

Разработка программы расчёта характеристик радиоканала передачи данных диапазона 160 МГц в системах связи с подвижными объектами железнодорожного транспорта

А. М. Малышев

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I

Malyshev.tema@gmail.com

Д. Н. Роенков

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I

Roenkov_dmitry@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке программного комплекса для частотно-территориального планирования цифровых сетей радиосвязи стандарта DMR диапазона 160 МГц на железнодорожных участках. Расчёт уровня сигнала ведётся по отраслевой методике с использованием базовых кривых распространения радиоволн, полученных для условий железной дороги. Предложен алгоритм расстановки базовых станций, обеспечивающий двойное радиопокрытие маршрута и приоритетную привязку к существующим объектам инфраструктуры. Комплекс протестирован на маршруте Санкт-Петербург (Ладожский вокзал) – Бабаево – Череповец, охватывающем участки с электрификацией постоянным (3 кВ) и переменным (25 кВ) током.

Ключевые слова: программа расчета радиоканала, передача данных по радиоканалу, железнодорожная радиосвязь, электромагнитная совместимость

I. ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация железнодорожного транспорта повышает требования к надёжности систем передачи данных. Системы интервального регулирования движения, в том числе ИСАВП-РТ (интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины) и технология «виртуальной сцепки», работают только при устойчивом радиоканале между локомотивами и диспетчерскими центрами. На российских железных дорогах с их протяжённостью и сложным рельефом технологическая радиосвязь остаётся основным каналом для телеметрии и команд управления.

Для нужд ОАО «РЖД» в России выделены полосы частот диапазона 160 МГц (ОВЧ). Этот диапазон применяется, в том числе, в системах управления соединёнными и тяжеловесными поездами. По сравнению с диапазонами 460 МГц (TETRA) и 900/1800 МГц (GSM-R, LTE) в диапазоне 160 МГц радиоволны лучше огибают препятствия и обеспечивается большая дальность радиосвязи, поэтому он подходит для протяжённых перегонов в лесистой и пересечённой местности [1].

Переход от аналоговых систем радиосвязи на цифровые стандарта DMR Tier II (TDMA) [2] требует пересмотра подходов к частотно-территориальному планированию. Для расчётов радиоканалов диапазона 160 МГц на железной дороге существует отраслевая методика [1] с базовыми кривыми распространения,

полученными для конкретных условий: с учётом влияния контактной сети, экранирования корпусом локомотива и промышленных помех от тягового оборудования. В отличие от рекомендаций МСЭ-R, включая рекомендации Р.1546-6 и Р.1812-8 [3-6], эта методика опирается на собственные коэффициенты и кривые, отражающие специфику отечественной железнодорожной инфраструктуры.

В работе описана программная реализация этой методики на Python с привлечением геоинформационных библиотек и цифровых матриц высот для расчёта уровня сигнала и расстановки базовых станций на протяжённых маршрутах.

II. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОКАНАЛА

Уравнение радиосвязи

Уровень сигнала на входе приёмника локомотивной радиостанции u_2 (дБ относительно 1 мкВ) рассчитывается по формуле отраслевой методики [1]:

$$u_2 = E_2 + A_{\text{тр}} + A_{\text{мп}} + G_1 + G_2 + A_{\text{выс}} - A_{\text{афт}} - A_3 - A_{\text{кс}} - g_2 - K_{\text{и}} - K_{\text{в}} - K_{\text{м}} \quad (1)$$

Здесь E_2 – напряжённость поля по базовой кривой распространения, дБ относительно 1 мкВ/м; $A_{\text{тр}}$ – поправка на условия распространения для конкретной трассы; $A_{\text{мп}}$ – поправка на отличие мощности передатчика от опорной (1 Вт); G_1 и G_2 – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн, дБ; $A_{\text{выс}}$ – поправка на отличие произведения высот установки антенн от опорного значения 100 м²; $A_{\text{афт}}$ – затухание в антенно-фидерных трактах; A_3 – поправка на экранирование возимой антенны корпусом локомотива; $A_{\text{кс}}$ – поправка на ослабление сигнала контактной сетью; $g_2 = 12$ дБ – коэффициент перехода от напряжённости поля к напряжению на входе приёмника (для 50-омного тракта); $K_{\text{и}}$, $K_{\text{в}}$, $K_{\text{м}}$ – вероятностные коэффициенты, отвечающие за интерференционные, климатические и медленные замирания.

В расчётах принимались следующие типовые значения: мощность передатчика базовой станции 20 Вт, коэффициент усиления локомотивной антенны АЛ1/160 – 2 дБ, высота локомотивной антенны 4,2 м (типовая высота для отечественных электровозов),

высота мачты базовой станции 30 м, потери в приёмном АФТ – 2,9 дБ.

Базовые кривые распространения

Базовые кривые задают зависимость медианного значения напряжённости поля E_2 от расстояния r между точкой приёма и источником на вероятностном уровне 50 % по месту и времени [1]. Кривые получены для опорных условий: мощность передатчика 1 Вт, произведение высот антенн $h_1 \cdot h_2 = 100 \text{ м}^2$, коэффициент усиления передающей антенны 0 дБ, нулевые потери в АФТ, стандартная атмосфера.

Используются две кривые: первая – для случая, когда направление распространения совпадает с направлением железнодорожного участка, вторая – когда не совпадает. Если реальные параметры радиолинии отличаются от опорных, в формулу (1) подставляются соответствующие поправки. Реальная высота установки антенн учитывается через поправку

$$A_{\text{выс}} = 20 \cdot \lg(h_1 \cdot h_2 / 100) \quad (2)$$

Поправки на тип трассы

По рельефу местности трассы радиосвязи делятся на пять типов с коэффициентом сложности $K_{\text{ст}}$ от 1 до 5: равнинные, среднепересечённые, лёгкие горные, сложные горные и горные повышенной сложности. Для маршрутов Европейской части России и Сибири, где преобладает среднепересечённая местность, в расчётах используется $K_{\text{ст}} = 2$ [1].

Поправка $A_{\text{тр}}$ и медленные замирания $K_{\text{м}}$ зависят от типа трассы. Для среднепересечённой местности $A_{\text{тр}} = 0$ дБ, $K_{\text{м}} = 4,2$ дБ на вероятностном уровне 95 %.

Поправки на железнодорожную среду

Поправочные коэффициенты для условий железной дороги сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Поправочные коэффициенты для условий железнодорожной среды [1]

Обозначение	Физический смысл	Значение, дБ
$A_{\text{к}}$	Ослабление сигнала контактной сетью. Однопутный участок - 1 дБ, двухпутный - 2 дБ	1,0 / 2,0
$A_{\text{э}}$	Экранирование возимой антенны корпусом локомотива. Для антенны АЛ1/160 - 3 дБ на постоянном токе и 5 дБ на переменном	3,0 / 5,0
$K_{\text{и}}$	Интерференционные замирания на электрифицированных участках при надёжности связи 95 %	7,0
$K_{\text{в}}$	Суточные и сезонные колебания поля из-за изменений рефракции в тропосфере	2,8
$K_{\text{м}}$	Медленные колебания поля от изменения рельефа. Для $K_{\text{ст}} = 2$ - 4,2 дБ	4,2

Все значения взяты из отраслевой методики расчёта канала передачи данных диапазона 160 МГц для систем связи с подвижными объектами железнодорожного транспорта [1]. Эта методика даёт оценки уровня сигнала, согласованные с инженерной практикой проектирования радиосетей ОАО «РЖД».

III. ПОРОГОВЫЙ УРОВЕНЬ СИГНАЛА

Минимально допустимое значение полезного сигнала $u_{2\text{мин}}$ на входе приёмника возимой радиостанции зависит от электромагнитной обстановки на участке, рода тяги и скорости движения [1]. Значения для диспетчерских участков приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Пороговые уровни чувствительности по родам тяги

Параметр	Постоянный ток (3 кВ)	Переменный ток (25 кВ)
$u_{2\text{мин}}$, дБ (1 мкВ)	8,0	14,0
P_{th} , дБм	-99,0	-93,0
Причина ужесточения порога	Слабые помехи от тягового оборудования	Искрение, коронные разряды, гармоники тяговых трансформаторов

Методика [1] оперирует значениями u_2 мин в децибелах относительно 1 мкВ. Для перевода в единицы мощности (50-омный тракт) применяется соотношение $P_{\text{th}} [\text{дБм}] = u_2 \text{ мин} [\text{дБ}(1 \text{ мкВ})] - 107,0$. Получается -99 дБм для постоянного тока и -93 дБм для переменного.

IV. АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Программный комплекс написан на Python 3 и состоит из четырёх модулей: подготовка геоинформационных данных, расчёт уровня сигнала по отраслевой методике, расстановка базовых станций с двойным радиопокрытием и визуализация результатов.

Реализация расчёта по отраслевой методике

Базовые кривые распространения [1] оцифрованы по точкам в диапазоне дальностей от 1 до 24 км. При расчёте программа линейно интерполирует напряжённость поля E_2 по логарифму расстояния. На дальностях свыше 24 км (нужны при оценке координационного расстояния между базовыми станциями для проверки ЭМС) применяется логарифмическая экстраполяция по наклону хвоста кривой.

Поправки $A_{\text{тр}}$ и $K_{\text{м}}$ из методики [1] хранятся в одномерных массивах с линейной интерполяцией по $K_{\text{ст}}$. Уровень сигнала в каждой точке маршрута считается напрямую по формуле (1).

Модуль визуализации

Результаты расчёта представляются в двух формах: профиль уровня сигнала вдоль маршрута строится через Matplotlib, интерактивная карта радиопокрытия – через Folium на базе Leaflet.js. На карте покрытие закодировано цветом: зелёный – уверенный приём, оранжевый – граничное покрытие, красный – нет покрытия. Маркерами отмечены позиции базовых станций с разделением на сегменты постоянного и переменного тока.

V. АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Принцип двойного радиопокрытия

Базовые кривые распространения [1] оцифрованы по В цифровых сетях технологической радиосвязи на

железнодорожной дороге требуется двойное радиопокрытие: в каждой точке маршрута локомотивная радиостанция должна иметь надежную радиосвязь как минимум с двумя базовыми станциями, ограничивающими перегон. При обрыве связи с одной БС связь сохраняется со второй – это резервирование канала.

Чтобы это требование выполнялось, базовые станции расставляются так, что уровень сигнала от одной БС на позиции следующей не падает ниже минимально допустимого порогового значения. Сигнал от одной БС должен снижаться до P_{th} не на середине участка между двумя БС, а на расстоянии расположения второй БС – тогда зоны действия радиосвязи перекрываются.

Алгоритм расстановки БС

Алгоритм работает по логике инженера-проектировщика: при возможности базовые станции размещаются на существующих объектах инфраструктуры – на постах ЭЦ, в других служебных зданиях, вокзалах. Шаги следующие.

Шаг 1. Привязка станций. Координаты железнодорожных станций привязываются к ближайшим точкам маршрута. Станции дальше 600 м от оси пути отбрасываются. Порог 600 м выбран по типичной ширине самой широкой станции (около 200 м) с запасом на погрешности координат в OSM.

Шаг 2. Определение зоны уверенного приёма. От текущей БС вдоль маршрута считается уровень сигнала P_{rx} . Программа находит последнюю точку, в которой P_{rx} ещё выше P_{th} – это граница зоны уверенного приёма.

Шаг 3. Размещение следующей БС. Новая БС ставится в найденной граничной точке. На её позиции сигнал от предыдущей БС всё ещё не ниже порогового значения – это и даёт двойное покрытие.

Шаг 4. Привязка к инфраструктуре. Если в зоне действия текущей БС есть существующие объекты с шага 1, новая БС переносится на ближайший из них – при условии, что он удалён от предыдущей БС не меньше чем на половину окна поиска. Это страхует от слишком плотной расстановки.

Шаг 5. Итерация. Цикл повторяется, пока маршрут не пройден до конца.

Когда расстановка завершена, программа считает сплошное покрытие: для каждой точки маршрута берётся максимальный уровень сигнала среди всех базовых станций. Это моделирует роуминг DMR Tier II/III.

Проверка электромагнитной совместимости

Частотный ресурс диапазона 160 МГц ограничен, поэтому на длинных маршрутах применяют частотный план с чередованием нескольких номиналов. Базовые станции, работающие на одной частоте, должны быть разнесены настолько, чтобы взаимная помеха не превышала допустимый уровень. Критерий записывается так:

$$P_{ij} \leq P_{th} - MC/I \quad (3)$$

где P_{ij} – уровень помехи от станции i на входе станции j ; $MC/I = 10$ дБ – защитное отношение сигнал/помеха для DMR.

При проверке ЭМС обе антенны в паре считаются стационарными (высота мачты 30 м), что увеличивает поправку А_э по сравнению с расчётом «БС – локомотив». Расчёт P_{ij} для каждой пары одночастотных станций выполняется по той же формуле (1) с подстановкой высот стационарных антенн. По результатам формируется отчёт с номерами конфликтующих БС и величиной превышения порога.

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ

Тестовый маршрут и параметры

Программный комплекс протестирован на маршруте Санкт-Петербург (Ладужский вокзал) – Бабаево – Череповец общей длиной 468,1 км. Маршрут разбит на два сегмента с разной электромагнитной обстановкой. Параметры приведены в табл.3.

ТАБЛИЦА 3. ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА ПО СЕГМЕНТАМ МАРШРУТА

Параметр	Сегмент 1 (3 кВ пост.)	Сегмент 2 (25 кВ перем.)
Участок	СПб Ладужский - Бабаево	Бабаево - Череповец
Длина, км	344,5	123,7
u_{2min} / P_{th}	8,0 дБ / -99 дБм	14,0 дБ / -93 дБм
$A_{э}$, дБ	3,0	5,0
$K_{ст}$	2 (среднепересеч.)	2 (среднепересеч.)
Антенна локомотива	АЛ1/160 (2 дБ)	АЛ1/160 (2 дБ)

Полученные результаты

Алгоритм разместил на маршруте 32 базовые станции: 20 на сегменте постоянного тока и 12 на сегменте переменного. Средний пролёт между соседними БС – 17,2 км на постоянном токе и 10,3 км на переменном.

На обоих сегментах получено сплошное радиопокрытие с перекрытием зон действия соседних БС: в каждой точке маршрута слышны минимум две базовые станции. Зона уверенного приёма заняла 100 % длины обоих сегментов, провалов покрытия нет.

Разница в числе БС между сегментами объясняется двумя причинами. Первая – более жёсткий порог чувствительности на переменном токе (-93 дБм против -99 дБм) из-за повышенного уровня промышленных помех от тягового оборудования электровозов. Вторая – большая поправка на экранирование корпусом локомотива ($A_{э} = 5$ дБ против 3 дБ). Вместе эти факторы сокращают допустимую дальность связи на сегменте переменного тока примерно в полтора раза.

Проверка ЭМС выполнена для частотных планов с 2, 3 и 4 номиналами частот. Результаты сведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА IV. ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЛА НАРУШЕНИЙ КРИТЕРИЯ КОКАНАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОТ ЧИСЛА ЧАСТОТНЫХ НОМИНАЛОВ

Число частот	Разнесение БС (DC), км	Разнесение БС (AC), км	Нарушение ЭМС (DC)	Нарушение ЭМС (AC)
2	34-39	22-23	18	10
3	51-55	33-34	Присутствуют	Присутствуют
4	68-72	44-45	0	0

При двух частотах на сегменте постоянного тока обнаружено 18 нарушений критерия ЭМС. Уровень помехи между одночастотными станциями (через одну, разнесёнными на 34–39 км) – от –96,9 до –95,3 дБм при

допустимом значении –109 дБм; превышение порога 12–14 дБ. На сегменте переменного тока – 10 нарушений на парах с разнесением 21–23 км: помеха от –88,2 до –87,7 дБм при лимите –103 дБм, превышение до 15 дБ.

При четырёх частотных номиналах одночастотные станции разнесены уже на три пролёта: больше 68 км на постоянном токе и больше 44 км на переменном. Этого хватает, чтобы выполнить критерий (3) с запасом – нарушений нет ни на одном из сегментов.

Из этих расчётов следует, что на рассматриваемом маршруте при текущей плотности БС двух номиналов недостаточно – нужно как минимум четыре.

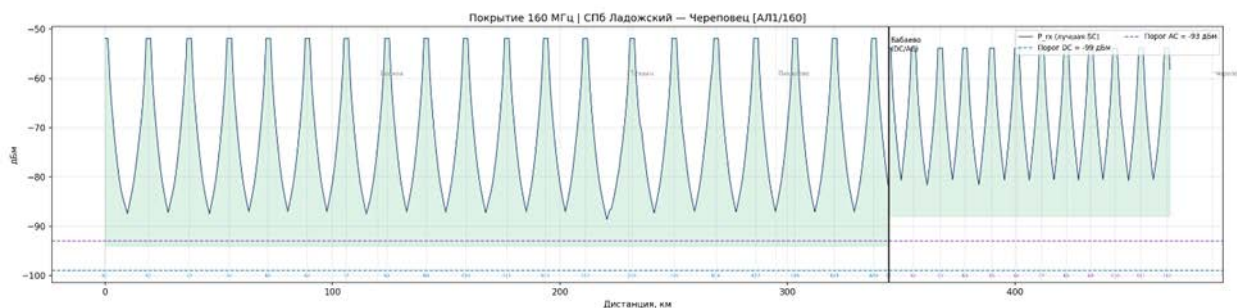


Рис. 1. Профиль уровня принимаемого сигнала вдоль маршрута. Ось X – расстояние, км; ось Y – P_{rx} , дБм. Штриховые линии – пороги P_{th} по сегментам (–99 дБм и –93 дБм). Вертикальные отметки – расположение базовых станций.

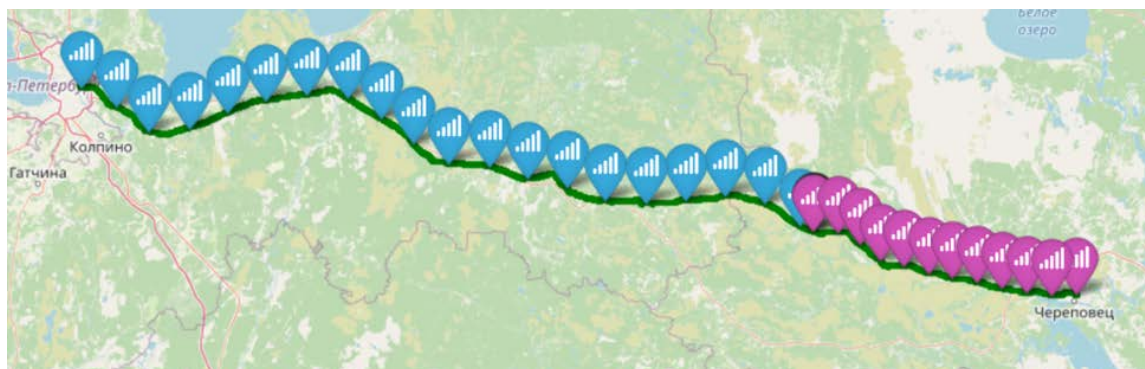


Рис. 2. Интерактивная карта радиопокрытия маршрута. Синие маркеры – базовые станции на участке постоянного тока, фиолетовые – переменного. Зелёные сегменты пути – зоны уверенного приёма

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан программный комплекс для частотно-территориального планирования сетей DMR диапазона 160 МГц. Расчёт уровня сигнала ведётся по отраслевой методике с использованием базовых кривых распространения, поэтому получаемые оценки соответствуют принятой в отрасли инженерной практике.

На маршруте длиной 468,1 км предложенный в рамках работы алгоритм разместил 32 базовые станции (20 на участках электрификации постоянного тока и 12 – переменного) со средними расстояниями между соседними БС соответственно 17,2 и 10,3 км. Сплошное радиопокрытие достигнуто на обоих сегментах. Проверка ЭМС показала, что для бесконфликтной работы сети при данной плотности БС нужен частотный план минимум на четыре номинала: при двух номиналах

фиксируется 28 нарушений критерия коканальной интерференции, при четырёх – нарушений нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Методические указания по организации и расчету сетей поездной радиосвязи ОАО «РЖД». Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 23.12.2013 № 2954р.
- [2] ETSI TS 102 361-1. Digital Mobile Radio (DMR); Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol. V2.10.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2021.
- [3] Recommendation ITU-R P.1546-6. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz. Geneva: ITU, 2019.
- [4] Recommendation ITU-R P.526-15. Propagation by diffraction. Geneva: ITU, 2019.
- [5] Recommendation ITU-R P.1812-7. A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 6 000 MHz. Geneva: ITU, 2023.
- [6] Recommendation ITU-R P.453-14. The radio refractive index: its formula and refractivity data. Geneva: ITU, 2019.