

Инструменты оценки радиопокрытия и трассировки лучей на цифровой модели местности в среде Matlab при использовании ненаправленных антенн

В. В. Стариков

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*

vl.vl.starikov@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена анализу инструментов, реализованных в среде Matlab для решения задач планирования и оптимизации сетей мобильной связи. На примере сот 5G с ненаправленными антеннами были рассмотрены модели, методы и инструменты оценки радиопокрытия и трассировки лучей. Моделирование производилось с использованием цифровой модели местности, что позволило учесть особенности рельефа и застройки. Полученные результаты позволяют утверждать о целесообразности применения данной среды моделирования при планировании сетей мобильной связи, использующих дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны радиоволн.

Ключевые слова: трассировка лучей; 5G; планирование сетей мобильной связи; радиопокрытие; цифровые модели местности; Matlab

I. ВВЕДЕНИЕ

Мобильные сети пятого поколения (5G – Five Generation) воплотили в себе самые современные технологические решения, позволяющие обеспечить абонентам низкую задержку, высокую скорость передачи, а также возможность подключения широкого спектра устройств. Внедрение новых технологических решений повлекло за собой пересмотр существующих методик планирования и оптимизации сотовых сетей. В виду дефицита свободного частотного ресурса и необходимости использования широких полос частот, исчисляемых сотнями МГц, был специфицирован диапазон FR2 (24–100 ГГц) [1]. Использование радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов частот обуславливает новые требования к методике расчета радиополостей, поскольку с ростом частоты процедура оценки радиопокрытия сети существенно усложняется. Данный факт объясняется сильным влиянием элементов морфоструктуры и застройки на системы, работающие в диапазонах СВЧ (сверхвысокие частоты) и КВЧ (крайне высокие частоты) [2]. Таким образом, планирование сот 5G в условиях плотной городской застройки будет сопряжено с необходимостью учета эффектов отражения, преломления, рассеяния и дифракции сигнала. Отметим, что на сегодняшний день многие программные комплексы по планированию и оптимизации сетей мобильной связи предоставляют возможность произвести расчет радиопокрытия только по эмпирическим моделям. Подробнее об ограничениях и

недостатках таких моделей можно прочитать в [3], [4]. Также стоит отметить, что статистические модели не применимы для расчета покрытия в помещениях.

Обозначенная выше проблематика диктует необходимость поиска новых решений, направленных на расчет сигнала в условиях сложной геометрии окружающей среды. Среда Matlab предоставляет гибкий инструментарий для моделирования сетей 5G [5]. Экстраполяция принципов геометрической оптики для процесса многолучевого распространения радиосигнала добавила в арсенал инженеров методы ray tracing (трассировки лучей) [6]. На основе данного подхода создается лучевая модель распространения, позволяющая описать взаимодействие сигнала с объектами застройки и морфоструктурой [7].

Благодаря реализации в Matlab методов SBR (Shooting and Bouncing Rays – метод «стреляющих» и отражающихся лучей) и IM (Image Method – метод отражений) инженеру предоставляется возможность для каждого луча рассчитать изменения его амплитуды и фазы, обусловленные потерями энергии при взаимодействиях с элементами окружающей среды [8]. На стороне абонентского терминала будет происходить оценка (суммирование) вкладов всех лучей, что позволяет получить итоговую характеристику канала связи. Таким образом, трассировка лучей позволяет подробно изучить многолучевые компоненты, что критически важно для разработки алгоритмов коррекции ошибок, и методов эффективного пространственного разделения (например, в системах MIMO (multiple-input and multiple-output – метод пространственного кодирования сигнала) [10].

При анализе многолучевого распространения сигнала важно оценить максимально-возможную разность прихода лучей. Необходимость такой оценки обусловлена тем, что в целях борьбы с межсимвольной интерференцией OFDM-символы (Orthogonal frequency-division multiplexing – ортогональное частотное разделение каналов) разделены между собой защитным промежутками. Максимальная разность прихода лучей не должна превышать длительность таких промежутков [10].

Целью данной работы является анализ инструментария, предоставляемого средой Matlab для решения задач планирования и оптимизации сетей мобильной связи.

Материал работы изложен в шести разделах, включая введение. Раздел II описывает подготовительный этап моделирования. Раздел III посвящен расчету карты покрытия. В разделе IV осуществляется моделирование диаграммы направленности антенны. В разделе V рассмотрен метод трассировки лучей. Раздел VI содержит выводы.

II. ПОДГОТОВКА К МОДЕЛИРОВАНИЮ

Проведение процедуры трассировки лучей подразумевает применение цифровых моделей местности (ЦММ) с 3D моделями объектов, граням (поверхностям) которых, в зависимости от указанного материала, можно присваивать различные свойства отражения и поглощения сигнала. В данной работе была применена векторная карта OpenStreetMap (OSM) [11].

При выборе антенн BS (Base Station – базовая станция) следует помнить, что изотропный излучатель является идеализированной моделью ненаправленной антенны [3]. Такой объект излучает электромагнитную энергию в трёхмерном пространстве равномерно во всех направлениях. В рамках проводимого моделирования под ненаправленными антеннами будем понимать излучатели, относящиеся к классу «omni» (от англ. omnidirectional – всенаправленный) в горизонтальной плоскости. В работе приведены расчеты с дипольной и штыревой антеннами.

Подключение карты местности и создание BS описывается следующим блоком программного кода [9]:

```
viewer =
siteviewer("Buildings", "Bonch.osm", "Basemap", "topographic")
fq = 1200e6;
tx1 = txsite("Name", "BS1", ...
"Latitude", 59.902813, ...
"Longitude", 30.487343, ...
"Antenna", design(dipole, fq), ...
"AntennaHeight", 2, ...
"TransmitterPower", 5, ...
"TransmitterFrequency", fq);
tx2 = txsite("Name", "BS2", ...
"Latitude", 59.901156, ...
"Longitude", 30.482360, ...
"Antenna", design(dipole, fq), ...
"AntennaHeight", 2, ...
"TransmitterPower", 5, ...
"TransmitterFrequency", fq);
tx3 = txsite("Name", "BS3", ...
"Latitude", 59.900844, ...
"Longitude", 30.486706, ...
"Antenna", design(dipole, fq), ...
"AntennaHeight", 2, ...
"TransmitterPower", 5, ...
"TransmitterFrequency", fq);
txs = [tx1, tx2, tx3];
show(txs)
```

Далее описано содержание операций, выполняемых данным программным модулем. На первом этапе производится подключение и отображение ЦММ, а также установка передатчиков tx (сокр. от англ. transceiver – передатчик) базовых станций с заранее определенными параметрами [3].

С помощью функции siteviewer вызывается окно, в котором будет отображена карта местности. Рассмотрим далее аргументы этой функции. Аргумент buildings указывает на отображение 3D-моделей зданий. Аргумент Bonch.osm указывает на одноименный файл карты местности, который необходимо подготовить заранее в среде OpenMap [5]. Аргумент Basemap указывает на то, что в сцене должна быть использована базовая карта.

Базовая карта предоставляет собой фоновое изображение местности (например, спутниковые снимки или топографические карты). Аргумент topographic представляет собой тип базовой карты. Топографические карты показывают рельеф местности, включая высоты, холмы, долины и другие географические особенности.

Далее необходимо задать частоту, на которой будет работать моделируемый фрагмент сети. В рассматриваемом примере значение freq = 1,2 ГГц.

Затем с помощью функции txsite поочередно создадим 3 передатчика. В целях упрощения назовем их BS с соответствующим номером. Как видно из представленного выше кода, для создания каждого из таких объектов необходимо указать:

- координаты площадки;
- тип антенны (dipole/monopole);
- высоту подвеса антенны (2 м);
- мощность передатчика (5 Вт);
- частоту передатчика (freq).

Для дальнейшего удобства все 3 передатчика объединены в единый массив txs размером 1x3.

Следующим этапом производится определение параметров абонентского терминала UE (User Equipment):

```
rx = rxsite("Name", "UE", ...
"Latitude", 59.901899, ...
"Longitude", 30.485925, ...
"AntennaHeight", 1.5, ...
"ReceiverSensitivity", -115)
```

При создании UE укажем чувствительность приемника ReceiverSensitivity = -115 dBm.

III. РАСЧЕТ КАРТЫ ПОКРЫТИЯ

Произведем расчет уровня поля по комбинированной модели pm, основанной на модели Лонгли–Райса (от 20 МГц до 20 ГГц), а также погодных составляющих gas и rain:

```
pm = propagationModel("longley-ryce") + ...
propagationModel("gas") + propagationModel("rain");
coverage(txs, pm, "SignalStrengths", -120:5)
```

На рис. 6 представлен результат расчета покрытия сети при использовании дипольной антенны. Местоположение UE обозначено синей пиктограммой.

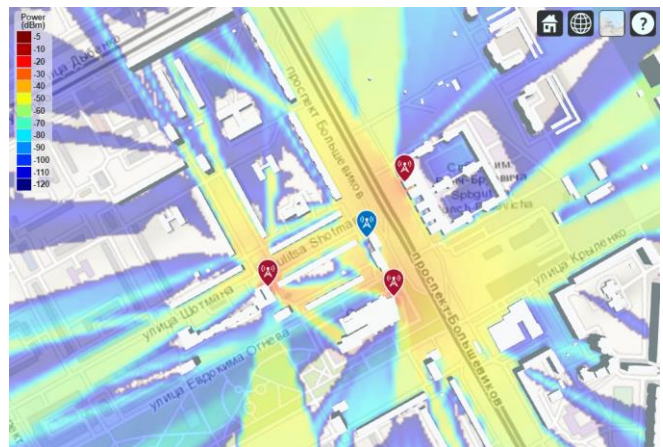


Рис. 1. Карта покрытия с использованием дипольной антенны

Аналогичный расчет для штыревой антенны представлен на рис. 2.

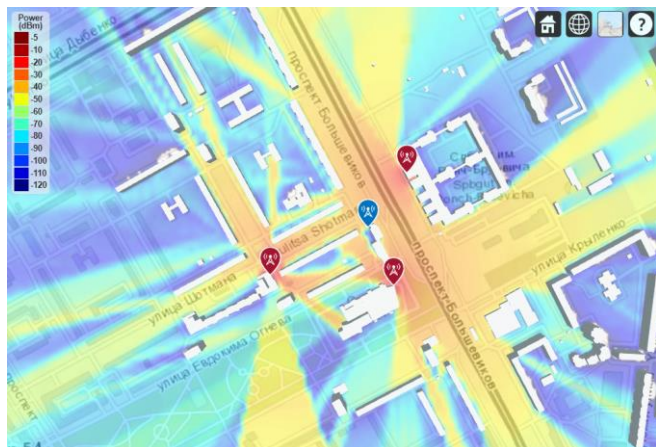


Рис. 2. Карта покрытия с использованием штыревой антенны

Анализируя результаты расчетов карт покрытия, можно сделать вывод о том, что несмотря на кажущееся сходство рассмотренных типов ненаправленных антенн наблюдаются серьезные различия в покрытии. Так, например, применение штыревой антенны позволило избавиться практически от всех «слепых» зон, где уровень сигнала был ниже минимального порога отображения (-120 дБм).

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДН АНТЕНН

Рассмотрим особенности ДН (диаграмм направленности), применяемых в процессе моделирования антенн. Команда для отображения ДН дипольной антенны выглядит следующим образом:

```
pattern(dipole, freq);
```

Данная строка выполняет построение 3D-диаграммы направленности антенны на ранее заданной частоте freq. Углы азимута (az) и места (el) задаются автоматически. По умолчанию az = -180°...180°, el = -90°...90°. На рис. 3 представлена 3D визуализация ДН дипольной антенны.

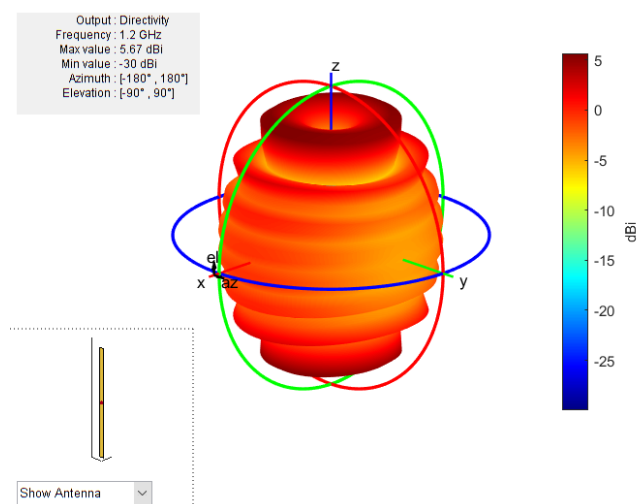


Рис. 3. 3D визуализация ДН дипольной антенны

Результат моделирования ДН для штыревой антенны представлен на рис. 4.

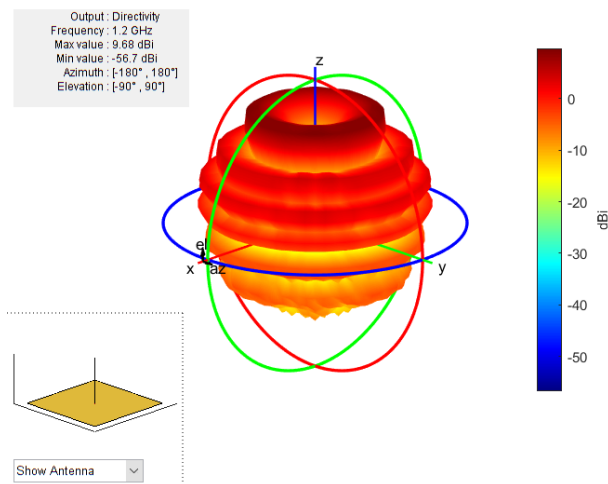


Рис. 4. 3D визуализация ДН штыревой антенны

Результаты моделирования антенн, представленные на рис. 3 и рис. 4, в полной мере обуславливают ранее отмеченные различия в радиопокрытии для дипольной и штыревой антенн.

На следующем этапе опишем модель распространения weatherpm, учитывающую потери сигнала при взаимодействии с атмосферой (gas) и дождем (rain). Дальнейшие расчеты приведены для с дипольными антеннами BS.

```
weatherpm = propagationModel("gas") + propagationModel("rain");
ss1 = sigstrength(rx,tx1,weatherpm);
ss2 = sigstrength(rx,tx2,weatherpm);
ss3 = sigstrength(rx,tx3,weatherpm);
disp("Signal strength at " + rx.Name + ":")
disp(ss1 + " dBm")
disp(ss2 + " dBm")
disp(ss3 + " dBm")
```

В первой строке табл. 1 приведены результаты расчетов мощностей ss принимаемого сигнала на входе UE от каждой BS. Местоположение UE обозначено на рис. 1.

Далее определим значение margin или т.н. «запас по связи», равный разности чувствительности приемника UE и соответствующего параметра ss. Значения margin приведены во второй строке табл. 1.

```
margin = abs(rx.ReceiverSensitivity - ss1);
disp(margin + " dBm")
%Dля BS2
margin = abs(rx.ReceiverSensitivity - ss2);
disp(margin + " dBm")
%Dля BS3
margin = abs(rx.ReceiverSensitivity - ss3);
disp(margin + " dBm")
```

ТАБЛИЦА I.

	Линия «ss1» (от BS1), dBm	Линия «ss2» (от BS2), dBm	Линия «ss3» (от BS3), dBm
Мощность сигнала на входе UE (без модели распространения)	-46.4738	-46.4738	46.0759
Запас «margin»	68.5262	64.3022	68.9241
Мощность сигнала на входе UE (по модели «rtpm»)	-59.9293	-61.3033	-73.5171

V. ТРАССИРОВКА ЛУЧЕЙ

Определим модель распространения, учитывающую трассировку лучей по методу SBR [6], [9]:

```
rtpm = propagationModel("raytracing", ...
    "Method", "sbr", ...
    "MaxNumReflections", 3, ...
    "BuildingsMaterial", "concrete", ...
    "TerrainMaterial", "concrete");
coverage(txs, rtpm, ...
    "SignalStrengths", -120:-5, ...
    "MaxRange", 250, ...
    "Resolution", 10, ...
    "Transparency", 0.6);
pattern(txs, "Transparency", 0.8, "Size", 5);
raytrace(txs, rx, rtpm);
ss1 = sigstrength(rx, txs, rtpm);
disp("Received power: " + ss1 + " dBm")
disp("Received power: " + ss2 + " dBm")
disp("Received power: " + ss3 + " dBm")
```

Максимальное количество отражений установим равным 3. Материалы для зданий и земной поверхности определим как concrete (бетон). Расчет карты покрытия произведем для уровней сигнала от -120 до -5 dBi, с шагом расчета 10×10 метров на дистанции 250 метров от антенны BS. Параметр Transparency определяет степень прозрачности отображаемого уровня поля. Далее с помощью функции pattern визуализируем на карте диаграмму направленности дипольной антенны для каждой BS. Посредством функции raytrace произведем расчет лучей (число отражений задано в модели rtpm). Результат описанных выше вычислений представлен на рис. 5. На следующем шаге определим мощность принимаемого UE сигнала от каждой из BS. Результат расчетов представлен в третьей строке табл. 1.

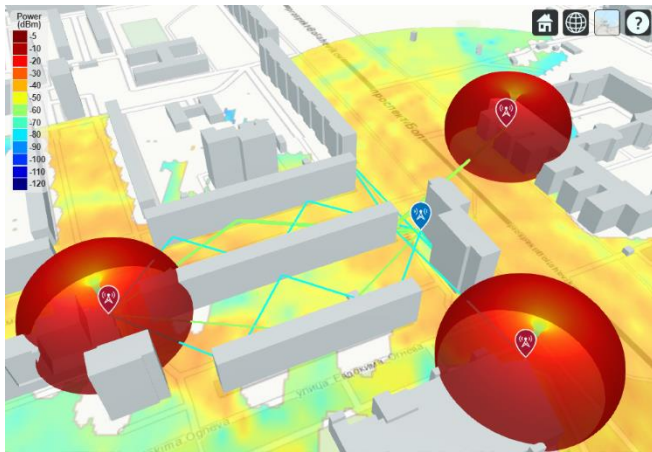


Рис. 5. Визуализация ДН изотропных антенн BS

Далее создадим комбинированную модель rtPlusWeather, объединяющую rtpm и погодные составляющие:

```
rtPlusWeather = ...
    rtpm + propagationModel("gas") + propagationModel("rain");
raytrace(txs, rx, rtPlusWeather)
```

С помощью комбинированной модели определим величину потерь на трассе распространения сигнала:

```
raytrace(txs, rx, rtPlusWeather, "Type", "pathloss")
raysAtmospheric =
raytrace(txs, rx, rtPlusWeather, "Type", "pathloss");
p1Atmospheric = [raysAtmospheric{1}.PathLoss]
```

Аргументы Type и pathloss указывают на то, что функция возвращает только потери на трассе для каждого из лучей. Результаты расчетов приведены в табл. 2 для каждого из найденных путей.

ТАБЛИЦА II.

	Pathloss на линии «ss1» (от BS1), dBm	Pathloss на линии «ss2» (от BS2), dBm	Pathloss на линии «ss3» (от BS3), dBm
Луч 1	95.4067	99.4688	112.6057
Луч 2	98.2999	99.4895	-
Луч 3	103.2861	100.1880	-
Луч 4	106.7700	114.8184	-
Луч 5	-	115.1812	-

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, можно сделать вывод о том, что среда Matlab предоставляет широкий спектр инструментов для планирования и оптимизации радиопокрытия сетей мобильной связи. Также стоит отметить, что методы трассировки лучей являются эффективным инструментом моделирования распространения радиоволн в сетях 5G. Их использование позволяет детально анализировать влияние особенностей окружающей среды на качество связи, что критически важно в условиях плотной городской застройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура / Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А., Девяткин Е.Е. М. : Техносфера, 2023. 527 с.
- [2] Фокин Г.А. Сетевое позиционирование 5G и вероятностные модели оценки его точности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 12. С. 4–17.
- [3] Бабков В.Ю., Цикин И.А. Сотовые системы мобильной радиосвязи: учебное пособие. 2-е изд. перераб.и дополн. СПб.: БХВ – Петербург, 2013. 432 с.
- [4] Okumura Y., Ohmori E., Kawano T., Fukuda K. (September–October 1968). "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service". // Review of the Electrical Communication Laboratory (in Japanese). 16 (9–10): 825–73.
- [5] Фокин Г.А., Рютин К.Е. Программный модуль обработки данных протокола NMEA и отображение местоположения на цифровой модели местности в среде Matlab // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2023. № 1 (78). С. 37-43.
- [6] Yun, Zhengqing, and Magdy F. Iskander. "Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications." // IEEE Access 3 (2015): 1089–1100.
- [7] Фокин Г.А., Рютин К.Е. Программный модуль обработки данных протокола NMEA и отображение местоположения на цифровой модели местности в среде Matlab // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2023. № 1 (78).
- [8] Фокин Г.А. Позиционирование в условиях отсутствия прямой видимости с использованием цифровых моделей местности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №11. С. 4-13.
- [9] Urban Link and Coverage Analysis Using Ray Tracing. [Электронный ресурс] URL: <https://nl.mathworks.com/help/comm/ug/urban-channel-link-analysis-and-visualization-using-ray-tracing.html> (дата обращения 05.03.2025).
- [10] Рыжков А.Е., Сиверс М.А., Бабкин А.С., Пыленок А.М., Трофимов А.П. Сети стандарта LTE. развитие технологий радиодоступа. Санкт-Петербург, 2015.
- [11] OpenStreetMap. [Электронный ресурс] URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения 27.02.2025).