

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 производиться 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.

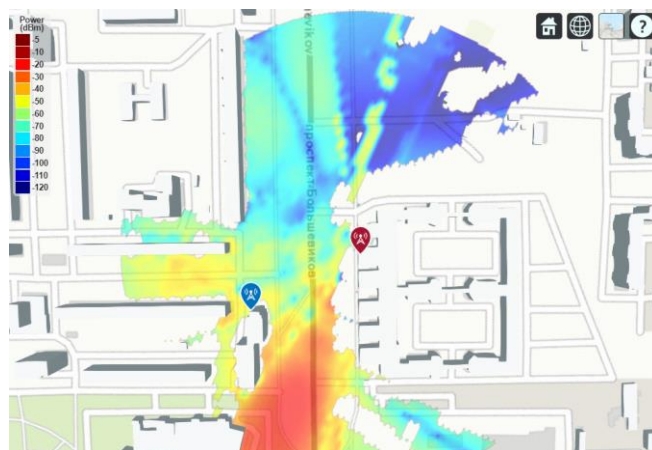


Рис. 1. Расчет карты покрытия

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.

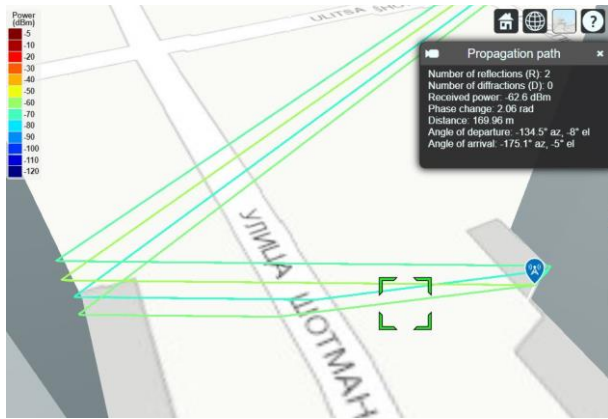


Рис. 2. Трассировка лучей по методу SBR

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.

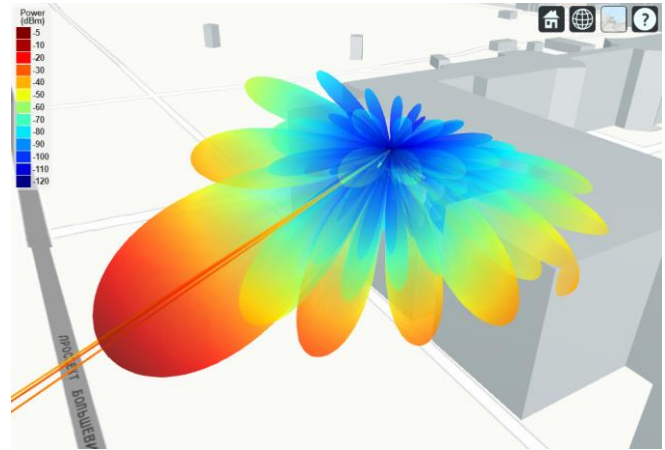


Рис. 3. Визуализация ДН антенны BS

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 миля. 2022. № 1(101). С. 42–49.
- [7] Фокин Г. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 2. Выравнивание лучей при ведении радиосвязи // Первая миля. 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.