

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

2026, №1 https://www.agequal.ru/pdf/2026/AGE_QUALITY_1_2026.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Лобеев Д.П. Особенности методики и модели проектирования технологических сетей радиосвязи LTE-1800 TDD в условиях высокоскоростного движения // Электронный научный журнал «Век качества». 2026. №1. С. 235-248. Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2026/126013.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 654.164, 656.254

Особенности методики и модели проектирования технологических сетей радиосвязи LTE-1800 TDD в условиях высокоскоростного движения

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

Статья посвящена проблеме проектирования технологических сетей железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD в условиях высокоскоростного движения, особенно в зонах пересечения двух смежных систем. В рамках Решения ГКРЧ, предусматривающего использование полос 1.4, 3, 5 и 10 МГц, проведен сравнительный анализ различных конфигураций.

Рассматриваются ключевые аспекты при создании методики оптимизации использования частотного ресурса при проектировании технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD, а именно выбор ширины полосы частоты, при которой данная система будет функционировать. Выбор ширины полосы частоты является одним из важнейших пунктов в алгоритме методики оптимизации использования частотного спектра. От выбора ширины полосы частоты будет зависеть дальнейшая работоспособность цифровой системы технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD.

Показано, что использование максимальной полосы 10 МГц, несмотря на высокую пиковую пропускную способность, приводит к серьезным проблемам электромагнитной совместимости: росту интерференции, сокращению дальности связи и необходимости применения сложных алгоритмов координации, что в итоге может снизить реальную производительность сети.

Узкие полосы (1.4 и 3 МГц) обеспечивают большую дальность, но неприемлемы из-за недостаточной пропускной способности для задач высокоскоростных магистралей.

В статье также рассматривается специализированная модель

проектирования радиосетей, предназначенная для использования в случаях, когда частотно-территориальное планирование (ЧТП) указывает на целесообразность применения канала с шириной полосы 5 МГц. В условиях ограниченного использования частотного спектра данная модель имеет ряд особенностей, которые позволяют провести оптимизацию использования частотного спектра для технологических сетей железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD.

Ключевые слова: проектирование сетей радиосвязи, радиочастотный спектр, высокоскоростная железнодорожная магистраль, технологические сети радиосвязи, LTE-1800 TDD, ширина полосы частоты, электромагнитная совместимость.

Введение

При проектировании современных технологических сетей железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD, особенно в условиях высокоскоростного транспорта, могут возникать ситуации, когда две системы пересекаются друг с другом. Для таких ситуаций были разработаны методика оптимизации использования частотного спектра, а также модель комплексного применения способов проектирования пересечения двух смежных сетей технологической железнодорожной радиосвязи, работающих в стандарте LTE-1800 TDD в полосе частот 1785-1805 МГц [1]. В соответствии с Решением ГКРЧ № 18-46-02 от 11 сентября 2018 г. возможно использовать один из четырех вариантов ширины полосы частоты: 1.4 МГц, 3 МГц, 5 МГц и 10 МГц [2]. С учетом этого ограничения и для нужд высокоскоростных железнодорожных магистралей была разработана вышеупомянутая методика. Для сетей, работающих при ширине полосы частоты 5 МГц, была разработана модель проектирования, имеющая ряд особенностей. Но для её применения необходимо рассмотреть все варианты использования, а также преимущества и недостатки той или иной ширины полосы частоты, используемой в методике.

С развитием технологий мобильной связи, особенно в контексте внедрения сетей LTE, требования к качеству и надежности услуг постоянно растут. Особенно актуальными эти вопросы становятся при необходимости обеспечить надежную связь в условиях железнодорожного транспорта.

Эффективное проектирование технологических сетей железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD становится критически важной задачей [3]. Именно поэтому были разработаны методика и модели проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Основная часть

Полоса 10 МГц

Как уже отмечалось ранее, система может работать в одном диапазоне из набора частот: 1.4 МГц, 3 МГц, 5 МГц и 10 МГц. Исходя из условий, применяемых на проектируемом участке, необходимо сделать обоснованный выбор именно той ширины полосы частоты, которая наиболее пригодна. Использование максимально доступной полосы из набора частот имеет некоторые особенности:

- 1) наибольшая пропускная способность системы;
- 2) наименьший запас по энергетике;
- 3) наименьшая дальность радиосвязи;
- 4) возможность перераспределения субкадров;
- 5) возможность использования полного ресурса полосы для единственного абонента;
- 6) подверженность интерференционным помехам.

Моделирование работы системы с максимально доступной полосой частоты 10 МГц, по сути, означает, что все базовые станции (БС) сети и их сектора будут работать на одной частоте, что без применения специальных мер приведет к деградации зон обслуживания и обрыву каналов связи (рис. 1).

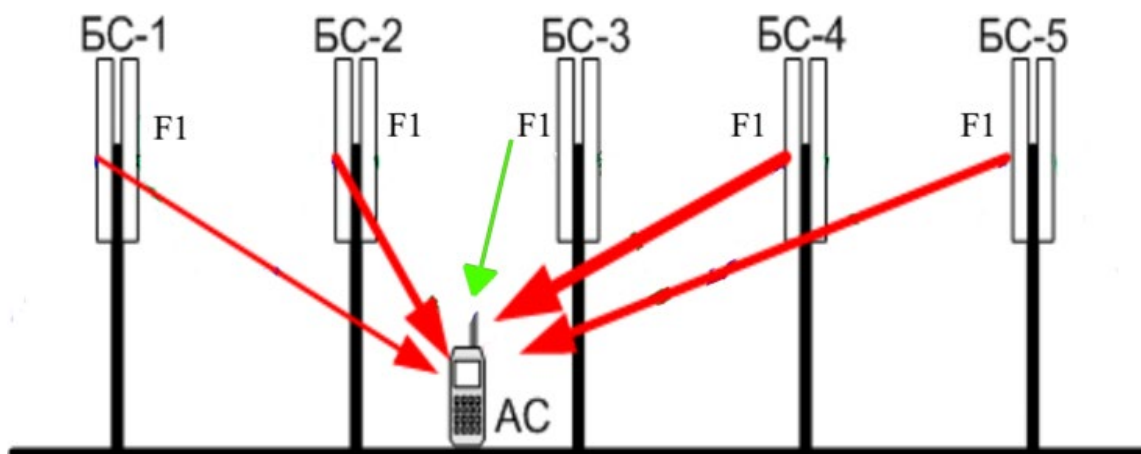


Рис. 1. Работа системы в полосе 10 МГц

При загрузке сети работа данного модуля приведет к следующей ситуации [3]:

а) Для исключения помех на обслуживаемом участке на секторах двух смежных БС будет использована только полоса в 5 МГц (сектор одной БС на поднесущих первых 5 МГц, сектор второй БС – на оставшихся частотных поднесущих), что приведет к снижению пропускной способности.

б) Без применения специальных мер часть этого же участка будет подвержена помехам от двух других ближайших к участку БС, что приведет к дополнительной деградации зоны обслуживания. Для исключения этой ситуации система управления LTE дополнительно разобьет используемые полосы частот на более узкие полоски, что дополнительно сократит пропускную способность.

в) Резко вырастет объем служебной информации, циркулирующей в каналах обмена между БС. Данный фактор приведет к дополнительному снижению информационной скорости передачи, что также можно интерпретировать как потерю пропускной способности.

г) Возникает необходимость применения и настройки протоколов IC-IC или CoMP для оптимальной работы сети.

Полоса 5 МГц

При выборе данной ширины полосы частоты с точки зрения электромагнитной совместимости наблюдаются следующие особенности:

- 1) наибольшая дальность радиосвязи (по сравнению с полосой 10 МГц);
- 2) возможность устранения помех на интерференцию;
- 3) запас по энергетике;
- 4) меньшая пропускная способность;
- 5) возможность индивидуального подбора конфигурации субкадров TDD;
- 6) резервирование на границах зоны обслуживания.

Следует отметить, что при работе системы LTE в диапазоне 1800 МГц на железнодорожном транспорте все БС сети могут работать только в двух режимах: только «на прием» или только «на передачу».

Переход на работу в полосе 5 МГц дает два номинала частот, что несколько упрощает проблему ЭМС.

Для более наглядного примера работы БС, а также влияния помех на зоны обслуживания представим расчет без учета рельефа местности (конфигурация субкадра «0»). На рис. 2 показана скорость передачи по нисходящей линии для ситуации, когда на всем участке работает только одна БС. В данных условиях удовлетворяются все требуемые для построения сети условия. На рис. 3 представлена скорость передачи по нисходящей линии, когда все БС участка включены «на передачу». В этой ситуации размер зоны обслуживания существенно сократился, т.е. видно влияние других секторов БС этой сети. Данная ситуация показывает, что на большей части территории будет использована модуляция QPSK, которая существенно снижает пропускную способность системы.

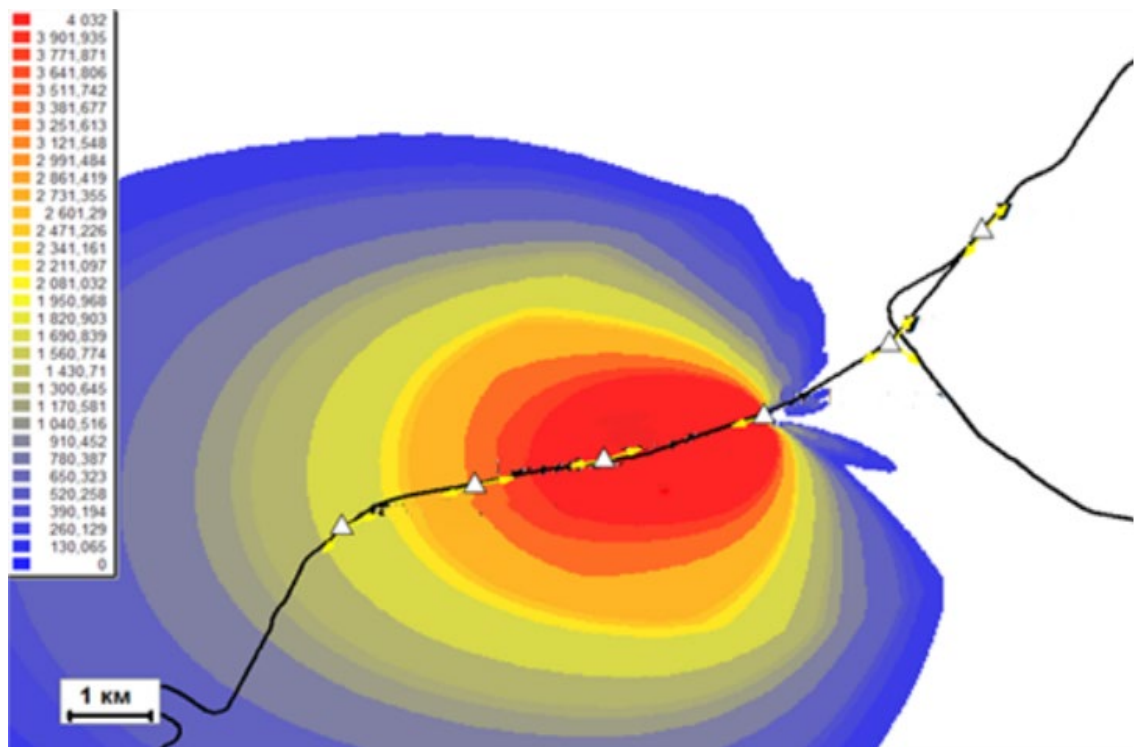


Рис. 2. Работа системы в полосе 5 МГц при работе только «на прием»

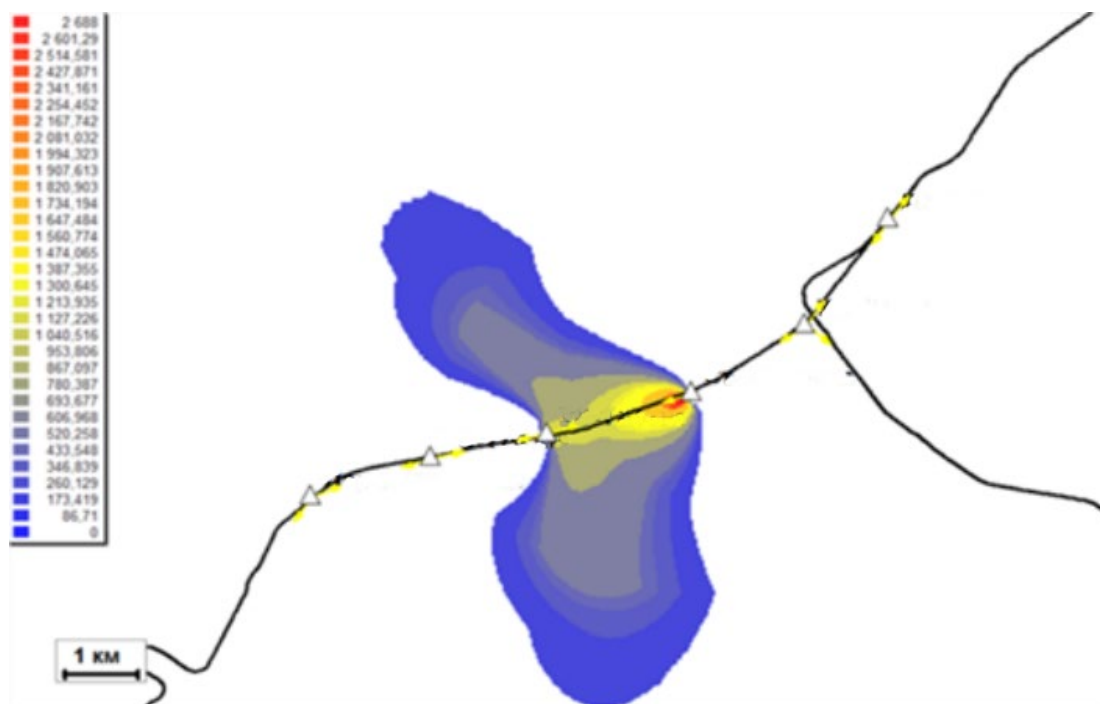


Рис. 3. Работа системы в полосе 5 МГц при работе только «на передачу»

Данная модель применима в ситуациях, когда по результатам частотно-территориального планирования (ЧТП) было получено, что на данном участке

целесообразно применять канал с шириной полосы 5 МГц [4-5].

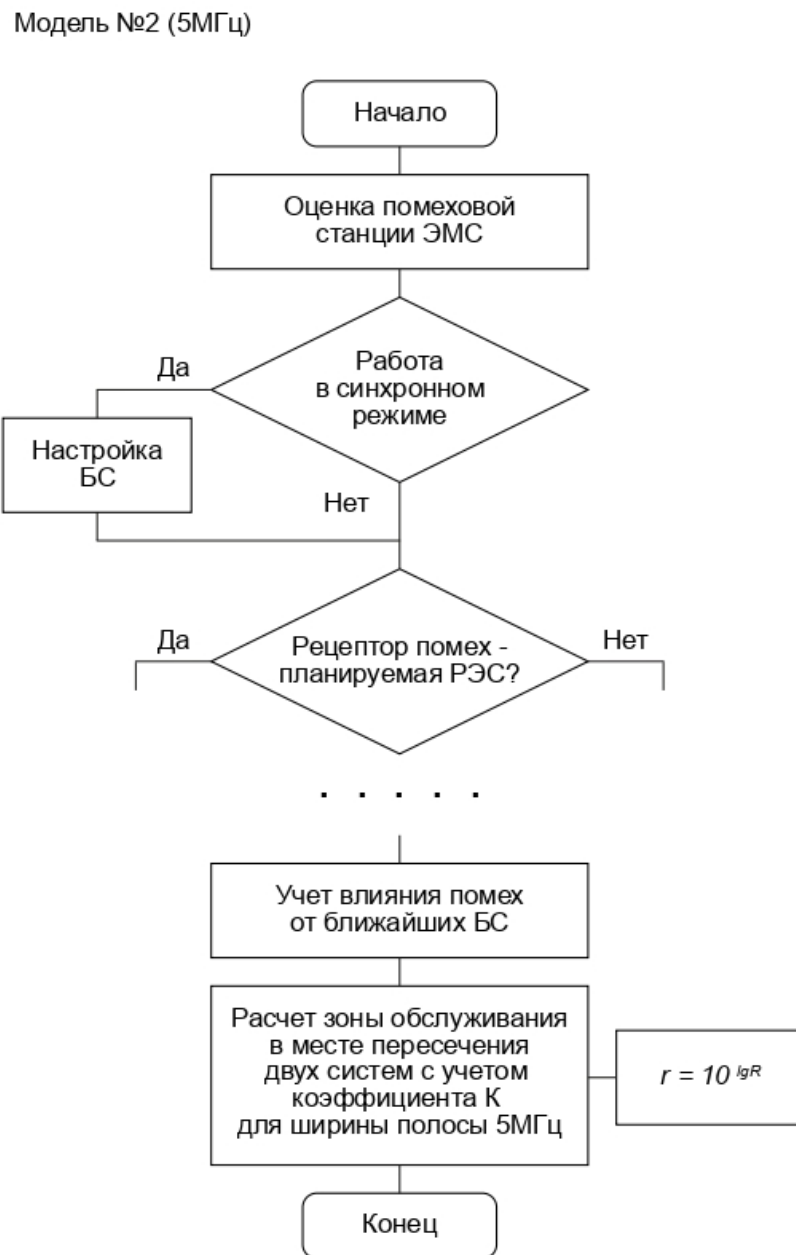


Рис. 4. Схема алгоритма работы Модели проектирования

Модель имеет несколько особенностей построения (рис. 4).

1. Возможность применения синхронного режима работы базовых станций.

Смысл синхронного режима в том, что ближайшие БС начинают передавать абоненту один и тот же контент. Тогда можно считать что БС,

передающие один и тот же поток информации, не создают на входе абонентской станции (АС) помех.

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.

Также сеть может работать и в классическом режиме.

2. При расчете зоны обслуживания в месте пересечения двух цифровых систем применяется коэффициент K для ширины полосы частоты 5 МГц. Данный коэффициент разработан для математического расчета перехода на использование полосы шириной, отличной от ширины полосы работы системы (к примеру, сеть работает в полосе 10 МГц, а место пересечения проектируется для полосы 5 МГц). Соответственно, при применении другого значения коэффициента будет изменен радиус зоны обслуживания и зона Handover [6-9].

Представим пример расчета зоны обслуживания для Модели проектирования в классическом режиме работы сети.

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 = 0,04 дБ/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 – параметр системы = 1,65;

D – параметр системы = 9,59.

$$\begin{aligned}lgR &= (10P_{\Pi} + 30 - \alpha_{\text{пер}} - l * \alpha_l + K_y - 69.55 - 26.16 \log f_{\text{нec}} + 13,82h_{\text{БС}} \\ &+ a(h_2) + 2 \log \frac{f_{\text{нec}}}{28} + 5.4 - K - A * D - P_{\text{пор}} + K_y) / (44,9 \\ &- 6,55 \log h_{\text{БС}})) \\ &= (10 * 20 + 30 - 7 - 50 * 0,04 + 12 - 69,55 - 26,16 \log 1800 \\ &+ 13,82 * 25 + 10,125 + 2 \log \frac{1800}{28} + 5.4 - 5 - 1.65 * 9.59 - (-92) \\ &+ 12) / 44.9 - 6.55 \log 25 = 0.175\end{aligned}$$

Отсюда получаем радиус зоны обслуживания $r = 10^{lgR} = 1,5$ км.

Важно отметить, что все исследования проводились для полосы 5 МГц и конфигурации субкадра TDD № 1.

Рассчитаем зоны обслуживания в месте пересечения двух цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи с применением Модели проектирования при помощи компьютерного моделирования (рис. 5).

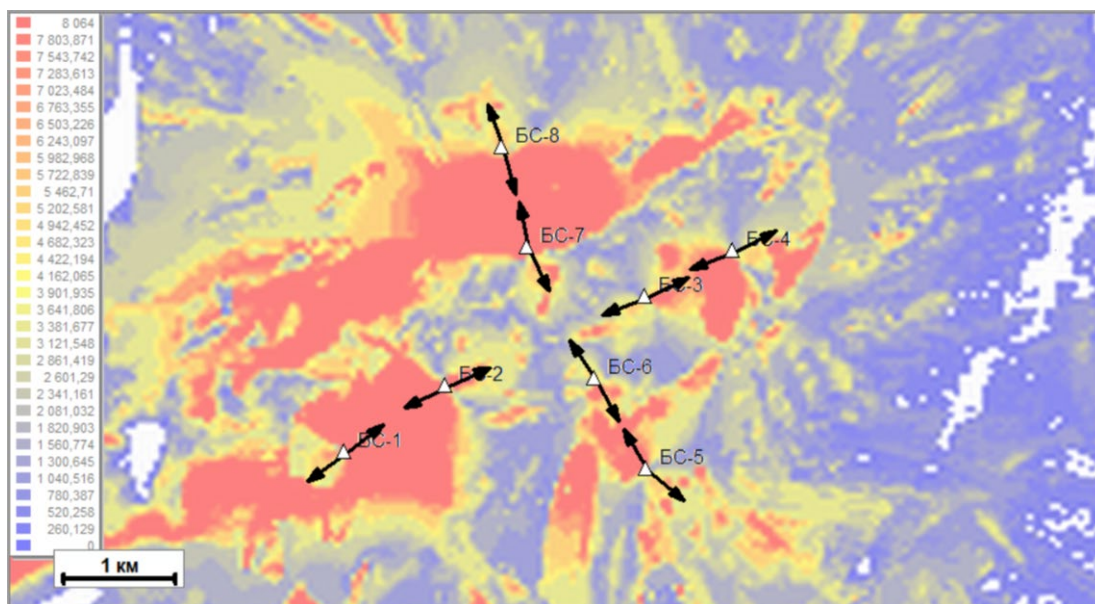


Рис. 5. Зона обслуживания в месте пересечения с применением Модели № 2 (5 МГц)

Полосы 3 МГц и 1.4 МГц

При выборе данных номиналов будут наблюдаться более высокая дальность радиосвязи, но наименьшая пропускная способность, которая не

позволит передавать объемные данные по радиоканалу.

Использование данных номиналов позволит «разбивать» систему на группы частот, что благоприятно с точки зрения ЭМС. Пример показан на рис. 6.

Такой метод будет применим лишь в частных случаях. Например, в ситуации пересечений с другими ЦСТР или в других случаях, в связи со «сложной обстановкой ЭМС».

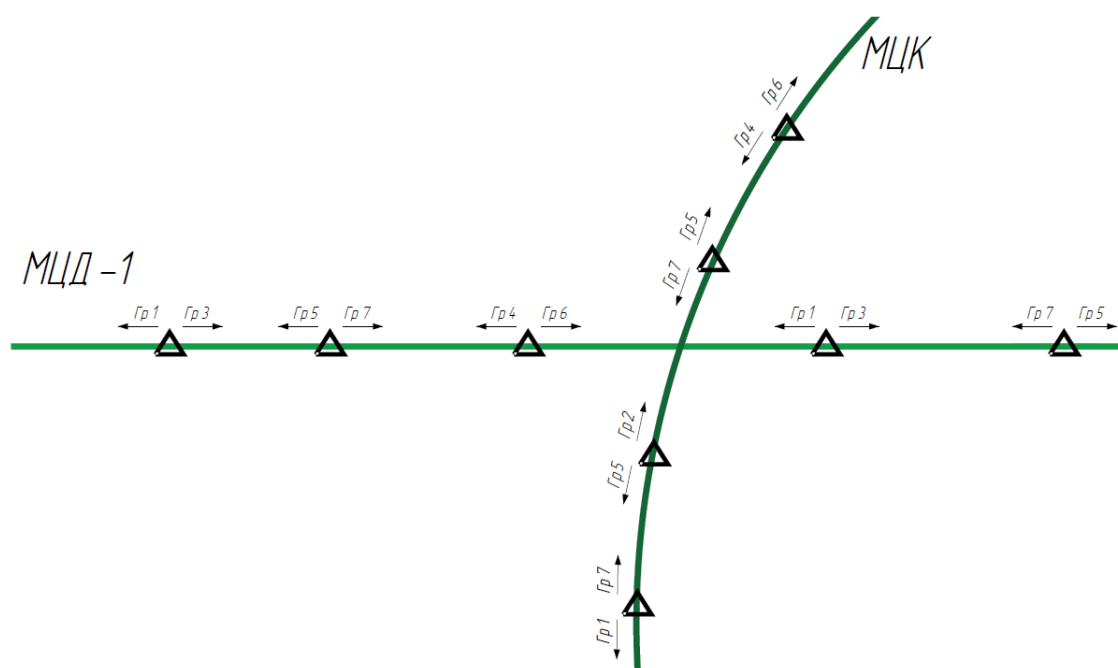


Рис. 6. Пример распределения частот по группам

Заключение

В статье были рассмотрены и проанализированы преимущества и недостатки для вариантов использования ширины полосы частоты 1.4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, а также особенности модели проектирования пересечения двух смежных технологических сетей железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD с использованием ширины полосы 5 МГц, рассчитана и промоделирована зона обслуживания БС в месте пересечения с применением Модели проектирования.

По результатам расчетов и моделирования можно сказать, что Модель проектирования применима в необходимых случаях.

Также применение одного из вариантов ширины полосы частоты необходимо в зависимости от исходных данных для проектирования, ситуации ЭМС на проектируемом участке и требуемой пропускной способности системы.

Выбор ширины полосы частот представляет собой компромисс между пропускной способностью и устойчивостью сети. Использование максимальной полосы 10 МГц, хотя и обеспечивает наибольшую теоретическую пропускную способность, на практике приводит к значительным сложностям: резкому росту интерференционных помех, сокращению дальности связи, необходимости применения сложных механизмов координации (ICIC, CoMP) и, как следствие, к потенциальной деградации реальной производительности сети на пересекающихся участках.

Разработанная Модель проектирования для полосы 5 МГц является эффективным инструментом для планирования сетей в сложных условиях, особенно в зонах пересечения двух систем. Её ключевые преимущества – возможность применения синхронного режима работы базовых станций для подавления помех и использование специального поправочного коэффициента (К) для точного расчета зон обслуживания и хэндовера. Модель предоставляет инженерам структурированный алгоритм (схему) выбора конфигурации сети, основанный на результатах частотно-территориального планирования.

Таким образом, для надежного функционирования современных технологических сетей радиосвязи на высокоскоростных железнодорожных магистралях в стандарте LTE-1800 TDD приоритетным является выбор полосы 5 МГц. Применение разработанной методики и соответствующей Модели проектирования позволяет системно решать проблему интерференции на пересекающихся участках, обеспечивая требуемое качество обслуживания, устойчивость связи и эффективное использование выделенного частотного

ресурса. Данный подход формирует основу для создания безопасной и надежной инфраструктуры связи, соответствующей возрастающим требованиям к цифровизации железнодорожного транспорта.

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. О выделении полосы радиочастот 1785-1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте: Решение ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г. // Гарант.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/72061770/>.
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. Пример модели планирования цифровой сети технологической радиосвязи в стандарте LTE-1800 TDD // XXXI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2025), посвященная 130-летию изобретения радио. – 2025. – Т. 2. – С. 285-289.
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. // Электронный научный журнал «Век качества». – 2025. – № 3. – С. 183-197. – Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2025/325012.pdf>.
6. Лобеев, Д.П., Билятдинов, К.З. Основы разработки и совершенствования моделей и алгоритмов проектирования сетей связи стандарта LTE-1800 TDD. // Электросвязь. – 2025 – № 10. – С. 72-77.

7. 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.
8. Лобеев, Д.П. О разработке и применении методики оптимизации использования частотного спектра при проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11, № 6. – С. 53-61.
9. 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>.

Specifics of the Methodology and Design Model for LTE-1800 TDD Railway Networks in High-Speed Operation

Lobeev Dmitry Petrovich,

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

The article addresses the problem of designing technological networks for railway radio communication based on the LTE-1800 TDD standard under high-speed motion conditions, especially in areas where two adjacent systems intersect. Within the framework of the SCRF (State Commission for Radio Frequencies) Decision, which stipulates the use of 1.4, 3, 5, and 10 MHz bands, a comparative analysis of various configurations is conducted.

Key aspects in developing a methodology for optimizing the use of the frequency resource when designing technological railway radio communication systems of the LTE-1800 TDD standard are considered, namely the selection of the frequency bandwidth at which the system will operate. The choice of bandwidth is one of the most important points in the algorithm of the frequency spectrum optimization methodology. The future operability of the digital system for technological railway radio communication of the LTE-1800 TDD standard depends on the selected bandwidth.

It is shown that the use of the maximum 10 MHz band, despite its high peak throughput, leads to serious electromagnetic compatibility issues: increased interference, reduced communication range, and the need to apply complex coordination algorithms, which can ultimately reduce the network's actual performance.

Narrow bands (1.4 and 3 MHz) provide greater range but are unacceptable due to insufficient throughput for the tasks of high-speed mainlines.

Furthermore, this work examines a specialized radio network design model intended for use in cases where frequency-territorial planning indicates the advisability of using a channel with a 5 MHz bandwidth. Under conditions of limited frequency spectrum use, this model has a number of features that allow for the optimization of frequency spectrum utilization for technological railway radio communication networks of the LTE-1800 TDD standard.

Keywords: radio communication network design, radio frequency spectrum, high-speed railway line, LTE-1800 TDD, technological radio communication networks, radio communications, frequency bandwidth, electromagnetic compatibility.