

Научная статья

УДК 654.16

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-53-61>

EDN:RTUYN



О разработке и применении методики оптимизации использования частотного спектра при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD

✉ Дмитрий Петрович Лобеев¹, lobeev1@mail.ru✉ Камиль Закирович Билятдинов², inib@pgups.ru

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность обусловлена одновременно техническими, отраслевыми и регуляторными факторами. Технологическая радиосвязь – базовый элемент обеспечения безопасности и управляемости движением поездов; при этом действующие решения на базе GSM-R достигают пределов по пропускной способности и функциональности. Дефицит и фрагментация спектра в диапазоне 1800 МГц, а также необходимость его совместного использования с иными радиосетями диктуют потребность в спектрально эффективных методиках планирования и снижении взаимных помех. Существующие практики радиопланирования слабо адаптированы к особенностям железных дорог, что повышает риски недополучения покрытия и невыполнения нормативов по задержкам. Предлагаемая в работе комплексная методика для LTE-1800 TDD обеспечивает измеримое снижение взаимных помех, расширение зон устойчивой связи, выполнение требований по задержке и рациональное использование радиоспектра. Тем самым тема имеет высокую практическую значимость для проектирования железнодорожных участков и поэтапной миграции к FRMCS/5G. Основная **цель исследования** состоит в разработке и обосновании комплексной методики проектирования технологических сетей железнодорожной радиосвязи на базе стандарта LTE-1800 TDD при ограниченном частотном ресурсе и жестких требованиях к надежности и задержкам.

Результаты: достигнуто снижение взаимных помех до 30 %, увеличение радиуса устойчивой связи до 15 % за счет оптимизации антенных систем, гарантировано выполнение требований к задержке сигнала <50 мс для систем управления; показана эффективность адаптивного выбора ширины полосы. Адаптивное многоэтапное планирование LTE-1800 TDD для технологической радиосвязи на железной дороге обеспечивает измеримое улучшение помехоустойчивости, покрытия и задержек при ограниченном спектре и может служить практическим стандартом проектирования.

Научная новизна: предложена интегрированная методика с адаптивным ветвлением и набором прикладных поправочных коэффициентов для железнодорожной среды, обеспечивающая совместное выполнение требований по задержкам, устойчивости и спектральной эффективности при дефиците частотного ресурса.

Практическая значимость: методика внедрена в реальное проектирование, повышая надежность критических сервисов и эффективность использования спектра.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, LTE, высокоскоростные магистрали, проектирование технологических сетей радиосвязи, радиосвязь

Ссылка для цитирования: Лобеев Д.П., Билятдинов К.З. О разработке и применении методики оптимизации использования частотного спектра при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 53–61. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-53-61. EDN:RTUYN

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-53-61>

EDN:RTUYNI

Development and Application of a Methodology for Optimizing Frequency Spectrum Usage in the Design of LTE-1800 TDD Radio Access Networks

 **Dmitriy P. Lobehev**¹ ✉, lobeev1@mail.ru **Kamil Z. Bilyatdinov**², inib@pgups.ru

¹Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I,
St. Petersburg, 190031, Russian Federation

²Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation

Annotation

Relevance of the research topic is simultaneously driven by technical, industry, and regulatory factors. First, mission-critical operational radiocommunications are a fundamental element in ensuring the safety and controllability of railway infrastructure; at the same time, current GSM-R-based solutions are reaching their limits in capacity and functionality. Second, spectrum scarcity and fragmentation in the 1785–1805 MHz band, as well as the need for its coexistence with other radio networks, necessitate spectrally efficient planning methods and the reduction of mutual interference. Existing radio planning practices are generally poorly adapted to the specifics of railways, increasing the risks of coverage shortfalls, degradation of handover performance, and failure to meet latency regulations. The comprehensive methodology proposed in this study for LTE-1800 TDD delivers measurable reductions in mutual interference, expands zones of reliable coverage, ensures compliance with <50 ms latency for critical services, and enables rational use of scarce spectrum. Accordingly, the topic has high practical relevance for the modernization of existing lines, the design of new sections, and the phased migration to FRMCS/5G.

The main objective of the study is to develop and substantiate a comprehensive methodology for designing digital systems of operational railway radiocommunications based on the LTE-1800 TDD standard under limited spectrum resources and stringent requirements for reliability and latency.

Results: mutual interference reduced by up to 30 %, the radius of reliable coverage increased by up to 15 % through antenna system optimization, guaranteed compliance with <50 ms signal delay requirements for control systems; the effectiveness of adaptive bandwidth selection is demonstrated. Adaptive multi-stage LTE-1800 TDD planning for operational railway communications delivers measurable improvements in interference immunity, coverage, and latency under spectrum constraints and can serve as a practical design standard.

Scientific novelty: an integrated methodology with adaptive branching and a set of application-specific correction factors for the railway environment is proposed, ensuring simultaneous fulfillment of latency, robustness, and spectral efficiency requirements amid spectrum scarcity.

Practical significance: the methodology has been implemented in real-world design practice, improving the reliability of critical services and the efficiency of spectrum use.

Keywords: railway transport, LTE, high-speed highways, radio access network design, radio communications

For citation: Lobehev D.P., Bilyatdinov K.Z. Development and Application of a Methodology for Optimizing Frequency Spectrum Usage in the Design of LTE-1800 TDD Radio Access Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(6):53–61. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-53-61. EDN:RTUYNI

Введение

Развитие цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи на основе стандарта

LTE-1800 TDD стало ключевым фактором повышения безопасности и эффективности обеспечения движением поездов [1, 2]. Однако проектиро-

вание таких систем сталкивается с комплексными вызовами:

1) ограниченность частотного ресурса (диапазон 1785–1805 МГц регулируется Решением ГКРЧ № 18-46-02 от 11.09.2018 г., разрешающим полосу не более 10 МГц);

2) взаимные помехи в зонах пересечения смежных сетей;

3) жесткие требования к задержкам сигнала (<50 мс для систем управления) и пропускной способности (видеонаблюдение, телеметрия) [3, 4].

В условиях роста скоростных магистралей и плотности движения традиционные подходы к проектированию не обеспечивают устойчивой радиосвязи [5]. Неоптимальный учет электромагнитной совместимости (ЭМС), рельефа местности или типа трафика приводит к обрывам каналов связи, снижению скорости передачи данных и рискам для обеспечения безопасности движения.

Целью работы является разработка оптимальной и адаптивной методики проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD, оптимизирующей использование частотного спектра и гарантирующей бесперебойность связи, решающей задачи развертывания и модернизации цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи в условиях сложного частотного рельефа и регуляторных ограничений. Методика обеспечивает рациональное использование ограниченного частотного ресурса, снижение времени задержки передачи сигналов автоматизированного управления и увеличение зоны обслуживания базовой станции (БС). Кроме того, предлагаемая методика является основой для разработки аналитической модели технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD, которая в свою очередь применяется как компонент компьютерного моделирования работы сети в различных условиях, что существенно повышает качество реальных сетей железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие задачи.

Задача 1. Создание алгоритма анализа проектных условий с учетом:

- топографии местности (городская застройка, открытое пространство и др.);
- помеховой обстановки (включая пересечения со смежными цифровыми системами);
- нормативных ограничений.

Задача 2. Разработка системы расчета параметров сети:

- потерь в антенно-фидерных трактах (АФТ);
- коэффициента ошибок передачи;
- зон обслуживания БС и Handover.

Задача 3. Внедрение ветвящейся логики выбора режимов работы (этапы V–VIII) в зависимости от:

- требуемой пропускной способности;
- необходимости георезервирования ядра;
- уровня электромагнитных помех и др.

Задача 4. 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 БС часто абстрагируется от реального рельефа местности.

Предлагаемая методика устраняет данные недостатки за счет интеграции географических частотных и аппаратных параметров, жесткой привязки к стандарту ГОСТ Р 55892-2018, а также – адаптации под сценарии «сложной обстановки ЭМС».

Задача 5. Детальное описание методики.

Структура методики состоит из 8 этапов с ветвлениями на этапах IV–VIII.

Этап I. Анализ проектируемого участка

На этом этапе производится оценка рельефа с применением поправочного коэффициента – для городской застройки используются формулы, учитывающие высоты БС, протяженность трассы и несущую частоту; расчет интегральных помех при пересечении диапазонов.

Далее выявляются точки пересечения со смежными системами, работающими в одинаковых стандартах на аналогичной частоте.

Этап II. Сбор исходных данных

Выполняется классификация типов трафика (таблица 1), расчет коэффициента ошибок и моделирование потерь в АФТ.

ТАБЛИЦА 1. Задержки в зависимости от типа данных

TABLE 1. Latency Variation by Traffic Type

Тип данных	Требования к задержке, мс	Примеры
Критичный	<50	Управление движением
Стандартный	50–200	Голосовая связь
Фоновый	>200	Видеоархивирование

Этап III. Оценка пропускной способности

Ключевые критерии оценки пропускной способности:

- скорость передачи данных;
- потери пакетов: допустимый порог составляет не более 1 %;

– SINR (аббр. от англ. Signal to Interference + Noise Ratio – отношение сигнал на помеху + шум): минимальное значение 15 дБ;

– ширина полосы частоты: ограничена 10 МГц (ГКРЧ).

Этапы IV–VIII. Адаптивное проектирование

Предполагается несколько сценариев развития в зависимости от требований к проектируемой системе.

Сценарий 1. Низкие требования к системе

Выбор варианта ширины полосы частоты 1,4, 3 или 5 МГц (Этап V), далее произвести расчет зоны обслуживания БС, а затем определение зоны Handover.

Сценарий 2. Для высокоскоростных магистралей

На этапе VI делается выбор ширины полосы частоты (5/10 МГц с учетом необходимости георезервирования ядра), затем на этапе VII делается вывод о необходимости применения технологии скоординированной многоточечной передачи CoMP (аббр. от англ. Coordinated Multi-Point) для синхронизации сот.

Сценарий 3. «Сложная обстановка ЭМС»

На этапе VIII производится активация «оптимального» режима работы сети – разделение приема-передачи для подавления помех.

Научная новизна данной методики связана с:

– ветвящейся архитектурой методики, где этапы V–VIII динамически адаптируются под результаты этапов I–IV;

– «оптимальным» режимом работы сети для условий сильных помех, снижающим интерференцию до 40 % и улучшающим SINR до 19 дБ на горных участках;

– интеграцией технологии CoMP в этап VII, повышающей пропускную способность на участках со скоростями свыше 250 км/ч, а также снижение задержки управления на 30 %.

Для высокоскоростных магистралей обязательным является этап VII. В зонах с высоким уровнем помех ЭМС – приоритет этапа VIII. Рекомендуется проводить калибровку поправочных коэффициентов каждые 6 месяцев.

Алгоритм методики

Для организации работы сети и эффективного использования частотного спектра при проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD была разработана методика оптимизации использования частотного ресурса.

Данная методика имеет сложную структуру и включает в себя множество операций и алгоритмов для создания работоспособной и высокоэффективной сети – исследование проектируемого участка; анализ исходных данных, предъявляемых к проектируемой сети; предварительный расчет

критериев пропускной способности; выбор ширины полосы частоты с последующим выбором режима работы сети.

В зависимости от данных, полученных в результате I–IV этапов предлагаемой методики, действия могут варьироваться:

– на V этапе осуществляется поиск приемлемой ширины полосы пропускания, с последующим выбором режима работы и расчетом зон обслуживания и Handover;

– на VI этапе производится выбор ширины полосы пропускания, с последующими операциями по настройке сети;

– на VII этапе рассчитываются зоны обслуживания и Handover, а также выбирается режим TDD (формируется методика);

– на VIII этапе производится выбор режима работы сети в зависимости от ситуации ЭМС с последующим расчетом зон обслуживания и Handover, а также – выбор режима TDD (формируется методика).

Этапы методики

Этап I включает в себя следующие операции: исследование характера рельефа местности, анализ и расчет помех на рассматриваемом участке, а также наличие точек пересечения со смежными системами, работающих в этом же частотном диапазоне. Схематично данный этап представлен на рисунке 1.

Исследование характера рельефа местности подразумевает собой выделение конкретной трассы и применение определенного коэффициента в зависимости от ее типа: городская застройка, сельская местность, свободное пространство и др. [6, 7].

Поправочный коэффициент для городской застройки определяется по выражению:

$$L_p = 4.56 - 13.82 \lg(h_{\text{БС}}) + 53.73 \lg(f) - [1.1 \lg(f) - 0.7 * h_{\text{АС}} - 4.78 [\lg(f)]^2 + [44.9 - 6.55 \lg(h_{\text{БС}})] \lg(d)]. \quad (1)$$

где $h_{\text{БС}}$ – высота базовой станции; f – частота радиоволны; $h_{\text{АС}}$ – высота абонентской станции; d – протяженность трассы.

На этапе I производится отбор радиоэлектронных средств (РЭС) по частотному критерию (выбираются все РЭС, использующие передающие полосы частот, пересекающиеся с приемными полосами частот рецептора помех):

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

где $B_{(-Nt)}$ – ширина спектра помехи с учетом маски спектра по уровню –60, –50, 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).

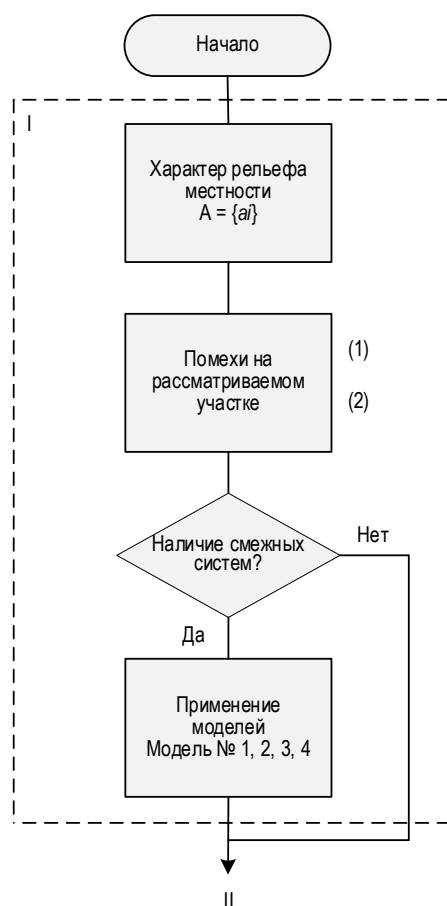


Рис. 1. Этап I методики

Fig. 1. Stage I of the Methodology

Формулы (1, 2) уже включены в поправочные коэффициенты в зависимости от характера рельефа местности, которые формируются, исходя из влияния помех на рассматриваемом участке.

Также помехи могут вноситься от смежных систем, работающих в местах пересечений двух диапазонов. Чтобы избежать потерь пропускной способности и обрывов каналов связи, были разработаны модели проектирования цифровых систем в местах пересечения со смежными цифровыми системами технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD. 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: длинная (более 10 км) и короткая (до 10–15 км).

Согласно заданию, на стадии проектирования необходим сбор исходных данных. Их сбор предусмотрен этапом II. Первоначально необходимо

узнать тип данных, которые необходимо будет передавать в проектируемой сети. Как правило, основными типами являются голос и речь, данные, информационно-управляющие сигналы. Также могут применяться видеопередача, местоположение поезда на участке, аудиотрансляция и др. [8] (рисунок 2).

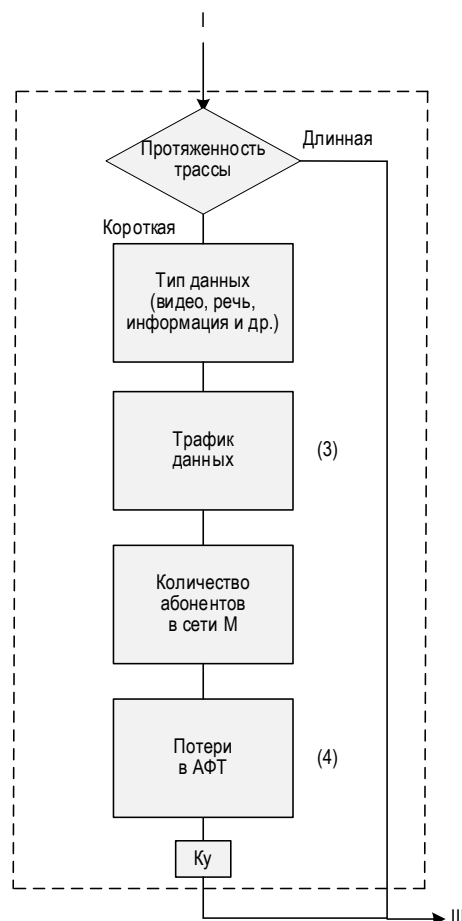


Рис. 2. Этап II методики

Fig. 2. Stage II of the Methodology

Опираясь на тип передаваемых данных, можно рассчитать коэффициент ошибок при передаче в зависимости от объема данных (трафик данных):

$$K_{\text{ош}} = \frac{N_{\text{ош}}}{N}, \quad (3)$$

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.

Далее можно рассчитать потери в АФТ, для чего можно применить одну из стандартных формул:

$$W_{\text{АФТ}} = W_c * L + W_{\text{сс}} * N + W_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где W_c – погонное затухание сигнала в кабеле на рабочей частоте (дБ/м); L – длина кабеля (м);

$W_{сс}$ – потери в разъеме (дБ); N – количество разъемов (шт.); $W_{доп}$ – потери в дополнительном АФТ (дБм).

При этом важно ориентироваться на оборудование, которое будет использовано при проектировании цифровой системы технологической железнодорожной радиосвязи, так как у любого устройства будут свои поправочные коэффициенты, которые будут влиять на изменение параметров расчета (например, коэффициент усиления антенны).

После получения и формирования исходных данных необходимо провести предварительный расчет критериев пропускной способности. Это будет происходить на следующем этапе методики.

Этап III является одним из ключевых. Выделяются 4 критерия оценки пропускной способности (рисунок 3).

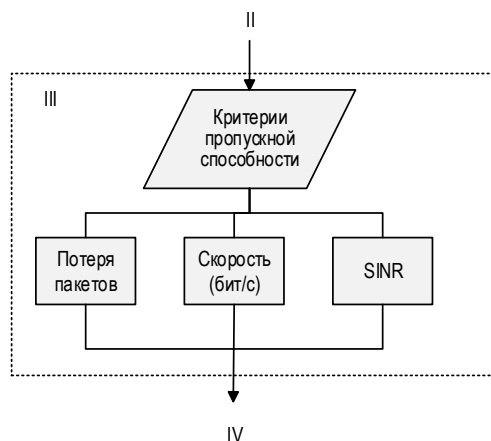


Рис. 3. Этап III методики

Fig. 3. Stage III of the Methodology

Скорость передачи данных для технологии LTE – главная особенность, поскольку именно из-за нее данная технология является самой перспективной при проектировании. При оценивании пропускной способности важно знать процент потери пакетов, которые не были доставлены при передаче [9]. Также весомым критерием является SINR. Его положительное значение 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 [10]. Ключевым критерием для данной методики является ширина полосы пропускания. Согласно стандарту LTE, возможно 6 вариантов используемой полосы: 1.4, 3, 5, 10, 15 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 будут рассмотрены на следующих этапах методики.

Этап IV включает в себя несколько этапов, так как является основополагающим при реальном проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD. 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–VIII зависят лишь от выбора, сделанного по результатам предыдущих этапов, и не могут выполняться одновременно. Именно поэтому они включены в общий этап IV (рисунок 4).

В случае, если проектируемый участок не требует высоких скоростей передачи данных и обладает стандартными требованиями по типу и объему данных, можно перейти к этапу V и выбрать один из вариантов ширины полосы частоты (1.4, 3 или 5 МГц).

После выбора ширины полосы частоты следует расчет зоны обслуживания БС по формуле (5), 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); $f_{\text{нec}}$ – 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).

Из выражения (5) получаем радиус зоны обслуживания:

$$r = 10^{\lg R}. \quad (6)$$

После расчета зоны обслуживания БС следует расчет зоны Handover по формуле [11]:

$$r_{\text{HO}} = 2 * r - 0.15 * r, \quad (7)$$

где r – длина зоны обслуживания БС в месте пересечения двух смежных технологических сетей радиосвязи (км); $0.15 * r$ – зона перекрытия, 15 % перегона (км).

$$\lg R = \frac{(10P_{\Pi} + 30 - \alpha_{\text{пер}} - l * \alpha_l + K_y - 69.55 - 26.16 \lg f_{\text{нec}} + 13.82 h_{\text{БС}} + a(h_2) + 2 \lg \frac{f_{\text{нec}}}{28} + 5.4 - K - A * D - P_{\text{ПОР}} + K_y)}{(44.9 - 6.55 \lg h_{\text{БС}})} \quad (5)$$

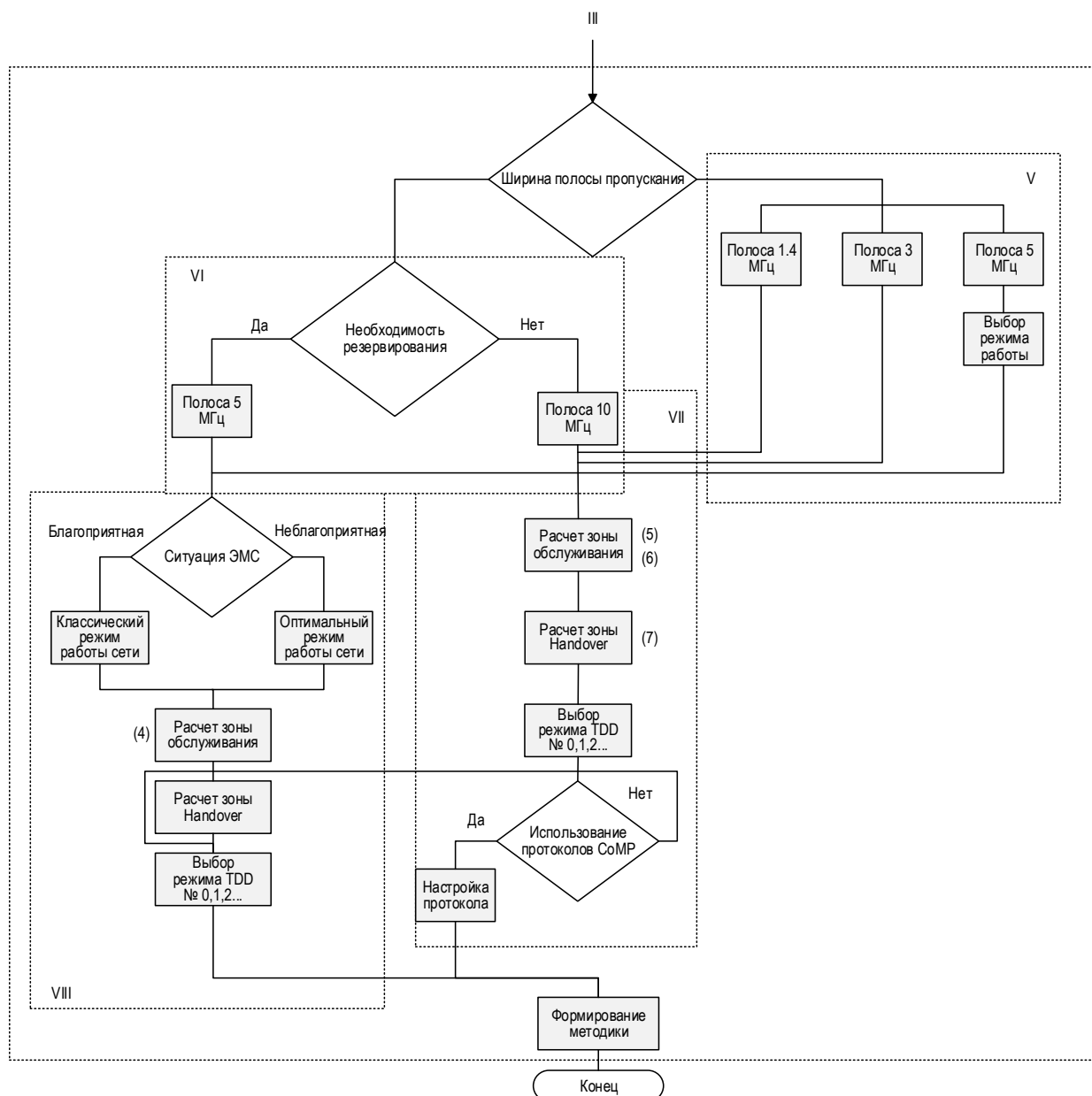


Рис. 4. Этап IV–VIII методики
Fig. 4. Stage IV–VIII of the Methodology

Далее следует выбор варианта конфигурации TDD, исходя из аналитики использования трафика. Как правило, на высокоскоростных магистралях необходимо проектировать более «сложные» трассы, обладающие повышенными скоростями передачи данных и нагрузкой на сеть, подобные варианты ширины полосы частоты будут наименее задействованы при проектировании [12]. Одним из условий проектирования цифровых систем технологической радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных магистралях является необходимость георезервирования ядра сети. Согласно требованиям по техническому заданию обеспечения георезервирования, допускается ширина полосы либо 5, либо 10 МГц. Данный выбор

производится на этапе VI 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.

При использовании ширины полосы 10 МГц (георезервирование ядра не требуется) происходит переход на этап VII. В него включены расчет зон обслуживания БС и Handover, а также выбор режима конфигурации TDD. При этом данный этап может включать применение и технологии скоординированной многоточечной передачи CoMP. После вывода об использовании / неиспользовании технологии выполняется настройка БС.

В случае необходимости георезервирования ядра сети и использования ширины полосы 5 МГц необходимо оценить ситуацию ЭМС на проектируемом участке. Если она благоприятная (нет поражающих факторов и внутренних помех системы), то используется классический режим работы сети в двух полосах по 5 МГц, работающих либо только на передачу, либо только на прием. В случае, если ситуация ЭМС критична (большое количество препятствующих факторов), то необходимо использовать «оптимальный» режим работы сети – усовершенствованный способ классического режима работы сети, являющийся «ключевой особенностью» предлагаемой методики проектирования. «Оптимальный» режим даст возможность «разнести» прием и передачу от БС, что существенно снизит помехи в системе и позволит увеличить дальность радиосвязи на обслуживаемом участке [13].

Вслед за выбором режима работы сети следует расчет зон обслуживания БС и Handover, а также выбор конфигурации TDD. Эти процессы происходят на этапе VIII.

После прохождения всех восьми этапов формулируется вывод о формировании методики и внедрении ее в эксплуатацию.

Заключение

Таким образом, в статье подробно описан алгоритм работы методики оптимизации использования частотного спектра при проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD. Данная методика рекомендована к использованию на железнодорожном транспорте (особенно при проектировании высокоскоростных железнодорожных магистралей), поскольку предполагает использование нескольких вариантов проектирования цифровой сети и оптимизирует самый редкий ре-

сурс – частотный, являющийся основополагающим для сетей стандарта LTE.

Методика решает триединую задачу: рациональное использование спектра, снижение уровня помех, гарантированный уровень качества обслуживания.

Дальнейшие рекомендации

Внедрение методики продемонстрировало весьма ощутимые показатели оптимизации, которые существенно улучшают работу системы.

Однако были выявлены некоторые недостатки: не учитывается динамическое перераспределение спектра в реальном времени; требуется ручной ввод данных геоинформационных систем.

Таким образом, можно сформулировать дальнейшие направления модернизации. Во-первых, создание экосистемы (совместно с искусственным интеллектом) для прогнозирования помех на базе цифровых двойников. Во-вторых, автоматизация сбора данных с датчиков подвижного состава.

Стоит отметить, что скорость движения поездов на высокоскоростной железнодорожной магистрали заявлена свыше 400 км/ч. Безусловно, при таких скоростях движения будет возникать доплеровский сдвиг частоты, который приведет к обрывам связи на железнодорожном участке, что критично для обеспечения безопасности движения поездов. На текущий момент установлено, что без компенсации негативного воздействия доплеровского сдвига частоты работа сети на заявленных скоростях невозможна. В связи с этим ведутся разработки такого способа, при котором было бы возможно нивелировать эффект Доплера, но для отечественного оборудования на данный момент решений не найдено. Поэтому предлагаемая методика должна быть усовершенствована рабочим способом компенсации негативного воздействия эффекта Доплера на скоростях свыше 400 км/ч.

Список источников

1. Росляков А. Поколения сетей фиксированной связи F1G-F5G. Часть 1 // Первая Миля 2022. № 8(108). С. 34–40. DOI:10.22184/2070-8963.2022.108.8.34.40. EDN:FHVQCW
2. Росляков А.В. Поколения сетей фиксированной связи F1G-F5G. Часть 2 // Первая Миля. 2023. № 1(109). С. 36–46. DOI:10.22184/2070-8963.2023.109.1.36.46. EDN:ODRGNG
3. Привалов А.А., Болдинов А.М., Привалов А.А. Математическая модель процесса передачи команд управления по радиоканалам автоматизированных систем // Информация и космос. 2023. № 4. С. 71–83. EDN:JQXUQN
4. Петров А.Г., Васильев М.Н. Роль автоматизированных систем управления на железнодорожном транспорте и всей транспортной системе страны // Специальная техника и технологии транспорта. 2023. № 18. С. 7–11. EDN:ISWFZT
5. Шнепс-Шнеппе М.А., Федорова Н.О., Суконников Г.В., Куприяновский В.П. Цифровая железная дорога и переход от сети GSM-R к LTE-R и 5G-R-состоится ли он? // International Journal of Open Information Technologies. 2017. № 1. С. 71–79. EDN:XNRUKL
6. Лобеев Д.П., Билятдинов К.З. Научно-технические предложения по проектированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD // Век качества. 2025. № 2. С. 301–312. EDN:VUBZLJ
7. Юркин Ю.В., Маслова А.А. Расчет зоны покрытия при проектировании сети мобильной связи // Автоматика. Связь. Информатика. 2024. № 8. С. 2–5. DOI:10.62994/AT.2024.8.8.001. EDN:QWVDND
8. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Юбилейное издание. СПб.:

Питер, 2024. 1008 с.

9. Скрынников В.Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. М.: Издательство «Спорт и Культура – 2000». 2012. 864 с. EDN:QMXKHV
10. Бабков В.Ю., Голант Г.З., Русаков А.В. Системы мобильной связи: термины и определения. М.: Горячая линия – Телеком, 2011. 160 с.
11. Лобеев Д.П., Роевков Д.Н. Особенности организации радиоканала в цифровых сетях технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. ПОПОВА, посвященная дню радио. 2024. № 1(79). С. 274–277. EDN:HEWVCO
12. Zhu X., Chen S., Hu H., Su X. TDD-based mobile communication solutions for high-speed railway scenarios // IEEE Wireless Communications. 2013. Vol. 20. Iss. 6. PP. 22–29. DOI:10.1109/MWC.2013.6704470
13. Тараненко А.Ю., Гриценко А.А., Лобеев Д.П. Оптимизация использования частотного спектра // Автоматика, связь, информатика. 2025. № 1. С. 9–12. DOI:10.62994/AT.2025.1.1.002. EDN:AUZIRU

References

1. Roslyakov A. Generations of fixed networks F1G-F5G. Part 1. *First Mile*. 2022;8(108):34–40. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2022.108.8.34.40. EDN:FHVCQW
2. Roslyakov A.V. Generations of F1G-F5G fixed networks. Part 2. *First Mile*. 2023;1(109):36–46. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2023.109.1.36.46. EDN:ODRGNG
3. Privalov A., Boldinov A., Privalov A. Mathematical model of the process of transmission of control commands over radio channels of automated systems. *Information and Space*. 2023;4:71–83. (in Russ.) EDN:JQXUQN
4. Petrov A.G., Vasiliev M.N. The role of automatic control systems in railway transport and the transport system of Russia. *Special equipment and transport technologies*. 2023;18:7–11. (in Russ.) EDN:ISWFZT
5. Schneps-Schneppe M.A., Fedorova N.O., Sukonnikov G.V., Kupriyanovsky V.P. Digital railway and the transition from the GSM-R network to the LTE-R and 5G-R – whether it takes place? *International Journal of Open Information Technologies*. 2017;1:71–79. (in Russ.) EDN:XNRUKL
6. Lobevev D.P., Bilyatdinov K.Z. Scientific and technical proposals for designing radio networks of the LTE-1800 TDD standard. *Age of Quality*. 2025;2:301–312. (in Russ.) EDN:VUBZLJ
7. Yurkin Yu.V., Maslova A.A. Calculation of coverage area when designing a mobile communication network. *Automation, Communications, Informatics*. 2024;8:2–5. (in Russ.) DOI:10.62994/AT.2024.8.8.001. EDN:QWVDND
8. Olifer V., Olifer N. *Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols. Anniversary Edition*. St. Petersburg: Peter Publ.; 2024. 1008 p. (in Russ.)
9. Skrynnikov V.G. *UMTS/LTE Radio Subsystems Theory and Practice*. Moscow: Sports and culture Publ., 2012. 864 p. (in Russ.) EDN:QMXKHV
10. Babkov V.Yu., Golant G.Z., Rusakov A.V. *Mobile Communication Systems: Terms and Definitions*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2011. 160 p. (in Russ.)
11. Lobevev D.P., Roenkov D.N. Features of the radio channel organization in digital networks of LTE standard technological railway radio communication. *Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg NTO RES Named after A.S. Popov, Dedicated to Radio Day*. 2024;1(79):274–277. (in Russ.) EDN:HEWVCO
12. Zhu X., Chen S., Hu H., Su X. TDD-based mobile communication solutions for high-speed railway scenarios. *IEEE Wireless Communications*. 2013;20(6):22–29. DOI:10.1109/MWC.2013.6704470
13. Taranenko A.Y., Gritsenko A.A., Lobevev D.P. Optimization of the use of the frequency spectrum in railway transport. *Automation, Communications, Informatics*. 2025;1:9–12. (in Russ.) DOI:10.62994/AT.2025.1.1.002. EDN:AUZIRU

Статья поступила в редакцию 14.09.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 08.10.2025.

The article was submitted 14.09.2025; approved after reviewing 24.09.2025; accepted for publication 08.10.2025.

Информация об авторах:

ЛОБЕЕВ
Дмитрий Петрович

аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
 <https://orcid.org/0009-0006-1256-4753>

БИЛЯТДИНОВ
Камиль Закирович

доктор технических наук, кандидат военных наук, профессор, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
 <https://orcid.org/0000-0003-4027-1449>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.