

УДК 625.42:621.3.091.1

**ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ОСЛАБЛЕНИЯ СИГНАЛА ДИАПАЗОНА 5 ГЦ
ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВДОЛЬ УЧАСТКОВ МЕТРОПОЛИТЕНА РАЗЛИЧНОГО ТИПА**

Адёркина Анастасия Александровна

аспирант, ассистент кафедры радиотехники радиофизического факультета
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского¹,
научный сотрудник ООО «Радио Гигабит»².
E-mail: anastasia.aderkina@radiogigabit.com

Шашанов Михаил Александрович

старший научный сотрудник ООО «Радио Гигабит»².
E-mail: mikhail.shashanov@radiogigabit.com

Шумилов Вячеслав Юрьевич

старший научный сотрудник ООО «Радио Гигабит»².
E-mail: vyacheslav.shumilov@radiogigabit.com

Трушанин Алексей Юрьевич

руководитель направления системных разработок ООО «Радио Гигабит»².
E-mail: alexey.trushanin@radiogigabit.com

¹Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

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

Аннотация: В работе рассматривается методология проведения измерений величины затухания сигнала диапазона 5 ГГц при распространении в тоннелях метрополитена, приводится анализ полученных результатов и сопоставление измеренных данных с теоретически предсказанными. Необходимость проведения данных измерений возникла при разработке подхода к решению задач радиопланирования в тоннелях метрополитена. Предложенный подход включает разработку специализированной модели распространения сигнала. Точность разработанной модели критически важна при проектировании беспроводных систем связи. Для достижения требуемой точности модели и проверки применимости описанного подхода в реальных условиях были проведены несколько серий экспериментов в тоннелях метро Москвы. Помимо тоннелей метрополитена измерения проводились на открытых участках и на станциях. Проведённые измерения имели следующие цели: определить параметры проводимости стен тоннеля для модели распространения, верифицировать разработанную модель, определить влияние станций и открытых участков на величину затухания сигнала. Анализ результатов измерений показал, что измеренные величины затухания с достаточной точностью согласуются с теоретически предсказанными, что доказывает применимость разработанного подхода.

Ключевые слова: измерения, модель, потери сигнала, тоннель, станция, коэффициент отражения.

Введение

В последние годы в мире наблюдается тенденция на переход к низкоэнергопотребляющему транспорту. В этом контексте железнодорожные перевозки широко рассматриваются как фундаментальное решение для улучшения ситуации с общественным транспортом по всему миру. Исследования, посвящённые изучению увеличения количества пользователей общественного железнодорожного транспорта и его важности в обеспечении комфортной жизни в городах, можно найти в [1, 2]. Из-за большой

загруженности городского транспорта, улучшение эффективности и пропускной способности метрополитена пользуется всё большим спросом. Различные виды беспроводных технологий, используемых в метрополитене, играют существенную роль в обеспечении безопасности людей, усилении эффективности работы сети, повышении комфорта пассажиров и оптимизации процессов. О различных типах беспроводных сетей в Московском метрополитене, как одном из самых загруженных и развитых метрополитенов мира, их назначении и

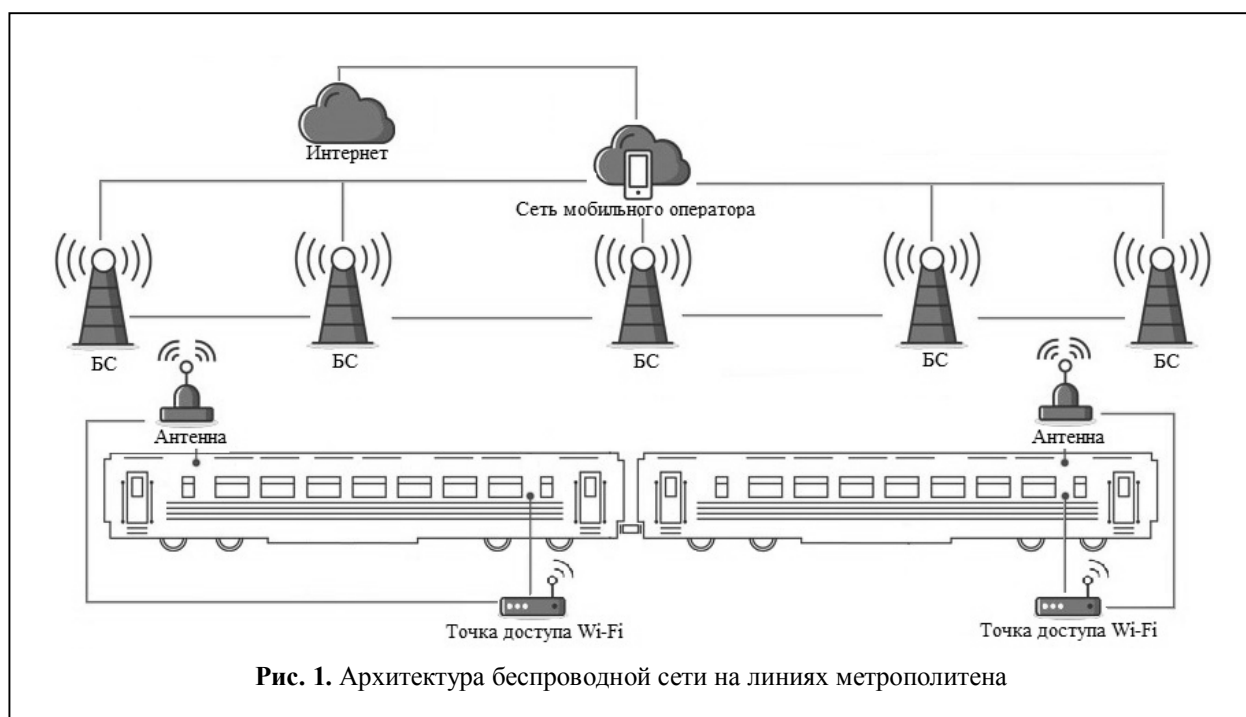
увеличении спроса на них говорится в [3–6]. По данным статистики, приведённых в источниках, по итогам 2019 года объём передаваемых данных в метро Москвы вырос в восемь раз по сравнению с 2018-м, годом ранее трафик возрастал в четырнадцать раз, два года назад в полтора раза. Приведённая тенденция увеличения объёма трафика будет продолжаться в последующие годы за счёт увеличения протяжённости тоннелей, покрытых сетью, и повышения качества беспроводной связи.

В данной работе представлены результаты исследования затухания сигнала диапазона 5–6 ГГц при распространении в тоннелях метрополитена. Беспроводной канал указанного диапазона предназначен для специализированных сетей беспроводной связи, основным назначением которых является обеспечение высокоскоростного доступа в Интернет для пассажиров поезда через точки доступа Wi-Fi. При организации таких сетей внутри каждого пассажирского вагона устанавливается точка доступа Wi-Fi, подключаемая к бортовой сети. Для связи бортовой сети с сетью Интернет используются специализированные системы связи, которые состоят из базовых станций (БС), расположенных вдоль маршрутов поездов, и

антенн, размещённых на крыше поездов. Более подробно архитектура сети описана в [7]. Упрощённая архитектура сети, описанная выше, схематично представлена на рис. 1. Описанная схема является универсальной для метрополитена и может быть развёрнута на участке любого типа.

Для расчёта количества БС, их расположения и предсказания радиопокрытия беспроводной сетью тоннелей метро нами был разработан алгоритм, основывающийся на использовании специально разработанной модели распространения сигнала вдоль тоннелей метрополитена, учитывающей особенности геометрии тоннелей и поглощающие свойства покрытия стен тоннелей. Описанный подход и результаты его применения были обзорно представлены в статье [8], которая является логической первой частью материала, представляемого в текущей работе, и содержит теоретическое обоснование разработанной модели затухания сигнала диапазона 5 ГГц в тоннелях метрополитена.

Предложенная модель использует в своей основе подход геометрической оптики (ГО) и метод трассировки лучей. Для каждого луча, пришедшего в точку приёмника, величина за-



тухания определяется несколькими компонентами, в том числе величинами затухания по законам ГО и затуханием вследствие отражения от стен. Для моделирования затухания при отражении от стен предполагается наличие эффективного переходного слоя между сплошной стеной тоннеля и свободным пространством внутри тоннеля. В качестве материала такого слоя используется виртуальный материал, характеризующийся небольшой проводимостью [8].

Точность модели распространения сигнала играет критическую роль при проектировании и оценке коммуникационных систем. Из-за ограниченного пространства тоннеля, наличия волноводного эффекта и различных неоднородностей вдоль тоннеля, характер распространения сигнала будет отличаться на разных участках. Тем не менее, достаточно точная модель распространения сигнала способна учитывать крупномасштабные характеристики затухания, существенные для систем связи, в любом из сценариев. Для метрополитена можно выделить следующие основные сценарии распространения: тоннели, открытые участки, станции. Каждый из этих участков имеет свои особенности, которые оказывают влияние на скорость спада мощности сигнала при распространении. Для построения достаточно точной модели затухания в каждом из описанных сценариев, необходимым этапом является проведение измерений на соответствующих участках.

Измерениями затухания сигнала в тоннелях ранее занимались многие исследовательские группы [9]. Работы [10, 11] являются одними из самых ранних работ, посвящённых проведению измерений свойств радиоканала в железнодорожных тоннелях. Изучению характеристик беспроводного канала именно в тоннелях метрополитена посвящено большое количество работ, в том числе [12–17]. Пример результатов измерений ослабления сигнала на частоте 5 ГГц представлен в [13, 14], в работах [12], [15, 16, 17] опубликованы результаты для частоты 2,4 ГГц и близких к ней, которые также

используются в сетях Wi-Fi. Сигналы указанных диапазонов обладают схожими свойствами, для обоих диапазонов применимы одинаковые методы исследования.

В статье [18] помимо обзора различных подходов к построению модели распространения сигнала в тоннелях рассматривается вопрос необходимости учёта электромагнитных характеристик стен тоннеля при построении точной модели.

Для проверки применимости разработанной модели распространения сигнала в тоннелях метрополитена [8] и определения параметров проводимости стен были проведены несколько серий измерений затухания сигнала в тоннелях метрополитена.

Первая серия измерений направлена на определение коэффициента отражения от стен тоннеля и других параметров модели. Полученные параметры используются в разработанной модели распространения. Целью второй серии измерений является сравнение величин затуханий сигнала, полученных на выходе модели распространения, и измеренных значений. Предложенная модель будет считаться применимой в случае, если эти значения будут совпадать в пределах погрешности измерений.

Данная статья организована следующим образом. В первом разделе описана методология проведения первой серии измерений по определению коэффициента отражения от стен, представлены результаты и анализ полученных результатов. Следующие разделы посвящены измерениям второй серии по определению уровня затухания сигнала при распространении на участках метрополитена разного типа: второй раздел — вдоль тоннелей, третий раздел — вдоль путей на открытых участках, четвёртый — на станциях метрополитена подземного и наземного типов. Каждый из этих разделов имеет одинаковую структуру и содержит два пункта: описание методологии проведения измерений с указанием особенности каждого сценария и результаты измерений с анализом и выводами.

1. Измерение коэффициента отражения от стен

а. Методология проведения измерений

В первой серии измерений измеряется коэффициент отражения сигнала от стен тоннеля метро, из которого затем определяются величины проводимости и толщины переходного слоя, которые являются параметрами модели распространения. Схема установки для измерения коэффициентов отражения от стен тоннелей представлена на рис. 2, фотография используемой установки на рис. 3.

На схеме используются следующие обозначения: TxA , RxA — углы поворота передающей и принимающей антенн; α — угол падения; β — угол наблюдения; D — расстояние до переходного слоя, имитирующего сложную конструкцию стен тоннелей; L — расстояние между стойками антенн; al — расстояния от центра стойки до центра излучающего элемента.

Параметр D изменялся в пределах 0,4–1,2 метра. Параметр L изменялся в пределах от 1 до 12 метров.

В измерениях использовались две одинаковые антенны [19], закреплённые на поворотных стойках. В результате вращения стоек каждая антенна ориентировались главным лепестком диаграммы направленности под углом TxA для передающей антенны и RxA для принимающей антенны. Диапазон изменения углов составлял от 0 (антенны направлены друг на друга) до 90 (обе антенны направлены на стену) градусов.

В результате проведённых измерений удалось получить матрицу мощностных потерь для каждого расположения антенн. Далее коэффициент отражения высчитывается по формуле:

$$R = FSPL - (G_{tx} + G_{rx}) - PL_{meas},$$

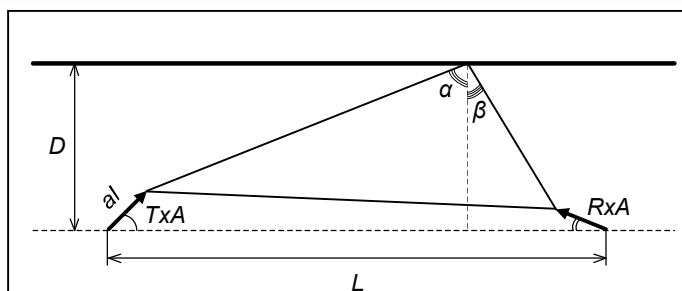


Рис. 2. Схема измерительной установки для определения коэффициента отражения от стены

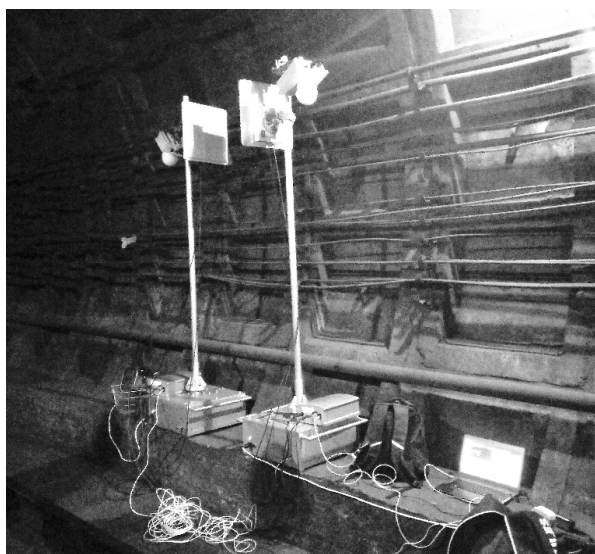


Рис. 3. Фотография измерительной установки для определения коэффициента отражения от стены

где R — коэффициент отражения; $FSPL$ — затухание в свободном пространстве по формуле Фрииса [20]; G_{tx} — коэффициент усиления передающей антенны, G_{rx} — коэффициент усиления приёмной антенны, PL_{meas} — измеренное затухание сигнала.

б. Результаты измерений и выводы

В качестве результатов измерений представлены зависимости коэффициента отражения от угла падения. Результаты измерений сравниваются с теоретической слоистой моделью [21]. Теоретически предсказанные величины и измеренные значения отображены на графиках рис. 4.

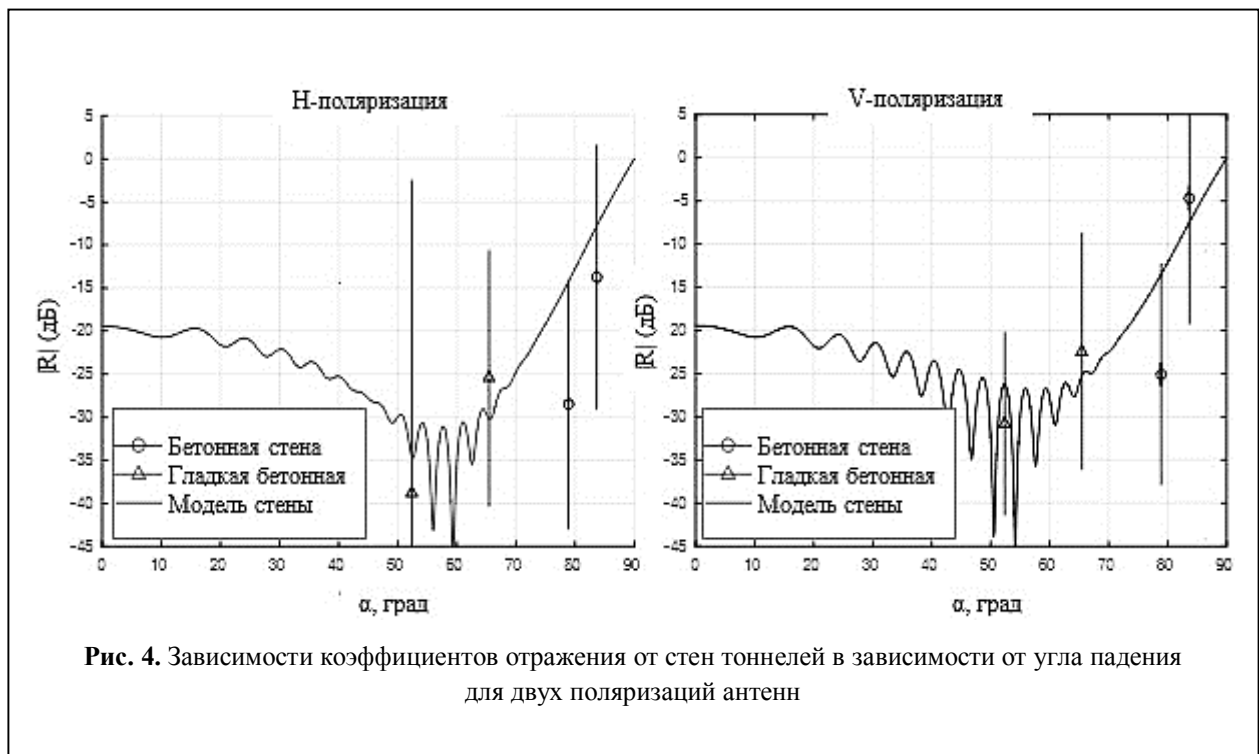


Рис. 4. Зависимости коэффициентов отражения от стен тоннелей в зависимости от угла падения для двух поляризаций антенн

В результатах приведены погрешности измерений, основанные на абсолютных погрешностях величин, измеренных напрямую. Абсолютная погрешность углов ориентации передающей и принимающей антенн составила 3° , погрешность величин, определяющих расстояние, составила 1 см.

Высокие погрешности, отображённые на рис. 4, объясняются невозможностью точного позиционирования измерительного оборудования по углу в условиях метрополитена и достаточно большой шириной главного лепестка используемых антенн.

В пределах имеющейся точности измерений различие в коэффициентах отражения, связанное с материалами стен, зафиксировать невозможно. По этой причине в модели распространения используются усреднённые параметры эффективной проводимости и толщины рассеивающего слоя для всех тоннелей.

По результатам измерений и сравнения их с моделью отражения от эффективного слоя были определены параметры эффективного рассеивающего слоя. Толщина слоя принята равной 60 см и проводимостью $\sigma = 0,01$ См/м.

2. Измерение затухания сигнала вдоль тоннеля

Тоннели метрополитена являются подходящим пространством для распространения радиосигнала вдоль них за счёт ограниченного узкого пространства и большой протяжённости. При этом тоннельный сценарий обладает рядом особенностей: сложной геометрией, а именно наличием множества поворотов и спусков/подъёмов различной крутизны, и плохой гладкостью внутренних стен, что обуславливает отличие этого сценария от других. Перечисленные особенности нужно учитывать при разработке модели распространения и при проведении измерений. Изучению поведения сигналов в тоннелях метрополитена посвящены многие работы, например в [12–14, 17]. В данных работах исследуется влияние сложной геометрии тоннелей на скорость спада мощности сигнала при распространении.

а. Методология проведения измерений

Для измерения потерь мощности сигнала использовалась две одинаковые антенны [22], которые представляли из себя передатчик и приёмник, разнесённые на определённые рас-

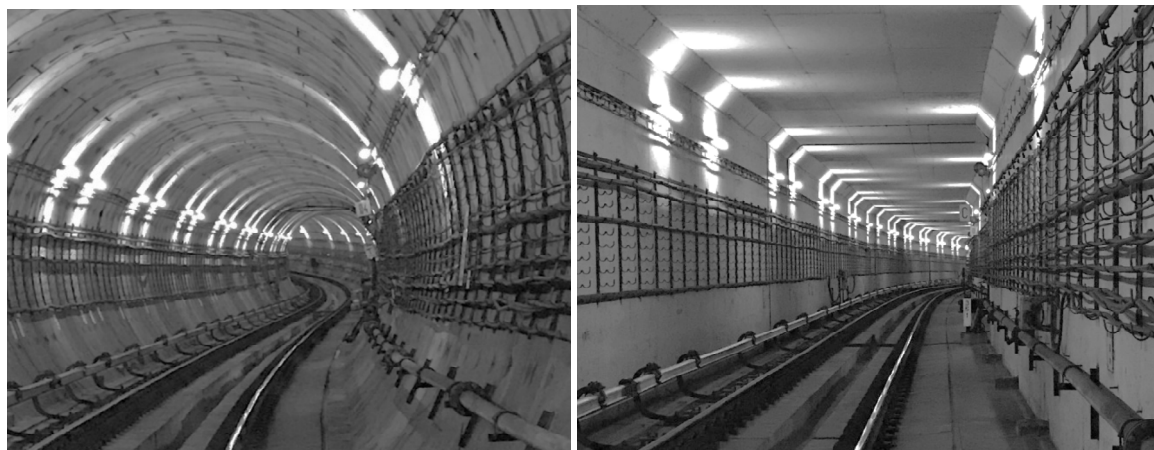


Рис. 5. Тоннели с бетонным покрытием круглого и прямоугольного сечений

стояния вдоль оси тоннеля. Антенны располагались приблизительно в центре поперечного сечения тоннеля. Максимумы диаграмм направленности антенн ориентировались вдоль прямой, соединяющей антенны, или вдоль касательной к закруглениям путей на больших расстояниях. Антенны имели вертикальную поляризацию.

Измерения проводились в тоннелях разного типа: круглого и прямоугольного сечения, чугунные и бетонные тоннели. Примеры бетонных тоннелей с разной формой поперечного сечения приведены на рис. 5.

б. Результаты измерений и выводы

На рис. 6, рис. 7 приведены полученные зависимости потерь мощности сигнала от расстояния между точками передатчика и приёмника на четырёх различных участках. Исследуемые участки характеризуются различными материалами стен и различными формами сечения.

Высота установки антенны над полом во всех измерениях составляла примерно 2,5 м. Высота тоннеля на участках измерений равна 4,2 м. Ширина тоннеля на участке Рижская — Алексеевская равна 5,8 метра, на других участках — 4 метра.

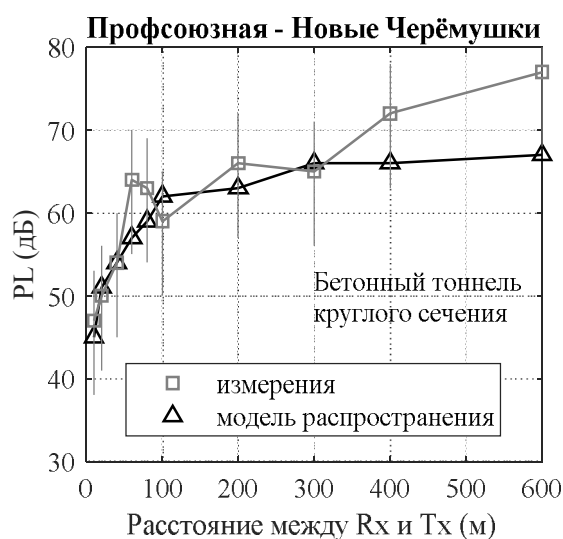
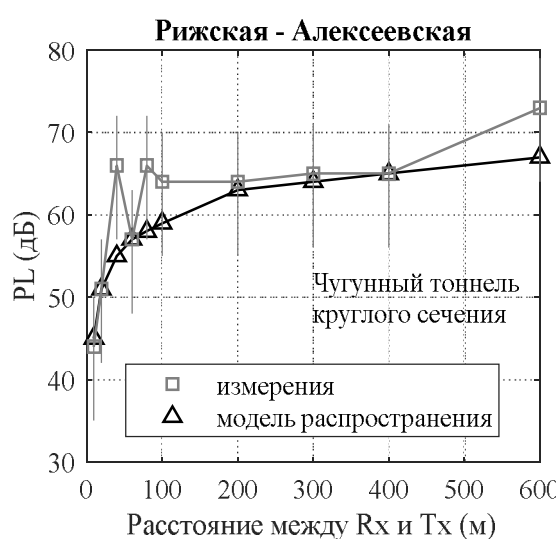
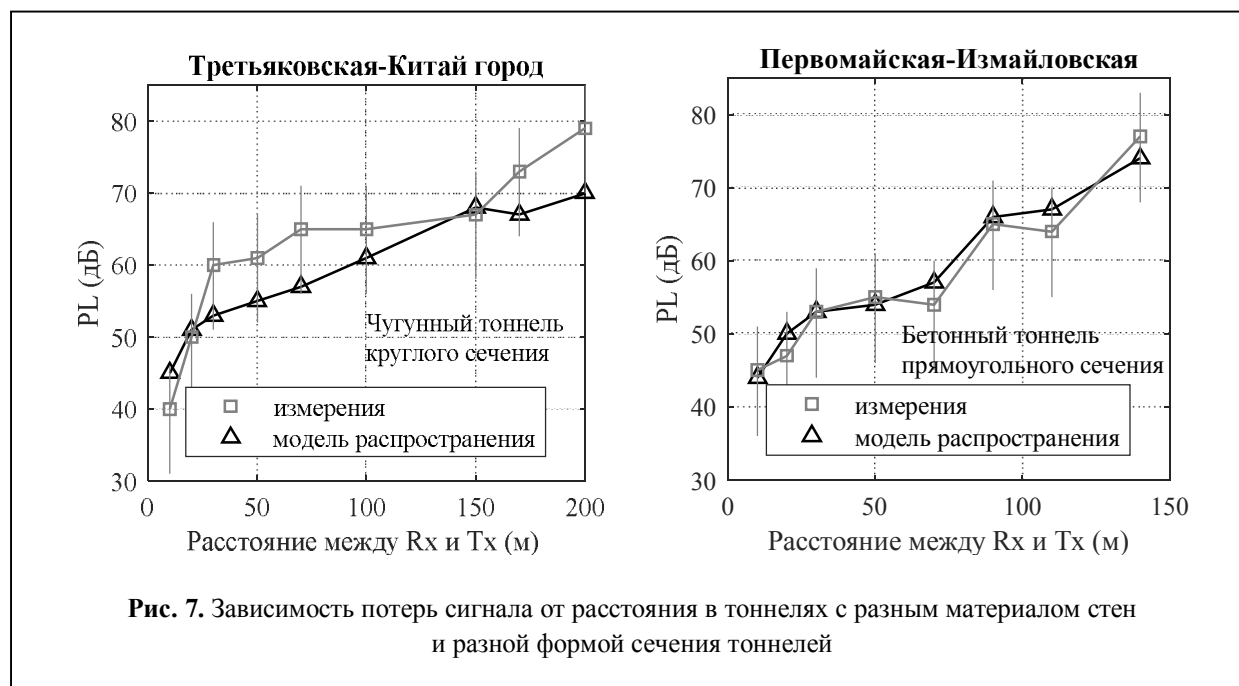


Рис. 6. Зависимость потерь сигнала от расстояния в тоннелях с разным материалом стен



Три последние точки на кривых для участка Профсоюзная — Новые Черёмушки были измерены на станции. Начало платформы располагается на расстоянии 478 м от передатчика, а конец платформы — на расстоянии 636 м от передатчика. Подробнее влияние станций на поведение затухания сигнала будет исследовано далее, но по последним точкам результатов на перегоне Профсоюзная — Новые Черёмушки можно отметить увеличивающееся расхождение между измеренными и предсказанными данными, что говорит о том, что наличие станций на пути распространения сигнала меняет характер распространения и вносит дополнительные потери.

В итоговых графиках приведены погрешности измерений, которые обозначены вертикальными метками на каждой измеренной точке. Размах метки соответствует величине погрешности. Ошибка угла ориентации антенн в вертикальной и горизонтальной плоскостях предполагалась равной 5° . Ошибка угла изначальной фиксации антенн на стойках составляет приблизительно 3° .

Сравнение затуханий, предсказанных моделью и измеренных, показывает, что в подавляющем большинстве случаев их разница укла-

дывается в погрешности измерений. Типичная ошибка не превышает 5–7 дБ. Имеющиеся расхождения результатов могут объясняться: ошибками измерений, неточностями модели (использование упрощений), неточностями задания геометрии тоннеля (предположения о постоянстве размеров и формы поперечного профиля).

По результатам калибровки модели можно заключить, что точность предсказания затухания для целей радиопланирования и расстановки базовых станций является приемлемой.

3. Измерение затухания сигнала на открытых участках пути

Также в работе исследуется затухание сигнала на открытых участках метрополитена. Участки такого типа мало распространены в российском метрополитене, но часто встречаются в других странах.

а. Методология проведения измерений

Для проведения измерений на открытых участках использовалось то же измерительное оборудование и та же методика измерений, что и в тоннелях. Особенностью измерений на открытых участках является то, что обе антенны



Рис. 8. Открытые участки на эстакадах с разным типов ограждений и количеством путей на участке

расположены выше уровня боковых ограждений. При этих условиях можно приблизительно говорить о распространении сигнала в свободном пространстве.

Измерения проводились на открытых наземных участках Филёвской и Бутовской линий. Высота установки обеих антенн над полом составляла 2,45 м. Измерения проводились на двухпутных участках линий. На участке Филёвской линии расстояние между осями путей 20 м, между ограждением и осью ближайшего пути 4,2 м. Общая ширина зоны 28,4 м. Для Бутовской линии расстояние между осями путей составляло 11,18 м, между

ограждением и осью ближайшего пути 2,26 м. Общая ширина 15,7 м. Высота ограждений на обоих участках 2 м.

б. Результаты измерений и выводы

На графиках измерений приведены характерные погрешности. В расчёте величины погрешностей учитывались два доминирующих источника ошибки измеренного затухания: неточность ориентации антенн вдоль путей и неточность оценки принятой мощности в приёмном устройстве измерителя. Ошибка угла ориентации антенн предполагалась равной $\pm 1,5^\circ$, что соответствует характерным ошибкам визу-

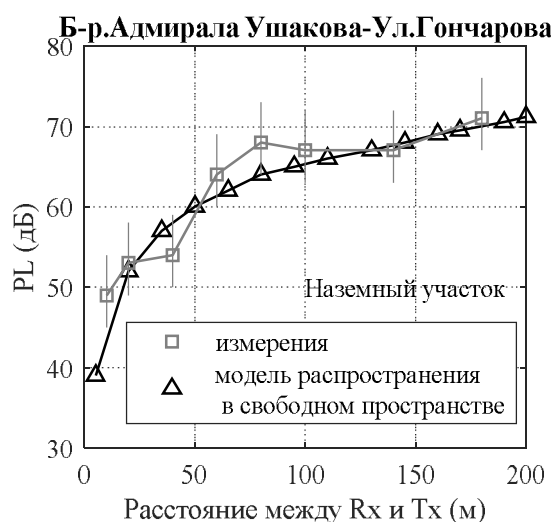
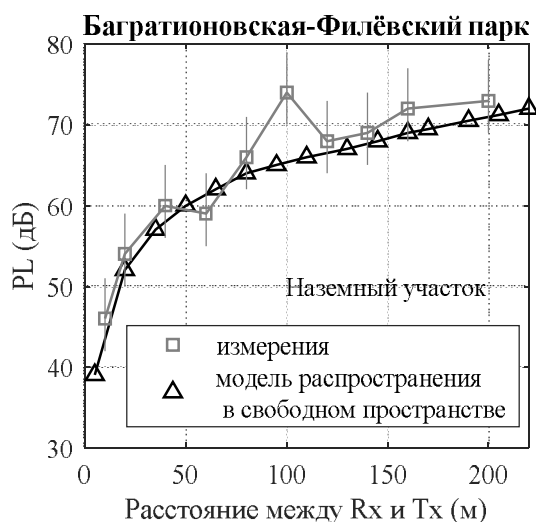


Рис. 9. Зависимость потерь сигнала от расстояния на открытых участках

альной ориентации антенны вдоль пути. Результирующая ошибка в уровне затухания складывается из ошибок ориентации двух антенн в двух плоскостях — азимутальной и угла места, с учётом формы диаграммы направленности. Ошибка оценки принятой мощности предполагается равной ± 1 дБ, что соответствует характеристикам используемого измерителя. В сумме по всем факторам величина погрешности составила около ± 4 дБ. Описанная методика использовалась для измерений как для открытых участков, так и вдоль станций.

Для большинства измеренных точек предсказанное и измеренное затухания достаточно близки, а их разница укладывается в пределы погрешностей измерений. Небольшое отклонение за пределы погрешностей для трёх точек из представленного множества может объясняться как неудачной ориентацией антенны в соответствующих точках расположения приёмника (например, из-за неровностей поверхности в месте установки штатива антенны), так и наличием факторов распространения сигнала, не учтённых в модели. К таким факторам можно отнести слабые отражения сигнала от поверхности земли (пола) и других конструктивных элементов путей.

В целом можно заключить, что точность предсказания затухания на открытых участках является достаточной для целей радиопланирования и расстановки базовых станций.

4. Измерение затухания сигнала на станциях

Одной из особенностей геометрии тоннелей метрополитена является наличие станций, которые из-за увеличенной ширины приводят к возрастанию потерь мощности сигнала. Эта особенность подробно была изучена в работах [15, 16, 17].

а. Методология проведения измерений

Для исследования влияния наличие станций на величину потерь мощности сигнала в данной работе были проведены измерения затухания сигнала вдоль станций различного типа: подземной (закрытой) и наземной (открытой), фотографии которых представлены на рис. 10.

Методика проведения измерений аналогична описанным ранее сценариям для тоннелей и открытых участков. Результаты измерений сравниваются с теоретическими результатами, полученными для закрытого или открытого тоннеля.

Измерения проводились в пределах открытой станции «Филёвский парк» и на прилегающих к ней участках линии. Высота установки обеих антенн над полом составляла 2,46 м. Измерения проводились на двухпутном участке линии: расстояние между осями путей 20 м, между ограждением и осью ближайшего пути 4,2 м. Общая ширина 28,4 м. Высота ограждений на прилегающих участках 2 м. Конструк-



Рис. 10. Подземная и открытая наземная станции

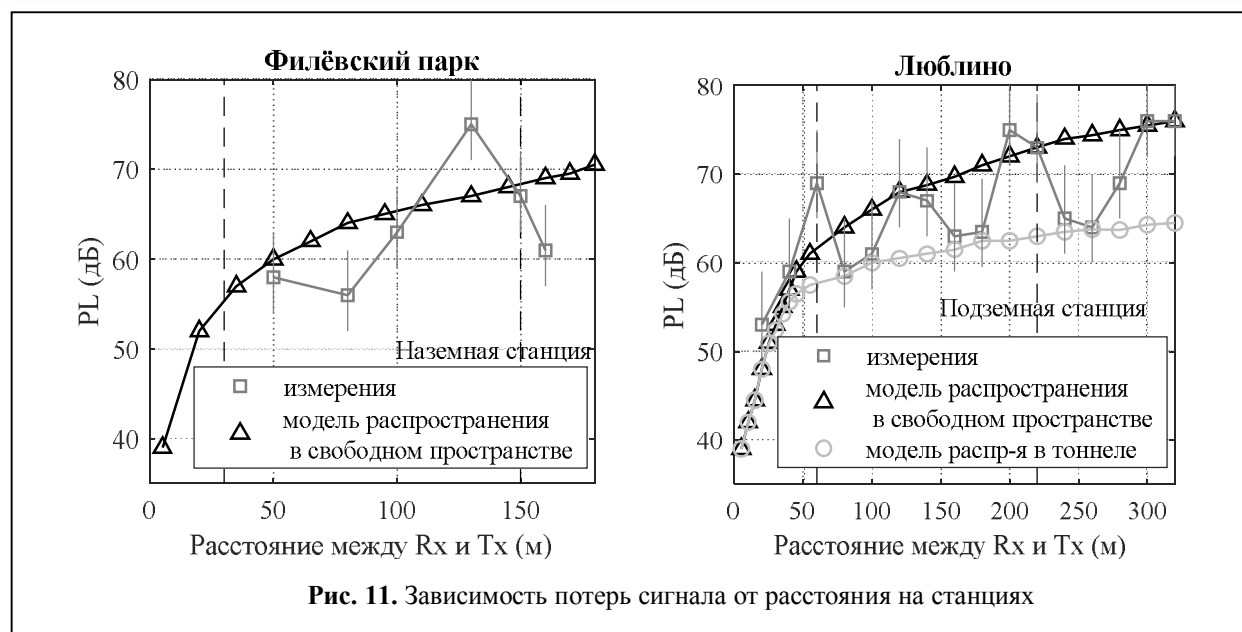


Рис. 11. Зависимость потерь сигнала от расстояния на станциях

ция станции — наземная с островной платформой. Навес над платформой поддерживается колоннами. Границы расположения станции показаны на рис. 11 пунктиром: 30 м и 150 м.

Измерения проводились в пределах подземной станции «Люблино» и на прилегающих к ней участках линии. Высота установки обеих антенн над полом составляла 2,4 м. Прилегающие участки линии расположены в тоннелях с бетонной гладкой отделкой квадратного сечения шириной и высотой по 4,5 м. Конструкция станции — односводчатая, мелкого заложения. Свод образует сплошную нишу. Платформа островная, прямая, на высоте 1,3 метра. Границы расположения станции показаны на рис. 11 пунктиром: 60 м и 220 м.

б. Результаты измерений и выводы

Полученные результаты приведены на рис. 11. Зависимость измеренных значений затухания от расстояния обладает достаточно сложной формой, с периодическими участками увеличения и уменьшения относительно затухания в аналогичном регулярном тоннеле.

Для тоннелей наличие станции всегда (в пределах погрешностей) приводит к увеличению затухания. Физическое объяснение увеличения затухания состоит в том, что на станции исчезает фокусирующее (волноводное) влия-

ние тоннеля, и сигнал распространяется во всем пространстве станции аналогично открытому участку линии. Данное объяснение хорошо подтверждается тем, что для большинства измеренных точек (в пределах погрешностей) измеренное затухание на станциях закрытого типа лежит между модельными кривыми для открытого и закрытого типа путей.

Аналогично для открытых участков линии. Случайность формы кривой и смена областей повышения и понижения затухания объясняется случайным возникновением и исчезновением подходящих отражающих поверхностей в соответствии с геометрией станции. При наличии отражающих поверхностей в нужных точках (например, в середине трассы между передатчиком и приёмником для однократного отражения луча) величина затухания совпадает с моделью распространения в тоннеле. При отсутствии подходящих отражающих поверхностей величина затухания совпадает с моделью распространения в свободном пространстве, где присутствует только один луч прямой видимости. При частичном наличии отражающих поверхностей величина затухания лежит между модельными кривыми.

На данном этапе для учёта описанных эффектов в модели распространения предлагается реализовать упрощенный способ, где влия-

ние станции моделируется добавлением фиксированного дополнительного затухания к расчётному. Величина затухания должна быть консервативно выбрана равной максимальному наблюдаемому дополнительному затуханию на измеренных кривых. Для станций открытых участков пути она в среднем составляет 7 дБ и характеризуется сравнительно небольшим отклонением значений. Для подземных станций она примерно равна 14 дБ и характеризуется большим отклонением от среднего.

Заключение

Приведены описания экспериментальных установок и хода измерений для двух типов измерений. Первый — измерение коэффициента отражений от стен. В результате была подтверждена корректность предложенной слоистой модели стен тоннеля и определены параметры рассеивающего слоя. Второй тип измерений заключался в измерении уровня затухания сигнала при распространении вдоль тоннелей метро, а также на открытых участках и станциях открытого и закрытого типов. Полученные значения сравнивались с теоретическими, полученными по разработанной модели распространения. При этом разработанная модель содержит в себе характеристики стен, полученные из измерений первого типа.

Сравнение затуханий, предсказанных описанной моделью и измеренных, показывает, что в подавляющем большинстве случаев их разница укладывается в погрешности измерений. Разработанная модель с достаточной точностью предсказывает потери мощности сигнала при распространении вдоль тоннеля.

Литература

1. McKinsey&Company: Elements of success: Urban transportation system of 24 global cities [Электронный ресурс]. URL: https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Elements%20of%20success%20Urban%20transportation%20systems%20of%2024%20global%20cities/Urban-transportation-systems_e-version_s.ashx (дата обращения 15.08.2020).
2. Eurostat Statistics Explained: Railway passenger transport statistics – quarterly and annual data [Электронный ресурс]. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Railway_passenger_transport_statistics_-_quarterly_and_annual_data (дата обращения 15.08.2020).
3. CNews: Михаил Миньковский, «Максима-Телеком»: Скорость Wi-Fi в московском метро повысится до 200 Мбит/с [Электронный ресурс]. URL: https://www.cnews.ru/articles/2019-12-04_mihail_minkovskijmaksimatelekom (дата обращения 15.08.2020).
4. 3D News: 1,7 Пбайт в месяц: объем трафика в метро Москвы бьет рекорды [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1002618> (дата обращения 15.08.2020).
5. TAdviser: Московский метрополитен [Электронный ресурс]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Компания:Московский_метрополитен (дата обращения 15.08.2020).
6. ТАСС: Объем трафика сети Wi-Fi московского метро в 2017 году увеличился в 1,5 раза [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/ekonomika/4949300> (дата обращения 15.08.2020).
7. Хабр: Wi-Fi в метро: архитектура сети и подземные камни [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/maximatelecom/blog/332538/> (дата обращения 15.08.2020).
8. Адёркина А.А., Пашанов М.А., Шумилов В.Ю., Трушанин А.Ю. Радиопланирование систем беспроводной связи в тоннелях метрополитена // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. №1. С. 41–53.
9. Lio Y., Chazal A., Wang Ch.-X., Ge X., Yang Y., Zhang Y. Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey // Science China Information Sciences. 2017. Vol. 60. Pp. 1–17.
10. Cichon D.J., Zwick T., Wiesbeck W. Radio link simulations in high-speed railway tunnels // 1995 Ninth International Conference on Antennas and Propagation, ICAP '95 (Conf. Publ. No. 407).
11. Aikio P., Gruber R., Vainikainen P. Wideband radio channel measurements for train tunnels // Proceedings of the 48th Vehicular Technology Conference (VTC'98), Ottawa, 1998. Pp. 460–464.
12. Guan K., Zhong Z.D., Alonso J.I., et al. Measurement of distributed antenna system at 2.4 GHz in a realistic subway tunnel environment // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2012. No. 61. Pp. 834–837.
13. Guan K., Ai B., Zhong Zh., Lopez C.F., Zhang L. Measurements and Analysis of Large-Scale Fading Characteristics in Curved Subway Tunnels at 920 MHz, 2400 MHz, and 5705 MHz // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. Vol. 16. Iss. 5. Pp. 2393–2405.
14. Ai B., Guan K., Zhong Zh., Lopez C.F., Zhang L. Measurements and Analysis of Extra Propagation Loss of Tunnel Curve // IEEE Transactions on

Vehicle Technology. 2016. Vol. 65. Iss. 4. Pp. 1845–1858.

15. He R., Zhong Zh., Guan K., Chen B., Aionso J. I., Briso C. Propagation channel measurements and analysis at 2.4 GHz in subway tunnels // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2013. Vol. 7. Iss. 11. Pp. 934–941.

16. Dominguez-Bolano T., Rodriguez-Pineiro J., Garcia-Naya J.A., Yin X., Castedo L. Measurement-Based Characterization of Train-to-Infrastructure 2.6 GHz Propagation Channel in a Modern Subway Station // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 52814–52830.

17. Briso-Rodriguez C., Fratilesco P., Xu Y. Path Loss Modeling for Train-to-Train Communication in Subway Tunnels at 900/2400 MHz // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. Vol. 18. Iss. 6. Pp. 1164–1168.

Поступила 2 декабря 2020 г.

18. Hrovat A., Kandus G., Javornik T. A survey of radio propagation modeling for tunnels // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. No. 16.

19. Specifications of MARS MA-WA52-DP24 antenna [Электронный ресурс]. URL: <https://mars-antennas.com/product/ma-wa52-dp24/> (дата обращения 08.11.2020).

20. Haslett C. Essentials of Radio Wave Propagation. US, New York: Cambridge University Press, 2008. 214 p.

21. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

22. Product data sheet of RADWIN RW-9041-5002 antenna [Электронный ресурс]. URL: https://www.inetdeal.com/pdf/Radwin_RW_9401_5002/RW-9401-5002.pdf (дата обращения 08.11.2020).

English

Measurement and analysis of the attenuation of the 5 GHz band signal propagated along various types of metro sections

Anastasiya Aleksandrovna Aderkina — Post-graduate Student, Assistant Lecturer, Radio Engineering Department, Radio Physics Faculty, N.I. Lobachevsky State University¹ of Nizhny Novgorod; Researcher, Radio Gigabit LLC.

E-mail: anastasia.aderkina@radiogigabit.com

Mikhail Alexandrovich Shashanov — Senior Researcher, Radio Gigabit LLC².

E-mail: mikhail.shashanov@radiogigabit.com

Vyacheslav Yurievich Shumilov — Senior Researcher, Radio Gigabit LLC².

E-mail: vyacheslav.shumilov@radiogigabit.com

Alexey Yurievich Trushanin — System Development Manager, Radio Gigabit LLC².

E-mail: alexey.trushanin@radiogigabit.com

¹Address: 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

²Address: 603105, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Osharskaya str., 95/2.

Abstract: This paper presents the research results of signal attenuation in 5-6 GHz range during its propagation in metro tunnels. The wireless channel of the specified range is designed for task-oriented wireless communication networks, the main purpose of which is to ensure high-speed Internet access for train passengers via Wi-Fi access points. Wi-Fi access point is fit up inside each passenger carriage and is connected to vehicle network when setting up such networks. Task-oriented communication systems are used to connect vehicle network with Internet and they comprise base stations (BS) located along metro railway, and antennas placed on the roof of trains. To calculate BS number, their location and to predict the radio coverage of metro tunnels by wireless network, we developed an algorithm based on using purpose designed model for signal propagation along metro tunnels, taking into account tunnel geometrical pattern features and absorption properties of tunnel wall covering. Model accuracy of signal propagation is extremely relevant in designing and evaluating communication systems. Signal propagation mode will vary in different areas due to tunnel limited space, available waveguide effect and various irregularities along the tunnel. The following main signal propagation scenarios can be singled out for the metro: tunnels, open areas, stations. Each of these parts has its own features that affect dropping rate of signal power during propagation. Measurements performed in corresponding areas is a necessary step for sufficiently accurate modelling of signal attenuation in each of the described scenarios. The conclusion was made that the developed model is functional based on the results of comparing the measured values of the signal attenuation and the values calculated according to the developed model, since the difference between these values is within the measurement errors in most of any cases.

Keywords: measurement, model, signal loss, tunnel, subway station, reflection coefficient.

References

1. McKinsey&Company: Elements of success: Urban transportation system of 24 global cities [Electronic source]. URL: https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Inights/Elements%20of%20success%20Urban%20transportation%20systems%20of%2024%20global%20cities/Urban-transportation-systems_e-versions.ashx (access date 15.08.2020).
2. Eurostat Statistics Explained: Railway passenger transport statistics – quarterly and annual data [Electronic source]. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Railway_passenger_transport_statistics_-_quarterly_and_annual_data (access date 15.08.2020).
3. CNews: Mikhail Minkovsky, MaximaTelecom: The speed of Wi-Fi in the Moscow metro will increase to 200 Mbit / s [Electronic source]. URL: https://www.cnews.ru/articles/2019-12-04_mihail_minkovskijmaksimatelekom (access date 15.08.2020).
4. 3D News: 1.7 PB per month: the volume of traffic in the Moscow metro breaks records [Electronic source]. URL: <https://3dnews.ru/1002618> (access date 15.08.2020).
5. TAdviser: Moscow metro [Electronic source]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Компания:Московский_метрополитен (access date 15.08.2020).
6. TASS: The volume of traffic on the Wi-Fi network of the Moscow metro in 2017 increased by 1.5 times [Electronic source]. URL: <https://tass.ru/ekonomika/4949300> (access date 15.08.2020).
7. Habr: Wi-Fi in the metro: network architecture and underground stones [Electronic source]. URL: <https://habr.com/ru/company/maximatelecom/blog/332538/> (access date 15.08.2020).
8. *Aderkina A.A., Shashanov M.A., Shumilov V.Yu., Trushanin A.Yu.* Radio planning for wireless communication systems in metro tunnels. Radioengineering and telecommunication systems. 2020. No. 1. Pp. 41–53.
9. *Lio Y., Chazal A., Wang Ch.-X., Ge X., Yang Y., Zhang Y.* Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey. Science China Information Sciences. 2017. Vol. 60. Pp. 1–17.
10. *Cichon D.J., Zwick T., Wiesbeck W.* Radio link simulations in high-speed railway tunnels. 1995 Ninth International Conference on Antennas and Propagation, ICAP '95 (Conf. Publ. No. 407).
11. *Aikio P., Gruber R., Vainikainen P.* Wideband radio channel measurements for train tunnels. Proceedings of the 48th Vehicular Technology Conference (VTC'98), Ottawa, 1998. Pp. 460–464.
12. *Guan K., Zhong Z.D., Alonso J.I., et al.* Measurement of distributed antenna system at 2.4 GHz in a realistic subway tunnel environment. IEEE Transaction on Vehicular Technology. 2012. No. 61. Pp. 834–837.
13. *Guan K., Ai B., Zhong Zh., Lopez C.F., Zhang L.* Measurements and Analysis of Large-Scale Fading Characteristics in Curved Subway Tunnels at 920 MHz, 2400 MHz, and 5705 MHz. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. Vol. 16. Iss. 5. Pp. 2393–2405.
14. *Ai B., Guan K., Zhong Zh., Lopez C.F., Zhang L.* Measurements and Analysis of Extra Propagation Loss of Tunnel Curve. IEEE Transactions on Vehicle Technology. 2016. Vol. 65. Iss. 4. Pp. 1845–1858.
15. *He R., Zhong Zh., Guan K., Chen B., Aionso J. I., Briso C.* Propagation channel measurements and analysis at 2.4 GHz in subway tunnels. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2013. Vol. 7. Iss. 11. Pp. 934–941.
16. *Dominguez-Bolano T., Rodriguez-Pineiro J., Garcia-Naya J.A., Yin X., Castedo L.* Measurement-Based Characterization of Train-to-Infrastructure 2.6 GHz Propagation Channel in a Modern Subway Station. IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 52814–52830.
17. *Briso-Rodriguez C., Fratilesco P., Xu Y.* Path Loss Modeling for Train-to-Train Communication in Subway Tunnels at 900/2400 MHz. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. Vol. 18. Iss. 6. Pp. 1164–1168.
18. *Hrovat A., Kandus G., Javornik T.* A survey of radio propagation modeling for tunnels. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. No. 16.
19. Specifications of MARS MA-WA52-DP24 antenna [Electronic source]. URL: <https://mars-antennas.com/product/ma-wa52-dp24/> (access date 08.11.2020).
20. *Haslett C.* Essentials of Radio Wave Propagation. US, New York: Cambridge University Press, 2008. 214 p.
21. *Brekhovskikh L.M.* Waves in layered media. Moscow: Nauka, 1973. 343 p.
22. Product data sheet of RADWIN RW-9041-5002 antenna [Electronic source]. URL: https://www.inetdeal.com/pdf/Radwin_RW_9401_5002/RW-9401-5002.pdf (access date 08.11.2020).