_d , деленное на интервал поднесущей Δf_d (для LTE составляет 15 кГц).

На рис. 4.2.6 представлено отклонение сигнального созвездия QPSK от

идеальных значений и матрица рассчитанных значений величин вектора ошибки $\vec{e}_k$ для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц при приближении поезда к базовой станции со скоростью 400 км/ч. Как видно из рисунка, значение $\vec{e}_k$ с учетом запаса $d/4$ не превышает значение $d_{QPSK}/2$ (0,707). Работоспособность радиоканала с модуляцией QPSK без компенсации эффекта Доплера в сигнале возможна [42].

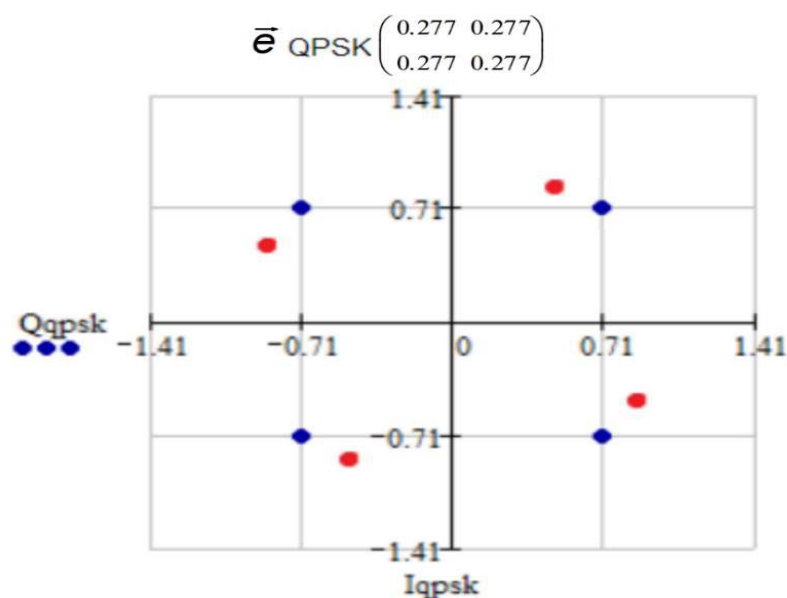


Рисунок 4.2.6 – Отклонение (красный цвет) сигнального созвездия QPSK от идеальных значений (синий цвет) для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц на скорости сближения 400 км/ч

На рис. 4.2.7 представлено отклонение сигнального созвездия QAM16 от идеальных значений величин вектора ошибки $\vec{e}_k$ для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц при приближении поезда к базовой станции со скоростью 400 км/ч. Как видно из рисунка значения $\vec{e}_k$ с учетом запаса $d/4$ для точек созвездия «0000», «1000», «0010», «1010» превышают значение $\frac{d_{QAM16}}{2}$ (0,236). Работоспособность радиоканала с модуляцией QAM16 без компенсации эффекта Доплера в сигнале невозможна [42].

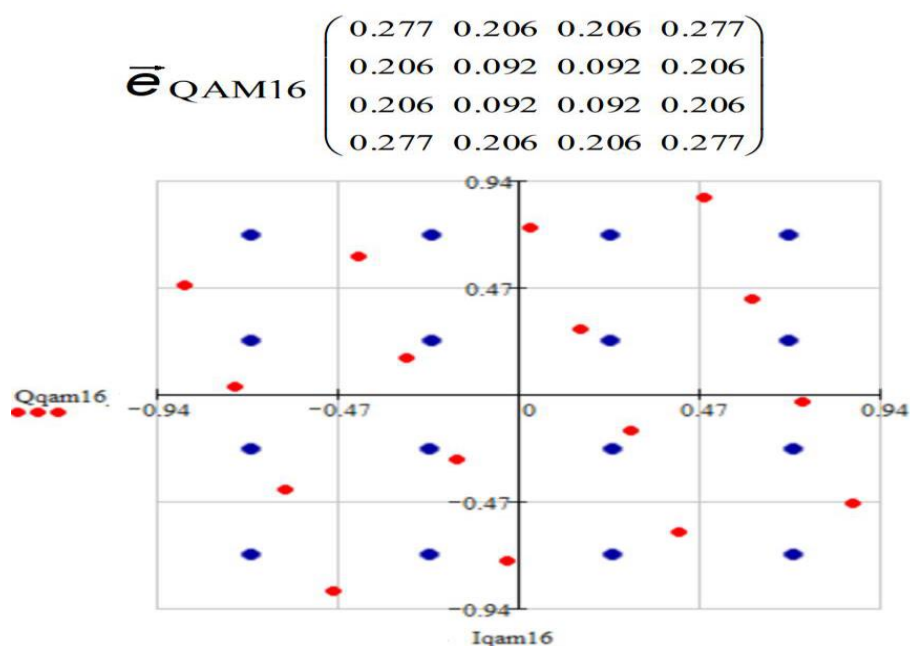


Рисунок 4.2.7 – Отклонение (красный цвет) сигнального созвездия QAM16 от идеальных значений (синий цвет) для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц на скорости сближения 400 км/ч

Расчеты показали, что значения $\vec{e}_k$ с учетом запаса $d/4$ не превышают значений $\frac{d_{QAM16}}{2}$ для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц при приближении поезда к базовой станции со скоростью 340 км/ч (величина $f_d = 566,5$ Гц). [34].

Как видно из рисунка 4.2.8 значения $\vec{e}_k$ с учетом запаса $d/4$ для 52 точек созвездия из 64 превышают значение $\frac{d_{QAM64}}{2}$ (0,101). Работоспособность радиоканала с модуляцией QAM64 на скорости 400 км/ч без компенсации эффекта Доплера в сигнале невозможна [42].

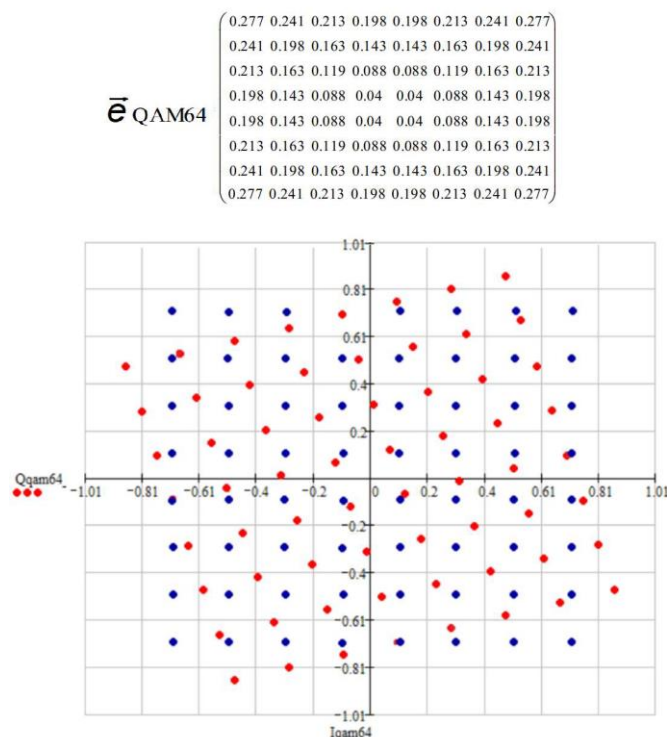


Рисунок 4.2.8 – Отклонение (красный цвет) сигнального созвездия QAM64 от идеальных значений (синий цвет) для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц на скорости сближения 400 км/ч

Способ компенсации негативного влияния эффекта Доплера

Рассмотрим следующий сценарий. На некотором контрольном участке жд. магистрали расположим четыре базовых станции (БС). Среднее расстояние между БС примем равным 1500 м. Антенны БС разместим на высоте 25 м. Высоту положения антенны абонентской (локомотивной) станции (АС) примем равной 6 м. Так как мачты БС размещаются в полосе отвода, то расстояние от железнодорожного полотна до БС примем равным 5 м. Скорость движения локомотива будем считать максимально возможной, численно равной 500 км/с [42].

Поясняющая иллюстрация показана на рисунке 4.2.9.

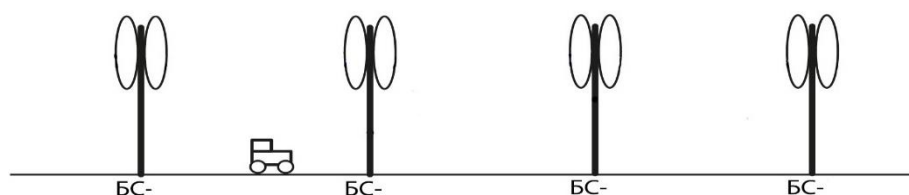


Рисунок 4.2.9 – Ситуационный план

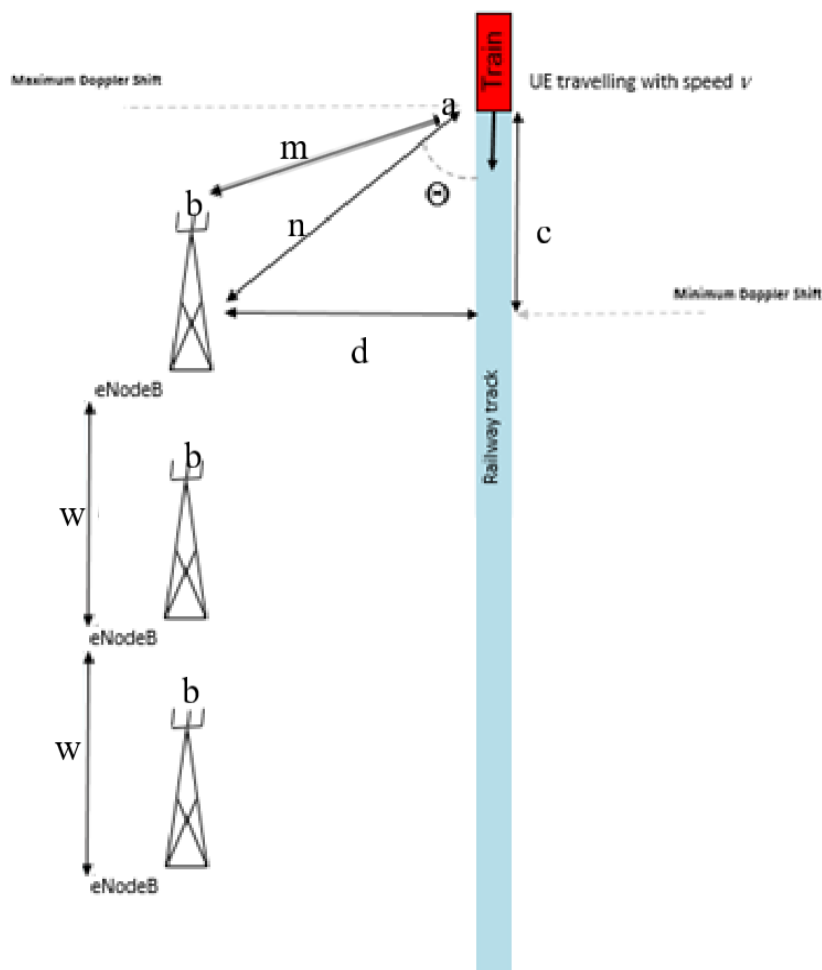


Рисунок 4.2.10 – Графическое изображение возникновения эффекта Доплера

Необходимо определить значение относительного доплеровского смещения (без частоты излучения) и абсолютное доплеровское смещение.

1. Найдём расстояния m и n по формулам:

$$m^2 = c^2 + d^2 + b^2 \quad (4.7)$$

$$n^2 = c^2 + d^2 \quad (4.8)$$

2. Найдём искомое расстояние

$$g^2 = c^2 + d^2 + (b - a)^2 \quad (4.9)$$

3. Найдём расстояние между фазовыми центрами антенн через 1 сек

$$g_1^2 = c + \Delta\theta^2 + d^2 + b^2 \quad (4.10)$$

4. Относительная скорость изменения расстояния между антеннами (АС и БС-1)

$$\Delta\vartheta = g - g_1 = \sqrt{c^2 + d^2 + (b - a)^2} - \sqrt{(c + \Delta\vartheta)^2 + d^2 + (b - a)^2} \quad (4.11)$$

5. Относительная скорость изменения расстояния между антеннами (АС и БС-2)

$$\Delta\vartheta_2 = g - g_1 = \sqrt{(c + w)^2 + d^2 + (b - a)^2} - \sqrt{(c + w + \Delta\vartheta)^2 + d^2 + (b - a)^2} \quad (4.12)$$

6. Абсолютное доплеровское смещение частоты, Гц

$$\Delta f = \frac{-f * \Delta\vartheta}{\vartheta_c} \quad (4.13)$$

где ϑ_c - скорость света, м/с.

Предположим, что выполнение процедуры хендовера происходит по типовому сценарию, т.е. когда уровень сигнала от новой БС превышает текущий уровень сигнала.

В данном случае это эквивалентно условию - переход на работу с БС, ближайшей по дальности. В этом случае участок хендовера расположен примерно по середине между ближайшими БС. График изменения относительной дальности между локомотивной АС и фокусом антенны ближайшей БС представлен на рис. 4.2.11 [42,46].

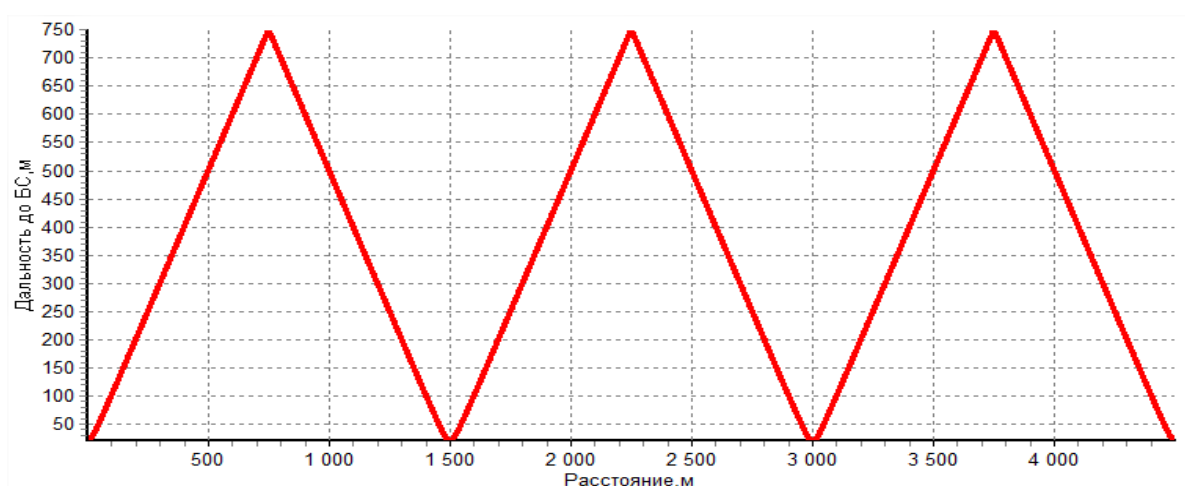


Рисунок 4.2.11 – График изменения дальности от локомотивной АС до ближайшей БС

Доплеровский сдвиг частоты определяется радиальной скоростью между передатчиком и приемником. На рис. 4.2.12 представлен график изменения

радиальной скорости между АС и БС в функции времени.

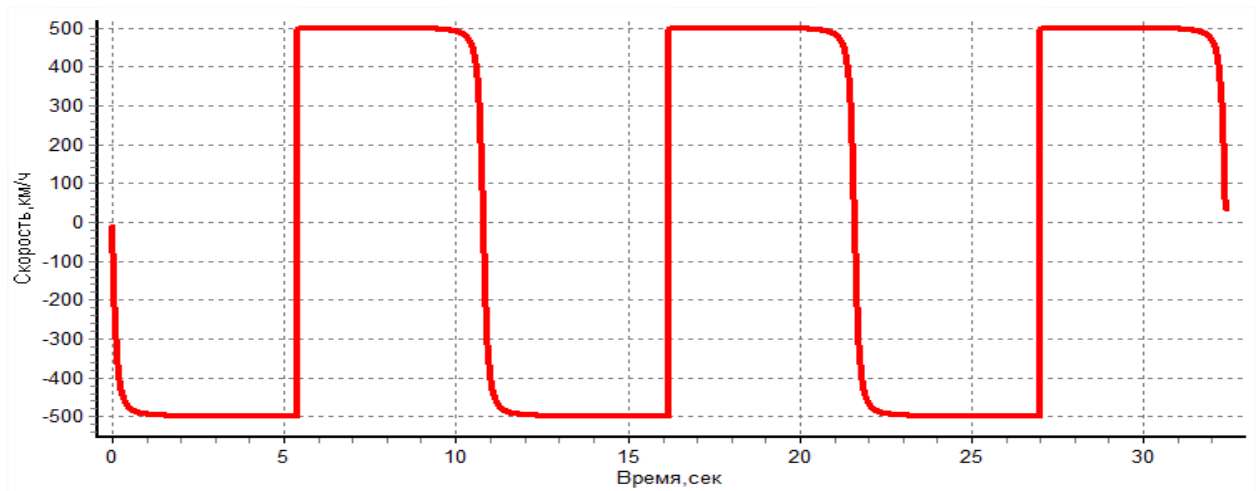


Рисунок 4.2.12 – График изменения относительной скорости между локомотивной АС и ближайшей БС

Изменение радиальной дальности приводит к доплеровскому смещению частоты. Построим соответствующий график в предположении, что частота передатчика равна 1800 МГц. Результат показан на рис. 4.2.13.

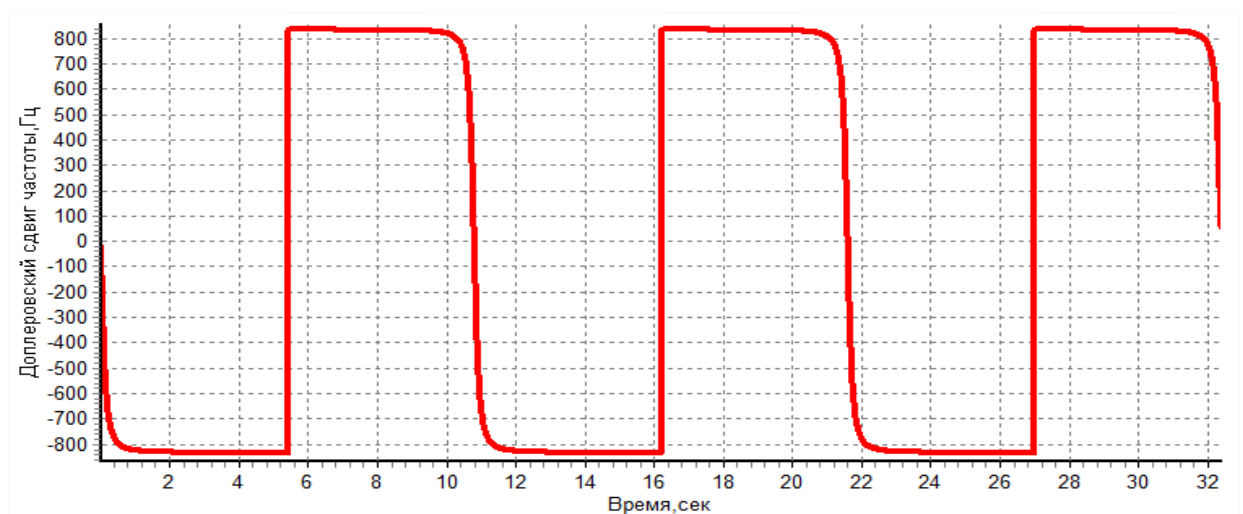


Рисунок 4.2.13 – График изменения доплеровского сдвига частоты (частота 1800 МГц)

На рис. 4.2.12 и 4.2.13 видно, что, во- первых, при выполнении процедуры хендовера происходит скачок доплеровского сдвига частоты на удвоенное значение 833 Гц, т.е. почти на 1,7 кГц. Это видно на отметках времени 5 сек, 16 сек и 27 сек. Кроме того, резкое изменение доплеровского сдвига частот

происходит и в моменты прохождения локомотивом очередной БС (на 11 сек и 22 сек). При этом, собственно участки такого резкого изменения доплеровской частоты достаточно малы и составляют 2...3 сек, а все остальное время доплеровский сдвиг постоянен и численно равен ± 833 Гц. Однако, в эти моменты высока вероятность потери канала, так как компенсация такого сдвига существенно усложняет аппаратную реализацию как БС, так и АС [42,46].

Для решения этой проблемы попробуем изменить положение участка хендовера. Будем выполнять его в момент прохождения очередной БС. Соответствующий график представлен на рис. 4.2.14.

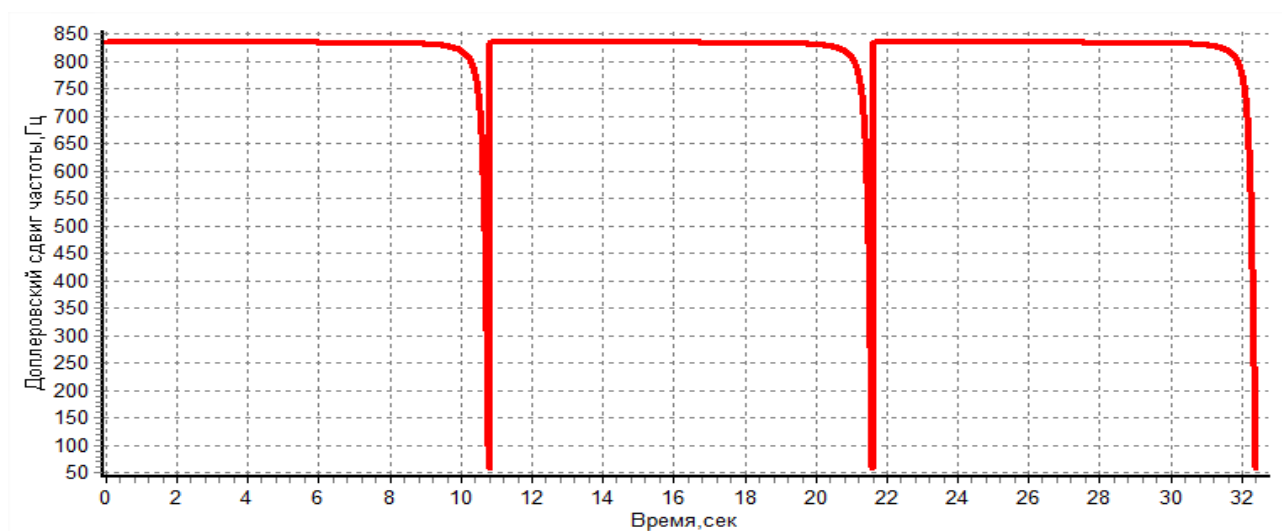


Рисунок 4.2.14 – График изменения доплеровского сдвига частоты при выполнении хендовера при прохождении очередной БС (частота 1800 МГц)

Из рис. 4.2.14 видно, что практически на всем перегоне обеспечивается постоянная составляющая доплеровского сдвига частоты, за исключением коротких моментов при прохождении локомотива мимо БС, когда его значение падает с 833 Гц до нуля. Очевидно, что решить эту проблему можно, если выполнять хендовер не в момент прохождения БС, а, например, за 3 секунды до этого события [42,46]. Соответствующий график показан на рис. 4.2.15.

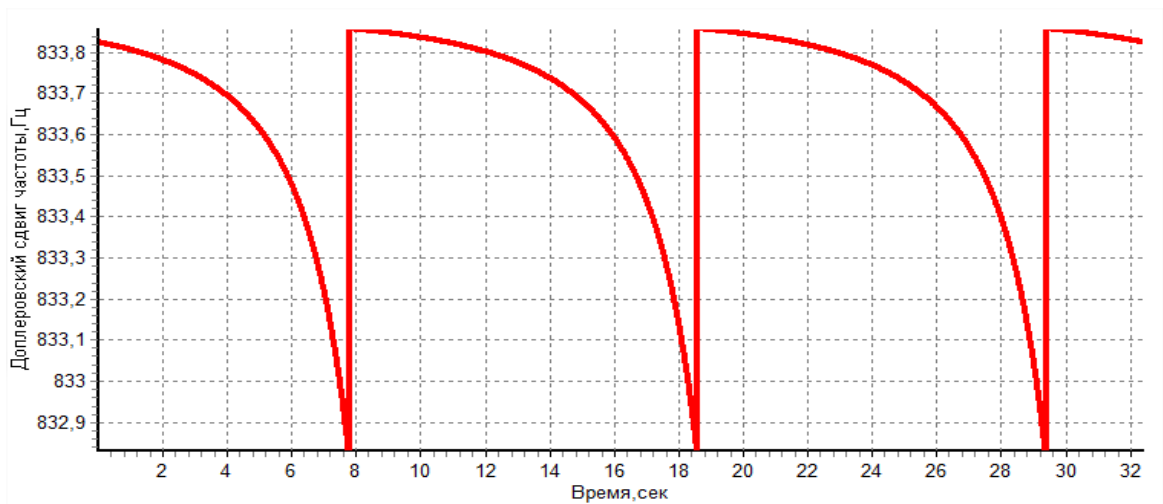


Рисунок 4.2.15 – График изменения доплеровского сдвига частоты при выполнении хендовера за 3 сек до прохождения очередной БС (частота 1800 МГц).

Из рис. 4.2.15 видно, что девиация доплеровского сдвига частоты будет составлять менее 1 Гц. Следовательно, эта проблема - решена. В процессе движения поезда значение доплеровского сдвига будет медленно изменяться от 0 до 833 Гц, в зависимости от скорости движения состава.

Нужно отметить, что так как в сети LTE диапазона 1800 МГц используется технология временного дуплекса (TDD) и работа в прямом и обратном направлении осуществляется на одной частоте, то и значение доплеровского сдвига будет одинаково как для прямого (БС - АС), так и для обратного (АС - БС) направлений [18,42].

Развитие современного методического аппарата в области изучения эффекта Доплера и возможности применения результатов борьбы с негативными последствиями эффекта Доплера позволяют в полной мере использовать предлагаемый способ компенсации негативного воздействия эффекта Доплера путем введения задержки на переключение между базовыми станциями для разработки метода компенсации негативных последствий возникновения эффекта Доплера на высокоскоростных магистралях со скоростями свыше 400 км/ч.

4.3 Второе научно-техническое предложение: применение технологии MIMO для увеличения зоны покрытия базовых станций на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Для реализации технологии MIMO («Multiple Input – Multiple Output», т.е. «Много входов – Много Выходов») используются многоантенные системы, в которых на передающей стороне имеется M передающих, на приемной – N приемных антенн. [26,96].

Математическая модель, описывающая систему MIMO, представляет собой векторное уравнение:

$$r = H * s + n, \quad (4.14)$$

где r и s – векторы принятых и переданных сигналов, n – вектор помех на входе приемников.

Принцип обработки сигналов на приемной стороне системы MIMO можно с помощью системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} y_1 &= h_{11}\theta_1 + h_{12}\theta_2 + \dots + h_{1M}\theta_M + \eta_1; \\ y_2 &= h_{21}\theta_1 + h_{22}\theta_2 + \dots + h_{2M}\theta_M + \eta_2; \\ &\dots \\ y_n &= h_{N1}\theta_1 + h_{N2}\theta_2 + \dots + h_{NM}\theta_M + \eta_N, \end{aligned}$$

где y_i – отсчет комплексной огибающей в i -й приемной ветви; θ_j – переданный через j -ю антенну комплексный символ квадратурно-амплитудной модуляции (QAM); h_{ij} – комплексный коэффициент передачи тракта распространения сигнала, излучаемого j -й антенной и принимаемого i -й антенной; η_i – отсчет комплексного гауссовского шума на i -м входе декодера со средней мощностью P_N . [123].

При пространственном временном/частотном кодировании группу символов передают либо последовательно во времени на одной поднесущей (пространственно-временное кодирование), либо одновременно на несколько поднесущих (пространственно-частотное кодирование) параллельными потоками.

Антенны Massive MIMO представляют собой сборные конструкции, состоящие из отдельных излучающих элементов, расположенных в виде линии,

квадрата (прямоугольника), круга, цилиндра и др. Эти антенные конструкции размещают вблизи базовой станции на крыше или на стене зданий либо на антенно-мачтовых сооружениях.

Целевую функцию можно представить следующим образом.

Необходимо найти максимальную дальность радиосвязи, удовлетворяющую критерию работоспособности, и сравнить ее с требуемым значением дальности.

$$R_{max} = \max\{R \geq 0 | SINR_{DL}(R) \geq SINR_{пор} \text{ и } SINR_{UL}(R) \geq SINR_{пор}\} \quad (4.15)$$

При условии $\Delta G_{DL} = \Delta G_{UL}$;

При этом $R_{max} \geq R_{треб}$,

где ΔG – энергетический выигрыш от применения MIMO, дБ.

При фиксированных мощностях и условиях распространения увеличение дальности радиосвязи под действием выигрыша ΔG описывается соотношением

$$\Delta G = \beta * 10 \log_{10} \left(\frac{R_1}{R_0} \right) \quad (4.16)$$

где β – коэффициент затухания в модели потерь.

Ключевой особенностью построения сети стандарта LTE-1800 TDD является линейное размещение базовых станций (БС) вдоль полотна железной дороги и, соответственно, обслуживание относительно узкой территориальной полосы с железнодорожной инфраструктурой [97].

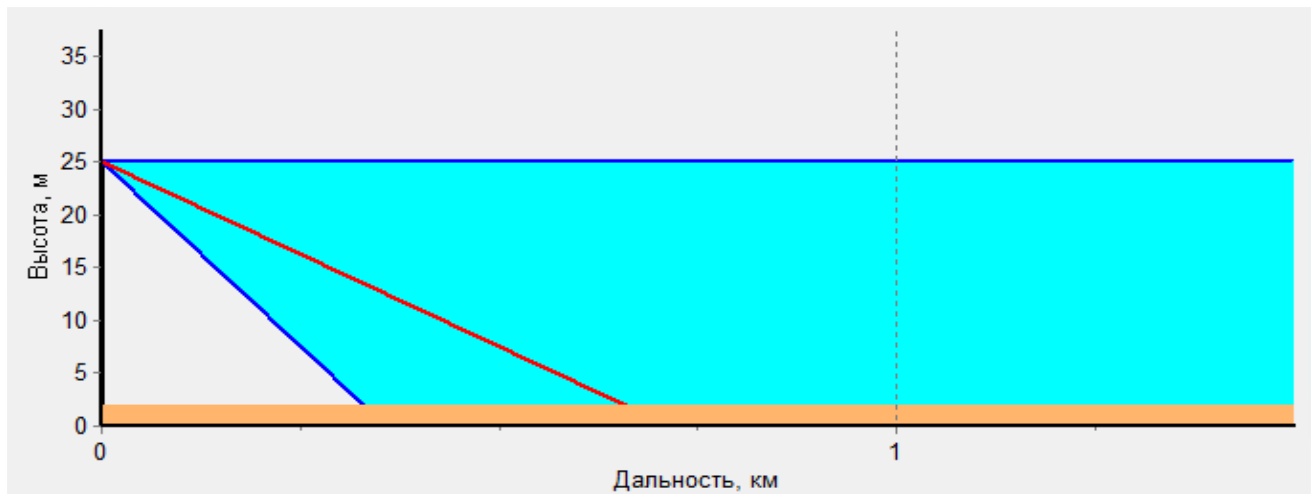
Основные преимущества MIMO:

1. Увеличение зоны обслуживания базовой станции до 30%;
2. Энергетический выигрыш до 30 дБ;
3. Оптимальный угол места от -2 до -3.

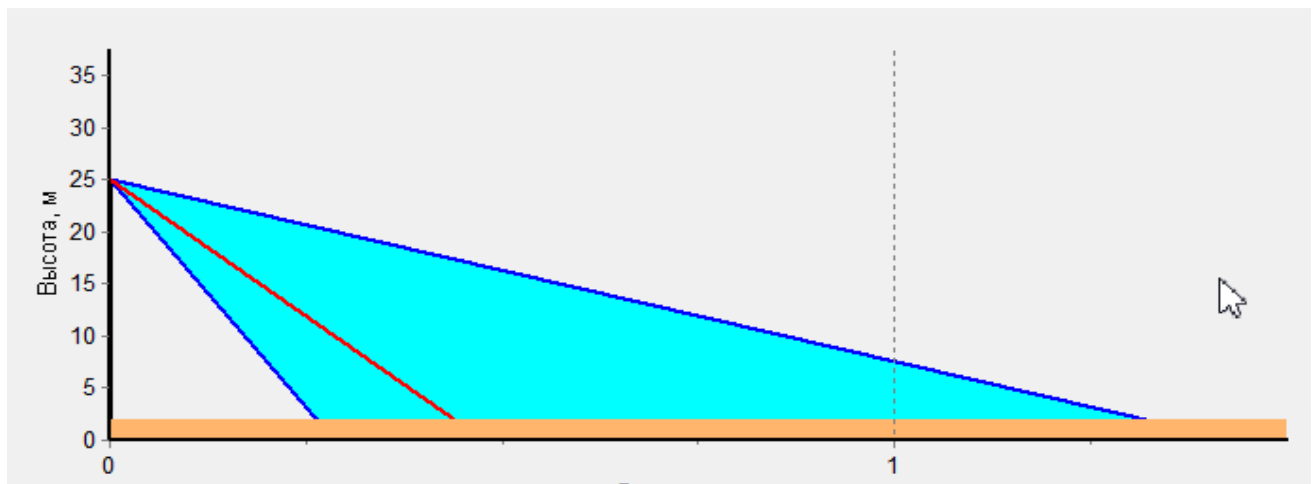
Из-за влияния внутрисистемных помех граница зоны обслуживания каждой БС, как правило, проходит в непосредственной близости от смежных БС. Для стандартных условий, когда между соседними БС нет существенных складок местности, энергетически наиболее слабой является зона в непосредственной близости от соседней БС. Данный факт определяется тем, что потери в свободном пространстве в этой точке максимальны. Поэтому, в

большинстве случаев, азимуты наведения антенн направлены на соседние БС (либо на самую удаленную точку зоны обслуживания).

Для предварительной оценки значения оптимального угла места наведения антенн в идеальных условиях (на плоскости) был использован инструментарий, позволяющий визуализировать раскрыв антенны в вертикальной плоскости, а также положение ее электрической оси при высоте подвеса антенны 25 м. Соответствующие рисунки для углов места "минус" 2 град ("вниз") и "минус" 3 град ("вниз") представлены на рис.4.3.1.



а) угол наклона 2 град



б) угол наклона 3 град

Рисунок 4.3.1 – Визуализация угла раскрыва антенны БС в вертикальной плоскости, а также положения электрической оси антенны при высоте подвеса антенны 25 м

Из рисунка видно, что при средней дальности между БС примерно 1,5 км оптимальным значением угла места будет величина в диапазоне от "минус" 2 град ("вниз") до "минус" 3 град ("вниз"). Выставка углов наклона и азимутов наведения антенн проводилась для каждой БС отдельно в ручном режиме.

Наиболее вероятные схемы ММО, которые могут быть реализованы для TSP LTE-1800 TDD в настоящее время - 2T2R на линии "вниз" и 1T2R на линии "вверх". В первом приближении это даст 3 дБ дополнительного выигрыша на каждой из линий [51].

Дополнительный выигрыш, как следует из рис., увеличивает дальность обслуживания с 700 м до примерно 1 км. (рис. 4.3.2) [104].

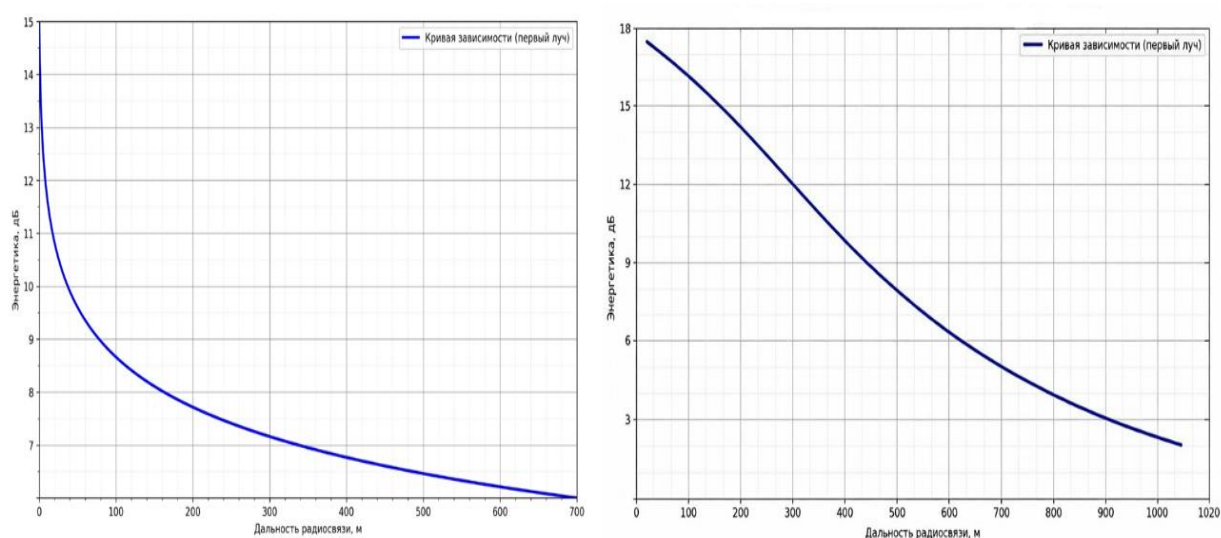


Рисунок 4.3.2 – Изменение дальности обслуживания при использовании ММО

4.4 Третье научно-техническое предложение: применение моделей распространения радиоволн при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Классические эмпирические модели (Okumura, Hata, SUI, COST231, ECC-33 и др.) удобны простой аналитической формой, что делает их применимыми в первую очередь для учебного процесса. Существенный недостаток – эмпиричность: не учитывается реальный рельеф, можно задать лишь тип местности (город, сельская местность, пригород) с поправочными коэффициентами. На практике идеальных типов местности не существует, поэтому прогнозирование по этим моделям даёт большую погрешность [43,87,88]. Исторически они использовались для планирования первых сетей цифровой подвижной радиосвязи (GSM). Сегодня модель Okumura-Hata применяется для GSM-R в Китае, но калибруется для минимизации погрешностей. Для реальной железнодорожной радиосвязи их применение не рекомендуется из-за невозможности учёта реального рельефа и степени застройки

Таким образом, **постановка задачи исследования** будет заключаться в следующем: разработать научно-технические предложения по проектированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD путём составления и систематизации рекомендуемого перечня основных применяемых моделей расчета распространения радиоволн на основе требований к проектируемым цифровым системам технологической радиосвязи и по результатам анализа перспективных и существующих способов прогнозирования [43].

Научно-технические предложения по проектированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD на основе применения 4 (четырёх) моделей расчета распространения радиоволн.

I. Модель согласно Рекомендации МСЭ-R P.1546.

Кривые напряжённости поля от дальности для заданных частот, высот БС, условий приёма и надёжности (1–50%). Учитывает рельеф обобщённо.

Основная для телевидения и приграничных помех. Универсальна: трассы 1–1000 км, частоты 30 МГц – 3 ГГц, высоты до 3000 м [43].

Используемые в моделях значения напряженности электрического поля E могут быть пересчитаны для практических задач в средние значения основных потерь на трассе L между двумя изотропными антеннами:

$$L(p_l, p_t) = 139.4 + 20 \log(f[\text{МГц}]) - E(f, d[\text{км}], h_1[\text{м}], env), \quad (4.17)$$

где $L()$ -средние потери на трассе в пределах процента p_l территории (площади), дБ;

p_l - 50 % территории;

p_t - 50%, 10%, 5% или 1% времени;

$E(\cdot)$ – напряженность поля.

Отличительные особенности: различные антенны, процент времени, коррекция углом возвышения и др.

Для систем LTE (1800 и 2100 МГц) определяется одна рабочая модель для одной полосы частот и далее вводятся поправки, которые бы учитывали потери для реальной частоты.

II. Модель согласно Рекомендации МСЭ-R P.1812.

Использует цифровые карты GTOPO30/SRTM03. Прогноз потерь с учётом профиля местности, дифракции. Полностью учитывает реальный рельеф [43]. Оптимальна для ЖД радиосвязи.

Рассмотренные рекомендации предназначены для расчета сетей типа «точка-зона», т.е. для расчета зон радиопокрытия. Для расчета сетей «точка-точка» (расчет линий радиосвязи) используются другие рекомендации (ITU-R.530, ITU-R.2001).

Универсальная модель P.2001 – для «точка-зона» и «точка-точка». Диапазон 30 МГц – 3 ГГц, трассы 0,25–3000 км, высоты до 3 км. Прогноз для LoS и NLOS.

Основные потери передачи в свободном пространстве определяются выражением:

$$L_{bfs} = 92.45 + 20\log f + 20\log d, \text{ дБ.} \quad (4.18)$$

Корректировка, учитывающая влияние многолучевости и фокусировки в течение p и β_0 процентов времени, соответственно, описываются выражениями:

$$E_{sp} = 2.6 \left[1 - \exp \left(-\frac{d_{lt}+d_{lr}}{10} \right) \right] \log \left(\frac{p}{50} \right) \text{ дБ,} \quad (4.19)$$

$$E_{s\beta} = 2.6 \left[1 - \exp \left(-\frac{d_{lt}+d_{lr}}{10} \right) \right] \log \left(\frac{\beta_0}{50} \right) \text{ дБ.} \quad (4.20)$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой LoS), которые не превышаются в течение $p\%$ времени, следующим образом:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \text{ дБ.} \quad (4.21)$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой LoS), которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, следующим образом:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs} + E_{s\beta} \text{ дБ.} \quad (4.22)$$

где d - расстояние по дуге большого круга (км);

d_{lt}, d_{lr} – расстояние от приемной и передающей антенн до горизонтальных им линий [43].

III. Модель Okumura-Hata.

Широко используется для городской застройки. Okumura предложил сетку кривых для среднего ослабления в городе с почти гладким профилем при высоте БС 200 м и мобильной антенны 3 м [40,43,90].

Эффективное усиление антенн $G(h_{Tx})$ и $G(h_{Rx})$ изменяется от высоты их подъема h_{Tx} и h_{Rx} следующим образом:

$$G(h_{Tx}) = 20 \log \left(\frac{h_{Tx}}{200} \right), 1000\text{м} > h_{Tx} > 10\text{м}; \quad (4.23)$$

$$G(h_{Rx}) = 10 \log \left(\frac{h_{Rx}}{3} \right), h_{Rx} < 3\text{м}; \quad (4.24)$$

$$G(h_{Rx}) = 20 \log \left(\frac{h_{Rx}}{3} \right), 10\text{м} > h_{Rx} > 3\text{м}. \quad (4.25)$$

Потери рассчитываются как ослабление в свободном пространстве плюс поправка по кривым. Модель основана на экспериментальных точках для

сотовых систем, применима для густонаселённых районов. Недостатки: работа с графиками, невозможность полноценно учесть быстроизменяющийся профиль [43].

Формула для расчета средних потерь мощности на трассе распространения сигнала продолжительностью до 100 км:

$$Pl = f_{propag}(f, h_1, h_2, d, env) = L + T(G(\delta)), \quad (4.26)$$

где L - средние потери на трассе, дБ;

δ – среднеквадратическое отклонение потерь, дБ;

f – частота, МГц;

d – протяженность трассы, км;

env – характер среды.

Средние потери L зависят от следующих продолжительностей трасс [43,131]:

1. $d \leq 0.04$ км - условия свободного пространства с учётом высоты антенн

$$L_{(0.04)} = 32.4 + 20 \log(f) + 10 \log(d^2 + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6 [\text{дБ}]}). \quad (4.27)$$

2. $0.04 < d < 0.1$ км

$$L = L_{(0.04)} + \frac{[\log(d) - \log(0.04)]}{\log(0.1) - \log(0.04)} * [L_{(0.1)} - L_{(0.04)}] [\text{дБ}] \quad (4.28)$$

3. $d \geq 0.1$ км

$$1500 \text{ МГц} < f < 2000 \text{ МГц}$$

$$L_{(\text{город})} =$$

$$46,3 + 33,98 \log(f) - 13,82 \log(\max\{30, H_b\}) + [44,9 - 6,55 \log(\max\{30, H_b\})] \log(d)^\alpha - a(H_m) - b(H_b) [\text{дБ}] \quad (4.29)$$

где $a(H_m), b(H_b)$ -поправочные коэффициенты для эффективной высоты антенн, которые являются функцией от размера зоны обслуживания [43].

IV. Модель EEC-33.

Данная модель основана на экстраполяции кривых Okumura с целью их адаптации для систем фиксированного беспроводного доступа FWA [43]:

$$Pl = A_{fs} + A_{bm} - G(h_{Tx}) - G(h_{Rx}) [\text{дБ}] \quad (4.30)$$

где A_{fs} – потери в свободном пространстве;

A_{bm} – основные медианные потери;

$G(h_{Tx}), G(h_{Rx})$ – выигрыш от высоты подъема передающей антенны базовой станции h_{Tx} и приемной антенны мобильной станции h_{Rx} .

$$A_{fs} = 92.4 + 20 \log(d) + \log(f) \text{ [дБ]}, \quad (4.31)$$

$$A_{bm} = 20.41 + 9.38 \log(d) + 7.894 \log(f) + 9.56[\log(f)]^2 \text{ [дБ]} \quad (4.32)$$

$$G(h_{Tx}) = \log\left(\frac{h_b}{200}\right) * [13.958 + 5.8 \log(d)]^2 \text{ [дБ]} \quad (4.33)$$

$$G(h_{Rx}) = [42.57 + 13.7 \log(f)] * [\log(h_{Rx}) - 0.585] \text{ [дБ]}. \quad (4.34)$$

Сравнение моделей представлено в таблице 4.1, из которой видны значения потерь для каждой модели.

Таблица 4.1 – Зависимости потерь от длины трассы для разных моделей

Длина трассы, км	Значение потерь, дБ		
	COST-231	Hata	ECC-33
0.5	104.7	105.1	130.7
1	115.2	115.5	139.3
1.5	121.3	121.7	144.7
2	125.6	126.0	148.6
2.5	129.0	129.4	151.8
3	131.7	132.1	154.5
3.5	134.1	134.5	156.8
4	136.1	136.5	158.8

Вывод: наиболее предпочтительны модели Okumura-Hata или COST231-Hata. Модель ECC-33 даёт потери более чем на 20 дБ выше, непригодна. COST231-Hata – новая версия Hata, расширенная до 2 ГГц. Таким образом, для планирования сетей в диапазоне 1800 МГц наиболее предпочтительна модель Okumura-Hata [43,105]. Схема выбора представлена на рис. 4.4.1.

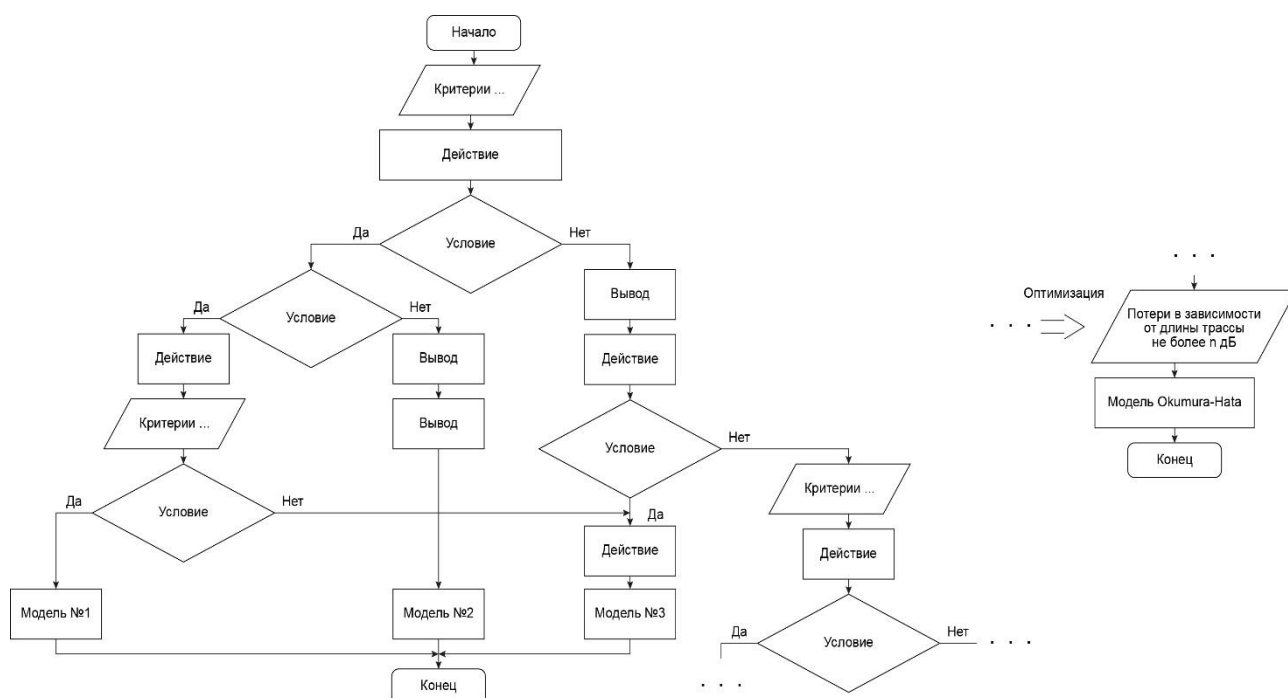


Рисунок 4.4.1 – Блок-схема алгоритма выбора модели распространения радиоволн

Примечание: каждую модель нужно рассматривать исходя из конкретных условий применения. В качестве примера, можно рассмотреть учет быстрых замираний сигнала. Эта составляющая в разных условиях приема и на разных частотах может иметь значение от 12 до 25 дБ (в некоторых условиях – более 25 дБ). Исходя из этого следует, что в модели ЕСС-33, которая дает более жесткий результат, учтен дополнительный запас на быстрые замирания.

Также следует отметить, что технологические сети радиосвязи должны обеспечивать, что уровень сигнала и уровень помех не будут отличаться от тех уровней, которые были спрогнозированы при частотно-территориальном планировании. Поэтому модели, обладающие более строгими требованиями, выглядят более предпочтительными для применения в исследуемой предметной области [43].

В случае проектирования TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ необходимо применять Рекомендацию Р.1812 так как она учитывает все необходимые параметры, представленные ранее.

Краткая схема применения модели распространения радиоволн представлена на рисунке 4.4.2.

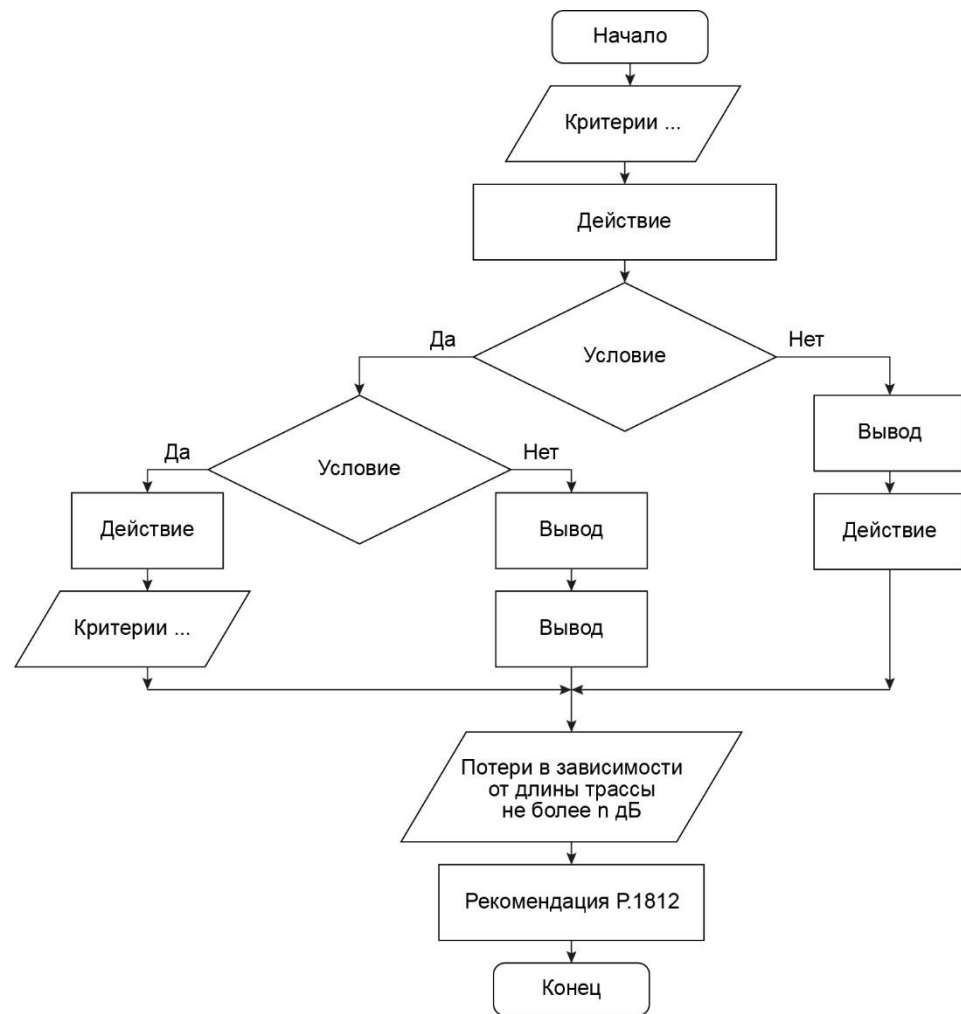


Рисунок 4.4.2 – Алгоритм применения модели распространения радиоволн в условиях ВСЖМ

4.5 Четвертое НТП по применению базы данных для расчета дальности радиосвязи по моделям проектирования технологических сетей радиосвязи

Для упрощения расчетов дальности радиосвязи при проектировании технологических сетей радиосвязи была разработана База данных (БД) для расчета дальности радиосвязи по моделям проектирования цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи №2025622894.

Алгоритм расчета дальности представлен на рисунке 4.5.1.

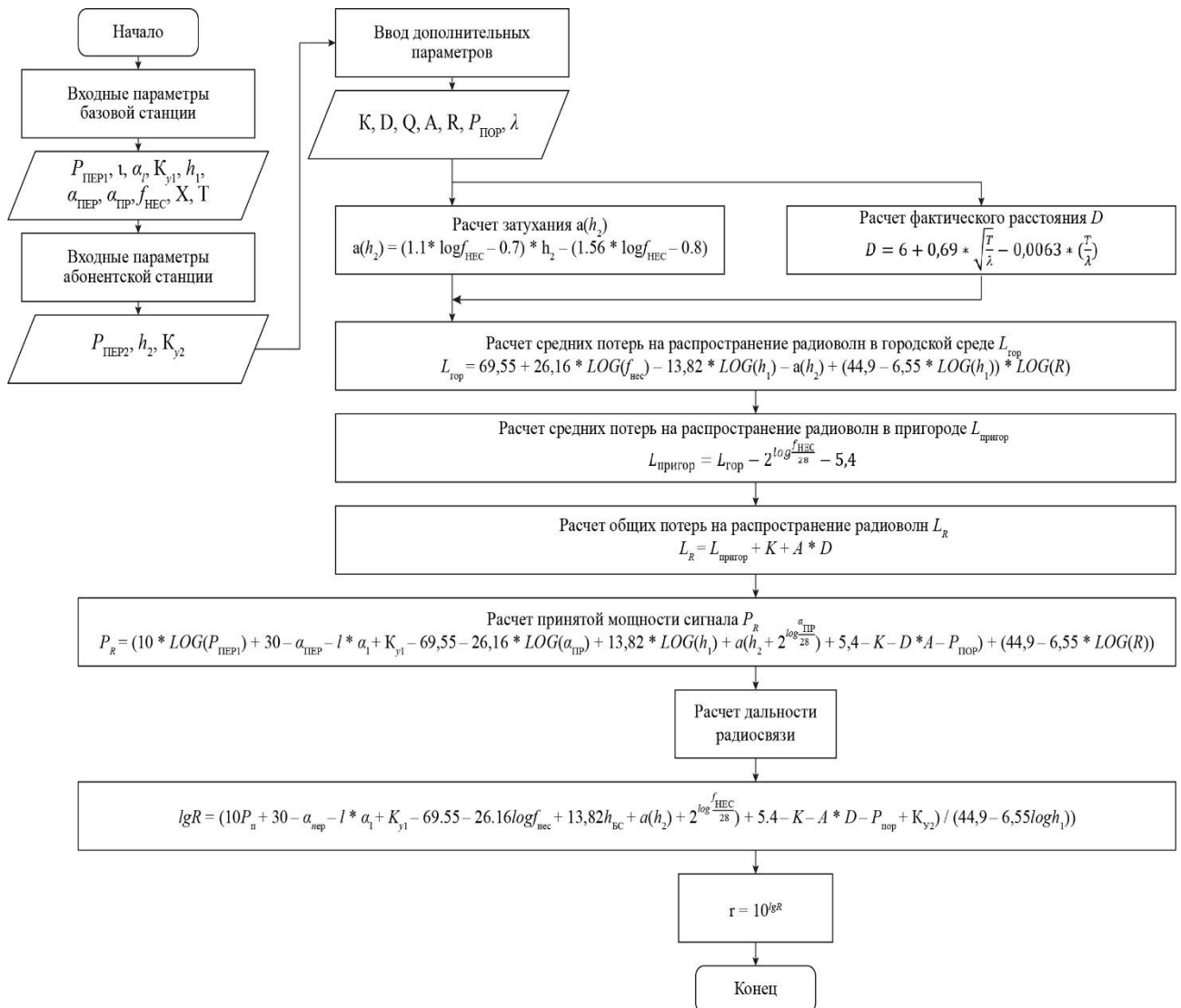


Рисунок 4.5.1 – Схема алгоритма расчета дальности радиосвязи по БД Расчет дальности радиосвязи по моделям проектирования цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи

Для расчета потребуются следующие начальные параметры:

Для антенны, расположенной на базовой станции:

$P_{\text{ПЕР}1}$ – мощность передатчика, Вт;

l – длина фидера, м;

α_l – затухание фидера, дБ/м;

K_{y1} – коэффициент усиления антенны, дБи;

h_1 – высота установки антенны БС, м;

$\alpha_{\text{ПЕР}}$ – затухание передающего тракта, дБ;

$\alpha_{\text{ПР}}$ – затухание приемного тракта, дБ;

$f_{\text{НЕС}}$ – несущая частота, МГц;

X – перепад высот местности, м;

T – неровность местности, м.

Для антенны, расположенной на абонентской станции:

$P_{\text{ПЕР}2}$ – мощность передатчика, Вт;

h_2 – высота антенны АС, м;

K_{y2} – коэффициент усиления антенны, дБи;

Помимо характеристик антенн, для расчета дальности радиосвязи потребуются знать некоторые коэффициенты:

K – поправочный коэффициент;

D – расстояние между приемником и передатчиком (с учетом рельефа местности), км;

Q – коэффициент надежности канала;

A – затухания, включающие потери на свободное пространство, потери в кабеле, потери при подключении антенн, дБ;

R - дальность радиосвязи (теоретическая), км;

$P_{\text{ПОР}}$ - пороговая мощность, дБм;

λ - длина волны, м.

Важно отметить, что, как правило, при проектировании применяется кабель сечением $\frac{1}{2}$, то α_l численно будет равна 0,04 дБ/м.

В данном расчете будет использоваться один и тот же тип антенн БС (двухсекторные антенны типа ТК11-506R). Поэтому значения K_{y1} , $\alpha_{\text{ПЕР}}$, $\alpha_{\text{ПР}}$, заведомо известны и принимаются как константа.

Также, расчет служит для определения дальности между БС и возимой АС и именно поэтому значения $P_{\text{ПЕР}2}$, h_2 , K_{y2} так же как и для антенн БС заведомо известны.

Параметр надежности канала составляет 0.95.

В целях упрощения расчетов, теоретическая дальность радиосвязи R и пороговая мощность $P_{\text{ПОР}}$ численно равны 9.3 км и -92 дБм соответственно.

Для правильного расчета дальности радиосвязи первоначально необходимо рассчитать параметр $a(h_2)$ – затухание от высоты антенны АС, дБ. Для расчета затухания от высоты антенны АС применяется формула (4.35):

$$a(h_2) = (1.1 * \log f_{\text{НЕС}} - 0.7) * h_2 - (1.56 * \log f_{\text{НЕС}} - 0.8) \quad (4.35)$$

При этом важно учитывать расстояние между БС и АС. Данное расстояние напрямую зависит от отношения характера рельефа местности и перепадов высот между БС и местоположением АС к длине волны. Фактическое расстояние D рассчитывается по формуле (4.36):

$$D = 6 + 0,69 * \sqrt{\frac{T}{\lambda}} - 0,0063 * \left(\frac{T}{\lambda}\right) \quad (4.36)$$

Поскольку железнодорожные трассы имеют высокую протяженность, то могут располагаться: в городской среде, в пригороде и в зонах открытой местности. При этом важно учитывать потери на распространение радиоволн в этих местностях.

Так, средние потери сигнала на распространение радиоволн в городской среде рассчитываются по формуле (4.37):

$$L_{\text{гор}} = 69,55 + 26,16 * \log(f_{\text{нес}}) - 13,82 * \log(h_1) - a(h_2) + (44,9 - 6,55 * \log(h_1)) * \log(R) \quad (4.37)$$

Поскольку чаще всего технологические сети радиосвязи проектируются в городской среде и близ городов, то потери на распространение в открытой сельской местности не учитываются. Поэтому необходимо учитывать только потери на распространение радиоволн только в пригороде (4.38):

$$L_{\text{пригор}} = L_{\text{гор}} - 2^{\log \frac{f_{\text{НЕС}}}{28}} - 5,4 \quad (4.38)$$

Далее рассчитаем общие потери на распространение радиоволн на трассе, с учетом поправочного коэффициента K , зависящего от типа трассы, а также с учетом произведения расстояния между приемником и передатчиком D и общими затуханиями A . Данный расчет производится по формуле (4.39):

$$L_R = L_{\text{пригор}} + K + A * D \quad (4.39)$$

После, найдем принятую мощность сигнала P_R которая характеризует усредненную медианную мощность сигнала (УММС) согласно формуле (4.40):

$$P_R = (10 * \text{LOG}(P_{\text{ПЕР1}}) + 30 - \alpha_{\text{ПЕР}} - l * \alpha_l + K_{y1} - 69,55 - 26,16 * \log(\alpha_{\text{ПР}}) + 13,82 * \log(h_1) + a(h_2) + 2^{\log \frac{\alpha_{\text{ПР}}}{28}} + 5,4 - K - D * A - P_{\text{ПОР}}) + (44,9 - 6,55 * \log(R)) \quad (4.40)$$

После проведения расчетов по формулам (4.35-4.40), можно рассчитать фактическую дальность радиосвязи для исходных данных (4.41-4.42):

$$\lg R = (10P_{\text{п}} + 30 - \alpha_{\text{пер}} - l * \alpha_l + K_{y1} - 69,55 - 26,16 \log f_{\text{нес}} + 13,82 h_{\text{БС}} + a(h_2) + 2^{\log \frac{f_{\text{нес}}}{28}} + 5,4 - K - A * D - P_{\text{пор}} + K_{y2}) / (44,9 - 6,55 \log h_1), \quad (4.41)$$

Вычислим фактическую дальность цифровой радиосвязи по формуле (4.33):

$$r = 10^{\lg R} \quad (4.42)$$

Краткий алгоритм расчета дальности радиосвязи представлен на рис. 4.5.2.



Рисунок 4.5.2 – Краткий алгоритм расчета дальности радиосвязи

Пример расчета с применением интерфейса Базы данных показан на рисунке 4.5.3.

1	Параметры базовой станции	
2	Мощность передатчика, Вт	40
3	Длина фидера, м	40
4	Затухание фидера, дБ/м	0,04
5	Коэффициент усиления антенны, дБ	10,15
6	Высота антенны, м	30
7	Затухание передающего тракта, дБ	7
8	Затухание приемного тракта, дБ	4
9	Несущая частота передатчика, МГц	1800
10	Перепад высот местности, м	15
11	Неровность местности, м	10
12	Параметры абонентской радиостанции	
13	Мощность передатчика радиостанции, Вт	10
14	Высота антенны, м	5
15	Коэффициент усиления антенны, дБ	2
16		
17	Прочее	
18	Поправочный коэффициент K, дБ	3
19	Вероятность	
20	Длина волны, м	0,3333333333
21	Параметр D	9,590285647
22	Параметр Q	0,95
23	Параметр A	1,65
24	Пороговая мощность, дБм	-92
25	R	9,3
26	a(h2)	10,12577367
27	L _{гор}	158,2830115
28	L _{пригор}	146,3444556
29	L _Ф	165,1684269
30	P _Ф	111,3711467
31	Значение lgR	0,298563186
32	Дальность радиосвязи, км	1,99

Рисунок 4.5.3 – Пример расчета дальности радиосвязи по базе данных №2025622894

Исходя из представленных математического аппарата, алгоритмов и примеров расчета, можно рассматривать данную базу данных как научно-техническую основу для создания сетей телекоммуникаций. База данных существенно упрощает довольно трудоемкий процесс расчета дальности радиосвязи при проектировании технологических сетей радиосвязи.

Поскольку данная база данных является реляционной, то графически ее можно также представить (рис. 4.5.4):

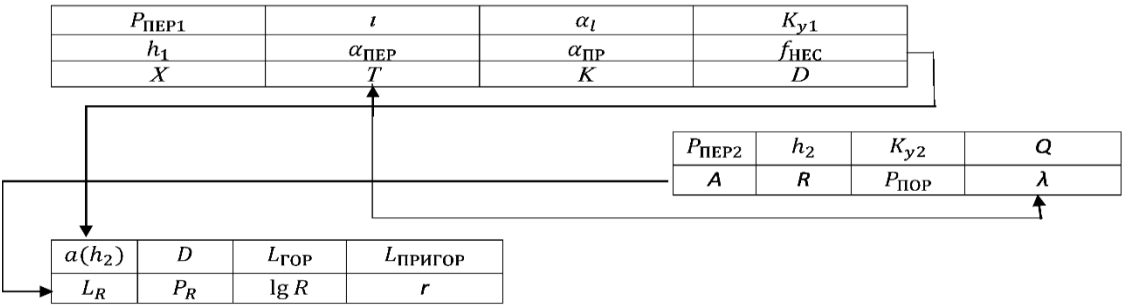


Рис. 4.5.4 – Реляционная база данных №2025622894

4.6 Оценка результатов внедрения разработанных научно-технических предложений

Для оценки улучшений значений показателей системы необходимо проанализировать ситуации до и после внедрения научно-технических предложений.

Первоначально рассмотрим способы компенсации негативного воздействия эффекта Доплера.

Существует несколько способов компенсации негативного воздействия эффекта Доплера:

1. Способ изменения расположения базовой станции

Одним из способов компенсации доплеровского сдвига частоты является изменение расположения базовой станции (БС) относительно пути следования. Но ввиду близкого расположения БС от пути и невозможностью изменения расположения БС, данный способ не применим для железнодорожного транспорта [46].

2. Способ введения линий временной задержки

При движении объекта с постоянной скоростью 400 км/ч возникает эффект Доплера, который приводит к тому, что на приемной стороне мы наблюдаем что частота сигнала, как будто изменяется с постоянной скоростью. Это непрерывное изменение частоты принятого сигнала можно интерпретировать как постоянный сдвиг по фазе сигнала. В свою очередь, сигнальное созвездие показывает амплитуду и фазу переданного сигнала. Амплитуда нормируется (численно равна «1») и, хотя она также меняется, но на сигнальном созвездии остается постоянной. Но фаза (угол наклона линии из центра на точку символа) приводит к тому, что положение символа поворачивается.

В этих сценариях применяют линии временной задержки (TDL). Модели TDL для простых оценок, к примеру, для оценки без использования MIMO, определены для диапазона от 0.5 ГГц до 100 ГГц с максимальной полосой пропускания 2 ГГц [2,46].

Три модели TDL, а именно TDL-A, TDL-B и TDL-C, созданы для представления трех различных профилей каналов для зон без прямой видимости (NLOS), в то время как TDL-D и TDL-E созданы для зон с прямой видимостью (LOS) [46]. Пример для TDL-A представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Пример значений для TDL-A.

№	Нормальная задержка	Мощность в дБ	Распределение затухания
1	0	-13,4	Релеевское
2	0,3819	0	Релеевское
3	0,4025	-2,2	Релеевское
...	...	...	...
22	5,3043	-19,9	Релеевское
23	9,6586	-29,7	Релеевское

Данный способ не получил большого распространения на железнодорожном транспорте ввиду сложного построения системы с применением данного способа. Поэтому данный способ также не будет применен на высокоскоростных магистралях со скоростями более 400 км/ч.

3. Способ автоподстройки несущей частоты

Также, сегодня существует ещё два способа борьбы с искажениями от действия ЭД, которые основаны на принципе автоподстройки несущей частоты (АПЧ), которая отслеживает изменения несущей частоты f_0 и производит её подстройку. В первом способе автоматическая подстройка частоты в приёмнике осуществляется с помощью прогнозирования смещения несущей Δf_0 во времени в зависимости от изменений скорости движения поезда. Для этого используется специальная программа, в основе которой лежит вычисление конечных разностей высокого порядка ($N \geq 2$), что характерно для немарковских случайных процессов. Полученное значение приращения ($\pm \Delta f_0$) подстраивает частоту гетеродина приёмника. Такой способ требует большого вычислительного ресурса и высокого быстродействия элементной базы [46].

Второй способ – это регулирование частоты гетеродина приёмника с

помощью пилот-сигналов, добавляемых в цифровые последовательности (кадры данных) на передающей стороне. Назначением пилот-сигнала является отслеживание условий распространения радиосигнала, в том числе сдвига несущей частоты за счёт ЭД. После детектирования на приёмной стороне информация об изменениях несущей частоты используется для подстройки генератора. В отличие от первого способа, для использования пилот-сигналов не нужны вычислительные устройства, но требуются дополнительные каналные ресурсы, например, по полосе частот [46].

Данные варианты способа на данный момент применяются на высокоскоростных магистралях для компенсации негативного воздействия эффекта Доплера на скоростях свыше 400 км/ч [101].

Главным недостатком данных вариантов являются сложность построения оборудования и элементной базы, а также смещение несущих частот в результате действия ЭД влечёт за собой нарушение принципа ортогональности и межчастотную интерференцию.

При использовании способа, предложенного в главе 4.2 (способ задержки процедуры Handover), не требуются дополнительные затраты на разработку оборудования и элементной базы, т.к. данный способ основан лишь на ручной или программной настройке оборудования. Также при использовании способа задержки процедуры Handover не требуется использовать дополнительные каналные ресурсы. Важно отметить, что в стандарте LTE-1800 TDD каналный ресурс сильно ограничен и дополнительные затраты крайне нежелательны [51].

В связи с этим, научно-техническое предложение по использованию способа задержки процедуры хендовер имеет большие перспективы на высокоскоростном транспорте.

Сравнительный анализ использования способов продемонстрирован на рисунке 4.6.1.

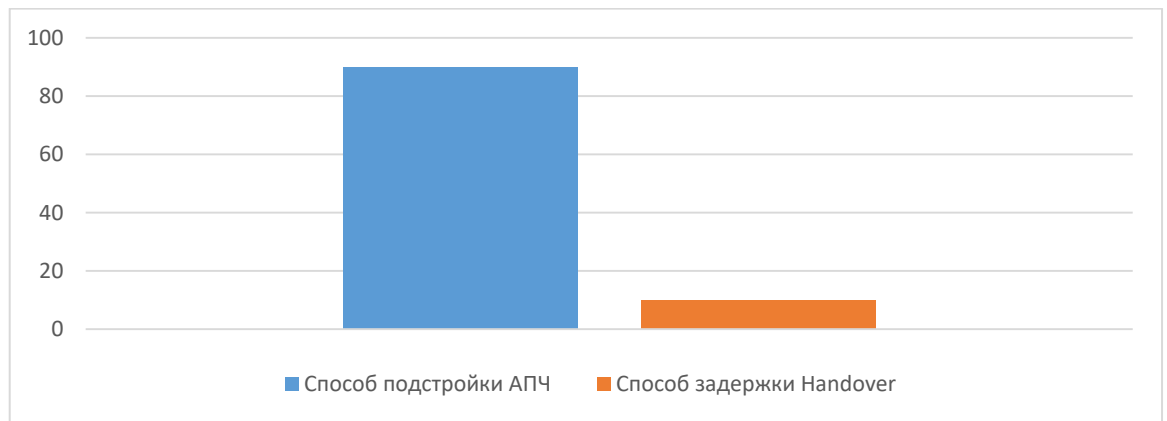


Рисунок 4.6.1 – Сравнение способов компенсации негативного воздействия эффекта Доплера с точки зрения использования частотного спектра

Как было показано в главе 4.3 на рисунке, выбор модели распространения радиоволн в TCP LTE-1800 TDD довольно трудоемкий и долгий процесс, состоящий из множества операций по выбору модели.

После анализа процесса по выбору модели распространения радиоволн в TCP LTE-1800 TDD, использование научно-технического предложения по использованию модели распространения радиоволн в технологических сетях железнодорожной радиосвязи несколько упростит процесс по выбору модели распространения радиоволн.

В ситуациях, когда на железнодорожном транспорте используются обычные направленные антенны, существуют проектные решения и рассчитанные показатели дальности радиосвязи. Но в случае внедрения фазированных антенных решеток с технологией MIMO видны улучшения сразу нескольких параметров [51].

В частности, показатели дальности радиосвязи с использованием технологии MIMO и без ее использования продемонстрированы на рисунке главы 4.4.

Помимо улучшений дальности радиосвязи, для антенн MIMO определен наиболее предпочтительный угол места, в то время в ситуациях использования антенн без технологии MIMO угол места необходимо определять в зависимости от условий расположения антенны на участке.

4.7 Разработка рекомендаций по комплексному применению результатов диссертационного исследования для повышения качества проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Методика использования частотного ресурса при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях показала высокие показатели эффективности применения на железнодорожном транспорте (Глава 2). Данная Методика может применяться не только при проектировании высокоскоростных железнодорожных магистралей, но и при разработке других цифровых систем [51].

Методика применима в необходимых случаях, когда частотный спектр сильно ограничен внешними факторами.

Модель проектирования предназначена для проектирования устойчивой связи в условиях частотного дефицита и взаимных помех на пересечения железных дорог.

Ключевые принципы:

1. Приоритет надежности над пиковой скоростью;
2. Обязательный расчет ЭМС;
3. Итерационный процесс проектирования с анализом нескольких сценариев.

Рекомендации по выбору ширины полосы (Таблица 4.3)

После проведения оценки улучшений показателей при внедрении научно-технических предложений можно предложить следующие рекомендации:

1. Использование способа задержки процедуры хендвер на высокоскоростных магистралях со скоростями движения более 400 км/ч как основного способа компенсации негативного воздействия эффекта Доплера поскольку он является наиболее оптимальным с точки зрения ресурсных затрат.
2. Использование научно-технического предложения по использованию модели распространения радиоволн в технологических сетях железнодорожной радиосвязи упростит процесс выбора модели распространения радиоволн [51].

Таблица 4.3 – Рекомендации по выбору ширины полосы

Способ	Полоса	Применимость	Ключевые условия
№1	10 МГц	Не рекомендуется	Только при 100% синхронизации всех сетей (маловероятно)
№2	5 МГц	Ограниченная	При слабых помехах. Обязательный детальный расчет ЭМС
№3	3 МГц	Рекомендуется	Для умеренных помех. Эффективное частотное планирование
№4	1.4 МГц	Основная	Для сложных условий (мегаполисы). Максимальная устойчивость

3. Внедрение фазированных антенных решеток ММО для высокоскоростных магистралей позволит улучшить проектирование TSP LTE-1800 TDD.

4. Внедрение фазированных антенных решеток ММО также увеличивает дальность радиосвязи в сетях стандарта LTE-1800 TDD.

5. Использование фазированных антенных решеток ММО даст дополнительный энергетический выигрыш свыше 3 дБ.

Также предлагается рассмотреть возможность применения технологии ММО свыше 2x2 (до 4x4 включительно), что позволит улучшить энергетические показатели мощности, а также показатели дальности радиосвязи.

Увеличение мощности абонентских станций (до 2 Вт) позволит улучшить качество приема сигналов и увеличит расстояние зоны приема.

Помимо данных рекомендаций по внедрению научно-технических предложений в технологический процесс проектирования, предлагается рассмотреть возможность использования рабочего диапазона частот для

технологической сети радиосвязи LTE-1800 TDD (1785-1805 МГц) без использования защитного интервала (10 МГц на концах спектра). Это существенно позволит упростить проектирование сети [43].

Также предлагается рассмотреть применение результатов диссертационного исследования как методологию для разработки TSP стандартов FRMCS (5G и 6G) [134-141].

Также, перспективным направлением по улучшению работы TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ является применение технологии SFN (одночастотная сеть), которая позволит усовершенствовать варианты проектирования TSP, а также оптимизирует затраты на разработку и внедрение результатов проектирования TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ [142, 143].

При проектировании TSP LTE-1800 TDD в районах Крайнего Севера возможно применение результатов диссертационного исследования в совместном режиме с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) в том случае, если железнодорожная трасса уже известна.

Результаты диссертационного исследования в значительной степени масштабируются на высокоскоростной автомобильный транспорт, но с рядом оговорок:

Наиболее перспективны для переноса: база данных для расчета дальности, модели распространения радиоволн, обобщенная модель пересечения сетей (глава 3) и методика оптимального распределения частот методом ЦЛП (глава 2.3).

Требуют существенной адаптации: способ компенсации эффекта Доплера (ввиду непредсказуемости траектории автомобиля) и модель временной синхронизации режимов работы БС (из-за преобладания FDD в коммерческих автомобильных сетях).

Непереносимы в исходном виде: жесткая привязка к частотному диапазону 1785–1805 МГц (так как он выделен только для железной дороги), однако сама методика может быть применена к любому выделенному или коммерческому диапазону.

Таким образом, для адаптации результатов к автомобильному транспорту рекомендуется:

1. Изменить нормативную привязку частотного диапазона на диапазон 5,9 ГГц или 2,1 ГГц (коммерческий LTE).
2. Заменить способ компенсации Доплера на предиктивный алгоритм с использованием данных навигации (или комбинировать с частотной автоподстройкой).
3. Учесть более высокую плотность абонентов и внешних помех при расчетах ЭМС.
4. Калибровка формулы зоны обслуживания для типовой высоты антенны легкового автомобиля (1,5–2 м).

Выводы по четвертой главе

Представленные в четвертой главе научно-технические предложения могут эффективно применяться для решения задачи исследования как в комплексе, так и по отдельности.

Был проведен анализ существующих моделей распространения радиоволн для сетей стандарта LTE. После изучения основных моделей, степени влияния их на исходные данные сделан вывод о применимости с точки зрения эффективного применения при проектировании технологических сетей железнодорожной радиосвязи.

По полученным данным, можно сделать вывод, что наиболее предпочтительно использовать модели Okumura-Hata, либо COST231-Hata. Модель ЕСС-33 непригодна ввиду большего количества потерь (более чем в 20 дБ по сравнению с другими моделями).

Модель COST231-Hata по своей сути является новой версией модели Hata, расширенной по диапазону частот до 2 ГГц. Поэтому можно сделать вывод, что наиболее предпочтительна для планирования сетей в диапазоне 1800 МГц- модель Okumura-Hata. [86].

Примечание: каждую модель нужно рассматривать исходя из конкретных условий применения.

Работа радиоканала LTE диапазона 1800 МГц на скоростях свыше 400 км/ч без компенсации негативного воздействия эффекта Доплера возможна только при модуляции QPSK. Для модуляций QAM16 и QAM64 требуется обязательное применение дополнительных мер по снижению влияния эффекта Доплера.

Были изучены существующие способы компенсации эффекта Доплера на скоростях свыше 400 км/ч. После анализа существующих способов компенсации, был предложен альтернативный способ компенсации негативного воздействия эффекта Доплера на высокоскоростных магистралях при скоростях свыше 400 км/ч в стандарте LTE-1800 TDD.

Предлагается выполнять хендовер не в момент прохождения БС, а, например, за 3 секунды до этого события. В этот момент девиация доплеровского сдвига частоты будет составлять менее 1 Гц. Следовательно, эта проблема - решена. В процессе движения поезда значение доплеровского сдвига будет медленно изменяться от 0 до 833 Гц, в зависимости от скорости движения состава [42].

Нужно отметить, что так как в сети LTE диапазона 1800 МГц используется технология временного дуплекса (TDD) и работа в прямом и обратном направлении осуществляется на одной частоте, то и значение доплеровского сдвига будет одинаково как для прямого (БС - АС), так и для обратного (АС - БС) направлений [8,42].

При использовании фазированных антенных решеток MIMO на высокоскоростных магистралях, работающих в TSP LTE-1800 TDD, будут наблюдаться: увеличение зоны обслуживания базовой станции до 30%; энергетический выигрыш до 3 дБ; определен оптимальный угол места от -2 до -3 градуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижения поставленных в диссертационной работе цели и задач был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, а также моделирование работы в ходе которых было получено следующее:

1. Доказано, что в современных условиях проектирование TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ является актуальной задачей и вносит значительный вклад в развитие и совершенствование TSP железнодорожного транспорта Российской Федерации, как важнейшей отрасли экономики.

Для обеспечения и повышения эффективного функционирования TSP был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, а также моделирование работы сети, которое во многом зависит от своевременных и обоснованных управленческих решений.

2. Для обоснования постановки задачи исследования на разработку и внедрение методики, моделей и НТП выполнены анализ предметной области, анализ методологического аппарата, а также уточнение понятийного аппарата. Установлены ограничения и допущения для разработки методики, моделей и НТП по развертыванию TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ с учетом специфики функционирования железнодорожного транспорта.

3. Разработана и внедрена Методика использования частотного ресурса при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях, а также модель временной синхронизации режимов работы базовых станций, обеспечивающая повышение внутрисистемной ЭМС за счет нейтрализации внутренних помех в диапазоне частот 1785-1805 МГц в интересах обеспечения связи на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

4. Разработана и внедрена Обобщенная модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания, обеспечивающая увеличение площади зоны устойчивой радиосвязи и улучшение ЭМС. При компьютерном моделировании установлено, что для

повышения эффективности применения частотного ресурса необходимо использовать полосу, шириной 1.4 МГц из набора частот, определенных Решением ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г.

5. Разработаны и внедрены научно-технические предложения и решения по проектированию ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ, обеспечивающие повышение эффективности использования выделенного частотного ресурса в полосе частот 1785-1805 МГц, а также снижение негативного влияния эффекта Доплера.

6. Оценка результатов внедрения Методики, Модели и НТП:

6.1. Научная задача исследования решена, так как разработка и внедрение Методики, Модели и НТП показала высокие результаты при применении в учебных и производственных процессах: сокращено время проектирования ТСП LTE-1800 TDD в среднем на 12% без затрат дополнительных ресурсов; снижены задержки автоматизированного управления в среднем на 25 %; увеличена зона обслуживания БС на 40%. Цель диссертации достигнута. Гипотеза научного исследования подтверждена. Доказано, что Методика, Модель и НТП являются наиболее рациональным путем решения научной задачи исследования.

6.2. Методика, Модель и НТП в достаточной степени универсальны для применения при проектировании ТСП LTE-1800 TDD на различных объектах железнодорожного транспорта Российской Федерации.

7. Методика, Модель, НТП и рекомендации представляют собой комплекс новых научно обоснованных методологических, технических и технологических решений в области проектирования ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ, что вносит значительный вклад не только в развитие радиосвязи на железнодорожном транспорте, как важнейшей отрасли экономики Российской Федерации, но и формируют научно-методологический задел в области проектирования ТСП LTE-1800 TDD для различных отраслей экономики страны.

8. Результаты диссертационного исследования рекомендуются для

дальнейшего совершенствования проектирования ТСП на ВСЖМ при переходе на стандарт FRMCS/5G, а также для перспективных ТСП на основе технологии 6G.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации состоят в следующем:

- разработка модели проектирования с применением технологии SFN (одночастотная сеть) для ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ как одного из перспективных направлений дальнейшего повышения эффективности использования ограниченного частотного ресурса и при повышении требований к ЭМС;

- разработка динамического распределения ресурсов трафика и машинного обучения доверенного искусственного интеллекта по данным, полученным от телеметрии, при помощи интеграции с перспективными (разрабатываемыми) отечественными системами доверенного искусственным интеллектом;

- разработка концепции базы данных вариантов готовых проектов ТСП на железнодорожном транспорте, полученных по результатам компьютерного моделирования;

- создание и разработка моделей и методик проектирования технологических сетей радиосвязи на основе FRMCS/5G;

- разработка квалификационных требований, учебных программ, формирование и поддержание в актуальном состоянии информационных ресурсов, необходимых для подготовки высококвалифицированных кадров для проектирования, создания, эксплуатации и технического обеспечения ТСП железнодорожного транспорта;

- результаты диссертационного исследования в значительной степени масштабируются на высокоскоростной автомобильный транспорт, но с рядом ограничений и допущений.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

3GPP	- 3 rd Generation Partnership Project;
4FSK	- 4 Frequency Shift Keying;
CoMP	- Coordinated Multipoint;
DL	- DownLink;
DMR	- Digital Mobile Radio;
eNB	- eNodeBase;
ETSI	- European Telecommunications Standards Institute;
FDD	- Frequency Division Duplex;
FEC	- Forward Error Correction;
FWA	- Fixed Wireless Access;
GSM-R	- Global System for Mobile Communications – Railway;
HO	- Handover;
LOS	- Line of Sight;
LTE	- Long Term Evolution;
MIMO	- Multiple Input – Multiple Output;
NLOS	- Non Line of Sight;
OFDM	- Orthogonal Frequency-Division Multiplexing;
OFDMA	- Orthogonal Frequency Division Multiple Access;
PARP	- Peak to Average Ratio;
Ppm	- Parts per million;
QAM	- Quadrature Amplitude Modulation;
QPSK	- Quadrature Phase Shift Keying;
RSRP	- Reference Signal Received Power;
RSRQ	- Reference Signal Received Quality;
SFN	- Signal Frequency Network
SC-FDMA	- Single Carrier- Frequency Division Multiply Access;
SINR	- Signal Interference Noise and Ratio;
TDD	- Time Division Duplex;

TDL	- Time Delay Spread;
TDMA	- Time Division Multiple Access;
UE	- User Equipment;
UL	- UpLink;
АС	- абонентская станция;
АРМ	- автоматизированное рабочее место;
АФТ	- антенно-фидерный тракт;
АЧХ	- амплитудно-частотная характеристика;
БС	- базовая станция;
ВСЖМ	- высокоскоростная железнодорожная магистраль;
ГКРЧ	- Государственная комиссия по радиочастотам;
МСЭ	- международный союз электросвязи;
РБ	- ресурсный блок;
РЭ	- ресурсный элемент;
РЭС	- радиоэлектронное средство;
ТСР	- технологические сети радиосвязи;
ЧТП	- частотно-территориальный план;
ЦСТР	- цифровые системы технологической радиосвязи;
ЭД	- эффект Доплера;
ЭИИМ	- эффективная изотропно излучаемая мощность;
ЭМО	- электромагнитная обстановка;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрынников, В.Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика / В.Г. Скрынников — М.: Издательство «Спорт и Культура – 2000». 2012. – 864 с., ил.
2. Решение ГКРЧ от 11 сентября 2018 г. №18-46-02 (о выделении полосы радиочастот 1785-1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте, работающих на основе радиointерфейса LTE TDD).
3. Тараненко, А.Ю. Оптимизация использования частотного спектра / А.Ю. Тараненко, А.А. Гриценко, Д.П. Лобеев // Автоматика, связь, информатика. -2025. -№1. -с. 9-12.
4. ПНСТ 828-2023 Предварительный национальный стандарт российской федерации. Устройства и системы электросвязи для систем управления железнодорожным подвижным составом в автоматическом и дистанционном режимах. Общие технические требования. Telecommunication devices and systems for railway rolling stock control systems in automatic and remote modes. General technical requirements. С 10.10.2023 до 10.10.2026 г. – Москва.: Российский институт стандартизации, 2023. – 40 с.
5. Sesia, Stefania. LTE – the UMTS long term evolution: from theory to practice / Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. – 2nd ed. Printed in Great Britain by CPI Antony Rowe, Chippenham, Wiltshire, 2011. – 794 с., ил.
6. Международный консорциум инженеров электросвязи: TS 138 134-V16.04.00- NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 16.4.0 Release 16). France, ETSI, 2020.
7. ГОСТ 33973-2016 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. Railway electric communication. Train radio communication. Technical requirements and methods of control. 01.09.2017 г.

- Введ. 2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с.
8. Рекомендация МСЭ-R P.1546-3 Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. // Электронная публикация. Женева, 2020 г. – 58 с.
 9. Рекомендация МСЭ-R P.1812 Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб «из пункта в зону» в диапазонах УВЧ и ОВЧ. // Электронная публикация. Женева, 2020 г. – 30 с.
 10. ТелекомПроект: сайт: интернет-версия. – URL: <https://telecomproject.tripod.com/mod.htm> (дата обращения 25.01.2025)
 11. TS 122 289-V17.0.0-LTE; 5G; Mobile communication system for railways (3GPP TS 22.289 version 17.0.0 Release 17). France, ETSI, 2022.
 12. Физический уровень сетей LTE // 1234g.ru! : портал о мобильных технологиях и беспроводной связи. 2024. URL: <https://1234g.ru/4g/lte/fizicheskij-uroven-standarta-lte/fizicheskij-uroven-setej-lte> (дата обращения 01.02.2025)
 13. Лобеев, Д.П. Особенности организации радиоканала в цифровых сетях технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE / Д.П. Лобеев, Д.Н. Роевков // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной дню радио. 2024. №1 (79). С.274-277. – Спб.: Изд. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2024. – с. 400.
 14. Билятдинов, К.З. Алгоритм выбора методов и способов оценки качества киберфизических и инфотелекоммуникационных систем /К.З. Билятдинов // Вестник воздушно-космической обороны. -2023.- №3 (39). -С. 87-90.
 15. Братухин, И.Ю. Мероприятия по совершенствованию процессов создания и модернизации отечественных систем связи и автоматизации / И.Ю. Братухин, А.Г. Фортинский, К.З. Билятдинов // Опыт и перспективы

- совершенствования систем связи и автоматизации. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С.14-20. – СПб.: ОАО «НИИ Масштаб», 2024. – 350 с.
16. Билятдинов, К.З., Кривчун Е.А. Систематизация критериев для оценки качества средств связи и автоматизации / К.З. Билятдинов, Е.А. Кривчун // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Сборник статей VI Международного форума. Санкт-Петербург, 2024. С.261. – СПб.: Изд. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – с. 537.
 17. Li Ke, Sun Zhiguo, Ning Xiaoyan. «Analysis of Doppler frequency shift response mechanism based on OFDM system», 2018 г.
 18. Журавлёва, Л.М. Оценка влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи в условиях высокоскоростного движения / Л.М. Журавлёва, М.А. Нилов, В.Л. Лошкарев, В.В. Левшунов // Мир транспорта. -2020. - том 18, №4. - с.54-71.
 19. Handover within 3GPP LTE: Design Principles and Performance Konstantinos Dimou, Min Wang, Yu Yang, Muhammad Kazmi, Anna Larmo, Jonas Petterson, Walter Muller, Ylva Timmer. IEEE Xplore- October, 2009.
 20. Роенков, Д.Н. Беспроводная связь для высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург / Д.Н. Роенков, П.А. Плеханов // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 12. – С. 11-13.
 21. Лобеев, Д.П. Жизненный цикл радиотехнических систем технологической железнодорожной радиосвязи / Д.П. Лобеев, Д.Н. Роенков // В сборнике Научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной дню радио. -2023. -№1 (78). -С.258-260. – СПб.: Изд. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2023. – с. 494.
 22. Исаков В.Н. Статистическая теория радиотехнических систем: курс лекций. URL: <http://strts-online.narod.ru> (дата обращения 24.02.2025).
 23. Алехин В.А. Проектирование радиотехнических систем: учебное пособие /

- В.А. Алехин, В.Т. Лобач, М.В. Потипак. Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2016. 218 с.
24. Гладышев А.М. Основы проектирования и эксплуатации радиоэлектронных систем: учеб.-метод. Пособие / А.М. Гладышев, И.Н. Давыденко. Минск: БГУИР, 2015. 184 с.
 25. Бабков В.Ю. Системы мобильной связи: термины и определения / В.Ю. Бабков, Г.З. Голант, А.В. Русаков. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2011. – 160 с.:ил.
 26. Чикалов Н.В. Метод синхронизации в гетерогенных сетях связи с высокой плотностью устройств с ограниченными вычислительными ресурсами / Н.В. Чикалов, К.З. Билятдинов // International Journal of Open Information Technologies. -2025. -Т.13. №1. -pp. 83-87.
 27. Алдошин В.М. Интеграционные ресурса развития телекоммуникационных систем /В.М. Алдошин, Н.А. Балуков, К.З. Билятдинов, А.З. Арсеньева // Вестник воздушно-космической обороны. -2024. -№2(42). -С.55-63.
 28. Шнепс-Шнеппе М.А. Цифровая железная дорога и переход от сети GSM-R к LTE-R и 5G-R – состоится ли он? /М.А. Шнепс-Шнеппе, Н.О. Фёдорова, Г.В. Суконников, В.П. Куприяновский // International journal of Open Information Technologies – 2017 T1 - №1. С. 71-79.
 29. М.А. Шнепс-Шнеппе. О перспективах сети GSM-R для цифровой железной дороги / М.А. Шнепс-Шнеппе // International journal of Open Information Technologies – 2016 T4 - №12. С. 47-52.
 30. ГОСТ 24375-80. Радиосвязь. Термины и определения. Введ. 1987. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 61 с.
 31. Technical Specification 3GPP TS 36.133 version 16.7.0 Release 16. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management. – 2020.
 32. Technical Specification 3GPP ETSI TS 136 104 v15.3.0 Release 15. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio

- transmission and reception. – 2018.
33. Technical Specification 3GPP ETSI TS 136 101 v15.9.0 Release 15. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. -2020.
 34. Technical Specification 3GPP ETSI TR 138 901 v16.1.0 Release 16. 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. – 2020.
 35. Гриценко А.А. САПР «Альбатрос» и моделирование работы спутниковых систем различного назначения / А.А. Гриценко // Технологии и средства связи. -S1, 2018 г. -с.57.
 36. Билятдинов К.З. Управление качеством и сравнительный анализ характеристик информационных технологий / К.З. Билятдинов, Е.А. Кривчун // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Сборник статей VI Международного форума. Санкт-Петербург, 2024. С. 320. – Спб.: Изд. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – с. 537.
 37. Билятдинов К.З. Применение структурно-функциональных моделей и алгоритмов для совершенствования управления системами связи и автоматизации / К.З. Билятдинов, А.В. Иванов, Р.А. Фортинский // Опыт и перспективы совершенствования систем связи и автоматизации. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 65-69. – Спб.: ОАО «НИИ Масштаб», 2024. – 350 с.
 38. Билятдинов К.З. Совершенствование информационного цикла управления телекоммуникационными системами путем внедрения методов и способов оценки качества / К.З. Билятдинов, В.В. Меняйло, И.В. Орлов // Вестник воздушно-космической обороны. -2024. -№1 (41). -С.100-106.
 39. Приложение к решению ГКРЧ от 28 декабря 2020 г. №20-57-05. Методика расчетов электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы с радиоэлектронными средствами гражданского назначения за исключением радиовещательной службы.
 40. Мелихов С.В. Модели предсказания уровня сигнала для расчета зон

обслуживания базовых станций систем мобильной связи. Учебно-методическое пособие для практических занятий и курсового проектирования для студентов радиотехнических специальностей. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) – г. Томск, 2014 г.

41. Булгаков М.К. Методика оценки и обеспечения выполнения решений по повышению качества технологических сетей связи промышленных предприятий на основе экспертной информации / М.К. Булгаков, К.З. Билятдинов // Научно-технический вестник Поволжья. -2025. -№4. -С.141-144.
42. Лобеев Д.П. О способе компенсации влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Д.П. Лобеев, К.З. Билятдинов, А.А. Гриценко// Техника средств связи. -2025. -№2. –с.65-75.
43. Лобеев Д.П., Билятдинов К.З. Научно-технические предложения по планированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD / Д.П. Лобеев, К.З. Билятдинов// Век качества. -2025. -№2. -С.301-312.
44. Лобеев Д.П. Модель сети технологической радиосвязи стандарта LTE-1800 / Д.П. Лобеев, К.З. Билятдинов// Вестник воздушно-космической обороны. -2026. -№1. –с. 82-90.
45. Лобеев Д.П. Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта / Д.П. Лобеев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2025. – т.22. – Вып. 3. – с.712-721.
46. Лобеев Д.П. Способы компенсации негативного влияния эффекта Доплера / Д.П. Лобеев // Автоматика. Связь. Информатика. 2025 №8. С.32-34.
47. Лобеев Д.П. Пример модели планирования цифровой сети технологической радиосвязи в стандарте LTE-1800 TDD / Д.П. Лобеев // XXXI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация,

- навигация, связь» (RLNC*2025), посвященная 130-летию изобретения радио. -2025. -том 2. -с.285-289.- Воронеж.: Изд. Воронежский государственный университет, 2025. – 406 с.
48. Лобеев Д.П. О результатах исследования эффекта Доплера в интересах обеспечения устойчивой радиосвязи с высокоскоростными объектами / Д.П. Лобеев, К.З. Билятдинов // IV Межвузовская научно-практическая конференция на тему: «Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей специального назначения». Военная академия связи им. С.М. Будённого. 28.03.2025 г. с.244-248. – СПб.: Военная академия связи, 2025 г. – 417 с.
49. Лобеев Д.П. Снижение негативного влияния эффекта Доплера на высокоскоростных объектах / Д.П. Лобеев, К.З. Билятдинов // Всероссийская научная конференция «Опыт и перспективы совершенствования систем связи и акустических испытаний современной техники». Военная академия связи им. С.М. Будённого. 09.04.2025 г. с.72-76. – СПб.: Военная академия связи, 2025 г. – 421 с.
50. Лобеев Д.П. О рациональном использовании частотного ресурса технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD / Д.П. Лобеев, К.З. Билятдинов // Международный симпозиум «Цифровая парадигма информационно-аналитического обеспечения учетных и финансовых процессов в отраслевых экономиках», Петербургский государственный университет путей сообщения. 04.04.2025 г. с.74-77. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2025 г. – 255 с.
51. Лобеев Д.П. Результаты внедрения методики и моделей проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Д.П. Лобеев // Век качества. – 2025. -№4. –с. 288-302.
52. Лобеев Д.П. Методика использования частотного ресурса при проектировании железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD /

- Д.П. Лобеев // Первая миля. -2025. -№4. -с. 58-69.
53. Сравнение цифровых стандартов DMR – TETRA. Интернет-ресурс: <https://kss-spb.ru/novosti/sravnenie-tsifrovyykh-standartov-dmr-tetra> (дата обращения 01.02.2025).
54. Билятдинов К.З. О формировании современного функционального эквивалента сети связи на основе требований к управлению большими техническими системами / К.З. Билятдинов // Век качества. -2024. -№4. - С.150-162.
55. Чикалов Н.В. Технические и методологические решения по распределению сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи с подключением киберфизических систем / Н.В. Чикалов, К.З. Билятдинов // International Journal of Open Information Technologies. -2025. -Т.13 №2. -Рр.39-45.
56. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Юбилейное издание. – СПб.: Питер, 2021. – 1008 с.: ил. – (Серия «Учебник для вузов»).
57. В. Тихвинский. Сети мобильной железнодорожной связи FRMCS: перспективы создания и внедрения / В. Тихвинский, С. Портной // Первая миля. -2021 г. -№3. -с. 54-64.
58. Sauter Martin. From GSM to LTE-Advanced, John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
59. Билятдинов К.З. Информационные ресурсы и динамическая модель оценки качества инфокоммуникационных систем / К.З. Билятдинов // Вестник воздушно-космической обороны. -2022. -№3(35). -С. 118-123.
60. Билятдинов К.З. Модель и методика оценки устойчивости функционирования телекоммуникационных систем / К.З. Билятдинов // Вестник воздушно-космической обороны. -2022. -№4 (36). -С.85-90.
61. Степутин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. Инфра-Инженерия, 2018.
62. Юркин Ю.В. Расчет зоны покрытия при проектировании сети мобильной связи / Ю.В. Юркин, А.А. Маслова // Автоматика. Связь. Информатика. - 2024. -№8. -С.2-5.

- 63.Булгаков М.К. Методика анализа экспертной информации о технологических сетях связи промышленных предприятий / М.К. Булгаков, К.З. Билятдинов // Научно-технический вестник Поволжья. -2025. -№4. - С.145-148.
- 64.Булгаков М.К. Методика получения экспертной информации для оценки качества технологических сетей связи промышленных предприятий /М.К. Булгаков, К.З. Билятдинов // Научно-технический вестник Поволжья. -2025. - №3. -С. 37-40.
- 65.Росляков А. Поколения сетей фиксированной связи F1G-F5G. Часть 1 / А. Росляков // Первая Миля. -2022. -№8. -С.34-40.
66. Росляков А. Поколения сетей фиксированной связи F1G-F5G. Часть 2 / А. Росляков // Первая Миля. -2023. -№1. -С. 36-46.
- 67.Казак С.С. Виды угроз безопасности в сетях сотовой связи LTE / С.С. Казак, К.З. Билятдинов // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS. Сборник статей LXIV Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022. С.68-69. – Пенза.: Издательство Наука и просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022 г. – с. 302 с.
- 68.Казак С.С. Методика организации построения базовых станций стандарта LTE с целью организации связи / С.С. Казак, К.З. Билятдинов // АКТУАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. Сборник статей V Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022. С.55-57. – Пенза.: Издательство Наука и просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022 г. – с. 283 с.
- 69.Билятдинов К.З. Оценка вероятностных характеристик сложных радиотехнических систем в зависимости от количества и качества электронных элементов в их составе / К.З. Билятдинов, Д.В. Досиков // Прикладная физика. -2021. -№4. -С.87-92.
- 70.Билятдинов К.З. Инфолингвистическое описание источников информации для оценки качества систем связи и автоматизации / К.З. Билятдинов, Е.А. Кривчун // Метрологическое обеспечение инновационных технологий.

- Сборник статей VII Международного форума. Санкт-Петербург, 2025. С.392-393. – Спб.: Изд. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроение, 2024. – с. 537.
71. Чикалов Н.В. Об основах разработки научно-технических предложений по применению моделей синхронизации в гетерогенных сетях связи с подключением киберфизических систем / Н.В. Чикалов, К.З. Билятдинов // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных технологий. Материалы научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2025. С.406-410. – СПб.: Военная академия связи, 2025 г. – 417 с.
 72. Билятдинов К.З. Применение действительных значений показателей качества при моделировании состояний сложных систем / К.З. Билятдинов, Е.А. Кривчун // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Сборник статей VII Международного форума. Санкт-Петербург, 2025. С.97-98. – Спб.: Изд. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроение, 2024. – с. 537.
 73. Чикалов Н.В. О разработке моделей систем распределения сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи с подключением киберфизических систем / Н.В. Чикалов, К.З. Билятдинов // Век качества. - 2025. -№1. -С.170-180.
 74. Куроуз Дж., Росс К. Компьютерные сети. Нисходящий подход. Эксмо, 2016.
 75. Одом Уэнделл. Официальное руководство Cisco по подготовке к сертификационным экзаменам CCNA ICND2 200-105. Маршрутизация и коммутация. Вильямс, 2018.
 76. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети, 5-е изд. СПб.: Питер, 2019.
 77. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. Диалектика-Вильямс, 2003.
 78. Noonan Wes, Dubrawsky Ido. Firewall Fundamentals – Cisco Press, 2006.
 79. Pieprzyk Josef, Hardjono Thomas, Seberry Jennifer. Fundamentals of Computer Security – Springer, 2010.
 80. Cole Eric. Network Security Bible, 2nd Edition – John Wiley & Sons, 2009.
 81. Kabiri Peyman. Privacy Intrusion Detection and Response, IGI Global, 2011.

82. Sauter Martin. Form GSM to LTE-Advanced, John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
83. Davies Josef. Understanding IPv6, 3E, Pearson, 2012.
84. Билятдинов, К.З. Реестры источников больших данных как элементы информационного обеспечения управления инфотелекоммуникационными системами / К.З. Билятдинов // Вестник воздушно-космической обороны. - 2024 г. - №2 (42). – с.55-63
85. Билятдинов, К.З. Методика оценки вероятностных характеристик инфокоммуникационных систем на основе биномиального закона распределения в выборках с возвратом / К.З. Билятдинов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2022 г. - № 4 (36). – с. 79-84
86. Григорьев, В. А. Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев, В. А. Лагутенко, Ю. А. Распаев. - М.: Эко-Трендз, 2005. -384 с.
87. Билятдинов, К.З. Практические аспекты совершенствования управления телекоммуникационными системами при использовании матриц значений показателей качества / К.З. Билятдинов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2022 г. - № 2 (34). –с.98-105.
88. Григорьев, В. А. Современные сигнальные технологии. Учебное пособие. – СПб.: ВАС, 2011. – 96 с.
89. Шурдак, А.В. Математическое моделирование радиоканала DMR для VSM / А.В. Шурдак, Р.В. Урусов, А.Д. Чесноков, А.О. Ермаков // Автоматика. Связь. Информатика. – 2025 г. - №4. –с.11-14.
90. Куприенко, О.Ю. Определение местоположения поезда в условиях работы систем РЭБ / О.Ю. Куприенко, В.В. Батраев, С.В. Маршов, С.В. Ипатов // Железнодорожный транспорт. -2025 г. - №7. – с.36-39.
91. Long Term Evolution (LTE). Technology Overview. – Rohde & Schwarz.
92. UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction. – Rohde & Schwarz. 2008.
93. LTE-Advanced Technology Introduction. Application Note. – Rohde & Schwarz. 2010.
94. 3GPP Long-Term Evolution (LTE). – Qualcomm. January, 2008.

95. 3GPP LTE Channels and MAC Layer. – EvenHelix. 2009.
96. MIMO Transmission Schemes for LTE and HSPA Networks. – 3G Americas. June, 2009.
97. Morey Rumney. Concepts of 3 GPP LTE. Webinar Technoline. – Agilent Technologies. September. 2007.
98. Morey Remney. 3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA. – Agilent Measurement Journal. January. 2008.
99. Morey Rumney. SC-FDMA – the new LTE uplink explained. – Agilent Technologies. March. 2008.
100. Crest Factor Reduction for OFDM-Based Wireless System. – White Paper. ALTERA. December, 2008.
101. Лобеев, Д.П. О разработке и применении методики оптимизации использования частотного спектра при проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD / Д.П. Лобеев // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. №6. С. 53-61.
102. Лобеев, Д.П. Основы разработки и совершенствования моделей и алгоритмов проектирования сетей связи стандарта LTE-1800 TDD / Д.П. Лобеев // Электросвязь. -2025- №10. –с.72-77.
103. Лобеев, Д.П. Применение комплекса моделей проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта стандарта LTE-1800 TDD / Д.П. Лобеев, А.А. Гриценко, К.З. Билятдинов // Век качества. -2025 -№3. -С.183-197.
104. Лобеев, Д.П. О повышении эффективности использования частотного ресурса при использовании антенных решеток ММО. / Д.П. Лобеев // Всероссийская научно-практическая конференция «Теория и практика совершенствования отечественных систем связи, автоматизации и информационной безопасности». Военная академия связи им. С.М. Будённого. 17-18.10.2025 г. том 2. с.305-309.
105. Лобеев, Д. П. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026660934 Российская Федерация. Распределение

- частот методом целочисленного линейного программирования: №2026619737: заявл. 09.04.2026: опубл. 16. 04.2026 / Д. П. Лобеев.
106. Лобеев, Д.П. Особенности методики и модели проектирования технологических сетей радиосвязи LTE-1800 TDD в условиях высокоскоростного движения/ Д.П. Лобеев // Век качества. -2026 -№1. –с.235-248.
 107. Каширин, С.А. Теоретические основы для проектирования модели при исследовании динамического распределения коммуникационных ресурсов базовой станции сети 5G/IMT2020 / С.А. Каширин, А.М. Тюрликов, К.З. Билятдинов // Век качества. -2025 -№4. –с.314-328.
 108. Лобеев Д.П. Внедрение модели проектирования технологических сетей радиосвязи LTE-1800 TDD в зонах пересечения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025 №4. С.36-45.
 109. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623306 Российская Федерация. База данных для расчета дальности радиосвязи по моделям проектирования цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи: №2025622894: заявл. 28.07.2025: опубл. 08.08.2025 / Д.П. Лобеев.
 110. Котельников В.А. Основы радиотехники, в 2 ч. Ч.1 / В.А. Котельников, А.М. Николаев. –М.: Связьиздат, 1950. – 372 с.
 111. Скрынников, В.Г. Обобщенный критерий ЭМС при рефарминге диапазона частот GSM 1800 для LTE / В.Г. Скрынников // Электросвязь. - 2016 г. - №6. –с.38-44.
 112. Скрынников, В.Г. Использование нелицензионного радиочастотного спектра в сетях LTE / В.Г. Скрынников // Технологии и средства связи. - 2016. -№1 (112). –с.42-49.
 113. Скрынников В.Г. Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи (Часть 1) / В.Г. Скрынников // Технологии и

- средства связи. -2016. -№5 (116). –с. 47-53.
114. Скрынников В.Г. Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи (Часть 2) / В.Г. Скрынников // Технологии и средства связи. -2017. -№1 (118). –с. 28-36.
 115. Скрынников В.Г. Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи (Часть 3) / В.Г. Скрынников // Технологии и средства связи. -2017. -№2 (119). –с. 33-37.
 116. Скрынников В.Г. Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи (Часть 4) / В.Г. Скрынников // Технологии и средства связи. -2017. -№4 (120). –с. 48-56.
 117. Скрынников, В.Г. Исследование условий совмещения сетей двух стандартов – GSM и LTE – в диапазоне частот 1800 МГц / В.Г. Скрынников // Электросвязь. -2014. -№3. –с.12-18.
 118. Скрынников, В.Г. Обеспечение ЭМС сетей UMTS и LTE с РЭС других радиослужб в России на основе нестандартных методов / В.Г. Скрынников // Электросвязь. -2013. -№9. – с.14-19.
 119. Скрынников, В.Г. Оценка ЭМС при внедрении перспективных радиотехнологий / В.Г. Скрынников // Электросвязь. -2011 г. -№8. – с.17-20.
 120. Скрынников В.Г. Временной дуплекс TDD в системах LTE / В.Г. Скрынников // Мобильные телекоммуникации. -2010. -№4. –с.39.
 121. Скрынников В.Г. Зоны Френеля в задачах по электромагнитной совместимости / В.Г. Скрынников // Технологии и средства связи. -2015. -№5 (110). –с.56-59.
 122. Гладкова Е.О. Частотно-территориальное планирование сетей подвижной профессиональной радиосвязи стандарта DMR / Е.О. Гладкова, А.А. Гриценко, В.А. Жиров, Ю.А. Молотков // Бюллетень результатов научных исследований. -2012. -№2 (3). –с.21-30.

123. Anpilogov V.R. A conflict in the radio frequency spectrum of LEO-HTS and HEO-HTS systems / V.A. Anpilogov, A.A. Gritsenko, Y.N. Chekushin, I.V. Zimin. In Proceedings – 5th International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT-MIPT 2018. 5. 2018. P. 122-125.
124. Spectrum used currently in commercially launched LTE FDD networks. – GSA’s Evolution to LTE report. December 5, 2013.
125. Осипов С.В. Исследование эффективности передачи трафика в сетях LTE / С.В. Осипов // III Международная научно-практическая конференция, посвященная 110-летию со дня рождения академика Н.А. Пилюгина «Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем» Елец, 03-05 июня 2019. с.47-52.
126. AN INTRODUCTION TO LTE. LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS. // Christopher Cox. – UK.: John Wiley & Sons Ltd, 2012. –p. 486.
127. Akyidiz, I.F. Wireless mesh networks: a survey / I.F. Akyidiz, X. Wang, W. Wang // Computer Networks. -2005. – Jan, 1. – p. 445-487.
128. FCC. Technology Transitions, Order, Report & Order and Further Notice of Proposed Rulemaking, Report Order, Order and Further Notice of Proposed Rulemaking, Proposal for Ongoing Data Initiative, GN Docket No. 13-5, FCC 14-5 (rel. Jan.31, 2014).
129. Григорьев, В. А., Щесняк, С. С., Гулюшин, В. Л., Распаев, Ю. А., Хворов, И. А., Щесняк, А. С. Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-х ч. Ч. 2. СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 118 с.
130. Steputin A.N., Al-Ameri H.A. (2018). Musing unlicensed radio-frequency spectrum to increase LTE network capacity. T-Comm, vol.12, no.2, pp. 62-69.
131. Решение ГКРЧ от 23 ноября 2020 г. №20-56-02-1 (Об утверждении Методики расчетов электромагнитной совместимости и условий совместного использования радиоэлектронных средств телевизионного вещания с радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы в

полосе частот 470-862 МГц).

132. Решение ГКРЧ при Минкомсвязи России от 28.12.2017 №17-44-06 (ред. от 23.11.2020) "Об использовании полос радиочастот радиоэлектронными средствами стандарта LTE и последующих его модификаций в режиме NB-IoT"
133. Билятдинов К.З. Способ определения состава выделенных сетей связи на основе структурно-функционального моделирования сложных систем / К.З. Билятдинов / Вестник воздушно-космической обороны. – 2025 г. - № 3 (47). –с.81-89.
134. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи 6G : Развитие и перспективы использования / В.О. Тихвинский, В.А. Коваль, Е.Е. Девяткин. Учебное пособие для вузов. -М.: Издательско-торговая корпорация Дашков и К, 2025. 326 с.
135. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А., Девяткин Е.Е. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура. -М.: Изд-во Техносфера, 2024. 528 с.
136. Тихвинский В.О. Перспективы стандартизации и создания сетей радиодоступа и опорных сетей 6G / В.О. Тихвинский, Е.Е. Девяткин, А.А. Савочкин, М.И. Недобежкин // Первая миля. -2025 г. - №1 (125). С.40-48.
137. Тихвинский В.О. Архитектура сетей 6G: принципы и особенности построения. Часть 1 / В.О. Тихвинский, Е.Е. Девяткин, В. Белявский, Ю. Смирнов // Первая миля. – 2022 г. -№3 (103). С.50-57.
138. Тихвинский В.О. Архитектура сетей 6G: принципы и особенности построения. Часть 2 / В.О. Тихвинский, Е.Е. Девяткин, В. Белявский, Ю. Смирнов // Первая миля. – 2022 г. -№4 (104). С.44-49.
139. Тихвинский В.О. Эволюция технологий сети FRMCS в релизах 3GPP: вызовы и перспективы / В.О. Тихвинский, С.Л. Портной, П.А. Сивицкий, А.И. Тихонюк // Первая миля. – 2023 г. -№2 (110). С.56-64.
140. Тихвинский В.О. Применение технологий искусственного интеллекта в сетях 5G / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, Е.Е. Девяткин // Первая миля.

- 2023 г. - №3 (111). С. 52-61.
141. Тихвинский В.О. Особенности построение сетей синхронизации 5G: архитектура, протоколы и алгоритмы / В.О. Тихвинский, Е.Е. Девяткин, В. Белявский // Первая миля. – 2022 г. - №1 (101). С.52-61.
 142. Фенг Ксианг. Проблемы развертывания одночастотных сетей, использующих OFDM. / Фенг Ксианг // Беспроводные технологии. – 2013 г. - № 3. С. 76-78.
 143. Гладкова Е.О. Влияние внутрисистемных помех на зоны обслуживания MFN и SFN сетей наземного цифрового телевизионного вещания / Е.О. Гладкова, А.В. Давыдов, Р.Н. Юрьев // Инфосфера СибГУТИ. – 2013 г. - №1. С. 17-19.
 144. Шевчук В.Г. Построение сетей связи GSM-R, LTE и 5G на белорусской железной дороге / В.Г. Шевчук, С.В. Киселева // Современные средства связи. - 2022 г. - №1 (т.1). С. 142-144.
 145. Шнепс-Шнеппе М.А. Мобильная сеть GSM-R - основа цифровой железной дорог / М.А. Шнепс-Шнеппе, В.П. Куприяновский // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2016 г. - №1 (т.12). с.22-231.
 146. Попов А.В. Оптимизация размещения базовых станций стандарта GSM-R в условиях сложного рельефа местности / А.В. Попов, В.Е. Унучков // Молодая наука сибери. – 2020 г. - №3 (9). С. 135-140.
 147. Шматченко В.В. Вопросы применения цифровых систем технологической радиосвязи GSM-R, TETRA И DMR на железнодорожном транспорте / В.В. Шматченко, П.Н. Ерлыков // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной дню радио. -2022 г. -№1 (77).С.172-175. – Спб.: Изд. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2022. – с. 331.
 148. Шнепс-Шнеппе М.А. О судьбе железнодорожной сигнализации GSM-R / М.А. Шнепс-Шнеппе, В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот // International

journal of open information technologies. – 2019 г. - №7 (т.7). с.53-59.

149. Kinan Ghanem. A Timer based on Overlapping Area for Avoiding Ping-Pong Handover in LTE Networks / Kinan Ghanem, Haysam Al-Radwan, Ahmad Ahmad // International Journal of Engineering & Technology (IJERT). – 2015. – Special Issue, volume 3, Issue 1. Pp. 1-8.
150. J.B. Chavarria. LTE Handover Performance Evaluation Based on Power Budget Handover Algorithm / J.B. Chavarria. Master degree of European Master of Research on Information and Communication Technologies. – 2014. P.56.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И КОД ПРОГРАММЫ

Математический расчет для модели проектирования с использованием ширины полосы 10 МГц

Предположим, высокоскоростной объект движется в зоне действия сигнально-кодовой конструкции 64QAM12.

В зоне действия сигнально-кодовой конструкции следующие исходные данные:

Количество ресурсных блоков – 50;

Количество ресурсных элементов – 84;

Продолжительность ресурсного элемента – 0,0005;

Количество бит на символ – 6.

Для того чтобы вычислить теоретическую скорость на данном участке применяется следующая формула (1):

$$\vartheta_t = \frac{N_{PB} * N_{PE} * n}{t_{PB}} / 1000000, \text{ Мбит/с}, \quad (1)$$

где N_{PB} - количество ресурсных блоков;

N_{PE} - количество ресурсных элементов;

n – количество бит на символ;

t_{PB} – продолжительность ресурсного элемента, с.

Согласно сигнально-кодовой конструкции 64QAM12, вероятность ошибки на бит информации (FEC) составляет 0,67.

Далее найдем скорость для восходящей и нисходящей линий по формуле (2):

$$\vartheta = \vartheta_t * FEC * k, \quad (2)$$

где k -коэффициент на распределение субкадров TDD при различных вариантах;

FEC – количество ошибок на бит информации.

Также необходимо выяснить уровень сигнала для сигнально-кодовой конструкции.

Уровень сигнала вычисляется формулой (3):

$$X = KTB + SINR + IM + NF, \text{ дБ}, \quad (3)$$

где KTB - мощность шума для полосы 1.4 МГц, дБм;

$SINR$ – отношение сигнал/шум, дБ;

IM – запас на реализацию, дБ;

NF – коэффициент шума.

Для сигнально-кодовой конструкции 64QAM12, согласно формулам (1), (2), (3), получаем:

$$\vartheta_t = \frac{\frac{50 * 84 * 6}{0,0005}}{1000000} = 50,4 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}.$$

$$\vartheta = 50,4 * 0.67 * 0.6 = 20,16 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}.$$

$$X = -113 + 15,3 + 4 + 7 = -77,7 \text{ дБ}.$$

Пример расчета по модели проектирования с использованием ширины полосы 1.4 МГц

Представим пример расчета скорости передачи по восходящей (UL) и нисходящей (DL) линий для полосы 1.4 МГц при прохождении участков пересечения двух цифровых систем, работающих в одном диапазоне (табл.3.1).

Предположим, высокоскоростной объект движется в зоне действия сигнально-кодовой конструкции 64QAM12.

В зоне действия сигнально-кодовой конструкции следующие исходные данные:

Количество ресурсных блоков – 6;

Количество ресурсных элементов – 84;

Продолжительность ресурсного элемента – 0,0005;

Количество бит на символ – 6.

Для того чтобы вычислить теоретическую скорость на данном участке применяется следующая формула (1):

$$\vartheta_t = \frac{N_{РБ} * N_{РЕ} * n}{t_{РБ}} / 1000000, \text{ Мбит/с}, \quad (4)$$

где $N_{РБ}$ - количество ресурсных блоков;

$N_{РЕ}$ - количество ресурсных элементов;

n – количество бит на символ;

$t_{РБ}$ – продолжительность ресурсного элемента, с.

Согласно сигнально-кодовой конструкции 64QAM12, вероятность ошибки на бит информации (FEC) составляет 0,67.

Далее найдем скорость для восходящей и нисходящей линий по формуле (2):

$$\vartheta = \vartheta_t * FEC * k, \quad (5)$$

где k -коэффициент на распределение субкадров TDD при различных вариантах;

FEC – количество ошибок на бит информации.

Также необходимо выяснить уровень сигнала для сигнально-кодовой конструкции.

Уровень сигнала вычисляется формулой (3):

$$X = KTB + SINR + IM + NF, \text{ дБ}, \quad (6)$$

где KTB - мощность шума для полосы 1.4 МГц, дБм;

$SINR$ – отношение сигнал/шум, дБ;

IM – запас на реализацию, дБ;

NF – коэффициент шума.

Для сигнально-кодовой конструкции 64QAM16, согласно формулам (1), (2), (3), получаем:

$$\vartheta_t = \frac{\frac{6 * 84 * 6}{0,0005}}{1000000} = 6,048 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}.$$

$$\vartheta = 6.048 * 0.67 * 0.6 = 2.42 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}.$$

$$X = -113 + 15,3 + 4 + 7 = -86,7 \text{ дБ}.$$

Код программы

Решение задачи распределения частот методом ЦЛП

Линейное расположение 5 базовых станций, 2 частотных канала

```
clear; clc; close all;

%% 1. Исходные данные

N = 5;           % количество станций

K = 2;           % количество доступных каналов

% Рёбра графа (соседние станции)
edges = [1 2; 2 3; 3 4; 4 5];

%% 2. Построение модели ЦЛП

% Обозначим переменные:

% x(i,k) - бинарная, 1 если станция i использует канал k

% y(k) - бинарная, 1 если канал k используется хотя бы одной станцией

% Всего переменных: N*K + K

nVars = N*K + K;

% Индексы переменных:

% x(i,k) имеет индекс (i-1)*K + k

% y(k) имеет индекс N*K + k

% Целевая функция: минимизировать сумму y(k)

f = [zeros(N*K, 1); ones(K, 1)];

% Целочисленные переменные: все переменные бинарные

intcon = 1:nVars;

% Ограничения-равенства: каждой станции ровно один канал

% Для i-й станции:  $\sum_k x(i,k) = 1$ 

Aeq = [];

beq = [];

for i = 1:N
```

```

row = zeros(1, nVars);

for k = 1:K

    idx = (i-1)*K + k;

    row(idx) = 1;

end

Aeq = [Aeq; row];

beq = [beq; 1];

end

% Ограничения-неравенства:

% 1) Соседние станции не могут иметь одинаковый канал:

%  $x(i,k) + x(j,k) \leq 1$  для всех  $(i,j)$  в edges и всех  $k$ 

% 2) Связь  $x$  и  $y$ :  $x(i,k) \leq y(k)$  для всех  $i,k$ 

% Инициализация матрицы A и вектора b

A = [];

b = [];

% 1) Ограничения на соседей

for e = 1:size(edges,1)

    i = edges(e,1);

    j = edges(e,2);

    for k = 1:K

        row = zeros(1, nVars);

        idx_i = (i-1)*K + k;

        idx_j = (j-1)*K + k;

        row(idx_i) = 1;

        row(idx_j) = 1;

        A = [A; row];

        b = [b; 1];      %  $x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1$ 

    end

```

```

end

% 2) Ограничения  $x(i,k) \leq y(k) \rightarrow x(i,k) - y(k) \leq 0$ 
for i = 1:N
    for k = 1:K
        row = zeros(1, nVars);
        idx_x = (i-1)*K + k;
        idx_y = N*K + k;
        row(idx_x) = 1;
        row(idx_y) = -1;
        A = [A; row];
        b = [b; 0];
    end
end

% Нижние и верхние границы (0 и 1)
lb = zeros(nVars, 1);
ub = ones(nVars, 1);

% Параметры решателя (опционально)
options = optimoptions('intlinprog', 'Display', 'iter');

%% 3. Решение задачи
[x_opt, fval, exitflag, output] = intlinprog(f, intcon, A, b, Aeq, beq, lb, ub, options);

if exitflag <= 0
    error('Не удалось найти оптимальное решение. Статус: %d', exitflag);
end

%% 4. Извлечение результатов
x = x_opt(1:N*K);
y = x_opt(N*K+1:end);

% Преобразуем в удобную матрицу X(i,k)
X = reshape(x, [K, N]); % X(i,k) - строка для станции i

```

```

fprintf('Оптимальное решение найдено.\n');

fprintf('Минимальное количество необходимых каналов: %d\n', round(fval));

fprintf('\nРаспределение каналов по станциям:\n');

fprintf('-----\n');

freqMap = {'1790–1795 МГц', '1795–1800 МГц'};

for i = 1:N
    for k = 1:K
        if X(i,k) > 0.5
            fprintf('БС%d -> Канал %d (%s)\n', i, k-1, freqMap{k});
        end
    end
end

% Проверка ограничений

fprintf('\nПроверка ограничений:\n');

% Проверка соседей

violation = false;

for e = 1:size(edges,1)
    i = edges(e,1);
    j = edges(e,2);
    for k = 1:K
        if X(i,k) > 0.5 && X(j,k) > 0.5
            fprintf('ОШИБКА: БС%d и БС%d используют общий канал %d\n', i, j, k-1);
            violation = true;
        end
    end
end

if ~violation
    fprintf('Все соседние станции используют разные каналы. Интерференция исключена.\n');
end

```

```

end

%%% 5. Визуализация

% Цвета для каналов: канал 1 (индекс 1) -> красный, канал 2 -> синий
channelColors = [1 0 0; 0 0 1]; % красный, синий
nodeColors = zeros(N, 3);

for i = 1:N
    for k = 1:K
        if X(i,k) > 0.5
            nodeColors(i, :) = channelColors(k, :);
        end
    end
end

% Создаём фигуру
figure('Position', [100 100 1200 500]);

% Подграфик 1: граф раскраски
subplot(1,2,1);

% Построение графа
G = graph(edges(:,1), edges(:,2));
h = plot(G, 'Layout', 'circle', 'MarkerSize', 20, 'NodeFontSize', 12);
h.NodeColor = nodeColors;
h.NodeLabel = cellstr(num2str((1:N)));
title('Граф базовых станций (раскраска)');

% Легенда
hold on;

scatter(nan, nan, 80, 'r', 'filled', 'DisplayName', 'Канал 0 (1790–1795 МГц)');
scatter(nan, nan, 80, 'b', 'filled', 'DisplayName', 'Канал 1 (1795–1800 МГц)');
legend('Location', 'best');

hold off;

```

```

% Подграфик 2: линейная диаграмма покрытия
subplot(1,2,2);

x_pos = 1:N;
y_pos = zeros(1, N);
radius = 0.6;

% Зоны покрытия
for i = 1:N
    if X(i,1) > 0.5
        faceColor = [1 0 0 0.3]; % красный полупрозрачный
    else
        faceColor = [0 0 1 0.3]; % синий полупрозрачный
    end
    rectangle('Position', [x_pos(i)-radius, -0.1, 2*radius, 0.2], ...
        'FaceColor', faceColor, 'EdgeColor', 'none');
end

% Станции
scatter(x_pos, y_pos, 100, nodeColors, 'filled', 'MarkerEdgeColor', 'k');
text(x_pos, y_pos+0.05, cellstr(num2str((1:N))), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 12);

% Зоны перекрытия (двойное покрытие)
for i = 1:N-1
    overlap_left = max(x_pos(i)-radius, x_pos(i+1)-radius);
    overlap_right = min(x_pos(i)+radius, x_pos(i+1)+radius);
    if overlap_left < overlap_right
        rectangle('Position', [overlap_left, -0.15, overlap_right-overlap_left, 0.3], ...
            'FaceColor', [0.5 0.5 0.5 0.2], 'EdgeColor', 'none');
    end
end

xlim([0.5 N+0.5]);

```

```

ylim([-0.3 0.3]);

xlabel('Позиция вдоль линии');

yticks([]);

title('Зоны покрытия и двойное резервирование');

grid on;

legend({'Канал 0', 'Канал 1', 'Двойное покрытие'}, 'Location', 'southoutside', 'Orientation',
'horizontal');

% Общая аннотация

sgtitle('Оптимизация распределения частот методом ЦПП (intlinprog)');

%% 6. Дополнительная информация

fprintf('\n--- Обеспечение требуемых скоростей ---\n');

fprintf('Каждый канал шириной 5 МГц способен обеспечить скорости >2 Мбит/с (DL) и 1
Мбит/с (UL)\n');

fprintf('при использовании современных методов модуляции (QPSK, 16QAM).\n');

fprintf('Двойное покрытие достигается за счёт перекрытия зон действия соседних
станций,\n');

fprintf('работающих на разных частотах, что позволяет абонентам выполнять хэндовер.\n');

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Акт о внедрении от АО «НИИ «Масштаб»

Заместитель генерального директора
АО «НИИ «Масштаб» по научной работе
кандидат технических наук
А.Г. Фортинский
«04» июля 2025 г.



о внедрении результатов диссертационного исследования
Лобеева Дмитрия Петровича

на тему: Модели и методики проектирования технологических сетей радиосвязи
стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Научные результаты, представленные в диссертации Лобеева Д.П. в виде положений, выносимых на защиту:

1. Методика использования частотного ресурса при проектировании технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD;
2. Комплекс моделей проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта;
3. Научно-технические предложения по проектированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD в интересах повышения эффективности использования частотного ресурса и снижения негативного влияния эффекта Доплера,

внедрены при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, что существенно повысило обоснованность разрабатываемых технических решений и рекомендаций, при снижении времени выполнения проектов до 12%. При этом результаты диссертации применялись для формирования научно-технического задела в интересах разработки отечественной высокотехнологичной продукции.

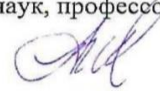
Вывод: результаты диссертации Лобеева Д.П. актуальны, обладают научной новизной и высокой практической значимостью в области построения мобильных систем связи.

Председатель комиссии:

Советник генерального директора АО «НИИ «Масштаб» по науке
Лауреат Ленинской премии, доктор технических наук, профессор

«04» июля 2025 г.

Е.Б. Давыдов



Члены комиссии:

Начальник НСЦ АО «НИИ «Масштаб»

«04» июля 2025 г.

Начальник научно-технического отдела

«04» июля 2025 г.

С.П. Гагарин



Е.В. Хрусталёва



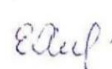
ВЕРНО (Одобрено решением НТС. Протокол НТС № 20 от 04.07.2025):

Секретарь НТС АО «НИИ «Масштаб»

Начальник научно-технического отдела

«04» июля 2025 г.

Е.В. Хрусталёва



**Акт о внедрении от проектного института «Гипротрансигналсвязь» - филиал
АО «Росжелдорпроект»**



**Институт по проектированию сигнализации,
централизации, связи и радио
на железнодорожном транспорте
«Гипротрансигналсвязь» –
филиал АО «Росжелдорпроект»**

ул. Боровая, д. 49
г. Санкт-Петербург, 192007
тел.: (812) 319-15-50
e-mail: gtss@rzdpr.ru
www.rzdp.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор
«Гипротрансигналсвязь» - филиал
АО «Росжелдорпроект»



М.С. Трясов

« 31 » 04 2025 г.

31.04.2025 № ОМкр-03705

На № _____ от _____

[_____]

Акт

о внедрении научных результатов,
полученных Лобеевым Дмитрием Петровичем

Комиссия в составе:

Председатель комиссии – главный инженер филиала
«Гипротрансигналсвязь» Блёскин Максим Александрович

Члены комиссии:

- заместитель главного инженера филиала, начальник технического
отдела Блехов Алексей Владимирович;

- начальник отдела связи Корпусенко Евгений Геннадьевич;

- главный инженер проекта отдела связи Тараненко Артем Юрьевич;

- руководитель группы отдела связи Богданов Андрей Иванович

настоящим актом подтверждает, что научные результаты, полученные
Лобеевым Дмитрием Петровичем, а именно:

1) Методика оптимизации использования частотного спектра при
проектировании цифровых систем технологической железнодорожной
радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD,

использованы при проектировании объекта «Создание высокоскоростной железнодорожной магистрали Санкт-Петербург – Москва (участок Крюково (Алабушево) – Обухово)».

Разработанная методика оптимизации использования частотного спектра позволяет эффективно применять модели проектирования для различной ширины полосы в диапазоне частот 1785-1805 МГц. В частности, при сравнении подходов к проектированию до и после внедрения методики были получены следующие результаты: увеличена зона покрытия базовых станций до 18% при использовании методики, снижены задержки управления до 40% при использовании методики.

Также, методика демонстрирует оптимизацию использования частотного спектра в необходимых случаях с учетом дефицита частотного ресурса.

Применение результатов работы позволило расширить функциональные возможности при проектировании цифровых систем технологической радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD.

Председатель комиссии:

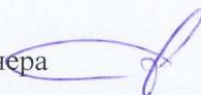
Главный инженера филиала



М.А. Блёскин

Члены комиссии –

Заместитель главного инженера



А.В. Блехов

Начальник отдела связи



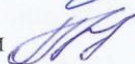
Е.Г. Корпусенко

Главный инженер проекта



А.Ю.Тараненко

Руководитель группы отдела связи



А.И.Богданов

**Акт о внедрении от ФГКВОУ ВПО «ВАС имени Маршала Советского Союза
С.М. Буденного» МО РФ**



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника академии
по учебной и научной работе
Генерал-майор

А.Сапрыкин

« » октября 2025 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Лобеева Дмитрия Петровича

**на тему: Модели и методика проектирования технологических сетей
радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных
железнодорожных магистралях**

Научные результаты, полученные в диссертации Лобеева Д.П.:

1. Методика использования частотного ресурса при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

2. Модель комплексного применения способов проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях, в местах пересечения с другими сетями связи.

3. Научно-технические предложения по проектированию технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Позволяют существенно сократить время разработки проектов при рациональном использования частотного ресурса и увеличении зоны обслуживания базовых станций.

Результаты диссертации применяются для моделирования технологических сетей радиосвязи и в учебном процессе для расчёта дальности радиосвязи и зон обслуживания базовых станций при применении стандарта LTE-1800 TDD в полосе частот 1785-1805 МГц.

Председатель: полковник

Члены

комиссии:

подполковник

подполковник

майор

О.С. Лаута

К.Н. Сорокин

М.А. Карпов

С.С. Дворников

Акт о внедрении от Центрального регионального центра связи- структурного подразделения Центральной станции связи – филиал ОАО «РЖД»

Центральный региональный центр связи –
структурное подразделение Центральной
станции связи – филиал ОАО «РЖД»
Первый заместитель начальника центра
А.В. Хайсов

«29» 07. 2025г.

Акт

о внедрении результатов диссертационного исследования
Лобеева Дмитрия Петровича
на тему: Модели и методики проектирования технологических сетей
радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных
магистральных

Научные результаты, представленные в диссертации Лобеева Д.П. в виде положения, выносимого на защиту:

1. Научно-технические предложения по проектированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD в интересах повышения эффективности использования частотного ресурса и снижения негативного влияния эффекта Доплера;

внедрены в эксплуатацию следующими пунктами:

1. Научно-техническое предложение по применению антенных решеток ММО внедрено при выполнении пуско-наладочных работ и показало, что при применении фазированных антенных решеток типа ММО дальность радиосвязи увеличивается до 40%.

2. Научно-техническое предложение по применению способа компенсации негативного влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях за счет проведения процедуры хэндовера за несколько секунд до прохода поездом основной (сигнальной) базовой станции привело к снижению затрат на оборудование на 70% для технологических сетей радиосвязи.

Вывод: результаты диссертации Лобеева Д.П. актуальны, обладают высокой практической значимостью в области эксплуатации технологических сетей радиосвязи.

Председатель комиссии:

Главный инженер Центрального регионального
центра связи
«29» июля 2025 г.

С.А. Середа

Члены комиссии:

Начальник участка производства
«29» июля 2025 г.

А.С. Лайков

Начальник центра технического обслуживания
«29» июля 2025 г.

С.В. Аверьянов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2025623306

База данных для расчета дальности радиосвязи по
моделям проектирования цифровых систем
технологической железнодорожной радиосвязи

Правообладатель: *Лобеев Дмитрий Петрович (RU)*Автор(ы): *Лобеев Дмитрий Петрович (RU)*

Заявка № 2025622894

Дата поступления 28 июля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 08 августа 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 0492e7c1ac300b54f2401670a0a2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№2026660934

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026660934

Распределение частот методом целочисленного
линейного программирования

Правообладатель: *Лобеев Дмитрий Петрович (RU)*

Автор(ы): *Лобеев Дмитрий Петрович (RU)*



Заявка № 2026619737

Дата поступления 09 апреля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 апреля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e47add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов