

УДК 654.164

Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта

Д. П. Лобеев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Лобеев Д. П. Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 712–721. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-712-721

Аннотация

Цель: Разработать модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта, работающих в стандарте LTE-1800 TDD. **Методы:** Сбор, анализ, обобщение научно-технической информации и существующих решений; метод математического и программного моделирования. **Результаты:** В статье приведены результаты создания модели проектирования цифровой сети в месте пересечения со смежной цифровой сетью, работающей в стандарте LTE-1800 TDD. Модель разработана с использованием компьютерного моделирования в САПР «Альбатрос-Зона». Данная модель учитывает все помехи, действующие на проектируемую сеть, — как внешние, так и внутренние: помехи по соседнему каналу, по совмещенному каналу, интермодуляционные помехи и др. Программа симулирует работу системы для разных вариантов настройки базовых станций, и поэтому можно проанализировать работоспособность системы в случае совместной работы смежных систем. Также было проведено математическое моделирование расчета дальности радиосвязи при различных сигнально-кодовых конструкциях стандарта LTE-1800 TDD, и получены результаты, схожие с компьютерным моделированием. Сделаны выводы о применимости и работоспособности данной модели проектирования. **Практическая значимость:** Предложенная модель проектирования цифровой сети в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта стандарта LTE-1800 TDD может применяться при разработке и проектировании высокоскоростных магистралей, а также в случаях создания цифровых сетей технологической железнодорожной радиосвязи при необходимости. Данная модель позволит проанализировать целесообразность использования ширины полосы частоты 10 МГц и сделать выводы о применимости данной модели для конкретного случая.

Ключевые слова: LTE-1800 TDD, цифровые системы технологической радиосвязи, проектирование сетей радиосвязи, частотный ресурс, программное моделирование, железнодорожный транспорт, радиосвязь.

Введение

Решение ГКРЧ от 11 сентября 2018 г. № 18-46-02 регулирует основные характеристики и условия эксплуатации технологической сети железнодорожной радиосвязи стандарта LTE для работы в полосе радиочастот 1785–1805 МГц [1]. Стандартом LTE определены 6 вариантов используемых

полос частот, но по вышеупомянутому решению ГКРЧ существуют ограничения по использованию полосы шириной не более 10 МГц, так как используются защитные интервалы на границах диапазона. Поэтому есть 4 варианта использования ширины полосы частоты: 1,4 МГц, 3, 5 и 10 МГц.

Таким образом, необходимо решить задачу исследования по использованию вариантов из набора частот: 1,4 МГц, 3, 5, 10 МГц [2] путем разработки модели проектирования цифровой сети технологической радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD (далее — Модель).

Основная часть

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

На данный момент существуют проектные решения для полосы 10 МГц в «линейном» расположении базовых станций (БС). Но в случаях пересечения цифровых сетей технологической железнодорожной радиосвязи решений нет. В связи с этим требуется разработать модель проектирования цифровой сети в месте пересечения со смежной цифровой сетью, работающей в полосе 10 МГц. Учитывая ограниченность частотного ресурса, необходимо рассмотреть вариант исполь-

Таблица. 1. Конфигурации кадра при TDD

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

зования в разрабатываемой модели синхронного режима работы сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD. В качестве исходных данных для создания модели были выбраны [3]:

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

Далее рассмотрим более подробно зоны обслуживания для каждой из БС, расположенных в месте пересечения.

Как видно из рис. 1, зона обслуживания для БС-7 с учетом влияния помех обеспечивает

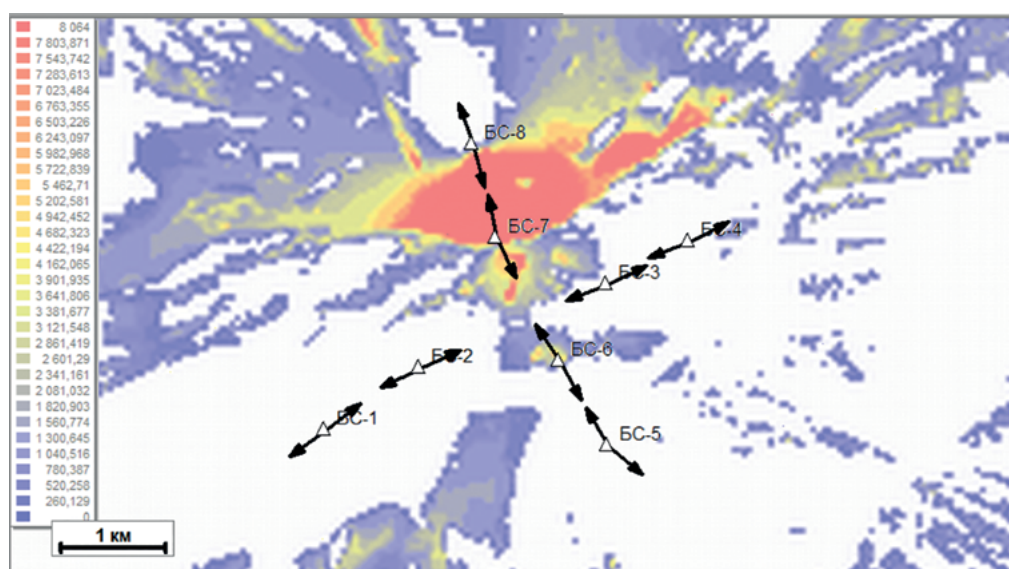


Рис. 1. Зона обслуживания и пропускная способность для БС-7

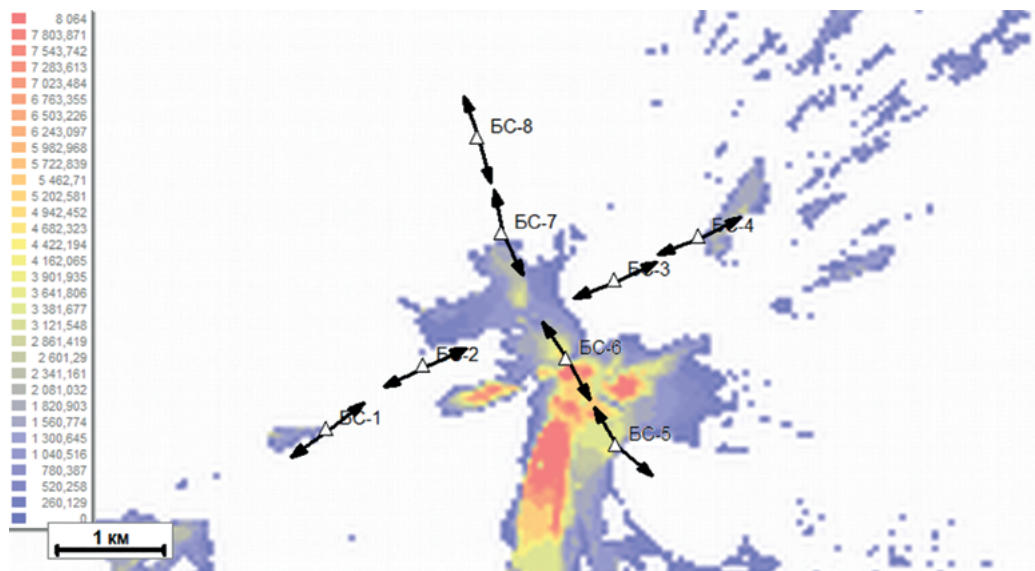


Рис. 2. Зона обслуживания и пропускная способность для БС-6

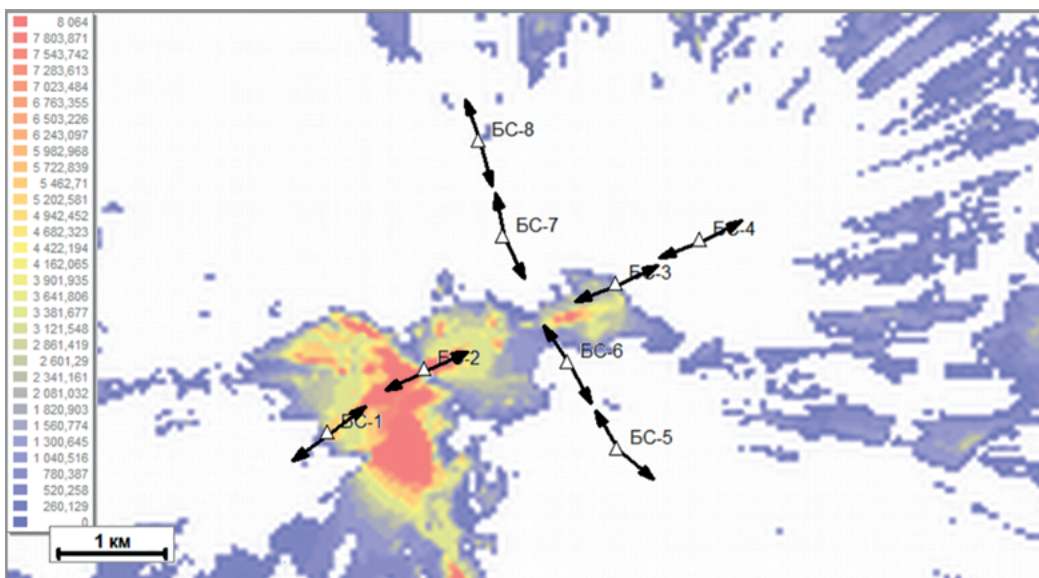


Рис. 3. Зона обслуживания и пропускная способность для БС-2

радиопокрытие с необходимыми скоростями на участке пересечения.

По полученным данным также можно сделать вывод об обеспечении необходимых скоростей на участке пересечения. По рис. 2 видно, что большая часть территории будет обеспечиваться при модуляции QPSK.

Аналогично были получены зоны обслуживания для БС-2 и БС-3. По рис. 3 и 4 видно, что на участке обеспечиваются заданные скорости.

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

На рис. 5 видно, что при влиянии помех на участке пересечения двух систем, работающих

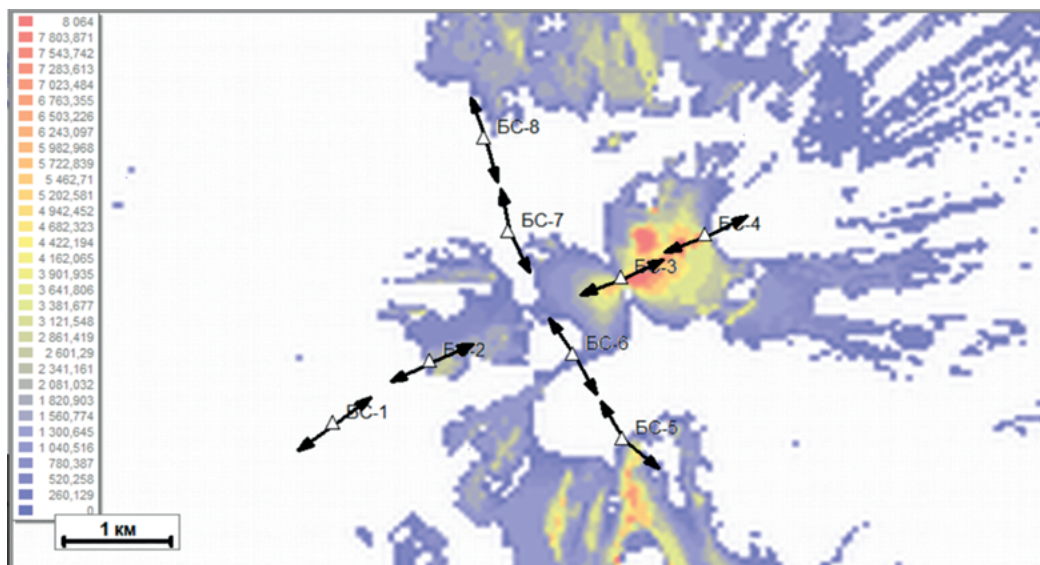


Рис. 4. Зона обслуживания и пропускная способность для БС-3

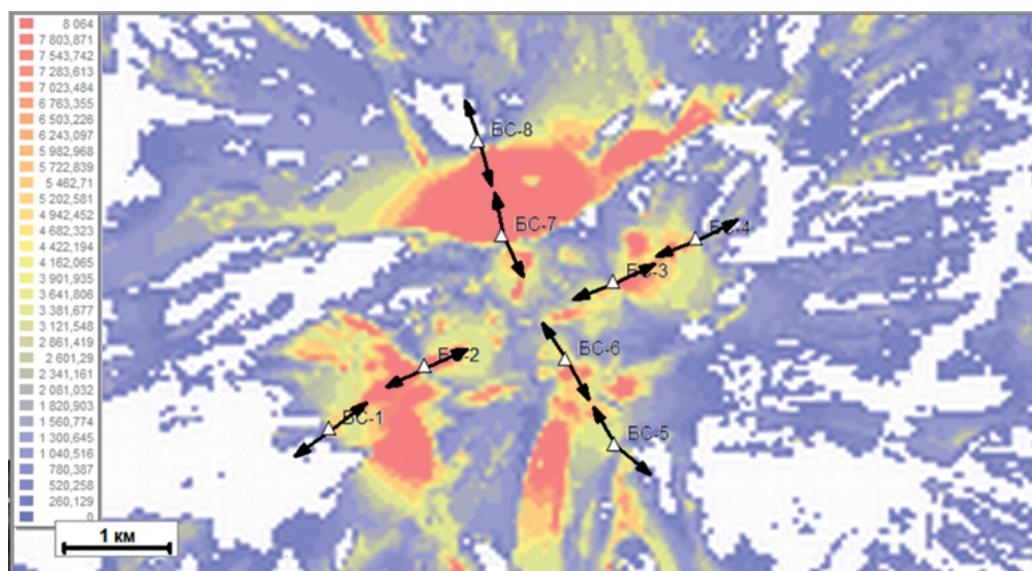


Рис. 5. Расчет скорости по модели с шириной полосы 10 МГц

в стандарте LTE-1800 TDD в полосе 10 МГц, не будут обеспечиваться требуемые скорости (как по линии «вниз», так и по линии «вверх»), что для технологии LTE является первостепенной задачей [5].

Также можно промоделировать работу системы в «синхронном» режиме работы, но для этого необходимо перенастроить базовые станции в 2 полосы по 5 МГц. Данный режим подразумевает синхронизацию всех БС сети по времени передачи, то есть БС будут чередовать режим

работы поочередно. Более подробно данный режим будет описан позже.

По результатам проведенных расчетов и моделирования работы сети модель проектирования цифровой сети для ширины полосы 10 МГц не удовлетворяет требованиям к сети и не может использоваться в данной ситуации. Поэтому необходимо создать модели, которые были бы работоспособны для данной полосы частот (1785–1805 МГц) с использованием другого номинала частоты: 1,4 МГц, 3 МГц или 5 МГц.

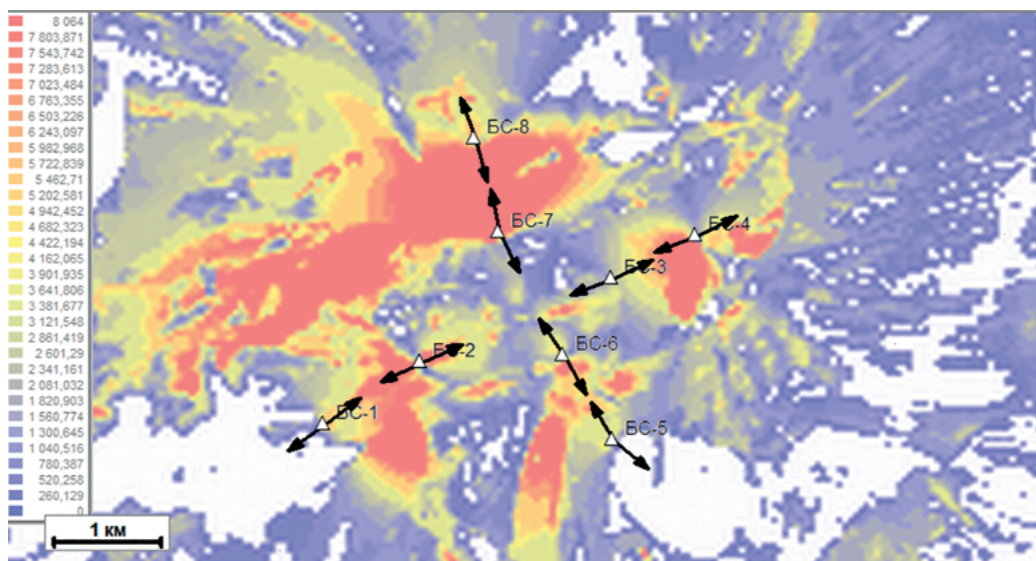


Рис. 6. Расчет скорости по модели с шириной полосы 10 МГц, с перенастройкой БС в месте пересечения на 2 полосы по 5 МГц в синхронном режиме работы

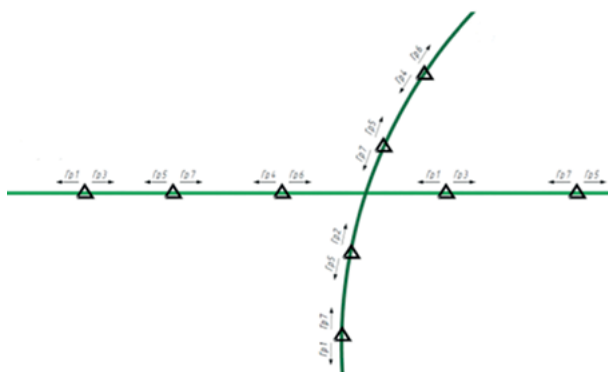


Рис. 7. Пример распределения частот по группам

При использовании других номиналов частот появляется возможность разделения частот по группам, как показано на рис. 7 для ширины полосы 1,4 МГц. Это значительно улучшит ситуацию с точки зрения ЭМС (электромагнитной совместимости) при создании моделей проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта одного диапазона частот.

Синхронный режим работы сети

Синхронный режим работы сети представляет собой режим, обеспечивающий временную синхронизацию базовых станций (БС) по сиг-

налам ГЛОНАСС, что позволяет согласовывать режимы приема и передачи между всеми элементами сети.

Поясняющая схема представлена на рис. 8.

На рисунке представлена гипотетическая сеть БС в составе пяти станций, выстроенных «в цепочку». Каждая БС имеет два сектора, которые «работают» на разных номиналах $F1$ и $F2$ с полосой 5 МГц. Например, все сектора западного направления используют номинал $F1$. Все сектора восточного направления используют частоту $F2$.

БС может находиться в одном из двух состояний — либо оба сектора одновременно работают на передачу (режим «ПРД»), либо оба сектора одновременно работают на прием (режим «ПРМ»).

Для обеспечения внутрисистемной ЭМС предлагается обеспечить временную синхронизацию режимов работы передатчиков БС так, чтобы режим «ПРД» чередовался с режимом «ПРМ». Как видно из рисунка, базовые станции с нечетными номерами 1, 3 и 5 на момент времени $t1$ будут работать на передачу. Соответственно, остальные БС с четными номерами — на прием.

При проведении предварительной оценки были заданы следующие исходные данные:

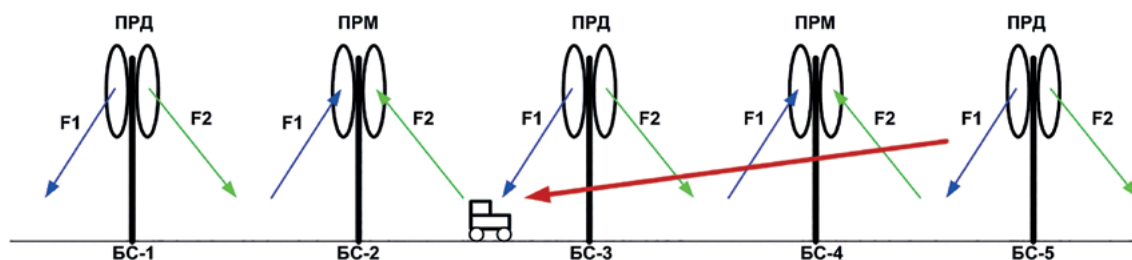


Рис. 8. Частотно-территориально-временной план сети

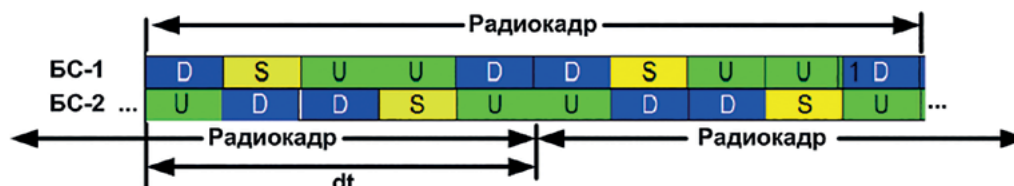


Рис. 9. Временная синхронизация режимов работы БС

1. Высота подвеса антенн БС составляет 25 м.
2. Значения ЭИИМ всех БС одинаковы.
3. Расстояния между БС одинаковы и равны d .
4. Модель распространения радиоволн — Рекомендация Р.1546.

Оценка проводится для худшего случая, когда АС находится возле БС-2 (рис. 8). Значение отношения мощности сигнала к мощности помехи будет практически совпадать со значением отношения потерь передачи на участках от БС-3 и БС 5 соответственно.

Результаты показали, что для данного случая значение SINR составляет порядка 15–18 дБ при удалении друг от друга БС на расстоянии от 1 до 2,5 км.

Учитывая, что на границе зоны обслуживания требуемое значение отношения сигнал/помеха составляет 15 дБ, вероятность возникновения помеховых ситуаций крайне мала.

Также необходимо определить вариант конфигурации субкадра TDD в радиокадре. Наиболее приемлемая с точки зрения распределения по всем каналам и дальности радиосвязи конфигурация субкадра № 1.

При выполнении данных условий возможно реализовать данный частотно-временной план.

В частности, на рис. 9 показан пример работы двух базовых станций (БС) с вариантом конфигурации №1 в синхронном режиме работы сети.

Из рис. 9 видно, что для реализации частотно-временного плана достаточно обеспечить относительный сдвиг радиокадров смежных БС на величину половины его длительности. Если длительность радиокадра 10 мс, то потребный сдвиг составит 5 мс. При этом циклы приема и передачи на смежных БС будут разные. Исключение составляет субкадр S со специальными полями. Однако чередование данного субкадра с режимами приема и передачи соседней БС позволяет минимизировать последствия.

Пример расчета скорости передачи

Представим пример расчета скорости передачи данных по восходящей (UL) и нисходящей (DL) линиям связи для полосы пропускания 10 МГц при прохождении участков пересечения двух цифровых систем, работающих в одном частотном диапазоне (табл. 2).

Предположим, высокоскоростной объект движется в зоне действия сигнально-кодовой конструкции 64QAM12.

В зоне действия сигнально-кодовой конструкции следующие исходные данные:

- количество ресурсных блоков — 50;
- количество ресурсных элементов — 84;
- продолжительность ресурсного элемента — 0,0005;
- количество бит на символ — 6.

Таблица 2. Расчет для рабочей полосы 10 МГц

Модуляция	Ресурсные блоки	Ресурсных элементов	Продолжительность ресурсного элемента, с	Бит на символ	Скорость общая, Мбит/с	FEC	Скорость UL TDD № 0, Мбит/с	Скорость UL TDD № 1, Мбит/с	Скорость DL TDD № 0, Мбит/с	Скорость DL TDD № 1, Мбит/с	Мощность шума для полосы 10 МГц, дБм	SINR отношение шум, дБ	IM запас на реализацию, дБ	NF, коэф. шума	Уровень, дБ
QPSK0	50	84	0,0005	2	16,8	0,13	1,26	0,84	0,42	0,84	-104	-5,1	2,5	7	-99,6
QPSK1	50	84	0,0005	2	16,8	0,20	2,02	1,34	0,67	1,34	-104	-2,9	2,5	7	-97,4
QPSK2	50	84	0,0005	2	16,8	0,25	2,52	1,68	0,84	1,68	-104	-1,7	2,5	7	-96,2
QPSK3	50	84	0,0005	2	16,8	0,33	3,36	2,24	1,12	2,24	-104	-1	2,5	7	-95,5
QPSK4	50	84	0,0005	2	16,8	0,50	5,04	3,36	1,68	3,36	-104	2	2,5	7	-92,5
QPSK5	50	84	0,0005	2	16,8	0,67	6,72	4,48	2,24	4,48	-104	4,3	2,5	7	-90,2
QPSK6	50	84	0,0005	2	16,8	0,75	7,56	5,04	2,52	5,04	-104	5,5	2,5	7	-89
QPSK7	50	84	0,0005	2	16,8	0,80	8,06	5,38	2,69	5,38	-104	6,2	2,5	7	-88,3
16QAM8	50	84	0,0005	4	33,6	0,50	10,08	6,72	3,36	6,72	-104	7,9	3	7	-86,1
16QAM9	50	84	0,0005	4	33,6	0,67	13,44	8,96	4,48	8,96	-104	11,3	3	7	-82,7
16QAM10	50	84	0,0005	4	33,6	0,75	15,12	10,08	5,04	10,08	-104	12,2	3	7	-81,8
16QAM11	50	84	0,0005	4	33,6	0,80	16,13	10,75	5,38	10,75	-104	12,8	3	7	-81,2
64QAM12	50	84	0,0005	6	50,4	0,67	20,16	13,44	6,72	13,44	-104	15,3	4	7	-77,7
64QAM13	50	84	0,0005	6	50,4	0,75	22,68	15,12	7,56	15,12	-104	17,5	4	7	-75,5
64QAM14	50	84	0,0005	6	50,4	0,80	24,19	16,13	8,06	16,13	-104	18,6	4	7	-74,4

Для того чтобы вычислить теоретическую скорость на данном участке, применяется следующая формула (1):

$$v_t = \frac{N_{PB} N_{PE} n}{t_{PB}}, \text{ Мбит/с}, \quad (1)$$

где N_{PB} — количество ресурсных блоков;

N_{PE} — количество ресурсных элементов;

n — количество бит на символ;

t_{PB} — продолжительность ресурсного элемента, с.

Согласно сигнально-кодовой конструкции 64QAM12, вероятность ошибки на бит информации (FEC) составляет 0,67.

Далее найдем скорость для восходящей и нисходящей линий по формуле (2):

$$v = v_t \cdot FEC \cdot k, \quad (2)$$

где k — коэффициент на распределение субканалов TDD при различных вариантах;

FEC — количество ошибок на бит информации.

Также необходимо выяснить уровень сигнала для сигнально-кодовой конструкции.

Уровень сигнала вычисляется формулой (3):

$$X = KTB + SINR + IM + NF, \text{ дБ}, \quad (3)$$

где KTB — мощность шума для полосы 1,4 МГц, дБм;

$SINR$ — отношение сигнал/шум, дБ;

IM — запас на реализацию, дБ;

NF — коэффициент шума.

Для сигнально-кодовой конструкции 64QAM12, согласно формулам (1)–(3), получаем:

$$v_t = \frac{50 \cdot 84 \cdot 6}{1000000} = 50,4 \text{ Мбит/с}.$$

$$v = 50,4 \cdot 0,67 \cdot 0,6 = 20,16 \text{ Мбит/с}.$$

$$X = -113 + 15,3 + 4 + 7 = -77,7 \text{ дБ}.$$

Заключение

При создании модели проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта, работающими в одном диапазоне частот стандарта LTE-1800 TDD с шириной полосы частот 10 МГц, были получены следующие результаты:

1. Данная модель может применяться при проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD в случаях минимального воздействия помех как от смежных базовых станций, так и от других источников помех.

2. Данная модель обладает работоспособностью, однако при моделировании ситуации работы системы сильно зависима от помех, которые приводят к потере пропускной способности, а также к обрывам канала связи без применения специальных мер по противодействию интермодуляционным помехам.

3. В случае высокоскоростной магистрали данная модель проектирования цифровой сети в месте пересечения с другой цифровой системой железнодорожного транспорта стандарта LTE-1800 TDD неприменима ввиду невыполнения требований по скорости передачи данных и обеспечению работоспособности системы в условиях высокоскоростного движения.

4. В ходе исследования было установлено, что использование полосы шириной 10 МГц не удовлетворяет требованиям сети, применимым для высокоскоростных магистралей. Для этого необходимо провести дальнейшие исследования по разработке альтернативных моделей для анализа зоны обслуживания и оценки скорости передачи данных в местах пересечения радиотрасс при использовании полос частот шириной 5 МГц, 3 МГц или 1,4 МГц, которые предусмотрены стандартом LTE-1800 TDD.

Список источников

1. Решение ГКРЧ от 11 сентября 2018 г. № 18-46-02 «О выделении полосы радиочастот 1785–1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте».
2. Скрынников В. Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика / В. Г. Скрынников. — М.: Спорт и Культура — 2000. — 2012. 864 с.
3. ГОСТ 33973—2016. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. — М.: Стандартинформ, 2017. — 27 с.
4. ПНСТ 828—2023. Предварительный национальный стандарт российской федерации. устройства и системы электросвязи для систем управления железнодорожным

подвижным составом в автоматическом и дистанционном режимах. Общие технические требования. С 10.10.2023 до 10.10.2026.

5. Бабков В. Ю. Подходы к планированию и оптимизации сетей LTE / В. Ю. Бабков. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2013. — 78 с.

Дата поступления: 29.05.2025

Решения о публикации: 20.07.2025

Контактная информация:

ЛОБЕЕВ Дмитрий Петрович — аспирант кафедры «Электрическая связь»; lobeev1@mail.ru

Digital Network Modelling for Railway Transport Sector at the Intersection with Other Digital Networks

D. P. Lobehev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Lobehev D. P. Digital Network Modelling for Railway Transport Sector at the Intersection with Other Digital Networks // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 712–721. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-712-721

Summary

Purpose: To develop a model for designing digital networks at the intersection with other digital railway transport systems that operate using the LTE-1800 TDD standard. **Methods:** Collection, analysis and generalisation of scientific and technical information and existing solutions; mathematical and software modelling. **Results:** This paper presents the results of creating a digital network design model at an intersection with an adjacent digital network operating in the LTE-1800 TDD standard. This model was developed using computer simulation in the Albatross-Zone CAD system. The model considers all kinds of interference affecting the designed network, including external and internal sources such as adjacent and combined channel interference and intermodulation interference. The programme simulates the operation of the system with different base station configurations, enabling analysis of the system's performance in the event of joint operation with adjacent systems. Mathematical modelling was also performed to calculate the range of radio communication with various LTE-1800 TDD standard signal-code designs. The results obtained were similar to those of the computer modelling. Conclusions have been drawn regarding the applicability and operability of this design model. **Practical significance:** The proposed model for designing a digital network at points of intersection with other digital railway transport systems of the LTE-1800 TDD standard can be used for the development and design of high-speed railways, including railway digital radio communication systems, if necessary.

This model will facilitate the analysis of the feasibility of utilising a 10 MHz bandwidth and draw conclusions about the applicability of this model for a specific case.

Keywords: LTE-1800 TDD, digital radio communication systems, radio network design, frequency resource, software modelling, railway transport, radio communication.

References

1. *Reshenie GKRCCh ot 11 sentyabrya 2018 g. № 18-46-02 "O vydelenii polosy radiochastot 1785–1805 MGts dlya radioelektronnykh sredstv sukhoputnoy podvizhnoy sluzhby dlya sozdaniya tekhnologicheskikh setey svyazi na zheleznodorozhnom transporte"* [Decision of the State Commission on Radio Frequencies dated September 11, 2018 № 18-46-02 "On the allocation of the radio frequency band 1785-1805 MHz for radio electronic means of the land mobile service for the creation of technological communication networks in railway transport"]. (In Russian)
2. Skrynnikov V. G. *RadiopodsystemyUMTS/LTE. Teoriya i praktika* [UMTS/LTE radio subsystems. Theory and practice]. Moscow: Sport i Kul'tura — 2000 Publ., 2012, 864 p. (In Russian)
3. *GOST 33973—2016. Zheleznodorozhnaya elektrosvyaz'. Poezdnaya radiosvyaz'. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya* [GOST 33973-2016. Railway telecommunications. Train radio communication. Technical requirements and control methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2017, 27 p. (In Russian)
4. *PNST 828—2023. Predvaritel'nyy natsional'nyy standart rossiyskoy federatsii. ustroystva i sistemy elektrosvyazi dlya sistem upravleniya zheleznodorozhnym podvizhnym sostavom v avtomaticheskom i distantsionnom rezhimakh. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. S 10.10.2023 do 10.10.2026* [PNST 828—2023. Preliminary national standard of the Russian Federation. devices and telecommunication systems for control systems of railway rolling stock in automatic and remote modes. General technical requirements. From 10.10.2023 to 10.10.2026]. (In Russian)
5. Babkov V. Yu. *Podkhody k planirovaniyu i optimizatsii setey LTE* [Approaches to planning and optimization of LTE networks]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy im. prof. M. A. Bonch-Bruевича Publ., 2013, 78 p. (In Russian)

Received: May 29, 2025

Accepted: July 20, 2025

Author's information:

Dmitry P. LOBEEV — Postgraduate Student, Department of Electrical Communications; lobeev1@mail.ru