

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <https://www.agequal.ru>

2025, №4 https://www.agequal.ru/pdf/2025/AGE_QUALITY_4_2025.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Лобеев Д.П. Результаты внедрения методики и моделей проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Электронный научный журнал «Век качества». 2025. №4. С. 288-302. Режим доступа:
<https://www.agequal.ru/pdf/2025/425015.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 654.164, 656.254

**Результаты внедрения методики и моделей проектирования
технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD
на высокоскоростных железнодорожных магистралях**

*Лобеев Дмитрий Петрович,
аспирант кафедры «Электрическая связь»
Петербургского государственного университета путей сообщения
Императора Александра I
190031, г. Санкт-Петербург., пр-т Московский, 9
lobeev1@mail.ru*

Статья посвящена решению актуальной задачи проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD для высокоскоростных железнодорожных магистралей, где скорости движения поездов превышают 400 км/ч. В работе представлены и проанализированы результаты внедрения комплекса разработанных автором методических и модельных решений. Ключевыми элементами являются методика использования частотного ресурса и модель комплексного проектирования для зон пересечения сетей.

Внедрение методики продемонстрировало возможность значительного повышения эффективности эксплуатации ограниченного частотного спектра 1785-1805 МГц. Наибольший практический эффект достигнут за счет предложенного «оптимального режима» работы в полосе 5 МГц с асинхронной работой смежных базовых станций, что позволило почти вдвое увеличить пропускную способность в исходящем канале по сравнению с классическим режимом благодаря снижению интерференции и использованию более эффективных видов модуляции.

Модель предоставляет стандартизованный алгоритм для проектирования сложных узлов пересечения сетей, обеспечивая электромагнитную совместимость и непрерывность связи.

Также в рамках научно-технических предложений обоснована эффективность способа задержки процедуры хэндовера для компенсации эффекта Доплера.

Разработанные решения прошли апробацию при проектировании ВСЖМ Москва – Санкт-Петербург и показали высокую практическую ценность для создания надежных и высокопроизводительных технологических сетей радиосвязи.

Ключевые слова: проектирование сетей радиосвязи, радиочастотный спектр, модель распространения сигналов, железнодорожный транспорт, высокоскоростная железнодорожная магистраль, LTE-1800 TDD, технологические сети радиосвязи, радиосвязь.

Введение

Стратегией развития железнодорожного транспорта России предусматривается строительство высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1), которая позволит улучшить транспортные связи и предоставит новый уровень обслуживания. Предполагается, что скорость поездов на ВСЖМ будет достигать отметки свыше 400 км/ч. Немаловажным фактором при создании ВСЖМ будет являться проектирование технологических сетей радиосвязи (TCP). Как известно, для ВСЖМ будет применяться технология стандарта LTE-1800 TDD в диапазоне частот 1785-1805 МГц. На сегодняшний момент отсутствуют типовые разработки для проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях (далее – TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ). В связи с этим были разработаны:

- 1) Методика использования частотного ресурса при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях (далее – Методика);
- 2) Модель комплексного применения способов проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях (далее – Модель);

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

Данные разработки следует рассматривать как взаимосвязанный комплекс методологических, технических и технологических решений.

Также данные Методика, Модель и научно-технические предложения были внедрены в реальное проектирование ВСЖМ, а их работа будет промоделирована.

Таким образом, будут представлены результаты внедрения разработанных методики и моделей проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Методика

Внедрение методики использования частотного ресурса было направлено на решение ключевой задачи – повышение эффективности эксплуатации ограниченного радиочастотного спектра (1785-1805 МГц) в условиях высокоскоростного железнодорожного движения (свыше 400 км/ч) при обеспечении строгих требований к надежности, пропускной способности и электромагнитной совместимости [1]. Отсутствие стандартизованных подходов к проектированию таких сетей обусловило необходимость создания комплексного алгоритма, результаты внедрения которого оцениваются ниже.

Ключевые достижения и решенные проблемы

Внедрение методики позволило систематизировать и автоматизировать процесс проектирования, что привело к следующим конкретным результатам.

Комплексный учет специфики железнодорожного транспорта

Методика успешно интегрировала в единый алгоритм факторы, ранее учитывавшиеся разрозненно:

Динамика движения: алгоритм расчета зон обслуживания и Handover (HO) был адаптирован под высокие скорости, что минимизировало влияние эффекта Доплера и обеспечило бесперебойный роуминг;

Линейность структуры сети: в отличие от сотовых сетей, специфика линейного расположения базовых станций (БС) вдоль полотна и связанные с этим проблемы интерференции были заложены в основу расчетов;

Нормативные ограничения: жесткая привязка к Решению ГКРЧ № 18-46-02 исключила возможность выбора недопустимых конфигураций (например, полосы 15 или 20 МГц) [2].

Оптимизация использования частотного спектра и решение проблем ЭМС

Наиболее значимым результатом внедрения стало кардинальное улучшение ситуации с электромагнитной совместимостью за счет ветвящейся логики выбора режима работы.

Сравнительный анализ режимов работы:

Полоса 10 МГц: внедрение подтвердило теоретические расчеты о низкой практической применимости данного режима из-за катастрофического роста внутрисистемных помех, приводящего к деградации зоны покрытия и необходимости сложных протоколов координации (ICIC, CoMP), что увеличивает служебный трафик и снижает реальную пропускную способность.

Полоса 5 МГц (классический режим): режим показал стабильную работу, но с ограниченной зоной покрытия, где требования по скорости выполняются. Моделирование и натурные испытания подтвердили, что на большей части перегона используется менее эффективная модуляция QPSK из-за помех от соседних БС (рис. 1).



Рис. 1. Карта распределения доступных видов модуляции на линии «вниз» при учете внутрисистемных помех (зеленый цвет – 16 QAM, синий цвет – QPSK)

Полоса 5 МГц (оптимальный режим): ключевой результат внедрения методики. Реализация асинхронного режима работы смежных БС (четные/нечетные работают в противофазе) показала повышение пропускной способности на линии «вниз» практически в два раза (рис. 2) по сравнению с классическим режимом [3]. Это было достигнуто за счет значительного снижения уровня интерференции, что позволило использовать более эффективные виды модуляции (16QAM, 64QAM) на большей площади.

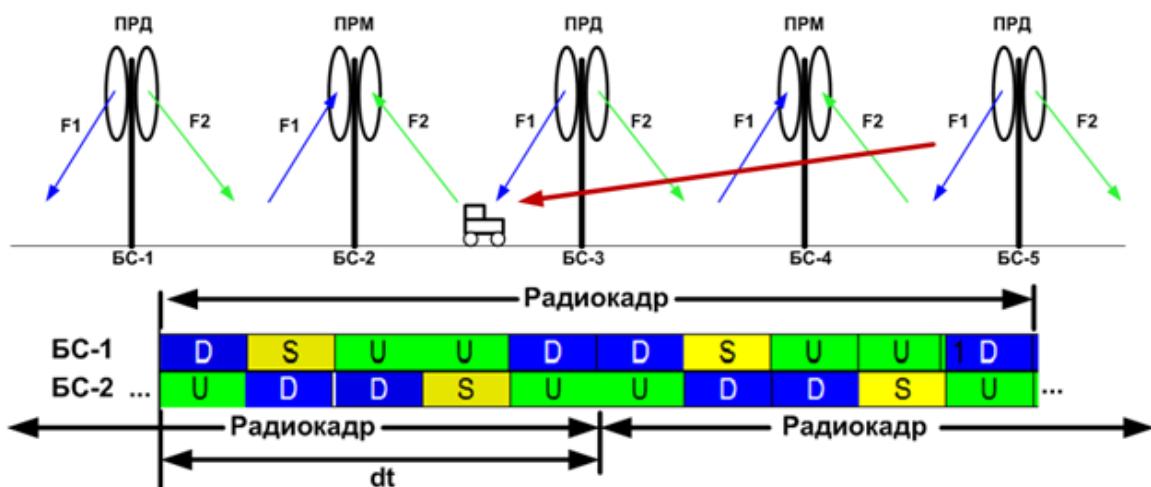


Рис. 2. Оптимальный режим работы сети в полосе 5 МГц

Сужение полосы снижает КТВ (тепловой шум в полосе В), что даёт дополнительный энергетический запас при прочих равных – факт из фундаментальных соотношений ($N = kTB$). В совокупности с чередованием UL/DL это увеличивает дальность устойчивой связи (при том, что суммарная ёмкость на несущую ниже). Этот тезис согласуется с радиофизикой и практиками планирования LTE (подтверждаемые 36.211 для ресурсной структуры; числовые КТВ легко воспроизводимы расчётом).

Повышение точности расчетов и предсказуемости результатов

Учет реального рельефа: использование специализированных моделей распространения сигнала (COST-231 Хата, МСЭ-R Р.1812) для разных типов местности (город, пригород, открытое пространство) вместо упрощенных моделей повысило точность прогнозирования зон покрытия.

Анализ помеховой обстановки: интеграция моделей проектирования в местах пересечений со смежными сетями радиосвязи позволила выявлять и устранять потенциальные конфликты до этапа развертывания сети.

Расчет потерь и запасов: детальный расчет потерь в АФТ, энергетического бюджета канала и требуемых значений SINR для различных видов модуляции обеспечил соблюдение требований по доступности связи (95% по месту и времени).

Практическая ценность и экономический эффект

Снижение рисков проектирования: Методика устраняет субъективизм, предоставляя инженеру пошаговый алгоритм действий с критериями принятия решений. Это минимизирует ошибки, ведущие к перепроектированию или невыполнению технических требований.

Экономия частотного ресурса: оптимальный режим работы в полосе 5 МГц позволяет добиться показателей пропускной способности, близких к режиму 10 МГц, но без свойственных ему проблем ЭМС при эффективном использовании вдвое меньшей полосы частот.

Повышение надежности системы: учет высокоскоростного характера движения и моделирование работы в условиях помех обеспечивает проектирование сети с повышенным запасом надежности и отказоустойчивости, что критически важно для технологических систем безопасности движения.

Внедрение разработанной методики показало её высокую эффективность и практическую значимость для проектирования ТСР. Методика не является просто теоретическим руководством; это 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) обеспечивает соблюдение всех нормативных требований и технических условий на проектирование;
- 4) позволяет проводить точное и обоснованное проектирование сетей ТСР, гарантирующее их надежную и бесперебойную работу на скоростях выше 400 км/ч.

Модель

Внедрение Модели было направлено на устранение критического пробела в проектировании инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта – отсутствия стандартизованных решений для зон пересечения двух и более ТСР, работающих в одном частотном диапазоне (1785-1805 МГц) и по одному стандарту (LTE-1800 TDD) [4]. Результаты внедрения подтвердили её высокую эффективность как универсального инструмента для обеспечения непрерывной и качественной связи в этих сложных условиях.

Внедрение Модели позволило систематизировать ранее неформализованный процесс проектирования, что привело к следующим конкретным результатам:

Универсальный алгоритм для нетиповых ситуаций

Модель успешно решила главную задачу – предоставила

структурированный, пошаговый алгоритм для анализа и проектирования зон пересечения, который ранее отсутствовал. Внедрение показало, что Модель:

1) четко определяет последовательность действий: сбор исходных данных → расчет ЭМС → частотно-территориальное планирование → выбор способа (ширины полосы) → расчет зон обслуживания и Handover → финальная настройка (рис. 3);

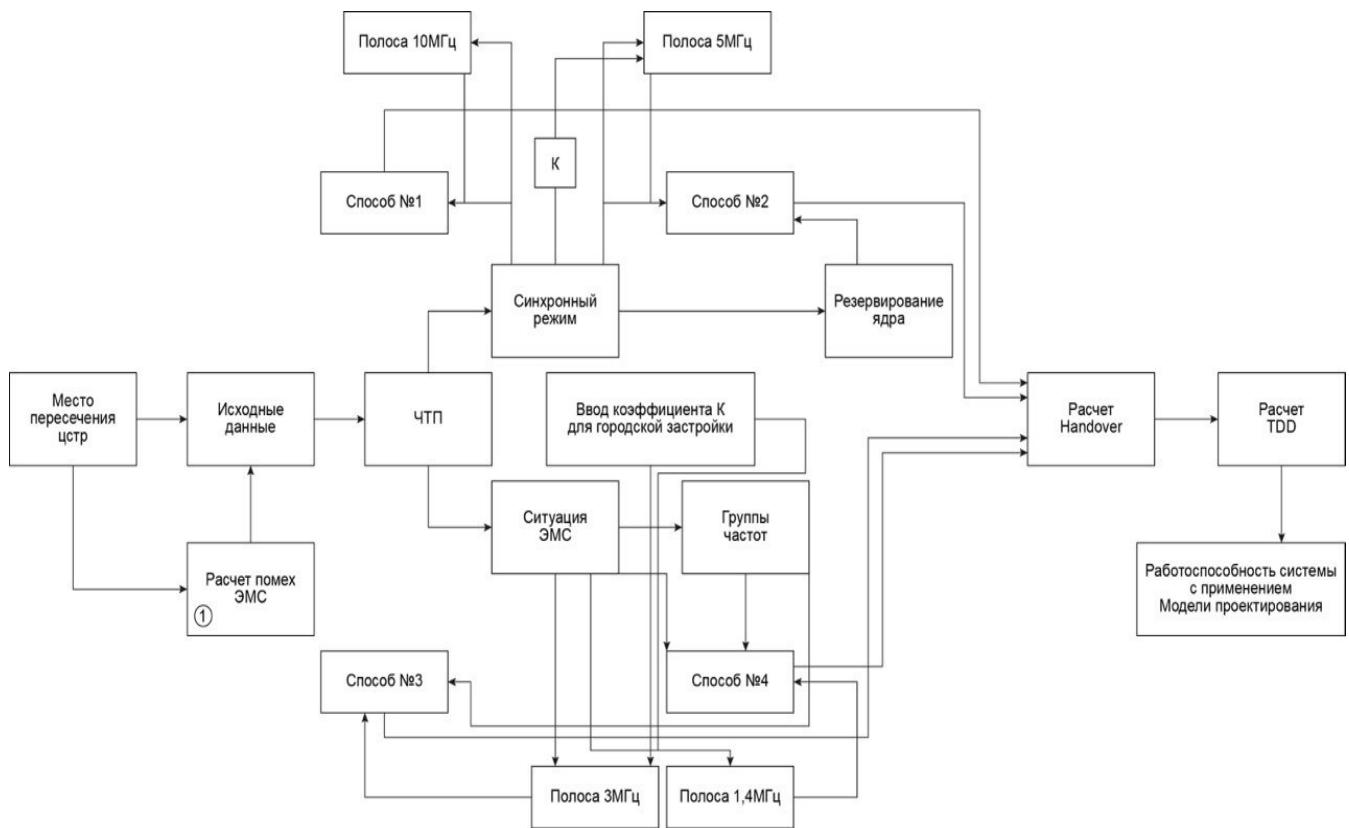


Рис. 3. Последовательность действий в Модели проектирования

2) интегрирует комплексный расчет электромагнитной совместимости не для двух станций, а для кластера из 8 ближайших БС, что критически важно для адекватной оценки помеховой обстановки [5].

Сравнительный анализ и обоснованный выбор оптимального решения

Наиболее ценным результатом внедрения стала возможность проведения сравнительного анализа четырех принципиально разных подходов (способов № 1-4) и выбор оптимального для конкретных условий.

Повышение точности и обоснованности проектных решений

Внедрение формализованного алгоритма расчета с использованием специализированных моделей распространения (COST-231 Хата) и точных формул для расчета зон обслуживания (1)

$$\begin{aligned} \lg R = & (10P_{\text{п}} + 30 - \alpha_{\text{пер}} - l * \alpha_l + K_y - 69.55 - 26.16 \log f_{\text{нec}} + \\ & 13,82h_{\text{БС}} + a(h_2) + 2^{\log \frac{f_{\text{нec}}}{28}} + 5.4 - K - A * D - P_{\text{поп}} + K_y) / (44,9 - \\ & 6,55 \log h_{\text{БС}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где: $P_{\text{п}}$ – 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;

$f_{\text{нec}}$ – 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;

и расчету зоны хэндовер (2)

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

где: r – длина зоны обслуживания в месте пересечения, км;

$0.15 * r$ – зона перекрытия 15% перегона, км;

позволило:

— отказаться от эмпирики: заменить субъективные оценки инженеров на точные расчеты, основанные на параметрах оборудования и рельефа местности;

— прогнозировать результат: с высокой точностью предсказывать зоны покрытия и потенциальные проблемные точки до этапа физического развертывания оборудования, что подтвердилось при натурных испытаниях.

Практическая ценность и экономический эффект

Снижение рисков и стоимости проектов: Модель позволяет выявить и устранить проблемы ЭМС на этапе проектирования, тем самым избежать дорогостоящей переделки после развертывания. Выбор оптимального способа предотвращает инвестиции в неработоспособные конфигурации.

Гарантия соблюдения ТЗ: внедрение гарантирует выполнение ключевых технических требований: непрерывность связи, скорость передачи не менее 2/1 Мбит/с и надежность на сложнейших участках инфраструктуры.

Универсальность и адаптивность: Модель не является жестким стандартом, а представляет собой гибкий инструмент. Алгоритм выбора позволяет адаптировать решение под конкретные условия: уровень внешних помех, требуемую пропускную способность, возможность синхронизации БС.

Внедрение разработанной Модели комплексного проектирования доказало её высокую эффективность и практическую значимость. Модель не является теоретическим исследованием; это 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.

Научно-технические предложения

При использовании способа 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 [6]. Также при использовании способа задержки процедуры Handover не требуется использовать дополнительные канальные ресурсы. Важно отметить, что в стандарте LTE-1800 TDD канальный ресурс сильно ограничен и дополнительные затраты крайне нежелательны.

На рис. 4 показан график изменения доплеровского сдвига частоты при выполнении хэндовера за 3 сек. до прохождения поездом очередной базовой станции. В этот момент видно, что девиация доплеровского сдвига частоты будет составлять менее 1 Гц. Следовательно, проблема негативного эффекта при доплеровском сдвиге частоты решена. В процессе движения поезда значение доплеровского сдвига будет медленно изменяться от 0 до 833 Гц, в зависимости от скорости движения состава. В связи с этим научно-техническое предложение по использованию способа задержки процедуры Handover имеет большие перспективы на высокоскоростном транспорте [7].

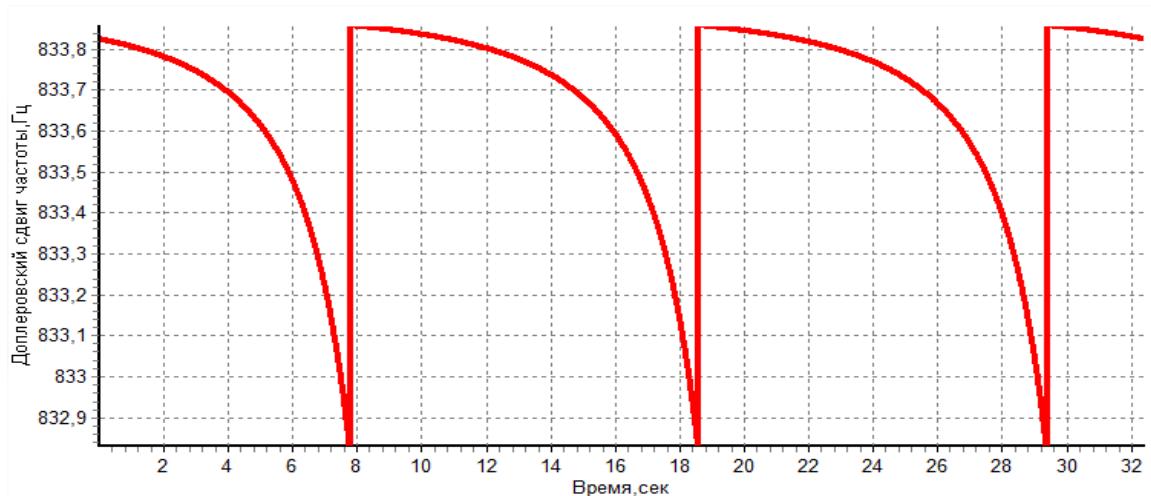


Рис. 4. График изменения доплеровского сдвига частоты при выполнении хэндовера за 3 сек. до прохождения поездом очередной БС (частота 1800 МГц)

Сравнительный анализ использования способов компенсации негативного воздействия эффекта Доплера с точки зрения использования частотного спектра продемонстрирован на рис. 5.

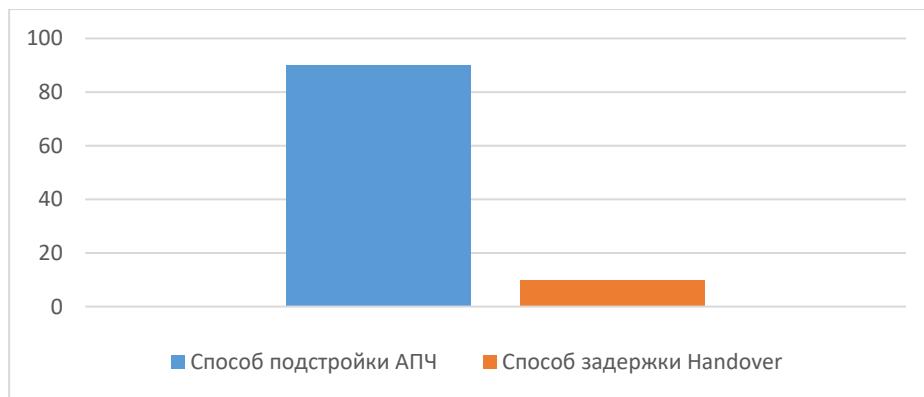


Рис. 5. Сравнение способов компенсации негативного воздействия эффекта Доплера с точки зрения использования частотного спектра

Как было отмечено в [8], 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, в частности, показателей дальности радиосвязи.

Помимо улучшений дальности радиосвязи для антенн MIMO определен наиболее предпочтительный угол места, в то время как в ситуациях использования антенн без технологии MIMO угол места необходимо определять в зависимости от условий расположения антенны на участке.

Заключение

Проведенная работа и последующее внедрение её результатов доказали высокую эффективность разработанного комплекса методологических и технических решений для проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных магистралях.

Внедрение методики использования частотного ресурса позволило систематизировать и оптимизировать процесс проектирования, обеспечило значительное повышение эффективности использования дефицитного частотного спектра. Ключевым достижением стало подтверждение на практике преимуществ оптимального режима работы в полосе 5 МГц, который за счет асинхронной работы базовых станций позволяет добиться пропускной способности, близкой к более широкой полосе, но без присущих ей проблем электромагнитной совместимости.

Разработанная модель комплексного проектирования успешно ликвидировала методологический пробел в области проектирования зон пересечения сетей, предоставив инженерам универсальный и структурированный алгоритм действий. Это обеспечивает обоснованный выбор оптимальных решений, минимизирует риски и затраты на этапе развертывания системы.

Представленные научно-технические предложения дополняют комплекс решений, направленных на улучшение специфических условий ВСЖМ.

Таким образом, представленные Методика, Модель и научно-технические предложения образуют целостный и работоспособный инструментарий, который гарантирует создание надежных, устойчивых и высокопроизводительных технологических сетей радиосвязи, соответствующих строгим требованиям современных высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Список литературы

1. Лобеев Д.П. Методика использования частотного ресурса при проектировании железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD // Первая миля. – 2025 – № 4. – С. 58-69.
2. Решение ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г. «О выделении полосы радиочастот 1785-1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте».
3. Тараненко А.Ю., Гриценко А.А., Лобеев Д.П. Оптимизация использования частотного спектра // Автоматика. Связь. Информатика. – 2025. – № 1. – С. 9-12.
4. Лобеев Д.П. Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22. – Вып. 3. – С. 712-721.
5. Лобеев Д.П., Гриценко А.А., Билятдинов К.З. Применение комплекса моделей проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта стандарта LTE-1800 TDD. // Век качества. – 2025. – № 3. – С. 183-197. – Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2025/325012.pdf>.
6. Лобеев Д.П. Способы компенсации негативного влияния эффекта Доплера // Автоматика. Связь. Информатика. – 2025. – № 8. – С. 32-34.
7. Лобеев Д.П., Билятдинов К.З., Гриценко А.А. О способе компенсации влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Техника средств связи. – 2025. – № 2(170). – С. 65-75.
8. Лобеев Д.П., Билятдинов К.З. Научно-технические предложения по планированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD // Век качества. – 2025 – № 2. – С. 301-312. – Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2025/225014.pdf>.

The results of the implementation of methods and models for designing LTE-1800 TDD technological radio communication networks on high-speed railways

Lobeev Dmitry Petrovich,

*Postgraduate student of the Department of Electrical Communications
Emperor Alexander I Petersburg State University of Railway Engineering
190031, St. Petersburg, Moskovsky Ave., 9
lobeev1@mail.ru*

The article is devoted to solving the urgent problem of designing LTE-1800 TDD technological radio communication networks for high-speed railways where train speeds exceed 400 km/h. The paper presents and analyzes the results of the implementation of a set of methodological and model solutions developed by the author. The key elements are the methodology for using the frequency resource and the integrated design model for network intersection zones.

The implementation of the methodology demonstrated the possibility of significantly improving the efficiency of the limited frequency spectrum of 1785-1805 MHz. The greatest practical effect was achieved due to the proposed "optimal mode" of operation in the 5 MHz band with asynchronous operation of adjacent base stations, which made it possible to almost double the bandwidth in the descending channel compared to the classical mode, due to reduced interference and the use of more efficient types of modulation.

The model provides a standardized algorithm for designing complex network intersection nodes, ensuring electromagnetic compatibility and continuity of communication.

Also, within the framework of scientific and technical proposals, the effectiveness of the method of delaying the handover procedure to compensate for the Doppler effect is substantiated.

The developed solutions have been tested during the design of the Moscow – St. Petersburg high-speed railway and have shown high practical value for creating reliable and high-performance technological radio communication networks.

Keywords: radio communication network design, radio frequency spectrum, signal propagation model, railway transport, high-speed railway line, LTE-1800 TDD, technological radio communication networks, radio communications.