

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

В. В. Стариков

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

vl.vl.starikov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются инструменты среды Matlab для планирования радиопокрытия и трассировки лучей в сетях мобильной связи пятого поколения при использовании на базовых станциях направленных антенн. Особое внимание в процессе моделирования было уделено применению направленных антенн базовых станций. Учет погодных факторов, а также использование трехмерной цифровой карты местности позволяют описать сложные условия распространения сигнала в городской среде. Благодаря встроенным средствам визуализации значительно упрощается процесс экспресс-анализа качественных параметров сети.

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

I. ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия сети мобильной связи прошли эволюционный путь от инструмента голосовой коммуникации до основы глобальной цифровой инфраструктуры. Высокоскоростная передача данных с низкой задержкой открыла новые возможности для развития беспилотного транспорта, телемедицины и многих других наукоемких отраслей. Современный ландшафт технологических решений, реализуемый на базе мобильных сетей, также способствовал воплощению концепций IoT (Internet of Things – интернет вещей) и Индустрии 4.0 [1]. Возросшие требования к сетевой инфраструктуре находят свое отражение в поиске эффективных способов повышения спектральной эффективности системы в целях увеличения пропускной способности системы. Успешное решение обозначенной выше задачи непосредственным образом связано с внедрением технологии Massive MIMO (Massive Multiple-Input Multiple-Output – массивный множественный вход-множественный выход) и механизмов координации внутрисистемных помех как на аппаратном, так и на программном уровнях.

Планирование и оптимизация систем мобильной связи неразрывно связаны с вопросом выбора среды моделирования [2]. На сегодняшний день рынок специализированного ПО (программного обеспечения) предоставляет решения на основе вычислительных модулей, интегрированных с ГИС (геоинформационными системами), обеспечивающих расчет покрытия на основе статистических моделей.

Такой подход показывает удовлетворительные результаты для условий, приближенных к стандартным [3]. Отметим, что эффективность упомянутого метода резко снижается для сетей, работающих в миллиметровом диапазоне частот в условиях плотной городской застройки. В таких сложных условиях наилучшую точность демонстрируют лучевые модели (например, Ray Tracing – трассировка лучей), основанные на принципах геометрической оптики и волновых уравнений [5]–[7]. Необходимо упомянуть, что применение данных методов сопряжено с необходимостью задействования значительных вычислительных ресурсов и подключения ЦММ (цифровых моделей местности) с 3D объектами зданий.

Отдельного внимания заслуживает вопрос моделирования сети, построенной с применением направленных антенн BS (базовых станций). Широкое применение такого оборудования обусловлено технологией адаптивного формирования диаграммы направленности антенны (от англ. beamforming – формирование луча). Возможность динамического управления излучением критически важна для повышения качественных характеристик принимаемого сигнала, снижения уровня внутрисистемных помех и повышения энергоэффективности [8].

Анализируя функционал программных комплексов планирования и оптимизации сетей мобильной связи, можно прийти к выводу о том, что обозначенная выше проблематика моделирования многолучевого распространения сигнала не находит своего решения в рамках этих систем. Таким образом, встает вопрос поиска альтернативного ПО, позволяющего осуществить такие расчеты. В этом контексте среда Matlab представляется удобным и многофункциональным инструментом имитационного моделирования, позволяющим производить расчеты по лучевым моделям, а также оценивать эффективность применения направленных антенн. Следует отметить, что данный вычислительный комплекс возможно дополнить рядом специализированных пакетов расширения (toolbox). Примером расширений, используемых в задачах планирования мобильных сетей, могут служить Antenna Toolbox [9] и Phased Array System Toolbox [10].

Цель работы заключается в исследовании возможностей среды Matlab для моделирования и оптимизации радиопокрытия при использовании на

базовых станциях направленных антенн, посредством описания: а) инструментария, предназначенного для трассировки лучей и расчета зон покрытия; б) процесса моделирования направленных антенн, создаваемых на основе фазированных антенных решеток.

Материал работы состоит из шести разделов, включая введение. Во II разделе представлен процесс подготовки к моделированию, включая определение основных параметров оборудования. Раздел III посвящен расчету карт покрытия и трассировке лучей. Раздел IV содержит подробное описание программного кода, описывающего модель направленной антенны. В разделе V описан процесс настройки диаграммы направленности антенны. Раздел IV содержит выводы.

II. ПОДГОТОВКА К МОДЕЛИРОВАНИЮ

Первый этап моделирования заключается в подключении ЦММ, а также описании основных характеристик передатчика BS и приемника UE (User Equipment – абонентское оборудование) [11], [12].

Программный код этого этапа выглядит следующим образом:

```
viewer =
siteviewer("Buildings", "Bonch.osm", "Basemap", "topographic");
freq = 1200e6;
tx = txsite("Name", "BS", ...
"Latitude", 59.902813, ...
"Longitude", 30.487343, ...
"AntennaHeight", 2, ...
"TransmitterPower", 3, ...
"TransmitterFrequency", freq);
tx.Antenna = helperM2412PhasedArray(tx.TransmitterFrequency);
tx.AntennaAngle = -90;
show(tx)
rx = rxsite("Name", "UE", ...
"Latitude", 59.901899, ...
"Longitude", 30.485925, ...
"AntennaHeight", 1.5, ...
"ReceiverSensitivity", -115)
show(rx)
```

Как видно из представленного выше кода, к перечню указанных характеристик оборудования относятся: частота, мощность, чувствительность, тип и высота подвеса антенны, а также географические координаты местоположения. Рассмотрение подробно функцию helperM2412PhasedArray свидетельствует о том, что в качестве антенны BS выступает модель антенной решетки, созданная в соответствии с отчетом ITU-R M.2412 [13]. Этот документ выпущен под эгидой международного союза электросвязи и является одним из основополагающих для стандартизации сетей 5G. Аргумент функции указывает на используемую частоту передатчика. Параметр tx.AntennaAngle задает физический угол наклона антенны. Подробный анализ кода, описывающего создание данной модели направленной антенны BS, представлен в разделе IV.

III. РАСЧЕТ КАРТЫ ПОКРЫТИЯ И ТРАССИРОВКА ЛУЧЕЙ

На втором этапе моделирования осуществляется определение параметров модели распространения rtpm, основанной на методе трассировки лучей [4], [12], [14]. Соответствующий блок программного кода выглядит следующим образом:

```
rtpm = propagationModel("raytracing", ...
"Method", "sbr", ...
"MaxNumReflections", 3, ...
"BuildingsMaterial", "concrete", ...
"TerrainMaterial", "concrete");
```

В третьей строке значение MaxNumReflections определяет максимальное количество отражений луча, учитываемых моделью. Последние две строки задают материал стен зданий (параметр BuildingsMaterial) и земной поверхности (параметр TerrainMaterial). В рассматриваемом примере таким материалом выступает concrete (бетон). Следующий блок описывает создание комбинированной модели распространения радиосигнала rtPlusWeather:

```
rtPlusWeather = ...
rtpm + propagationModel("gas") + propagationModel("rain");
rtPlusWeather.PropagationModels(1).AngularSeparation = "low";
```

Во второй строке кода к существующей модели rtpm добавляются две погодные составляющие: propagationModel("gas") и propagationModel("rain"). Первая описывает затухания сигнала в атмосфере, а вторая учитывает влияние дождя. Третья строка производит настройку углового разделение лучей (устанавливается значение "low") для компонента rtpm.

Далее представим блок кода для расчета зоны радиопокрытия по комбинированной модели rtPlusWeather:

```
coverage(tx, rtPlusWeather, ...
"SignalStrengths", -120:-5, ...
"MaxRange", 250, ...
"Resolution", 7, ...
"Transparency", 0.6)
```

Параметр SignalStrengths задает диапазон уровней сигнала (в дБм), который будет отображаться на карте покрытия. В строке MaxRange указывается максимальное расстояние (м), на котором будет производится расчет карты покрытия. Параметр Resolution определяет шаг расчета (м). Параметром Transparency регулируется степень прозрачности карты покрытия (задаются значения от 0 до 1). Например, заданное значение «0.6» означает, что отображаемая цветовая схема покрытия будет полупрозрачной. Результаты расчетов карты покрытия приведены на рис. 1.

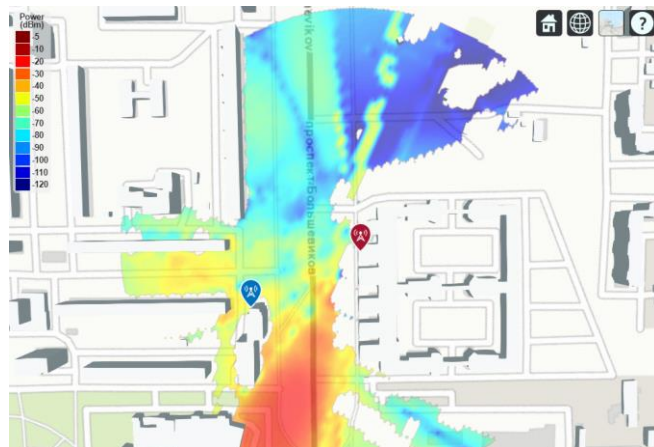


Рис. 1. Расчет карты покрытия

Проведем предварительную трассировку лучей, выполнив команду:

```
raytrace(tx, rx, rtPlusWeather)
```

Результат расчета представлен на рис. 2 и подробно рассмотрен в разделе V на этапе настройки антенны.



Рис. 2. Трассировка лучей по методу SBR

IV. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ НАПРАВЛЕННОЙ АНТЕННЫ

Рассмотрим функцию `helperM2412PhasedArray`, описывающую ФАР (фазированную антенную решетку). Соответствующий программный код можно разделить на 6 блоков. Первый блок определяет основные параметры шаблона антенны:

```
function antennaArray = helperM2412PhasedArray(fq)
azvec = -180:180;
elvec = -90:90;
Am = 30; % Maximum attenuation (dB)
tilt = 0; % Tilt angle
az3dB = 65; % 3 dB bandwidth in azimuth
el3dB = 65; % 3 dB bandwidth in elevation
```

В первой строке оператор `function` указывает на то, что пользователь инициировал определение функции Matlab. Благодаря этому шагу осуществляется инкапсуляция программного кода с возможностью вызова этой функции из других частей программы. Имя функции `helperM2412PhasedArray` содержит отсылку к тому, что она является вспомогательной (*helper*) и описывает антенную решетку в соответствии с ITU-R M.2412. Аргумент `fq` является частотой работы антенны. Вторая строка описывает параметр `azvec`, определяющий границы ДН (диаграммы направленности антенны) в горизонтальной плоскости. Аналогичным образом в третьей строке параметр `elvec` задает границы ДН антенны в вертикальной плоскости. В четвертой строке параметр `Am` определяет максимальное затухание сигнала за пределами основного лепестка ДН (дБ). В пятой строке параметр `tilt` задает электрический угол наклона антенны (град.). В шестой и седьмой строках параметры `az3dB` и `el3dB` задают ширину ДН антенны (deg) на уровне 3 дБ в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. Во втором блоке кода производится определение основных параметров, необходимых для описания ДН антенны:

```
[az,el] = meshgrid(azvec,elvec);
azMagPattern = -12*(az/az3dB).^2;
elMagPattern = -12*((el-tilt)/el3dB).^2;
combinedMagPattern = azMagPattern + elMagPattern;
combinedMagPattern(combinedMagPattern < -Am) = -Am;
phasepattern = zeros(size(combinedMagPattern));
```

С помощью функции `meshgrid` и подачи на вход векторов `azvec` и `elvec` создается 2 матрицы. Данные математические объекты представляют собой сетки углов, содержащие значения азимутальных и угломестных составляющих. В последующих двух строках с помощью расчета параметров `azMagPattern` и `elMagPattern` осуществляется параболическая аппроксимация затухания мощности в двух плоскостях

(горизонтальной и вертикальной) для антенны с главным лепестком ДН. Параболический характер аппроксимации описывается за счет использования коэффициента -12, стоящего в начале приведенных формул. Четвертая строка объединяет в ранее описанные аппроксимации ДН в параметр `combinedMagPattern`. Следующая строка ограничивает главный лепесток ДН уровнем `-Am`. Последняя строка рассматриваемого блока создает нулевую матрицу `phasepattern` с размерностью матрицы `combinedMagPattern`. Физический смысл этой записи заключается том, что фаза излучаемого сигнала во всех направлениях будет одинакова. Следующий этап посвящен описанию антенного элемента:

```
antennaElement = phased.CustomAntennaElement(...
'AzimuthAngles',azvec, ...
'ElevationAngles',elvec, ...
'MagnitudePattern',combinedMagPattern, ...
'PhasePattern',phasepattern);
```

Из первой строки следует, что компоненты антенной решетки задаются с помощью функции `phased.CustomAntennaElement`, относящейся к `Phased Array System Toolbox` [10]. Перечень входных аргументов функции содержит четыре аргумента. Первым выступает `AzimuthAngles`, отвечающий за допустимый диапазон азимутальных углов. Аналогичным образом аргумент `ElevationAngles` задает диапазон для вертикальной плоскости (угла места). Третий аргумент `MagnitudePattern` описывает ДН направленности антенного элемента, поскольку его значение равно `combinedMagPattern`, определенному в предыдущем блоке. Последний аргумент `PhasePattern` задает фазовую составляющую ДН антенны. Значение этого аргумента тождественно нулевой матрице `phasepattern`. Четвертый блок кода определяет размерность антенной решетки по строкам (`nrow`) и столбцам (`ncol`):

```
nrow = 8;
ncol = 8;
```

Таким образом, создаваемая решетка будет состоять из 64 антенных элементов. Пятый блок кода определяет расстояние между элементами:

```
lambda = physconst('lightspeed')/fq;
drow = lambda/2;
dcol = lambda/2;
```

В первой строке, используя значения скорости света `physconst('lightspeed')` и частоты `fq`, вычисляется длина волны `lambda`. Следовательно, в целях предотвращения появления нежелательных боковых лепестков, расстояния `drow` и `dcol` необходимо задать равным половине длины волны. Шестой блок кода завершает процесс создания антенной решетки и имеет следующий вид:

```
antennaArray = phased.URA('Size',[nrow ncol], ...
'Element',antennaElement, ...
'ElementSpacing',[drow dcol]);
```

В первой строке с помощью функции `phased.URA` создается однородный прямоугольный массив, представляющий собой равномерную прямоугольную антенную решетку размерностью 8x8. Аргумент `Element` задает тип антенны, используемой в каждом узле решетки. Аргумент `ElementSpacing` определяет расстояние между антенными элементами.

V. НАСТРОЙКА АНТЕННЫ

На следующем этапе перейдем к настройке фазированной антенной решетки для формирования ДН

в направлении AoD (Angle of Departure – угла отбытия) первого луча, полученного при трассировке. Этот шаг необходим для моделирования технологии beamforming.

```
ray = raytrace(tx,rx,rtPlusWeather);
aod = ray{1}.AngleOfDeparture;
steeringaz = wrapTo180(aod(1)-tx.AntennaAngle(1));
steeringVector =
phased.SteeringVector("SensorArray",tx.Antenna);
sv =
steeringVector(tx.TransmitterFrequency,[steeringaz;aod(2)]);
tx.Antenna.Taper = conj(sv);
```

Первая строка определяет массив `ray`, содержащий информацию о всех рассчитанных лучах в процессе трассировки. Во второй строке из первого элемента массива (`ray{1}`) извлекается параметр `AngleOfDeparture`, содержащий углы (азимутальный и угол места) отбытия сигнала от антенны. В третьей строке параметр `tx.AntennaAngle(1)` является текущим азимутальным углом антенны передатчика. Параметр `aod(1)` является азимутальным углом отбытия (первый элемент вектора `aod`). Следовательно, выражение `aod(1) - tx.AntennaAngle(1)` будет означать разницу угла отправления относительно оси антенны. Запись `wrapTo180` обеспечивает корректировку угла, чтобы он находился в пределах $-180...180^\circ$. В результате переменная `steeringaz` будет содержать скорректированный азимутальный угол, который учитывает текущую ориентацию антенны. Далее создается объект `steeringVector`, для управления диаграммой направленности фазированной антенной решетки передатчика. Здесь `phased.SteeringVector` представляет собой объект (из `Phased Array System Toolbox`), который используется для расчета вектора фазовых сдвигов. Аргументы `SensorArray` и `tx.Antenna` указывают на то, что это антенная решетка конкретного объекта. Далее определим комплексный вектор фазовых сдвигов `sv`, управляющий фазами сигналов на элементах антенны. Здесь `tx.TransmitterFrequency` – частота передатчика, на которой работает антенна. `[steeringaz; aod(2)]` – массив, содержащий скорректированный азимутальный угол `steeringaz` и угол места `aod(2)` для формирования диаграммы направленности. Последняя строка применяет весовые коэффициенты к элементам антенной решетки антенны, поскольку `conj(sv)` представляет собой комплексно-сопряженное значение вектора управления. Оно используется для настройки весовых коэффициентов антенной решетки для компенсации фазового сдвига. На заключительном этапе произведем перерасчет путей распространения сигнала (лучей) и визуализируем на карте ДН антенны:

```
raytrace(tx,rx,rtPlusWeather);
pattern(tx,"Transparency",0.6)
hide(tx)
```

Последняя строка кода скрывает пиктограмму передатчика. Результат расчета приведен на рис. 3.

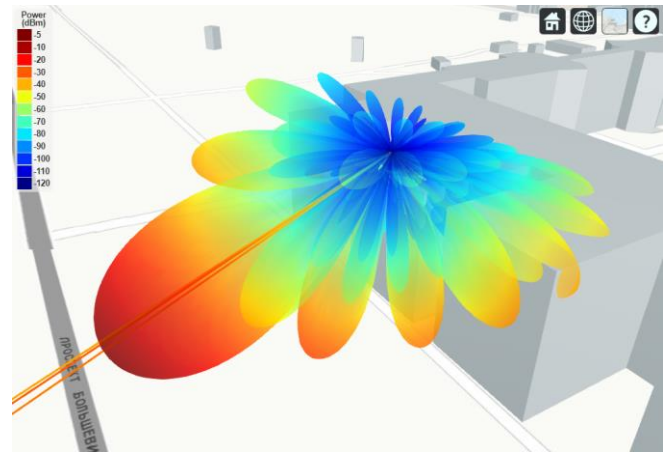


Рис. 3. Визуализация ДН антенны BS

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среда Matlab предоставляет широкий инструментарий для моделирования и оптимизации направленной радиосвязи, что очень важно при оценке сценариев в сверхплотных сетях радиодоступа 5G.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шваб К., Дэвис Н. Технологии Четвертой промышленной революции / пер. с англ. М.: Эксмо, 2018. 317 с.
- [2] Модели и методы трассировки лучей в среде Matlab / Фокин Г.А., Арефьев А.С., Варыгин А.А. // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1 (79). С. 178-181.
- [3] 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.
- [4] Yun, Zhengqing, and Magdy F. Iskander. "Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications." // IEEE Access 3 (2015): 1089–1100.
- [5] Фокин Г.А., Гришин И.В. Метод управления лучом в сверхплотных сетях для подвижных устройств путем сканирования // Информация и космос. 2024. № 1. С. 6-15.
- [6] Фокин Г.А. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 1. Выравнивание лучей при установлении соединения // Первая мяля. 2022. № 1(101). С. 42–49.
- [7] Фокин Г. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 2. Выравнивание лучей при ведении радиосвязи // Первая мяля. 2022. № 3(103). С. 62–69.
- [8] Стариков В.В. Методика оценки средней пропускной способности сети стандарта LTE на основе расчета внутрисистемной интерференции // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей: в 4 томах. 2017. С. 253-258.
- [9] Antenna Toolbox. [Электронный ресурс] URL: <https://nl.mathworks.com/help/antenna/index.html> (дата обращения 05.03.2025).
- [10] Phased Array System Toolbox. [Электронный ресурс] URL: <https://nl.mathworks.com/help/phased/index.html> (дата обращения 05.03.2025).
- [11] OpenStreetMap. [Электронный ресурс] URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения 05.03.2025).
- [12] 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).
- [13] Report ITU-R M.2412-0. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. ITU. 2017.
- [14] Фокин Г.А. Позиционирование в условиях отсутствия прямой видимости с использованием цифровых моделей местности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №11. С. 4-13.