

## Проблемы организации радиотракта на участке высокоскоростной железнодорожной магистрали

С.М. Куценко<sup>1</sup>✉, Д.С. Чинаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «НПФ Беркут», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉kutsenko@pgups.ru

### Резюме

Реализация столь масштабного мероприятия как проектирование и строительство высокоскоростной магистрали не может быть осуществлена без средств связи. Несомненно, что в таком случае должны применяться самые современные средства связи, удовлетворяющие как с точки зрения эксплуатации инфраструктурных объектов и подвижного состава, так и обслуживания пассажиров. В России еще никогда массово в эксплуатационном режиме не обеспечивали сотовой связью подвижные объекты, перемещающиеся на скоростях от 250 до 400 км/ч. Естественно, радиотракт в этом случае необходимо реализовывать на современном стандарте сотовой связи LTE. Таким образом, проведение анализа основных факторов, влияющих на установление устойчивой связи на всем участке высокоскоростной магистрали, является актуальной задачей. В результате исследования определены проблемные вопросы для организации беспроводной связи при высоких скоростях движения (свыше 250 км/ч), такие как эффект Доплера, уровень сигнала, процесс обслуживания мобильных абонентов при переходе их от одной базовой станции к другой во время вызова или передаче информационных сообщений (хэндовер), а также анализ существующих решений реализации этих процессов ведущими российскими и всемирно известными производителями оборудования сетей 5G стандарта LTE. Практическая значимость исследования заключается в выработанных рекомендациях при управлении сетью связи на железнодорожном транспорте, а именно использование совместных ячеек между ближайшими ячейками сотовой связи посредством их объединения в одну логическую ячейку.

### Ключевые слова

сети сотовой связи, стандарт 5G, стандарт LTE, радиотракт, высокоскоростные железнодорожные магистрали, хэндовер, логическая ячейка

### Для цитирования

Куценко С.М. Проблемы организации радиотракта на участке высокоскоростной железнодорожной магистрали / С.М. Куценко, Д.С. Чинаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 31–39. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).31-39.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 26.08.2025 г.; поступила после рецензирования: 04.09.2025 г.; принята к публикации 05.09.2025 г.

## Problems of organizing of a radiotrack on a section of a high-speed railway line

S.M. Kutsenko<sup>1</sup>✉, D.S. Chinarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, the Russian Federation

<sup>2</sup>LCC «RPF Berkut», Saint Petersburg, the Russian Federation

✉kutsenko@pgups.ru

### Abstract

Implementation of such a large-scale project as the design and construction of a high-speed railway cannot be carried out without communication facilities. Undoubtedly, such a project should use the most modern communication facilities that satisfy both the operation of infrastructure facilities and rolling stock, and directly passengers. In Russia, mobile objects have never been provided with cellular communications in operational mode at speeds from 250 to 400 km/h. Naturally, the radio path in this case must be implemented on the currently modern LTE cellular communication standard. In this regard, conducting an analysis of the main factors influencing the organization of stable communications along the entire section of the high-speed railway is an urgent task. The results of the study are the definitions of problematic issues for organizing wireless communications at high speeds (over 250 km/h), such as the Doppler effect, signal level, the process of servicing mobile subscribers when transmitting them from one base station to another during a call or when transmitting information messages (handover) and the analysis of existing solutions for the implementation by leading Russian and world-famous manufacturers of 5G LTE network equipment. The practical significance of the study lies in the developed recommendations for organizing the management of a communication net-

work in rail transport, namely, using joint cells between the nearest cellular cells by combining them into one logical cell.

### Keywords

cellular networks, 5G standard, LTE standard, radio track, high-speed railways, handover, logical cell

### For citation

Kutsenko S.M., Chinarov D.S. Problemy organizatsii radiotrakta na uchastke vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali [Problems of organizing of a radiotrack on a section of a high-speed railway line]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. № 3(87). Pp. 31–39. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87)31-39.

### Article Info

Received: August 26, 2025; Revised: September 4, 2025; Accepted: September 5, 2025.

### Введение

В настоящий момент в России реализуется масштабный проект – строительство высокоскоростной магистрали (ВСМ), который позволит вывести сервис пассажирских перевозок на новый уровень. Одним из важных компонентов в предоставлении сервиса пассажирам, а также для управления поездом является надежный доступ к широкополосной системе связи. Не секрет, что на высоких скоростях существует проблема качественной беспроводной связи. Факторов, снижающих полезный уровень сигнала, много: многолучевое распространение радиоволн; эффект Доплера (для высоких скоростей); электромагнитные помехи и др. Существующие решения, применяемые на сети железных дорог компании ОАО «РЖД» для организации технологической связи, такие как радиостанции Ижевского радиозавода РС-46МЦ (диапазон гектометровых волн 2,130 и 2,150 МГц и метровых волн от 151,725 до 156 МГц) [1], радиостанции КБ Пульсар-Телеком (г. Пенза) РЛСМ-10 [2], поддерживающих стандарты DMR, GSM, радиостанции, поддерживающие стандарт TETRA на высоких скоростях, не апробированы. Известные технологические ограничения перечисленных радиостанций и стандартов и заявленные высокие требования к скорости передачи информации на проектируемом объекте не позволяют использовать существующие решения, а требования к показателям качества обслуживания, например таким как скорость передачи данных, коэффициент битовых ошибок, задержка при передаче информации и т.д., весьма высокие [3].

Кроме технологических аспектов необходимы и решения для пассажиров. Уже в ближайшем будущем мы все будем повсеместно пользоваться стандартом 5G. Более того, современные телекоммуникационные компании

(например, всемирно известная компания Huawei или российский научно-технический центр «Протей» [4]) уже разрабатывают решения с применением стандарта 5G, а, следовательно, логично, что новая система беспроводной связи будет построена на оборудовании 5G.

В связи с указанными требованиями возрастает ответственность столь масштабного строительства сети технологической связи, которое на многие годы будет определять тенденции ее (технологической связи) развития для эксплуатации инфраструктурных объектов и подвижного состава. Более того, данная технология позволяет реализовывать уже нарабатываемые решения по беспилотному управлению локомотивом.

Несмотря на то, что уже существуют переломные решения по данному вопросу, есть еще много «белых пятен», которые будут изложены в настоящем исследовании. В статье проанализированы проблемные вопросы при организации беспроводной связи на ВСМ, такие как уровень сигнала, эффект Доплера и работа хэндовера, а также изложено собственное видение авторов для решения обозначенных проблем.

Целью данного исследования является проведение анализа основных факторов, влияющих на организацию устойчивой связи на всем участке железнодорожного пути и выработка практических решений по реализации поставленных задач.

### Материалы и методы

Методология исследования основана на изучении научной литературы, материалов СМИ, презентационных материалов со всемирных выставок и конференций. В статье использованы такие методы, как системный подход, обобщение, анализ. Проведенный анализ основывается на сравнении существующих методов

организации сетей беспроводной связи на железных дорогах России и мира с действующими в настоящее время современными решениями и идеями для организации беспроводной связи на высокоскоростных магистралях. Также в работе проведено обобщение основных проблемных вопросов, влияющих на организацию беспроводной связи.

### Проблемные вопросы

При организации беспроводной передачи информации с применением сотовой связи (данная технология большинством разработчиков радиотрактов на железной дороге принята как основной вектор развития [4, 5]) необходимо решить следующие задачи:

- обеспечить приемлемую пропускную способность и надежность;
- минимизировать задержку при передаче информации;
- учесть экономический эффект (капиталовложения и эксплуатационные затраты).

Далее обсудим ряд факторов, влияющих на реализацию столь масштабного проекта.

**Эффект Доплера.** Данный эффект оказывает существенное влияние на уровень сигнала при движении объекта на высоких скоростях.

Влияние эффекта может провоцировать искажение принимаемого радиосигнала, что, в свою очередь, может привести к ошибкам при передаче информации. На рис. 1 приведена демонстрация эффекта. Если подвижный объект (подвижной состав) движется к неподвижному объекту (базовой станции), то наблюдается увеличение значения смещения частот относительно исходного сигнала (рис. 1, а). В противном случае смещение уменьшается (рис. 1, б).

На смещение частот также влияет и угол распространения радиоволн:

$$f_d = \frac{f}{c \cdot V \cdot \cos \alpha},$$

где  $c$  – скорость света;  $V$  – скорость подвижного состава;  $\alpha$  – угол между направлением подвижного объекта и направлением распространения радиоволн (рис. 2).

В настоящий момент в России только строится полигон для ВСМ и натурных экспериментов оценки эффекта Доплера для подвижного состава нет. В мире подобные оценки проведены. Например, авторы статьи [6] опубликовали результаты исследований характеристик распространения радиоволн на участке ВСМ «Гуанчжоу – Шэньчжэнь» в окрестности диапазона частот 2,4 ГГц. Полученные резуль-

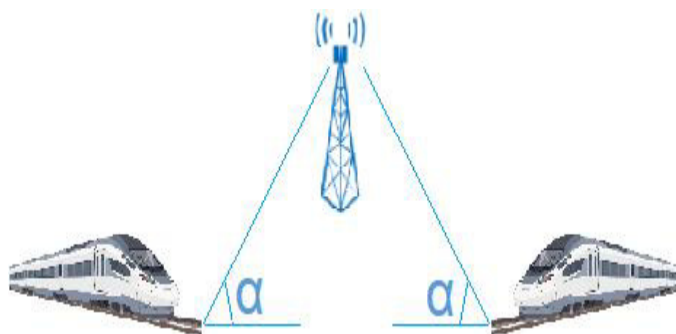


**Рис. 1.** Демонстрация эффекта Доплера ( $f$  – исходная частота,  $f_d$  – частота, регистрируемая неподвижным приемником):

увеличение (а) и уменьшение (б) значения смещения частот относительно исходного сигнала

**Fig. 1.** Demonstration of the Doppler effect ( $f$  – original frequency;  $f_d$  – frequency recorded by a stationary receiver):

increase (a) and reducing (b) in the frequency offset value of the relative source signal



**Рис. 2.** Влияние угла распространения радиоволн на значение смещения частоты

**Fig. 2.** The influence of the propagation angle of radio waves on the frequency shift value

таты они разделили на четыре вида в зависимости от рельефа местности (на данном участке железной дороги преобладает холмистая местность). Для каждого из четырех участков авторы предлагают разработать специальный радиоинтерфейс, учитывающий характеристики задержки и доплеровский сдвиг. Еще один пример: компания Huawei в своих технических решениях предлагает учитывать смещения частоты путем специального алгоритма (так называемая двухинтервальная оценка исходя из отклонения от кварцевого (эталонного) генератора). Принятие во внимание эффекта Доплера – это большой успех для реализации качественной передачи информации, но все же требуются эксперименты, тем более помимо эффекта Доплера на качественную передачу информации влияют и другие факторы.

**Уровень сигнала.** Для уверенного приема сигнала и обеспечения заявленной пропускной способности каналов связи одним из ключевых факторов для организации устойчивой связи является определение оптимального количества

базовых станций (рис. 3). Принимая во внимание разные источники, можно сделать общий вывод, согласно которому оптимальным считается расстояние от 1,5 до 3 км (диапазон зоны покрытия или диапазон соты) [3–5, 7–9].

В этом случае стоимость проекта зависит от количества базовых станций.

Помимо мощности излучателя, размещенного на базовой станции, на уровень сигнала (или отношение сигнал/шум, или сигнал/помеха) влияет многолучевое распространение радиоволн (рис. 4), где между передатчиком и приемником, помимо прямого луча (d1), распространяется посредством переотражения от препятствий и отраженный луч (d2). Этот важный фактор может существенно снижать уровень полезного сигнала и, как следствие, влиять на пропускную способность в канале связи. Для уменьшения влияния необходимо учитывать размещение инфраструктурных объектов и тщательно настраивать антенно-фидерные устройства базовых станций.

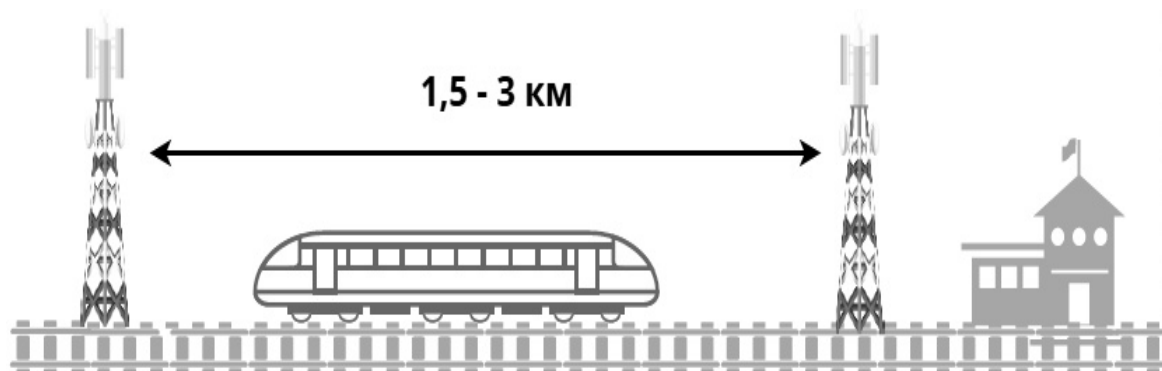


Рис. 3. Определение оптимального расстояния между базовыми станциями

Fig. 3. Determining the optimal distance between base stations

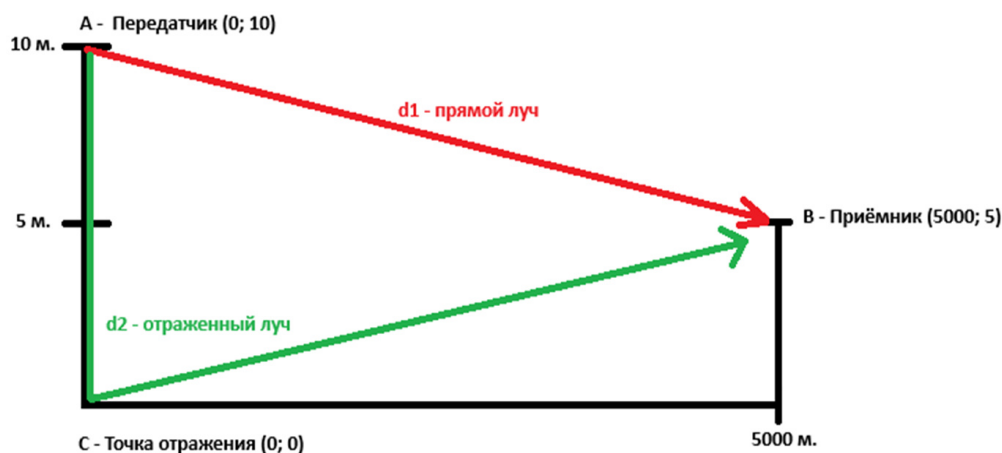


Рис. 4. Демонстрация эффекта многолучевого распространения радиоволн

Fig. 4. Demonstration of the effect of multipath propagation of radio waves

Примером новых решений в части проектирования антенн для реализации стандарта LTE может служить источник [9].

Кроме перечисленных факторов на уровень сигнала также существенно влияют взаимные помехи между действующим оборудованием и общедоступными сетями связи [3]. Взаимные помехи могут привести к кратковременным потерям голосовой связи и передачи данных на нескольких сотнях метрах участка пути. Устранить взаимные помехи весьма непросто, так как общедоступные операторы связи применяют практически те же самые частотные полосы. Уменьшить влияние возможно только при экспериментальной настройке оборудования и проведении постоянного мониторинга уровня сигнала.

*Хэндовер.* Еще один важный фактор, непосредственно влияющий на скорость передачи данных для подвижных объектов, это хэндовер – процесс передачи обслуживания абонента от одной базовой станции к другой во время вызова или сеанса передачи данных (т.е. при «активном» абоненте). Вообще, решение проблемы времени на переключение от одной базовой станции к другой – это инженерные настройки системы, но даже при существующих скоростях движения возникает эффект кратковременной потери сигнала.

Оригинальным решением является создание совместной ячейки между ближайшими ячейками сотовой связи, предложенное Huawei (рис. 5).

Предлагаемое на рис. 5 объединение нескольких физических ячеек в одну логическую ячейку позволит повысить устойчивость связи, осуществить бесшовное переключение каналов, а также повысить эффективность применения алгоритмов для учета раннего и позднего хэндовера, расчеты которых приведены в [10].

## Результаты

Обозначенные проблемные вопросы можно решить только комплексными мерами. Для повышения эффективности управления сетями связи на железной дороге, осуществления мониторинга базовых станций и мобильных устройств, их оперативного управления предлагается структурная схема (рис. 6).

Сигналы управления и контроля должны передаваться посредством сетей передачи данных (СПД) дирекции связи ОАО «РЖД» (на схеме рис. 6 сеть СПД реализуется посредством мультиплексоров), что позволит диспетчерам полностью контролировать весь процесс. Все сигналы должны агрегировать в устройство SG (шлюз в сети LTE) с передачей информации на сервер, с которого, в свою очередь, пользователи будут использовать полученные данные по необходимости. Для увеличения зоны контроля и управления на десятки и сотни километров предлагается использовать совместную логическую ячейку сотовой связи, что, несомненно, позволит повысить эффективность управления на железной дороге устройствами связи. Управлять диспетчерам подвижным составом при таком решении будет проще и легче. С подобным решением можно провести аналогию развития диспетчерской централизации, а именно внедрение единых диспетчерских центров управлений в 1990–2000-х гг. на сети железных дорог. Важно определиться с необходимым и достаточным количеством диспетчеров по управлению и мониторингу устройств связи. В современную эпоху цифровых технологий предлагается дополнить схему, представленную на рис. 5: добавить функцию управления ячейками сотовой сети связи алгоритмами искусственного интеллекта (ИИ), а также дополнительно собирать информацию о точном местоположении подвижного состава Глонасс-приемниками по рельсовым

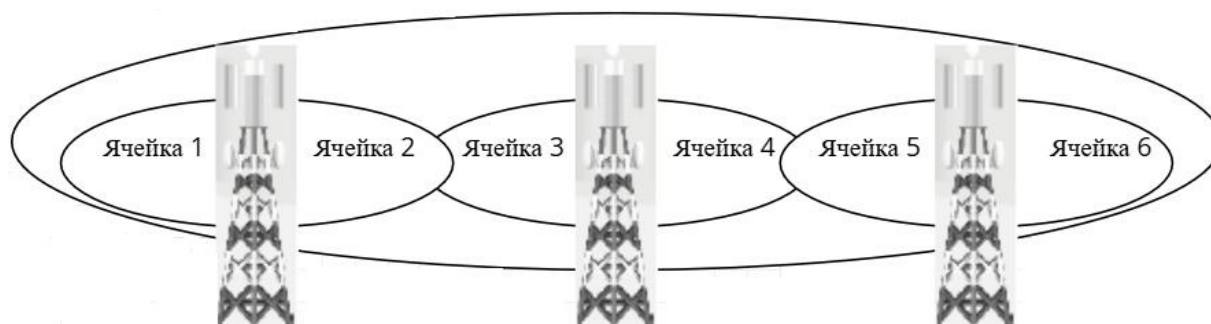
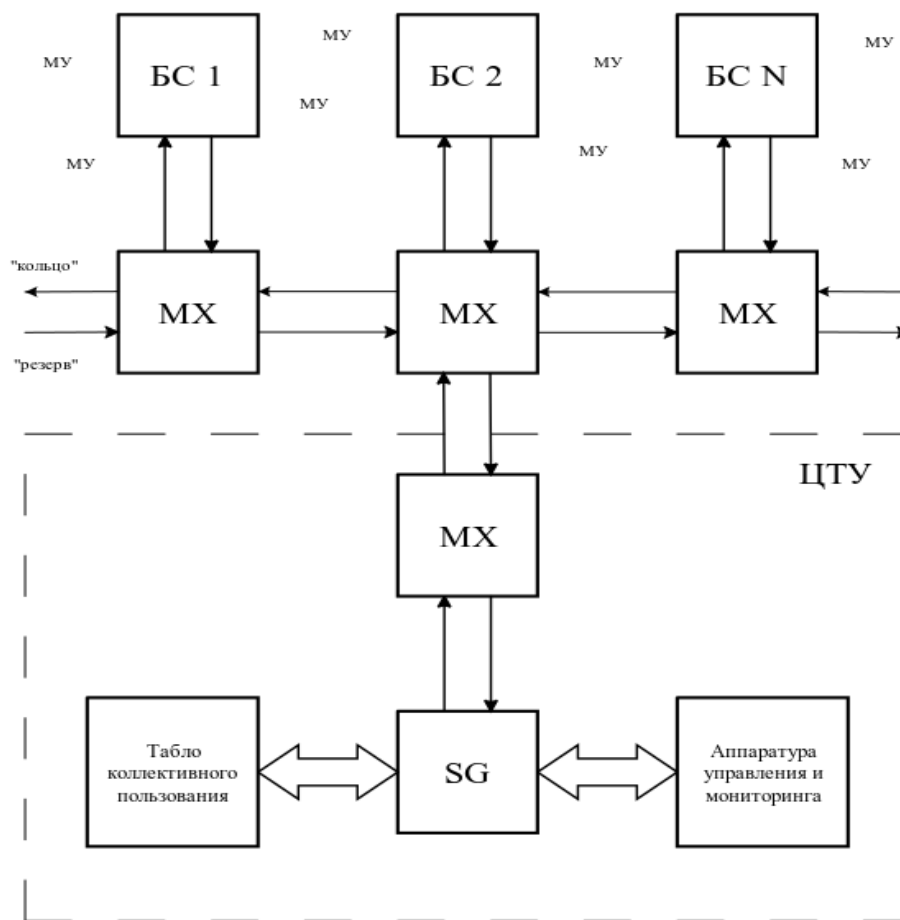


Рис. 5. Совместная логическая ячейка  
Fig. 5. Joint logic cell



**Рис. 6.** Структурная схема управления и мониторинга базовыми станциями:

*БС* – базовая станция; *МУ* – мобильные устройства; *MX* – мультиплексор;  
*SG* – serving gateway, шлюз в сети LTE; *ЦТУ* – центр технического управления

**Fig. 6.** Structural diagram of control and monitoring of base stations:

*BC* – base station; *MU* – mobile devices; *MX* – multiplexer;  
*SG* – serving gateway, gateway in the LTE network; *ЦТУ* – technical control center

цепям [11]. В этом случае ИИ позволит оперативно проводить мониторинг местоположения подвижного состава даже в случае кратковременной потери сигнала, вызванной внешними помехами и высокой скоростью.

Реализация алгоритма совместной логической ячейки невозможна без применения современных методов организации хэндовера. Предлагается использовать идею подканалов, изложенных в патенте [12], где при переходе мобильного устройства из одной соты в другую связь с исходной базовой станцией будет поддерживаться по дополнительному каналу (подканалу) и переключение произойдет лишь в тот момент времени, когда классический алгоритм хэндовера полностью завершит все действия и произойдет переключение мобильного устройства на необходимую (последующую) базовую станцию.

Для учета эффекта Доплера на скоростях свыше 400 км/ч необходимо использовать алгоритм двухинтервальной оценки с учетом отклонения частоты от эталонного генератора. Обеспечение требуемого и достаточного уровня полезного сигнала предлагается достичь путем применения квазимикрополосных антенн [9] либо антенн типа «волновой канал» [4]. Об окончательном решении о местах размещения базовых станций можно судить только после строительства ВСМ, где будет принято во внимание влияние рельефа местности с учетом известной модели распространения радиосигналов Окумуры – Хата [13].

## Заключение

Анализ трех основных проблемных факторов, возникающих при реализации проекта

широкополосной связи на ВСМ позволяет сделать вывод, что решение может быть только комплексным и без реальных испытаний и экспериментов достичь современных требований, заявляемых при реализации сетей 5G, невозможно. В мире уже ведутся разработки в данном направлении. Например, в странах Евросоюза поэтапно внедряется современная система управления движением поездов ETCS (European Train Control System) [5], которая включает в себя и развитие сетей 5G. В других странах (Китай, Малайзия, Нигерия, Ангола, Казахстан и др.) реализуется масштабный проект разработки стандартов будущей системы железнодорожной мобильной связи (Future railway mobile communication system, FRMCS) [7–9, 14]. Дорожные карты при реализации данных проектов предусматривают использование либо только технологии LTE, либо разработку гибридной системы, которая учитывает существующую технологию GSM-R и сети 5G, работающие на LTE. Разрабатываемые отраслевые и международные стандарты предусматривают применение частотного диапазона 1,9–1,915 ГГц. В некоторых странах помимо частоты 1,9 ГГц предлагается использовать частотный диапазон 876–925 МГц.

Внедрение стандарта FRMCS на сети железных дорог происходит совместно с развитием таких технологий, как улучшение позиционирования поездов, совершенствование кибер-

безопасности, сокращение путевых компонентов, развитие технологии интернет-вещей [15], т.е. внедрение FRMCS дает новый импульс развития перечисленных технологий, в том числе и при реализации проекта ВСМ.

С точки зрения помехозащищенности и дальности передачи информации проблемы есть как в том, так и в другом диапазоне [16–18]. Имеется много вопросов к технической реализации антенно-фидерных систем связи, требуются новые типы антенн [9]. Здесь опять же нужен эксперимент, который, помимо технических аспектов, включая рельеф местности и особенности распространения радиоволн между Москвой и Санкт-Петербургом, несомненно, учет и экономику проекта. При проведении эксперимента, безусловно, нужно протестировать различные сценарии железнодорожной связи, учесть требования к трафику сети, оценить такие параметры, как речевая связь для рабочих целей, видеосвязь для целей наблюдения, стандартная и экстренная передача данных и многое другое [19].

При данном анализе не исследовались важные вопросы безопасности передачи информации, которые также окажут влияние на реализацию и стоимость проекта. Также не рассмотрены варианты альтернативной связи (например, спутниковой), но это темы дальнейших изысканий.

### Список литературы

1. Стационарная симплексная радиостанция PC-46МЦ // ООО «ИРЗ» : сайт. URL : <https://www.irz.ru/products/15/133.htm> (Дата обращения 04.06.2025).
2. Радиостанция передачи речи и данных РЛСМ-10 // КБ ПУЛЬСАР-ТЕЛЕКОМ : сайт. URL : <https://www.pulsar-telecom.ru/catalog/radiosvyaz/rlsm-10> (Дата обращения 04.06.2025).
3. High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R / R. He, B. Ai, G. Wang et al. // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2016. Vol. 11. Iss. 3. P. 49–58. DOI 10.1109/MVT.2016.2564446.
4. Решение Private LTE/5G // НТЦ «Протей» : сайт. URL : <https://protei.ru/solutions/private-lte5g> (Дата обращения 04.06.2025).
5. European Train Control System // Digitale Schiene : site. URL : <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/technologies/ETCS> (access date 04.06.2025).
6. Measurement-Based Delay and Doppler Characterizations for High-Speed Railway Hilly Scenario / Y. Zhang, Z. He, W. Zhang et al. // International Journal of Antennas and Propagation. 2014. DOI 10.1155/2014/875345.
7. Pencheva E., Atanasov I., Trifonov V. Identity Management in Future Railway Mobile Communication System // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 9. DOI: 10.3390/app12094293.
8. 5G Based on MNOs for Critical Railway Signalling Services: Future Railway Mobile Communication System / A. González-Plaza, R. Gutiérrez Cantarero, R. Arancibia et al. // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 18. DOI 10.3390/app12189003.
9. Shao J., Li Q., Tan J. Design and Simulation of Quasi-microstrip Yagi Antenna in Railway Mobile Communication // EAI Endorsed Transactions On Scalable Information Systems. 2025. Vol. 12. Iss. 2. DOI 10.4108/eetsis.7029.
10. Дроздова В.Г., Завьялова Д.В. Анализ и оптимизация ключевых показателей эффективности хэндоверов в мобильных сетях LTE // Вестник кибернетики. 2017. № 4 (28). С. 146–153.
11. Сулимин А.Ю., Куценко С.М., Иванов М.А. Использование геопозиционирования объекта для повышения точности работы защиты питающих линий системы тягового электроснабжения // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2024. Т. 21. № 4. С. 954–964.



12. Пат. 2642831 Рос. Федерация. Узел и способ для обеспечения обслуживания беспроводного терминального устройства множеством сот в коммуникационной сети / Ф. Гуннарссон, П. Валлентин, А. Чентонца [и др]. № 2015106987 ; заявл. 17.07.2013 ; опубл. 29.01.2018, Бюл. № 4. 59 с.
13. Ярыгин В.С., Криштофович А.Ю. Исследование распространения сигнала LTE-1800 в условиях плотной городской застройки на основе статистических моделей и экспериментальных данных // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2020. № 8. С. 507–513.
14. Modelling of heterogeneous 5G network slice for smart real-time railway communications / S. Hanczewski, M. Stasiak, J. Weissenberg et al. // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2025. Vol. 22. Iss. 3. P. 2534–2545. DOI 10.1109/TNSM.2025.3547762.
15. 5GRAIL paves the way to the Future Railway Mobile Communication System Introduction / V. Nikolopoulou, D. Mandoc, F. Bazizi et al. // 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). Montreal, 2022. P. 53–57. DOI 10.1109/FNWF55208.2022.00018.
16. Тарасенко А.Ю., Гриценко А.А., Лобеев Д.П. Оптимизация использования частотного спектра // Автоматика, связь, информатика. 2025. №1. С. 9–12.
17. Куценко С.М., Евдокимова О.Г., Климов Н.Н. О регистрации электромагнитных импульсов, оказывающих мешающее воздействие на работу систем обеспечения движения поездов // Eltrans – 2023 : Электрификация и электрическая тяга: цифровая трансформация железнодорожного транспорта : сб. тр. XI Междунар. симпозиума. СПб., 2023. С. 303–311.
18. Method for detecting the source of radio interference affecting train radio communication in the band of 2,13 and 2,15 MHz / S.M. Kutsenko, N.I. Rukavishnikov, O.G. Evdokimova et al. // BRICS Transport. 2023. Vol. 2. Iss. 2. DOI 10.46684/2023.2.4.
19. Тихвинский В., Портной С. Сети мобильной железнодорожной связи FRMCS: перспективы создания и внедрения // Первая миля. 2021. № 3 (95). С. 54–65.

### References

1. Stationarnaya simpleksnaya radiostantsiya RS-46MTs (elektronnyi resurs) [Stationary simplex radio station RS-46MC (electronic resource)]. Available at: <https://www.irz.ru/products/15/133.htm> (Accessed June 4, 2025).
2. Radiostantsiya peredachi rechi i dannykh RLSM-10 (elektronnyi resurs) [Radio station for speech and data transmission RLSM-10 (electronic resource)]. Available at: <https://www.pulsar-telecom.ru/catalog/radiosvyaz/rism-10> (Accessed June 4, 2025).
3. He R., Ai B., Wang G., Guan K., Zhong Z., Molisch A.F. High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R // IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, Vol. 11, iss. 3, pp. 49–58.
4. Kompleksnoe reshenie Private LTE/5G «pod klyuch» (elektronnyi resurs) [A comprehensive Private LTE/5G turnkey solution (electronic resource)]. Available at: <https://protei.ru/solutions/private-lte5g> (Accessed June 4, 2025).
5. European Train Control System (electronic resource). Available at: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/technologies/ETCS> (Accessed June 4, 2025).
6. Zhang Y., He Z., Zhang W., Xiao L., Zhou S. Measurement-Based Delay and Doppler Characterizations for High-Speed Railway Hilly Scenario // International Journal of Antennas and Propagation. 2014. DOI: 10.1155/2014/875345.
7. Pencheva E., Atanasov I., Trifonov V. Identity Management in Future Railway Mobile Communication System // Applied Sciences, 2022, Vol. 12, iss. 9. DOI: 10.3390/app12094293.
8. González-Plaza A., Gutiérrez Cantarero R., Briso Rodríguez C. 5G Based on MNOs for Critical Railway Signalling Services: Future Railway Mobile Communication System // Applied Sciences, 2022, Vol. 12, iss. 18. DOI <https://doi.org/10.3390/app12189003>.
9. Shao J., Li Q., Tan J. Design and Simulation of Quasi-microstrip Yagi Antenna in Railway Mobile Communication // EAI Endorsed Transactions On Scalable Information Systems, 2025, Vol. 12, iss. 2. DOI <https://doi.org/10.4108/eetsis.7029>.
10. Drozdova V.G., Zav'yalova D.V. Analiz i optimizatsiya klyuchevykh pokazatelei effektivnosti khendoverov v mobil'nykh setyakh LTE [Analysis and optimization of key performance indicators of handovers in LTE mobile networks]. *Vestnik kibernetiki* [Bulletin of Cybernetics], 2017, no 4 (28), pp. 146–153.
11. Sulimin A.Yu., Kutsenko S.M., Ivanov M.A. Ispol'zovanie geopozitsionirovaniya ob'ekta dlya povysheniya tochnosti raboty zashchity pitayushchikh linii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [The use of object geo-positioning to improve the accuracy of protection of supply lines of traction power supply system]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Petersburg State Transport University], 2024, Vol. 21, no 4, pp. 954–964.
12. Gunnarsson F., Vallentin P., Chentontsa A., Teyib O., Vager S., Yokhansson N. Patent RU 2642831 C1, 29.01.2018.
13. Yarygin V.S., Krishtofovich A.Yu. Issledovanie rasprostraneniya signala LTE-1800 v usloviyakh plotnoi gorodskoi zas-troiki na osnove statisticheskikh modelei i eksperimental'nykh dannykh [Investigation of LTE-1800 signal propagation in conditions of dense urban development based on statistical models and experimental data]. *Informatsionnye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii* [Information Technologies. Radio electronics. Telecommunications], 2020, no 8, pp. 507–513.
14. Hanczewski S., Stasiak M., Weissenberg J., Weissenberg M. Modelling of heterogeneous 5G network slice for smart real-time railway communications // IEEE Transactions on Network and Service Management, 2025, Vol. 22, iss. 3, pp. 2534–2545. DOI: 10.1109/TNSM.2025.3547762.
15. Nikolopoulou V., Mandoc D., Bazizi F. et al. 5GRAIL paves the way to the Future Railway Mobile Communication System Introduction // 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). Montreal, 2022, pp. 53–57. DOI 10.1109/FNWF55208.2022.00018.
16. Tarasenko A.Yu., Gritsenko A.A., Lobeev D.P. Optimizatsiya ispol'zovaniya chastotnogo spektra [Optimization of the use of the frequency spectrum]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, Informatics], 2025, no 1, pp. 9–12.



17. Kutsenko S.M., Evdokimova O.G., Klimov N.N. O registratsii elektromagnitnykh impul'sov, okazyvayushchikh meshayushchee vozdeystvie na rabotu sistem obespecheniya dvizheniya poezdov [On the registration of electromagnetic pulses that interfere with the operation of train propulsion systems]. *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans – 2023: Elektrifikatsiya i elektricheskaya tyaga: tsifrovaya transformatsiya zheleznodorozhnogo transporta»* [Proceedings of the XI International Symposium «Eltrans – 2023 : Electrification and electric traction: digital transformation of railway transport»]. Saint Petersburg, 2023, pp. 303–311.

18. Kutsenko S.M., Rukavishnikov N.I., Evdokimova O.G., Kurbanov J.F. Method for detecting the source of radio interference affecting train radio communication in the band of 2.13 and 2.15 MHz // *BRICS Transport*. 2023, Vol. 2, no 2. DOI 10.46684/2023.2.4.

19. Tikhvinskii V., Portnoi S. Seti mobil'noi zheleznodorozhnoi svyazi FRMCS: perspektivy sozdaniya i vnedreniya [FRMCS mobile railway communication networks: prospects for creation and implementation]. *Pervaya milya* [The first mile], 2021, no 3 (95), pp. 54–65.

### Информация об авторах

**Куценко Сергей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, декан факультета безотрывных форм обучения, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: kutsenko@pgups.ru.

**Чинаров Даниил Сергеевич**, инженер внедрения и сопровождения группы внедрения и сопровождения, ООО «НПФ Беркут», г. Санкт-Петербург; e-mail: matsjov@bk.ru.

### Information about the authors

**Sergei M. Kutsenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Dean of the Faculty of Continuous Forms of Education, Petersburg State Transport University, named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: kutsenko@pgups.ru.

**Daniil S. Chinarov**, Implementation and Support Engineer of the Group of Implementation and Support, Bercut LLC, Saint Petersburg; e-mail: matsjov@bk.ru.