

# Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 004.733

## РАДИОПЛАНИРОВАНИЕ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ В ТОННЕЛЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА

**Адёркина Анастасия Александровна**

аспирант, ассистент кафедры радиотехники радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского<sup>1</sup>, научный сотрудник второй категории ООО «Радио Гигабит»<sup>2</sup>.

*E-mail:* anastasia.aderkina@radiogigabit.com.

**Шашанов Михаил Александрович**

старший научный сотрудник ООО «Радио Гигабит»<sup>2</sup>.

*E-mail:* mikhail.shashanov@radiogigabit.com.

**Шумилов Вячеслав Юрьевич**

старший научный сотрудник ООО «Радио Гигабит»<sup>2</sup>.

*E-mail:* vyacheslav.shumilov@radiogigabit.com.

**Трушанин Алексей Юрьевич**

руководитель направления системных разработок ООО «Радио Гигабит»<sup>2</sup>.

*E-mail:* alexey.trushanin@radiogigabit.com.

<sup>1</sup>Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

<sup>2</sup>Адрес: 603105, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Ошарская, д. 95.

**Аннотация:** В работе рассматривается задача радиопланирования специализированных сетей беспроводной связи поезд-земля диапазона 5–6 ГГц в метрополитенах, которые применяются для соединения бортовых сетей поездов со стационарной опорной сетью. Основным назначением таких систем является обеспечение высокоскоростного доступа в Интернет для пассажиров поезда через точки доступа Wi-Fi или пико соты 4G и 5G, расположенные в вагонах и подключённые к бортовой сети поезда. В работе предлагается методология эффективного выбора координат размещения базовых станций системы поезд-земля вдоль тоннелей в зависимости от геометрической формы изгибов пути. При разработке методики были решены две ключевые задачи: разработка достаточно точной модели затухания сигнала диапазона 5 ГГц при его распространении в тоннелях и разработка алгоритма выбора координат БС на основе получаемых данных о затухании сигнала. Предложенный подход позволяет снизить плотность и общее число базовых станций по сравнению с ранее применявшимися методами при условии обеспечения достаточного уровня покрытия сети.

**Ключевые слова:** базовая станция, тоннель, метрополитен, геометрическая оптика, затухание сигнала.

### Введение

Стремление жителей крупных городов иметь доступ к сети Интернет в любом месте привело к развитию городской инфраструктуры для увеличения зон покрытия сетей Wi-Fi (семейство стандартов IEEE 802.11), в том числе в общественном транспорте. При организации таких сетей внутри каждого пассажирского вагона устанавливается точка доступа Wi-Fi, подключаемая к бортовой сети. Для связи бортовой сети со стационарной опорной сетью и

далее с сетью Интернет используются специализированные системы связи типа подвижной состав-земля. Сети такого типа состоят из стационарно расположенных вдоль маршрута поезда базовых станций (БС) и мобильных станций (МС), размещённых на крыше подвижного состава. Для образования беспроводного соединения состав-земля чаще всего используется нелицензируемый диапазон 5–6 ГГц.

Построение сетей высокоскоростного беспроводного доступа для метрополитенов явля-

ется актуальной и технически сложной задачей. Это связано с большой концентрацией абонентов и особенностью среды распространения волн – узких протяженных тоннелей, часто сложной геометрии. В настоящее время в качестве основного подхода к построению сетей беспроводного доступа рассматривается использование сетей поезд-земля диапазона 5–6 ГГц с последующей установкой точек доступа Wi-Fi или пико сот мобильной связи 4G и 5G внутри вагонов и с подключением их к бортовой сети поезда.

При развёртывании сетей поезд-земля возникает задача оптимального выбора координат БС вдоль тоннеля. Основными критериями выбора являются минимизация средней плотности БС (соответственно, и полного числа БС, стоимости развёртывания и эксплуатации сети) и обеспечение уровня принимаемого сигнала не ниже заданного порога при любом расположении состава в тоннеле. В данной работе предлагается метод решения данной задачи, построенный на основе специальной математической модели распространения радиоволн диапазона 5–6 ГГц в тоннелях метрополитена. Модель основывается на методе геометрической оптики (ГО) и учитывает как геометрические, так и физические характеристики стен тоннелей. Предложенный метод сравнивается с используемым ранее методом расстановки,

который не учитывает зависимость затухания сигнала от геометрической формы пути.

### Модель тоннелей

Для получения точной модели распространения сигнала, пространство, в котором он распространяется должно быть задано с достаточной высокой точностью. Для этого разрабатываемая модель должна учитывать реальную форму изгибов тоннеля в трехмерном пространстве. Для существенного упрощения задачи исходная трёхмерная задача разбивается на две двумерные во взаимно-перпендикулярных плоскостях, проходящих через ось тоннеля: горизонтальной и вертикальной.

Ось тоннеля в пространстве задается кривыми в двух плоскостях. Первая кривая является проекцией оси на горизонтальную плоскость и называется планом пути. Вторая кривая, называемая профилем пути, задается на вертикально расположенной поверхности, повторяющей изгибы на плане пути (план является горизонтальным сечением этой поверхности). Примеры плана и профиля одной из линий Московского метрополитена представлен на рис. 1.

Двумерная геометрическая модель стен тоннеля задается в виде двух непрерывных кривых в каждой из плоскостей. При горизонтальном

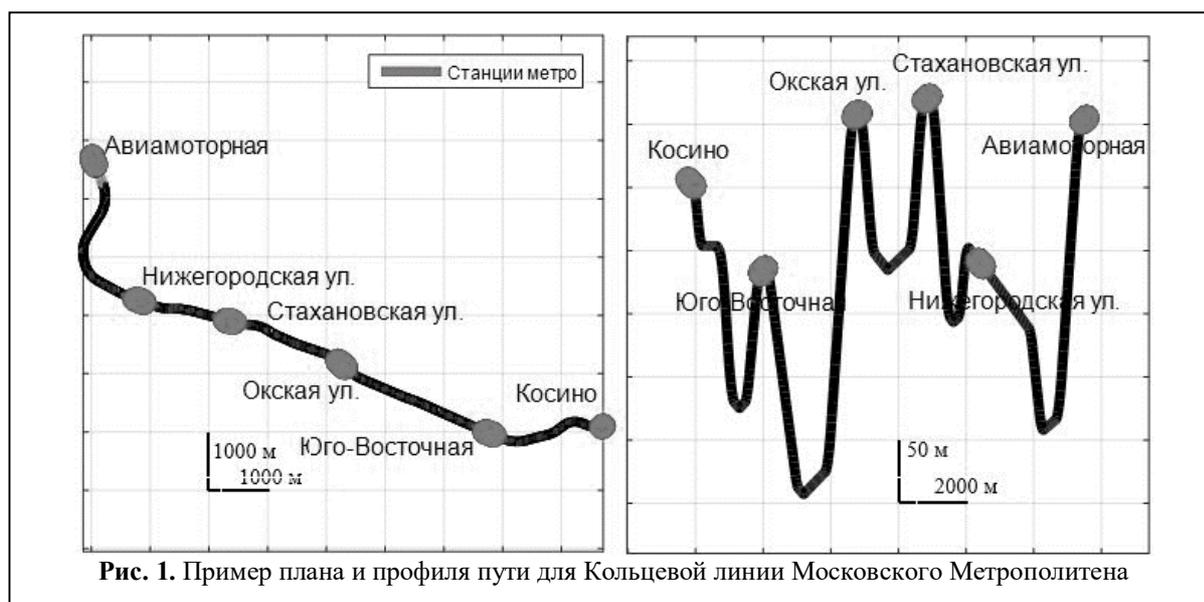


Рис. 1. Пример плана и профиля пути для Кольцевой линии Московского Метрополитена

расчёте они являются сечениями боковых стен, а при вертикальном расчёте – сечениями пола и потолка. Вертикальный расчёт производится полностью аналогично с точностью до замены боковых стен полом и потолком, а ширины тоннеля – высотой тоннеля. Для упрощения расчётов предполагается, что тоннель имеет постоянную геометрию поперечного сечения.

Модель затухания сигнала предполагает независимое проведение расчётов в плоскости плана и плоскости профиля с последующим комбинированием результатов для получения окончательной оценки затухания сигнала. Такой подход необходим для существенного упрощения расчётов падения мощности сигнала при его распространении вдоль тоннелей.

#### Модель стен тоннеля

Предлагаемая модель распространения сигнала вдоль тоннелей строится на основе методов ГО. Существенной частью общей модели распространения является модель отражения одного луча от стены (пола и потолка) тоннеля. Отражённый и падающий лучи лежат в плоскости, содержащей перпендикуляр к отражающей поверхности (или касательной к ней) в точке падения, и угол падения равен углу отражения. В условиях реального тоннеля при каждом отражении луча от реальной стены только часть излучения отражается в зеркальном направлении, остальная часть поглощается материалами стен и рассеивается под другими углами (это излучение предполагается потерянным и далее не учитывается).

Для моделирования отражения волны от стены тоннеля была построена специальная упрощённая модель самой стены. Для уменьшения сложности модели распространения сигнала, предполагается единая модель для различных типов стен, потолка и пола тоннелей. Реальные стены и пол, как правило, обладают неровной поверхностью с множеством выступов. По обеим

боковым стенам проложено большое число кабелей, закреплённых на выступающих металлических крепежах. Пол тоннеля иногда покрыт щебнем, вдоль проходит водосточный желоб, размещаются рельсы и шпалы.

При обобщении различных типов стен можно заключить, что за редкими исключениями все они покрыты достаточно толстым (десятки сантиметров) слоем конструкций с множеством выступов и отверстий, представляющих собой хороший рассеиватель радиоволн. Глубже всегда располагается слой сплошной стены, в который радиоволны практически не проникают.

В качестве упрощённой модели стены для расчёта отражений в составе предлагаемой модели расчёта затухания сигнала предлагается структура, имеющая две гладкие границы раздела сред. Слоистая модель стена показана на рис. 2.

В качестве материала переходного слоя рассеивателя используется модель материала, отличающегося от воздушной среды наличием относительно небольшой проводимости. Величина проводимости выбирается в таких пределах, чтобы волны рассматриваемых диапазонов частот могли распространяться через материал, но испытывали при этом затухание по экспоненциальному закону. Наличие такого затухания эффективно моделирует потерю мощности из-за рассеяния волны.

Описанная модель стены имеет два параметра: величину проводимости эффективного материала переходного слоя и толщину переходного слоя. Данные параметры, выбираются по

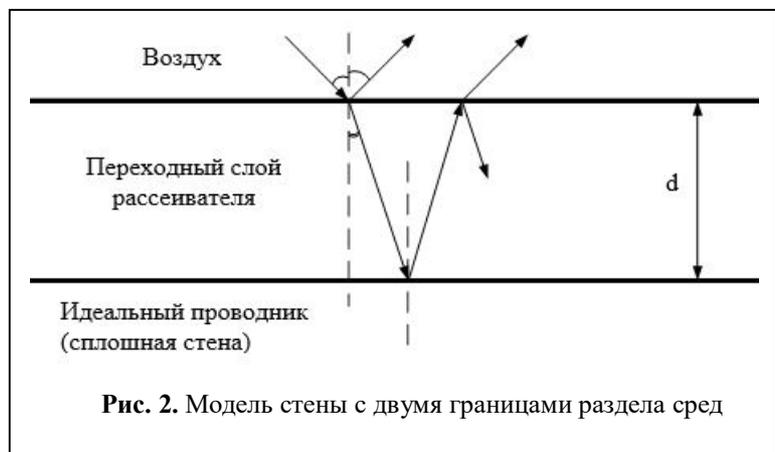


Рис. 2. Модель стены с двумя границами раздела сред

результатам измерений. Указанные параметры переходного слоя зависят от частоты сигнала. Для разработанной модели параметры подбирались для частот диапазона 5–6 ГГц, который используется для установления беспроводных соединений между поездом и тоннельной сетевой инфраструктурой.

### **Модель распространения радиосигнала в тоннелях**

При выборе подхода к построению модели распространения радиоволн были изучены основные теоретические методы [1–5]. Также были изучены подходы, которые ранее анализировались на возможность применения при моделировании поведения радиосигнала в железнодорожных тоннелях [6], и которые использовались при расчёте в схожих пространствах распространения [7].

Одной из особенностей расчёта распространения поля в тоннелях метрополитена является соотношение размеров геометрических объектов, с которыми оно взаимодействует (ширина и высота тоннеля, радиусы поворота и масштабы перепада по высоте – от единиц до сотен метров), и длины волны (6 см для 5 ГГц). Другой особенностью является большая область распространения сигнала. Площадь сечения тоннелей составляет десятки квадратных метров, протяжённость линий метро может достигать пятидесяти километров.

Метод численного решения уравнений в частных производных (волнового или уравнений Максвелла) с граничными условиями неприменим для расчёта больших пространств, так как шаг пространственной сетки должен быть много меньше длины волны, а общий размер сетки должен быть таким, чтобы покрыть всю область распространения сигнала.

Метод аналитического расчёта распространения волн с заменой стен тоннеля некоторыми каноническими формами оказывается неприменимым, так как длина волны слишком мала для обеспечения возможности аппроксимации реальной формы тоннеля простыми аналогами.

Метод приближения геометрической оптики (ГО) наиболее прост в реализации и имеет достаточно высокую точность предсказания уровня потери мощности сигнала при его распространении в замкнутом пространстве. Повышение точности достигается за счёт построения специальной модели стен тоннелей метро. На основании проведённого анализа в качестве подхода к расчёту затухания сигнала был выбран именно этот вариант.

При вычислении величины затухания радиосигнала при распространении вдоль тоннеля используется алгоритм трассировки лучей. Этот алгоритм модели ГО используется для того, чтобы найти все возможные геометрические лучи (лучевые трубки), выходящие из передатчика и приходящие в приёмник при том, что они распространяются по законам ГО.

Для нахождения лучей, соединяющих передающую и приёмную антенны, генерируется набор лучей, исходящих из передающей антенны, с равным угловым шагом в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  относительно оси тоннеля. Лучи запускаются только в сторону нахождения приёмника. Распространяясь в сторону приёмника, исходные лучи последовательно отражаются от стен тоннеля по законам ГО до тех пор, пока не пересекут поперечное сечение тоннеля, проходящее через точку расположения приёмной антенны. Если в процессе распространения количество отражений конкретного луча превышает некоторую заданную величину, принимающую значения от 5 до 25 в зависимости от расстояния между передатчиком и приёмником, то расчёт данного луча прекращается еще до достижения поперечного сечения тоннеля, проходящего через точку расположения приёмной антенны. Максимально допустимое количество отражений луча, при котором его расчёт не прекращается, определяется мощностью луча после N-го отражения. Конкретные значения параметров выбраны на практике для обеспечения достаточной точности модели представлены в Таблице 1.

Среди всех дошедших лучей окончательно выбираются те, которые попали в точку распо-

Таблица 1. Параметры алгоритма трассировки лучей

Расстояние, м	Кол-во исходных лучей, тыс.	Максимальный порядок отражения
0–100	3	5
100–300	5	7
300–600	8	9
600–800	15	12
800–1500	25	20
>1500	40	25

ложения приёмника. Наличие пришедшего луча фиксируется, если положение приёмника на линии поперечника находится между точками прихода двух изначально соседних лучей. Может найтись несколько таких пар соседних лучей среди исходно запущенных. Полагается, что каждой такой паре соответствует отдельный пришедший луч (отдельная лучевая трубка). Окончательно для расчёта параметров данного луча он запускается под углом, который определяется интерполяцией лучей из данной соседней пары с весами, обратно пропорциональными расстоянию от точки прихода луча до точки расположения приёмника на поперечнике. Такой луч считается идеально попадающим в точку расположения приёмника.

Для каждого из пришедших в точку приёма лучей в каждой из двух плоскостей расчёта определяется величина затухания, состоящая из следующих компонент 3:

$$PL_k^{(h/v)} = PL_{GO} + PL_{refl} - (G_{TX} + G_{RX}),$$

где  $PL_k^{(h/v)}$  – суммарное затухание  $k$ -го луча в горизонтальной ( $h$ ) или вертикальной ( $v$ ) плоскости в дБ,  $PL_{GO}$  – величина затухания по законам ГО,  $PL_{refl}$  – суммарная величина затухания вследствие потерь на отражениях от стен,  $G_{TX}$  – коэффициент усиления передающей антенны,  $G_{RX}$  – коэффициент усиления приёмной антенны.  $G_{TX}$  и  $G_{RX}$  являются величинами диаграмм направленности под углами выхода и прихода луча. Азимутальная диаграмма используется для расчёта в горизонтальной плоскости, диаграмма по углу места в вертикальной плоскости.

Величина ГО затухания включает в себя изменение мощности вследствие сходимости и

расходимости бесконечно тонкой лучевой трубки при прохождении определённого расстояния. В простейшем случае, если луч не испытывает ни одного отражения (луч является лучом прямой видимости), учитывая двухмерность задачи в каждой плоскости:

$$PL_{GO} = 10 \cdot \lg(d),$$

где  $d$  – расстояние вдоль луча.

При отражении от радиальных участков характер расходимости лучевой трубки изменяется, что меняет зависимость дальнейшего затухания от пройденного лучом пути. Для учёта этого эффекта в итоге используется следующая процедура расчёта  $PL_{GO}$ .

Для каждого  $n$ -го отражения от стен ( $n > 0$ ) итеративно вычисляется параметр расстояния от точки отражения до каустики (условной точки, где отражённая лучевая трубка, продлённая в обе стороны на достаточное расстояние, смыкается):

$$\frac{1}{\rho_n} = \frac{1}{\rho_{n-1} + l_{n-1}} \pm \frac{2}{a_n \cdot \cos(\theta_n)},$$

где  $\rho_n$  – параметр расстояния до каустики после  $n$ -го отражения,  $\rho_0 = 0$ ,  $l_{n-1}$  – расстояние, пройденное лучом от  $(n-1)$ -го отражения до  $n$ -го,  $l_0$  – расстояние от передатчика до первой точки отражения,  $a_n$  – радиус отражающей стены в точке  $n$ -го отражения,  $\theta_n$  – величина угла падения, отсчитанного от нормали. Знак «+» соответствует выпуклой стене, знак «-» – вогнутой.

Расстояние до каустики имеет положительный знак в том случае, если лучи после отражения расходятся (точка каустики остается сзади от точки отражения), и отрицательный знак, если лучи после отражения сходятся

(точка каустики находится впереди). В вырожденном случае расстояние до каустики может обращаться в бесконечность. Тогда отражённая лучевая трубка параллельна.

Суммарные потери при распространении сигнала от  $n$ -го отражения до  $(n+1)$ -го описываются следующим выражением:

$$L_n = 10 \cdot \lg \left| \frac{\rho_n + l_n}{\rho_n} \right|$$

где  $n > 0$ . Пусть  $N$  – общее количество отражений данного луча. Затухание от последнего  $N$ -го отражения до точки приёмника  $L_N$  описывается той же формулой, где  $l_N$  задаёт расстояние от последнего  $N$ -го отражения до точки приёмника. Затухание при распространении от передатчика до первого отражения (или до приёмника, если текущий луч не имеет отражений)  $L_0$  задаётся формулой:

$$L_0 = 10 \cdot \lg(l_0),$$

После учёта всех отражений получается следующее выражение:

$$\begin{aligned} PL_{GO} &= \sum_{i=0}^N L_i = 10 \cdot \lg(l_0) + \sum_{i=1}^N 10 \cdot \lg \left| \frac{\rho_n + l_n}{\rho_n} \right| = \\ &= 10 \cdot \lg \left| \frac{\rho_1 + l_1}{\rho_1} \dots \frac{(\rho_n + l_n)}{\rho_n} \right|. \end{aligned}$$

Можно показать непосредственной подстановкой, что при отражении только от прямых стен ( $a_n = \infty$ ):

$$\begin{aligned} PL_{GO} &= 10 \cdot \lg(\rho_N + l_N) = \\ &= 10 \cdot \lg(\rho_{N-1} + l_{N-1} + l_N) = \dots = \\ &= 10 \cdot \lg(l_0 + \dots + l_{N-1} + l_N) = 10 \cdot \lg(d). \end{aligned}$$

Из приведённого способа расчёта затухания следует, что оно может обращаться в минус бесконечность децибел в том случае, если  $(\rho_n + l_n)$  обращается в ноль для какого-либо  $n$ -го отражения, то есть при совмещении точки каустики со следующей точкой отражения или точкой расположения приёмника. Такая ситуация является ожидаемым артефактом ГО подхода. Кроме обращения результата в минус бесконечность, может также возникнуть снижение точности модели, если какая-либо точка отражения или точка расположения приёмника

попадает в достаточно близкую окрестность вокруг каустики.

Для устранения описанных эффектов, случайно возникающих при определённых положениях передатчика и приёмника, и получения гладких результатов применяется следующий приём. Если величина  $(\rho_n + l_n)$  при каком-либо  $n$  при вычислении  $PL_{GO}$  опускается ниже заданного порога по модулю, она приравнивается к величине порога с сохранением знака. Значение порога выбирается так, чтобы результаты предсказания модели были наиболее близки к измеренным данным.

При рассмотрении слагаемого  $PL_{refl}$  в описанных ранее предположениях о модели стены, необходим расчёт коэффициента отражения по формулам для тонкого слоя 2. Величина затухания  $PL_{refl}^{(n)}$  для одного отражения рассчитывается следующим образом:

– для ТЕ волны

$$PL_{refl}^{(n)} = 20 \lg \left| \frac{Z_1 \cos(\theta_i) - j Z_2 \cos(\theta_i) \operatorname{tg}(k_2 d \cos(\theta_i))}{Z_1 \cos(\theta_i) + j Z_2 \cos(\theta_i) \operatorname{tg}(k_2 d \cos(\theta_i))} \right|,$$

– для ТМ волны

$$PL_{refl}^{(n)} = 20 \lg \left| \frac{Z_1 \cos(\theta_i) - j Z_2 \cos(\theta_i) \operatorname{tg}(k_2 d \cos(\theta_i))}{Z_1 \cos(\theta_i) + j Z_2 \cos(\theta_i) \operatorname{tg}(k_2 d \cos(\theta_i))} \right|,$$

где  $\theta_i$  – угол падения на границу воздух – переходный слой (угол падения в алгоритме трассировки лучей),  $d$  – толщина переходного слоя (параметр модели стены),  $\theta_i$  – угол преломления в переходной среде,  $k_1$  и  $Z_1$  задают волновое число и волновой импеданс воздуха (или вакуума),  $k_2$  и  $Z_2$  – волновое число и волновой импеданс переходной среды, ТЕ волны – магнитные волны у которых отсутствует продольная составляющая электрического поля, ТМ волны – электрические волны у которых отсутствует продольная составляющая магнитного поля. Предполагается, что тоннель имеет постоянные электромагнитные характеристики стен вдоль всей области расчёта.

При наличии нескольких отражений данного луча от стен тоннеля при его распространении вычисляется суммарное затухание (в децибелах):

$$PL_{refl} = \sum_{n=1}^N PL_{refl}^{(n)},$$

где  $N$  – число отражений данного луча.

Таким образом, для каждого пришедшего в точку приёмника луча величина затухания (в разгах) определяется произведением затухания по законам ГО для двумерной задачи с учётом кривизны стен тоннеля, итоговой величины затухания вследствие отражения от стен и произведения обратной суммы коэффициентов усиления передающей и приёмной антенн.

$$PL_k^{(h/v)} = PL_{GO} \cdot PL_{refl} \cdot \frac{1}{(G_{TX} + G_{RX})}.$$

Комбинирование всех найденных лучей между передатчиком и приёмником независимо производится как для расчёта в вертикальной плоскости, так и для расчёта в горизонтальной плоскости. В каждой плоскости предполагается, что суммарная мощность сигнала в точке приёмной антенны равна сумме мощностей всех найденных лучей, то есть предполагается некогерентное сложение мощностей. Применение такого подхода связано с тем, что в большинстве случаев отражения от стен близки к скользящим, пятно отражения захватывает существенную область стены тоннеля, на которой не постоянны ширина тоннеля, форма стены, наличие или отсутствие объектов и выступающих агрегатов и т.д. Поэтому в рамках рассмотренной геометрической модели невозможно говорить о точном расчёте фаз пришедших лучей, и они рассматриваются как случайные. Таким образом, рассматриваемая модель позволяет рассчитать среднюю мощность сигнала (усреднённую по небольшому объёму пространства, где может располагаться антенна). Реальная мощность сигнала отличается от средней на некоторую величину случайного замирания, которую невозможно рассчитать в рамках предложенной модели. Данный факт учитывается в алгоритме размещения базовых станций пу-

тем снижения порогового затухания на величину случайных потерь.

В соответствии со сказанным выше полная величина затухания в каждой плоскости вычисляется по формуле:

$$PL^{(h)} = -10 \cdot \lg \left[ \sum_{k=1}^{K^{(h)}} 10^{-PL_k^{(h)}/10} \right],$$

$$PL^{(v)} = -10 \cdot \lg \left[ \sum_{k=1}^{K^{(v)}} 10^{-PL_k^{(v)}/10} \right],$$

где  $PL_k^{(h/v)}$  – затухание, вычисленное для каждого из пришедших лучей,  $K^{(h/v)}$  – полное число найденных лучей в данной плоскости.

Результирующее затухание для трёхмерной задачи вычисляется как произведение затуханий в двух плоскостях.

### Результаты измерений параметров модели распространения

В тоннелях Московского метрополитена были проведены две серии измерений для уточнения и проверки разработанной модели затухания. В ходе первой серии были получены зависимости коэффициента отражения от угла падения для двух поляризаций антенн. На рис. 3 представлена схема установки для измерения коэффициентов отражения от стен тоннелей.

$TxA$  – угол поворота передающей антенны,  $RxA$  – угол поворота принимающей антенны,  $\alpha$  – угол падения,  $\beta$  – угол наблюдения. Все углы отсчитываются в азимутальной плоскости.  $D$  – расстояние до стены (до уровня наиболее выступающих конструкций). В модели стены это соответствует расстоянию до границы воздух – рассеивающий слой,  $L$  – рассто-



Рис. 3. Схема измерительной установки для определения коэффициента отражения от стены. Вид сверху.

яние между стойками антенн,  $al$  – длина крепления антенн (расстояния от центра стойки до центра излучающего элемента). В измерениях использовались две идентичные антенны, закреплённые на поворотных стойках. В результате вращения стоек каждая антенна ориентировалась под углом  $TxA$  для передающей антенны и  $RxA$  для принимающей антенны. Диапазон изменения углов составлял от 0 (антенны смотрят друг на друга) до 90 (обе антенны смотрят на стену) градусов. Углы  $TxA$  и  $RxA$  в ходе измерений принимали 11 значений независимо, таким образом, всего насчитывается 121 ориентация антенн по углам.

В результате проведённых измерений удалось получить матрицу мощностных потерь для каждого расположения антенн. Размерность матрицы  $11 \times 11$  соответствует всем комбинациям положений углов антенн. Матрицы были получены для каждого расстояния между антеннами внутри одного перегона и для всех исследуемых перегонов. Путём последующей обработки данных матриц удаётся получить отдельные точки зависимости коэффициента отражения ( $|R|$ ) от угла падения ( $\alpha$ ). Результаты измерений сравниваются с теоретической слоевой моделью. Данные зависимости представлены на рис. 4. Результаты измерений сравниваются с идеальной слоевой моделью отраже-

ния от эффективного рассеивающего слоя, описанной выше. Как можно видеть, кривая, задаваемая моделью, везде находится в коридоре погрешностей, что позволяет сделать вывод о применимости данной модели для дальнейшего использования. Большие величины погрешностей измерений обуславливаются технической сложностью контроля углов при проведении измерений в тоннелях метрополитена.

Для расчётов затухания сигналов с частотами около 5–6 ГГц по результатам измерений были выбраны следующие параметры модели стен: толщина слоя ( $d$ ) 60 см и эффективная проводимость ( $\sigma$ ) 0,01 См/м.

#### Калибровка модели распространения сигнала 5 ГГц в тоннеле

Вторая серия измерений в метрополитене заключалась в измерении потери мощности (PL) сигнала между зафиксированным передатчиком и приёмником, который перемещался вдоль тоннеля. В качестве примеров приведены результаты измерений в тоннелях различного типа (различные материалы покрытия стен, формы сечения тоннелей) и геометрии. На рис. 5 представлены зависимости потерь от расстояния в поворотных тоннелях с радиусом кривизны около 400 м и 200 м. На рис. 6 пред-

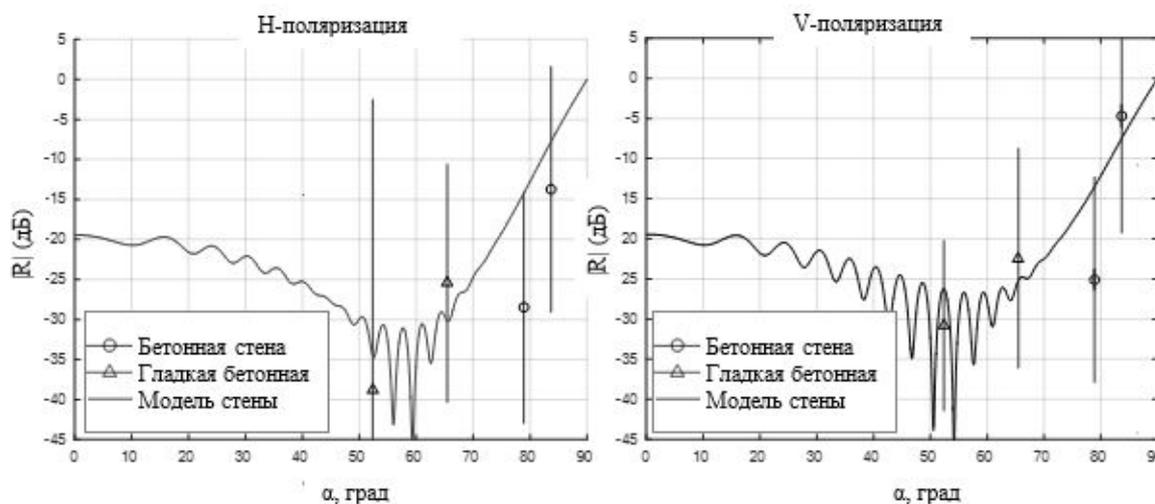


Рис. 4. Зависимости коэффициентов отражения от стен тоннелей в зависимости от угла падения для двух поляризаций антенн



Рис. 5. Зависимости потерь мощности радиосигнала в зависимости от расстояния в прямых тоннелях

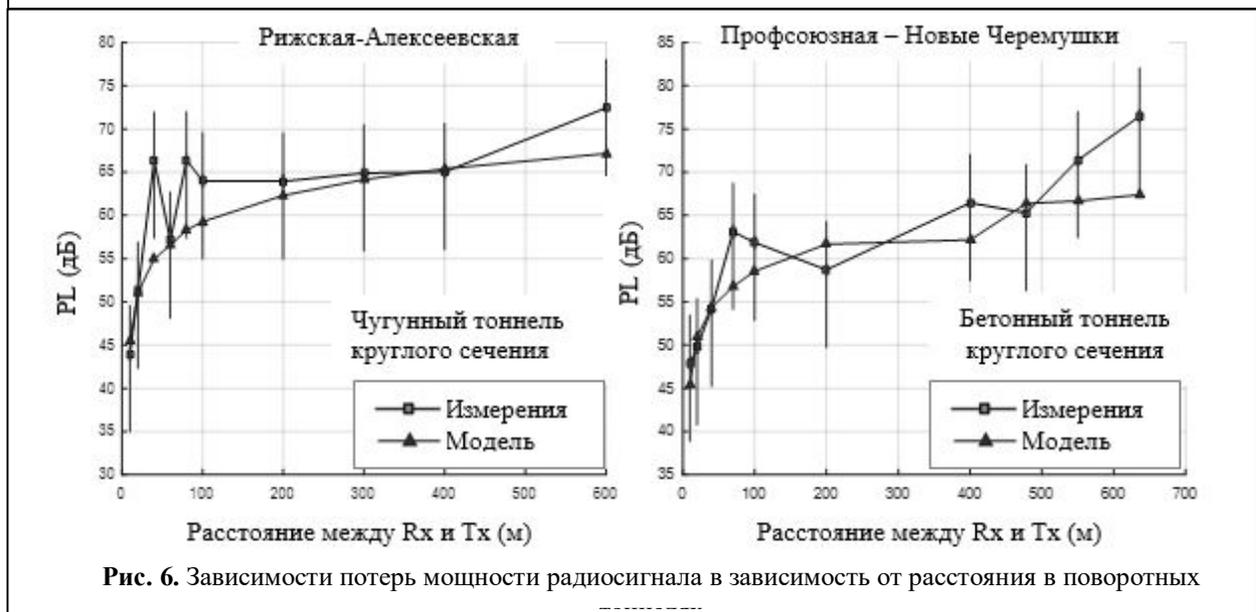


Рис. 6. Зависимости потерь мощности радиосигнала в зависимости от расстояния в поворотных

ставлены зависимости величины потерь от расстояния в прямых тоннелях.

Сравнение результатов измерений со значениями, предсказанными моделью, показывают, что в большинстве случаев их разница укладывается в погрешности измерений. Погрешности измерений обусловлены преимущественно ошибками при механической ориентации антенн по углам азимута и места.

#### Алгоритм размещения БС

Рассмотрев различные подходы к задаче радиопланирования [12], стало очевидно, что стандартные методы не применимы к решаемой

задаче нахождения оптимальной расстановки БС. Для решения поставленной цели был разработан алгоритм, позволяющий получить лучшую расстановку БС в условиях тоннелей.

Целью предлагаемого алгоритма является получение расстановки БС, обеспечивающей равномерное покрытие путей метрополитена радиосетью. Немаловажной целью является возможность уменьшения необходимого количества БС.

Алгоритм размещения БС использует разработанную модель затухания сигнала. При реализации алгоритма были использованы

следующие предположения, соответствующие используемому оператором приёмно-передающему оборудованию:

1. потери мощности сигнала между составом и БС не должны превышать заданного порога;
2. установка антенн на станциях запрещена;
3. при нормальном движении внутри тоннеля состав подключается к следующей по ходу БС через антенну своего головного вагона. В ряде случаев, например, при подъезде к станции, состав может подключаться к последней БС на перегоне через хвостовой вагон;
4. к каждой БС должен подключаться только один состав во избежание разделения временного ресурса БС между составами.

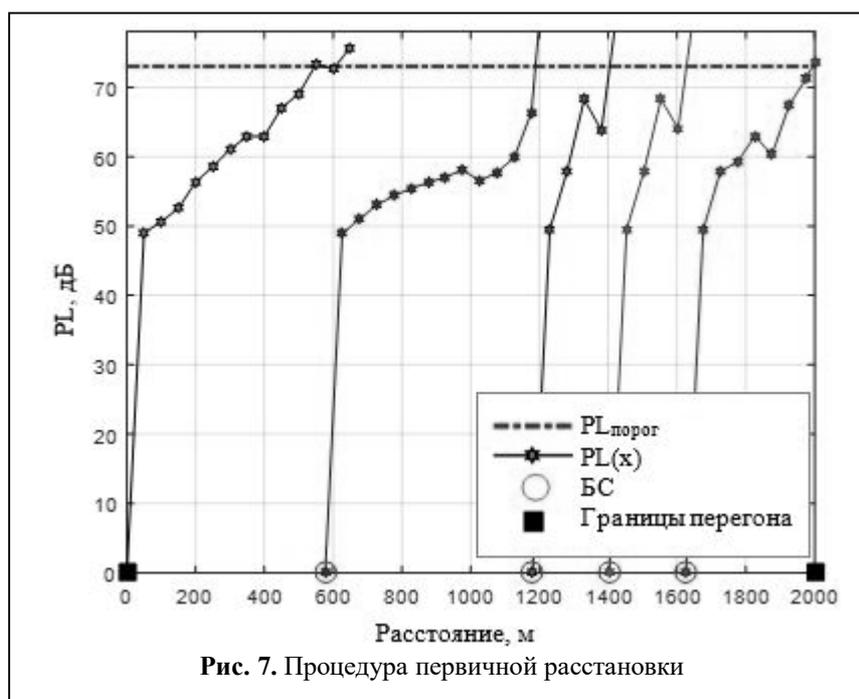
Выбор целевых координат БС для каждого перегона состоит из двух этапов, называемых начальной расстановкой и оптимизацией расстановки БС.

На первом этапе БС размещаются так, чтобы затухание сигнала от начала перегона, где располагается антенна головного вагона поезда при его остановке на станции, до точки расположения первой БС, и между последующими соседними БС были равны заданной величине порога ( $PL_{порог}$ ). Алгоритм состоит в продвижении вдоль тоннеля с заданным шагом и вычислении затухания между последней установленной БС и текущей координатой ( $x$  – расстояние между этими двумя точками), куда помещается антенна поезда. В точке, где значение затухания равно порогу устанавливается новая БС. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут конец перегона. Описанная процедура отображена на рис. 7.

Задачей второго этапа является введение поправок к выбранным координатам БС для выравнивания затухания между последней БС и концом перегона, которое не контролируется в ходе первого этапа, и затуханий между остальными БС, установленными в перегоне.

Процедура оптимизации может идти одним из двух возможных путей. В том случае, если потери между точкой расположения последней БС и точкой антенны поезда в конце перегона, где располагается антенна хвостового вагона поезда при остановке на станции, ниже установленного порога, оптимизация состоит в сокращении количества БС, полученных после первичной расстановки. При этом последняя БС удаляется, а оставшиеся смещаются в сторону конца перегона для выравнивания затуханий. Если же между последней БС и концом перегона значение потерь выше порога, то все установленные БС перемещаются в сторону начала перегона.

Эффективность разработанного алгоритма приведена на примере количества БС, установленных на старых линиях метро Москвы первоначально, и количества БС, полученных на выходе нового алгоритма. Количественное сравнение приведено в Таблице 2.



**Таблица 2.** Сравнение количества БС в двух подходах расстановки

Линия	Количество БС при первоначальной расстановке	Количество БС при использовании разработанного алгоритма расстановки БС
Замоскворецкая	52	42
Калужско-Рижская	50	43
Арбатско-Покровская	61	54

На рис. 8 представлено сравнение расстановок БС по первоначальному методу и по разработанному методу.

### Заключение

В ходе выполнения работы была разработана специализированная модель падения мощности сигнала при его распространении вдоль тоннелей, использующая в своей основе метод геометрической оптики (ГО). Предложенная модель применима для расчёта распространения сигналов в диапазоне 5–6 ГГц, который используется для организации беспроводных каналов между поездом и тоннельной инфраструктурой.

Полученная модель была верифицирована путем проведения прямых измерений уровня падения мощности сигнала при его распространении вдоль тоннелей в реальных условиях Московского метрополитена.

Разработан алгоритм расстановки БС вдоль тоннелей. Расстановка БС, найденная при при-

менении этого алгоритма, обеспечивает равномерное покрытие тоннелей с требуемым уровнем сигнала при использовании минимального количества БС.

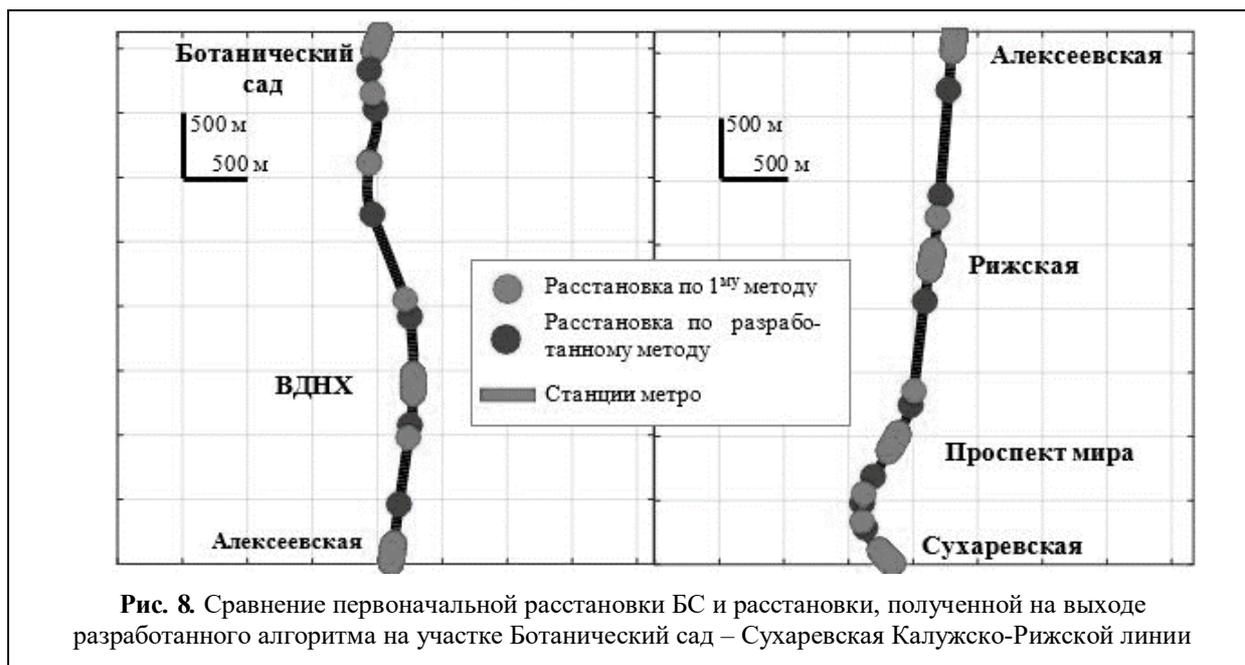
Разработанный алгоритм был успешно применён при планировании строящихся сетей Петербургского метрополитена, новых участков Московского метрополитена, отдельных участков метрополитенов в Сантьяго-де-Чили, Дели, Тель-Авива.

Ранее данные результаты были представлены на 73-й Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» 13.

Данная работа была выполнена по заказу АО «МаксимаТелеком».

### Литература

1. Hrovat A., Kandus G., Javornik T. A survey of radio propagation modeling for tunnels. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. No. 16.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Москва: Наука, 1973. 343 с.



**Рис. 8.** Сравнение первоначальной расстановки БС и расстановки, полученной на выходе разработанного алгоритма на участке Ботанический сад – Сухаревская Калужско-Рижской линии

3. Bouche D., Molinet F., Mittra R. Asymptotic methods in electromagnetics. Berlin: Springer, 1997. 548 p.
4. Popov A. V. and Zhu N. Y. Modeling radio wave propagation in tunnels with a vectorial parabolic equation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2000. No. 48.
5. Taflov A., Hagness S. C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed. Norwood: Artech House, 2005. 1038 p.
6. Wang C.-X., Ghazal A., Ai B., Liu Y., Fan P. Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. No. 18.
7. Ranjan A., Sahu H.B., Misra P. Modeling and measurements for wireless communication networks in underground mine environments. Measurement. 2020. No. 149.
8. Фитасов Е.С., Односецьев В.А., Душко И.В., Ивлев Д.Н. К вопросу моделирования канала распространения радиолокационных сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 3. С. 48–56.
9. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. 368 с.
10. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.А. Гауссовская модель многолучевого канала связи в городских условиях // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2004. № 1. С. 127–137.
11. Фитасов Е.С., Ивлев Д.Н., Морозов Н.С., Савельев Д.В. Система синхронизации времени и локального позиционирования на базе беспроводных сетей // Датчики и системы. 2017. № 8–9. С. 20–26.
12. Tolstrup M. Indoor Radio Planning. A Practical Guide for GSM, DCS, UMTS, HSPA and LTE. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 480 p.
13. Адёркина А.А., Шашанов М.А., Шумилов В.Ю., Трушанин А.Ю., Карасев С.А. Разработка методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS-2018). Москва, 2018. С. 147–151.

Поступила 12 декабря 2019 г.

English

## ADAPTIVE PROTECTION AIDS OF NARROW-BAND RADIO COMMUNICATION SYSTEMS FROM MULTIPATH SIGNALS AND PULSE INTERFERENCE

**Anastasiya Aleksandrovna Adyorkina** – Post-graduate Student, Assistant Lecturer, Radio Engineering Department, Radio Physics Faculty, N.I. Lobachevsky State University<sup>1</sup> of Nizhny Novgorod; 2nd Category Researcher, Radio Gigabit LLC.

*E-mail:* anastasia.aderkina@radiogigabit.com.

**Mikhail Alexandrovich Shashanov** – Senior Researcher, Radio Gigabit LLC<sup>2</sup>.

*E-mail:* mikhail.shashanov@radiogigabit.com

**Vyacheslav Yurievich Shumilov** – Senior Researcher, Radio Gigabit LLC<sup>2</sup>.

*E-mail:* vyacheslav.shumilov@radiogigabit.com.

**Alexey Yurievich Trushanin** – System Development Manager, Radio Gigabit LLC<sup>2</sup>.

*E-mail:* vyacheslav.shumilov@radiogigabit.com.

<sup>1</sup>*Address:* 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

<sup>2</sup>*Address:* 603105, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Osharskaya str., 95.

*Abstract:* Special-purpose equipment should be installed in public transport to incorporate this transport into Wi-Fi network coverage areas. Wi-Fi access point network is connected with landline network in each train in metro tunnels using 5-6 GHz wireless communication system comprising an array of base stations (BS) located along metro railway, and two mobile stations (MS) in train trailer carriages. The problem that arises deploying this system is about optimal choice of BS coordinates along railway tracks to ensure a sufficient signal strength between MS and BS when train is moving and there is a minimum number of employed BS. The main difficulty in choosing BS coordinates is the problem to calculate signal attenuation coefficient between BS and MS in tunnels. Model of signal propagation along tunnels is based on ray tracing method and when using it those rays are searched for that reached receiving antenna. Attenuation coefficient according to GO laws and due to losses on reflections from walls is defined for each incoming ray. A simplified model of wall was made to simulate ray reflection from tunnel walls. Walls are assumed to be covered with a material that differs from air medium by having relatively small conductivity. This model parameters are as follows:

conductivity value and layer thickness are determined by measurement results. Dependencies of signal power loss on distance between MS and BS were measured to test signal propagation model in Moscow metro tunnels. Comparison of measurement results with model-predicted values confirmed sufficient accuracy of the developed model. Based on the proposed signal attenuation model, an instrument was developed to automatically choose BS coordinates along the tunnel in such a way that received signal strength would not drop below specified critical level when train is moving. The developed instrument was successfully used when planning to construct St. Petersburg metro networks, new sections of Moscow metro, and some sections of metro in Santiago de Chile, new Delhi, and Tel Aviv.

*Keywords:* base station, tunnel, metro system, geometric optics, signal attenuation.

### References

1. *Hrovat A., Kandus G., Javornik T.* A survey of radio propagation modeling for tunnels. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014. No. 16.
2. *Brekhovskikh L.M.* Waves in layered media. Moscow: Nauka, 1973. 343 p.
3. *Bouche D., Molinet F., Mittra R.* Asymptotic methods in electromagnetics. Berlin: Springer, 1997. 548 p.
4. *Popov A.V. and Zhu N.Y.* Modeling radio wave propagation in tunnels with a vectorial parabolic equation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2000. No. 48.
5. *Taflove A., Hagness S. C.* Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed. Norwood: Artech House, 2005. 1038 p.
6. *Wang C.-X., Ghazal A., Ai B., Liu Y., Fan P.* Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. No. 18.
7. *Ranjan A., Sahu H.B., Misra P.* Modeling and measurements for wireless communication networks in underground mine environments. *Measurement*. 2020. No. 149.
8. *Fitasov E.S., Odnosevtsev V.A., Dushko I.V., Ivlev D.N.* On the issue of modeling the propagation channel of radar signals. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. 2016. No. 3. Pp. 48–56.
9. *Ermolaev V.T., Flaxman A.G.* Theoretical bases of signal processing in wireless communication systems. Nizhny Novgorod: NNSU, 2011. 368 p.
10. *Ermolaev V.T., Flaxman A.G., Averin I.A.* Gaussian model of a multipath communication channel in urban conditions. *Bulletin of N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*. 2004. No. 1. Pp. 127–137.
11. *Fitasov E.S., Ivlev D.N., Morozov N.S., Savelev D.V.* Time synchronization and local positioning System based on wireless networks. *Sensors and systems*. 2017. No. 8–9. Pp. 20–26.
12. *Tolstrup M.* Indoor Radio Planning. A Practical Guide for GSM, DCS, UMTS, HSPA and LTE. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 480 p.
13. *Aderkina A.A., Shashanov M.A., Shumilov V.Yu., Trushanin A.Yu., Karasev S.A.* Development of radio planning methods for wireless communication systems in the metro. *Radio electronic devices and systems for information technologies (REDS-2018)*. Moscow, 2018. Pp. 147–151.