

УДК 621.396.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ СОТОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ RSSI В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ МИНСКА

Родионов М.А., магистрант гр.467041

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Аксенов В.А. – старший преподаватель,

Астровский И.И. – кандидат технических наук, доцент

Аннотация. В работе представлены результаты практических измерений уровня принимаемого сигнала (RSSI) в сетях LTE г. Минска. Измерения выполнены в 64 точках трёх характерных локаций с различной плотностью застройки. Расстояния от точек замера до базовых станций рассчитаны по формуле гаверсинусов. Экспериментальные данные сопоставлены с логарифмической моделью затухания; определены коэффициенты затухания n для каждой зоны. Выявлена зависимость качества покрытия от типа городской среды и плотности размещения базовых станций.

Ключевые слова. гетерогенные сети, LTE, RSSI, затухание сигнала, формула гаверсинусов, коэффициент затухания, планирование сетей связи, многолучевое распространение, хэндовер, городская среда, практические измерения, качество сигнала.

Введение

Стремительный рост объёмов мобильного трафика и ужесточение требований к качеству обслуживания обуславливают необходимость постоянного совершенствования инфраструктуры сотовой связи. Согласно прогнозам 3GPP, глобальный мобильный трафик ежегодно возрастает более чем на 40 %, что требует существенного увеличения плотности сетевой инфраструктуры [1]. Современные сети мобильной связи строятся по гетерогенному принципу (HetNet): они объединяют макросоты, микросоты и пикосоты, работающие в различных частотных диапазонах и образующие перекрывающиеся зоны покрытия [2].

Эффективное планирование HetNet невозможно без точных моделей распространения радиоволн, верифицированных на реальных данных. Классические модели – Hata-COST 231, ITU-R P.1411 и 3GPP TR 38.901 – описывают средние потери пути в типовых городских условиях, однако их применимость к конкретным районам требует экспериментальной проверки [3, 4].

Целью настоящей работы является верификация логарифмической модели затухания сигнала и определение эмпирических коэффициентов затухания для трёх типологически различных локаций г. Минска на основе практических измерений RSSI в сети LTE.

Для достижения цели решены следующие задачи: сбор данных RSSI в 64 точках трёх локаций; расчёт расстояний между точками замера и базовыми станциями; статистический анализ данных; оценка коэффициентов затухания методом наименьших квадратов; сравнение с теоретическими значениями по ITU-R P.1411 и 3GPP TR 38.901.

Методика исследования

Полевые измерения проводились с использованием смартфона с установленным приложением Network Cell Info (Android), которое обеспечивает доступ к параметрам Radio Interface Layer (RIL): идентификатору соты (CID), уровню принимаемого сигнала RSSI (дБм) и географическим координатам. Для повышения достоверности в каждой точке выполнялось три последовательных измерения с последующим усреднением, что позволяет снизить влияние быстрых замираний Рэля [5].

Исследование охватило три характерные локации г. Минска, различающиеся типом застройки и функциональным назначением. На проспекте Дзержинского собрано 22 точки измерений (жилая многоэтажная застройка, базовая станция CID 17926). В районе Ботанического сада – 14 точек (открытая парковая зона с густой древесной растительностью, CID 17920). На проспекте Независимости – 28 точек (плотная смешанная застройка, зафиксировано переключение между пятью сотами: CID 17949, 17924, 17923, 17971, 26843). Общее количество точек измерений составило 64.

Для расчёта геодезического расстояния между точкой замера и антенной базовой станции применялась формула гаверсинусов [6]:

$$d=2 \cdot R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right),$$

где d – расстояние между точками; R – радиус Земли (6371 км); φ_1, λ_1 – широта и долгота антенны; φ_2, λ_2 – широта и долгота точки измерения.

Она обеспечивает погрешность не более 0,3 % при расстояниях до 1 км. На рисунках 1, 2 и 3 приведено расположение антенн и точек замера на карте Минска в районах Парка Челюскинцев, проспекта Независимости и станции метро Петровщина.

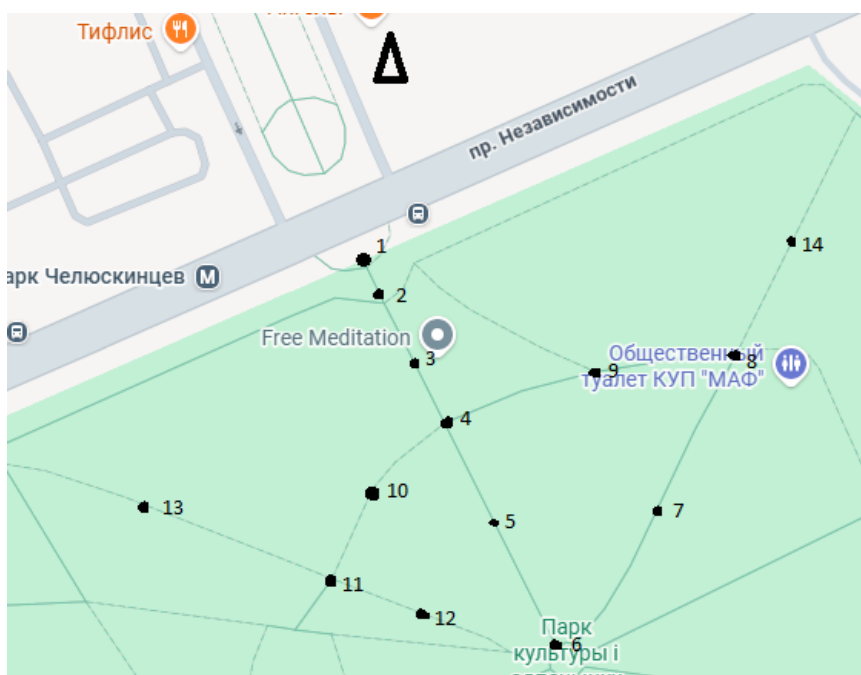


Рисунок 1 – Расположение антенн (▲) и точек замера (●) на карте Парка Челюскинцев

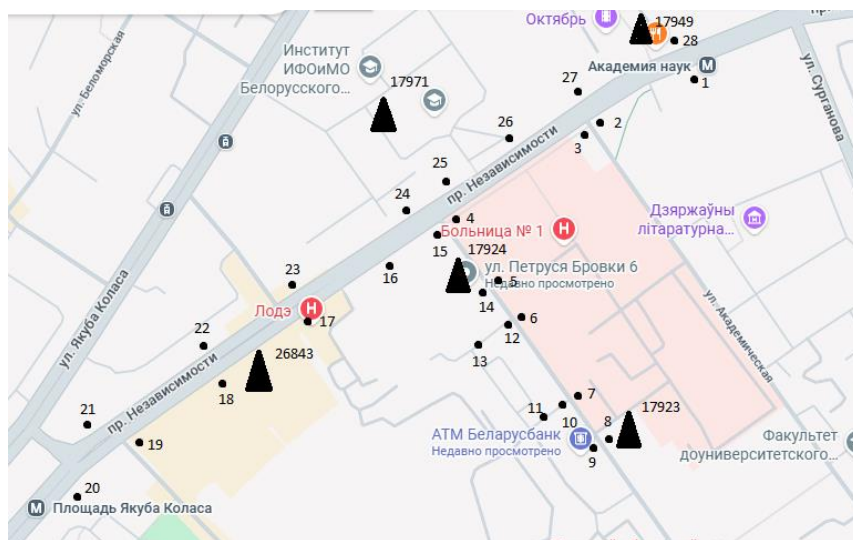


Рисунок 2 - Расположение антенн (▲) и точек замера (●) на карте проспекта Независимости

Для анализа зависимости RSSI от расстояния использована стандартная логарифмическая модель потерь пути [3, 4]:

$$\text{RSSI}(d) = P_0 - 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right),$$

где P_0 – уровень сигнала на опорном расстоянии $d_0 = 1$ м; n – коэффициент затухания (для свободного пространства $n = 2$; для городской среды $n = 2,5-5,0$ по ITU-R P.1411 [3]).

Параметры P_0 и n определялись методом наименьших квадратов по выборке каждой локации отдельно. Коэффициент детерминации R^2 использовался для оценки адекватности модели.

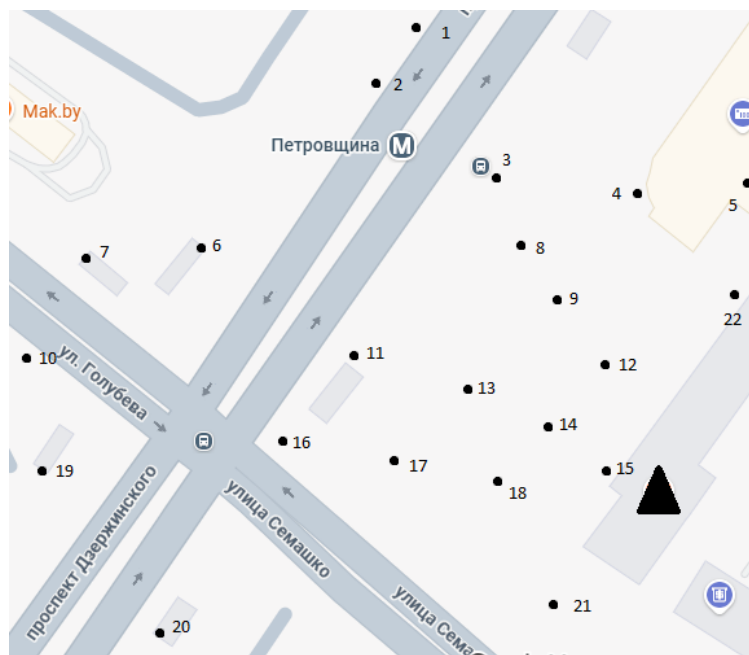


Рисунок 2 - Расположение антенн (▲) и точек замера (●) на карте ст. м. Петровщина

Результаты и обсуждение

По результатам обработки 64 точек измерений получены статистические характеристики уровня сигнала по локациям, приведённые в таблице 1.

Таблица 1 – Статистика измерений параметров сигнала RSSI

Локация	Точек	Среднее, дБм	Min, дБм	Max, дБм	Стд. откл., дБ	Ср. расст., м
Пр. Дзержинского	22	-91,8	-112	-70	14,4	~100
Ботанический сад	14	-92,9	-109	-69	12,5	307
Пр. Независимости	28	-81,7	-102	-66	9,0	~120

Из данных таблицы 1 следует, что лучшее покрытие зафиксировано на проспекте Независимости (средний RSSI $-81,7$ дБм, $\sigma = 9,0$ дБ). Высокая плотность базовых станций и эффективный хэндовер между пятью сотами обеспечивают стабильный приём: 67,9 % точек имеют уровень «отличный» ($-65...-75$ дБм) или «хороший» ($-75...-85$ дБм). Минимальное стандартное отклонение подтверждает равномерность покрытия в этом районе.

На проспекте Дзержинского (средний RSSI $-91,8$ дБм, $\sigma = 14,4$ дБ) наблюдается наибольший разброс значений. Высокое стандартное отклонение обусловлено чередованием участков с прямой видимостью (LOS) и зонами теневого экранирования (NLOS) плотной жилой застройкой. Доля точек с «отличным» и «хорошим» уровнем составляет 40,9 %.

В Ботаническом саду (средний RSSI $-92,9$ дБм, среднее расстояние до антенны 307 м) зафиксировано наибольшее удаление от базовой станции и значительное затухание вследствие поглощения сигнала кроной деревьев. Доля критического покрытия (ниже -105 дБм) составляет 21,4 %, что указывает на необходимость установки дополнительных микро- или пикосот.

Коэффициент затухания $n = 2,8$ для Ботанического сада находится в нижней части диапазона ITU-R P.1411 для открытых городских зон, что объясняется относительно свободным распространением сигнала на большей части маршрута. Значимая корреляция ($r = -0,707$, $p < 0,01$, метод Пирсона) свидетельствует о доминирующей роли расстояния в формировании затухания при отсутствии крупных зданий-экранов.

На проспекте Дзержинского и проспекте Независимости корреляция $r-d$ незначима ($p > 0,05$), что обусловлено различными причинами. На Дзержинского резкие перепады RSSI в соседних точках связаны с многолучевым распространением в плотной застройке. На проспекте Независимости хэндовер между пятью сотами устраняет монотонное нарастание потерь с расстоянием, характерное для однотипной модели [2]. Тем не менее значения $n = 3,2$ и $n = 3,5$ хорошо согласуются с рекомендациями 3GPP TR 38.901 для сценария UMa (Urban Macro) [4].

Заключение

В работе проведены практические измерения RSSI в 64 точках трёх локаций г. Минска и выполнен их сравнительный анализ с логарифмической моделью затухания. Установлены закономерности.

В зоне плотной застройки с высокой плотностью базовых станций (пр. Независимости) наблюдается наилучшее покрытие (средний RSSI = -81,7 дБм) при минимальном разбросе ($\sigma = 9,0$ дБ) благодаря эффективному хэндоверу в гетерогенной сети.

В открытой парковой зоне (Ботанический сад) установлена значимая корреляция RSSI с расстоянием ($r = -0,707$, $p < 0,01$), коэффициент затухания $n = 2,8$ соответствует нижней границе диапазона ITU-R P.1411; 21,4 % точек имеют критический уровень покрытия, что требует установки пикосот с интервалом не более 150 м.

В жилой многоэтажной застройке (пр. Дзержинского) значительный разброс ($\sigma = 14,4$ дБ) и слабая корреляция $r-d$ ($p > 0,05$) обусловлены многолучевым распространением; доля удовлетворительного и выше покрытия составляет 40,9 %, что свидетельствует о необходимости оптимизации антенных систем макросоты.

Полученные значения n (2,8–3,5) согласуются с рекомендациями ITU-R P.1411 и 3GPP TR 38.901 для сценариев городской застройки, что подтверждает применимость логарифмической модели как инструмента экспресс-верификации планировочных расчётов.

Результаты работы могут быть использованы операторами сотовой связи для корректировки моделей планирования с учётом локальной специфики городской среды Минска, а также в качестве базы данных для верификации ПО радиосетевого планирования.

Список использованных источников:

1. 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. – V17.0.0. – 2022. – 105 p.
2. 3GPP TS 36.104. Base Station (BS) radio transmission and reception (LTE). – V17.10.0. – 2023. – 84 p.
3. ITU-R P.1411-10. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems. – Geneva : ITU, 2019. – 66 p.
4. Rappaport, T. S. Wireless Communications: Principles and Practice / T. S. Rappaport. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, 2002. – 707 p.
5. Parsons, J. D. The Mobile Radio Propagation Channel / J. D. Parsons. – 2nd ed. – Chichester : Wiley, 2000. – 436 p.
6. Sinnott, R. W. Virtues of the Haversine / R. W. Sinnott // Sky and Telescope. – 1984. – Vol. 68, № 2. – P. 159.
7. Давыдов, А. В. Планирование сетей мобильной связи / А. В. Давыдов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2021. – 312 с.
8. Парамонов, А. И. Модели распространения радиоволн в системах мобильной связи / А. И. Парамонов // Телекоммуникации. – 2020. – № 6. – С. 42–48.

UDC 621.396.4

COMPARATIVE ANALYSIS OF SIGNAL ATTENUATION IN HETEROGENEOUS CELLULAR NETWORKS BASED ON RSSI MEASUREMENTS IN MINSK URBAN ENVIRONMENT

Rodionov M.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Aksenov V.A. – senior lecturer

Astrovskii I.I. – Phd in Engineering

Annotation. The paper presents the results of practical RSSI measurements in LTE networks across 64 measurement points in three characteristic locations of Minsk. Distances from measurement points to base stations were calculated using the haversine formula. Experimental data were compared with the logarithmic path-loss model; attenuation exponents were derived for each zone via least-squares fitting. The dependence of coverage quality on urban morphology and base-station density was established.

Keywords. heterogeneous networks, LTE, RSSI, signal attenuation, haversine formula, path loss exponent, network planning, multipath propagation, handover, urban environment, practical measurements, signal quality.