

Модели и методы трассировки лучей в среде MATLAB

А. С. Арефьев, А. А. Варыгин, Г. А. Фокин

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

tay3435@yandex.ru, sahsa330@gmail.com, grihafokin@gmail.com

Аннотация. Сети пятого поколения обладают высокими скоростями передачи данных, позволяющими обрабатывать большие объемы трафика. Большой объем трафика данных происходит из-за нескольких одновременных подключений. Направленность антенных лучей используется для обеспечения высокой скорости передачи данных и помехоустойчивости. В статье показано исследование трассировки лучей в MATLAB, где моделирование происходит в городской местности. Результатом являются расчеты интерференционных эффектов мощности сигнала и направления распространения луча. Трассировка лучей может помочь значительно увеличить пропускную способность и надежность соединения на основе данных, полученных в программе MATLAB.

Ключевые слова: сверхплотные сети, SBR, трассировка лучей, прямая видимость

I. ВВЕДЕНИЕ

За последние два десятилетия беспроводная и радиосвязь претерпела огромное развитие, которое вместе с Интернетом сыграло ключевую роль в содействии глобализации. Ключевой частью любой системы беспроводной связи является беспроводной канал, в котором радиоволны используются для передачи сигналов или информации. Хотя электромагнитные волны управляются уравнениями Максвелла с соответствующими граничными условиями, в целом невозможно найти аналитическое решение для электромагнитного поля в реалистичной среде распространения. Целью моделирования распространения является получение оценки силы поля/сигнала, когда заданы некоторые параметры беспроводной системы, такие как частота, характеристики местности, высоты антенны и т. д.

Теоретические модели и эмпирические модели в целом просты и быстры с точки зрения вычислений. Они также имеют удовлетворительную точность. К основным недостаткам эмпирических моделей относится то, что они, как правило, основаны на диапазонах и действительны только для среды, аналогичной той, в которой разрабатываются модели. Кроме того, для недавно разработанных систем с несколькими входами и множеством выходов (MIMO) эмпирические модели не могут обеспечить точные результаты пространственно-временной или угловой задержки, которые являются ключевыми характеристиками для моделирования систем. С другой, метод трассировки лучей основан на лучевой оптике, которая решает уравнения Максвелла в высокочастотном режиме. Таким образом, метод трассировки лучей является общим инструментом моделирования распространения, который обеспечивает оценки потерь на трассе, угла прихода/отправления и

временных задержек [[1]]. В отличие от теоретических и эмпирических моделей, метод трассировки лучей не дает простых формул для расчета потерь на трассе. Это компьютерная программа, представляющая собой численный метод решения уравнения Максвелла. Следовательно, методы трассировки лучей также относятся к семейству вычислительных Computational electromagnetics (CEM). Большинство методов CEM требуют больших вычислительных ресурсов. В связи с тем, что среда распространения в большинстве случаев электрически велика, численные методы, основанные на дискретизации дифференциальных или интегральных уравнений, столкнутся с проблемами непомерно больших потребностей в памяти и низкой скорости вычислений. К счастью, метод трассировки лучей благодаря своей высокочастотной аппроксимации не так уж зависит от большого объема памяти компьютера.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB

A. Моделирование среды распространения

Эксперимент проведен при помощи интегрированной среды MATLAB и с использованием трехмерной геометрии среды рис. 1. Представление модели трассировки лучей с помощью RayTracing объекта [2].

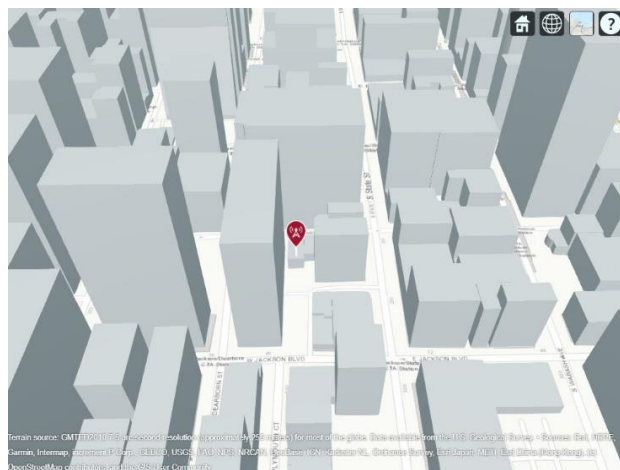


Рис. 1. Трехмерная среда в программном комплексе MATLAB

B. Концепция лучей и механизмы распространения

Концепция лучей предоставляет средства для понимания различных механизмов распространения и визуальный инструмент для понимания взаимодействия электромагнитных волн. Для моделирования распространения радиоволн с использованием трассировки лучей концепция, следующая: 1) Луч распространяется прямолинейно в однородной среде. 2) Луч подчиняется законам отражения, преломления и

дифракции. 3) Луч рассматривается как трубка, вокруг которого находится энергия [2]]. На рис. 2 показан луч находящийся слева, а также лучевые трубки с круглым сечением по центру и треугольным сечением справа для точечного источника.

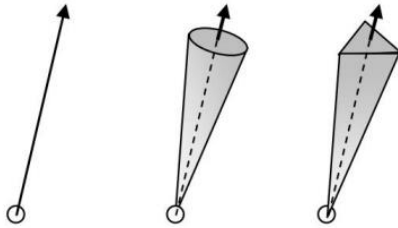


Рис. 2. Вид трассированного луча

Используя данные концепции, можно описать механизмы распространения. Описывается точечный источник, от которого исходит множество лучей. По поведению этого луча можно отнести к следующим типам: прямые лучи с механизмом распространения по прямой видимости; отраженные лучи, величина которых определяется уравнениями Френеля для различных поляризаций; Дифракционные лучи, где один падающий луч может создавать непрерывный конус лучей.

С. Моделирование сигнала

В программном комплексе Matlab используются RayTracing объекты – это модели распространения, которые вычисляют пути распространения с использованием трехмерной геометрии среды. Представление модели трассировки лучей с помощью RayTracing объекта. Модель трассировки лучей: 1) Используется в диапазоне от 100 МГц до 100 ГГц. 2) Вычисляет несколько путей распространения. Другие модели распространения вычисляют только отдельные пути распространения. 3) Поддерживает трехмерную работу как на открытом воздухе, так и внутри помещений. 4) Определяет потери на пути и сдвиг фазы каждого луча с помощью электромагнитного анализа, включая отслеживание горизонтальной и вертикальной поляризаций сигнала на пути распространения. Расчеты потерь на пути включают потери в свободном пространстве, потери на отражение и дифракционные потери. Для каждого отражения и дифракции модель вычисляет потери в горизонтальной и вертикальной поляризациях с использованием уравнения Френеля, единой теории дифракции (UTD), геометрического угла и комплексной диэлектрической проницаемости материалов интерфейса на указанной частоте.

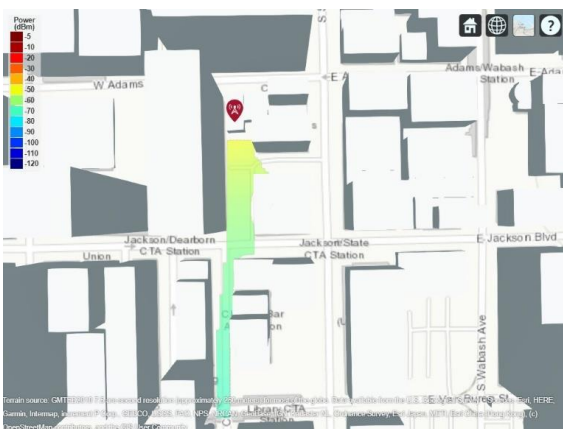


Рис. 3. Область распространения сигнала

Также модель распространения SBR использует анализ трассировки лучей для расчета путей распространения и соответствующих им потерь на пути. Потери на трассе рассчитываются на основе потерь в свободном пространстве, потерь на отражение и дифракцию из-за взаимодействия с материалами, а также потерь на поляризацию антенны. Для запуска лучей обычно требуется, чтобы все лучи, исходящие из точки источника, были распределены как можно более равномерно, чтобы каждый луч нес одинаковую мощность для изотропного источника. Когда луч отслеживается от местоположения источника, он может идти непосредственно к точке поля или может несколько раз отражаться и огибать поверхность, прежде чем достигнет точки поля. В типичной городской среде эта процедура включает в себя важный этап: определение того, пересекает ли луч какой-либо объект в сцене. Но в типичной городской среде метод чистого изображения может оказаться неэффективным из-за большого количества отражающих поверхностей, что приводит к низкой скорости вычислений. Это одна из причин того, что метод отражающихся лучей более широко используется. Если луч попадает на объект, возникает отраженный или преломленный луч. Эти тесты пересечения лучей и объектов обычно занимают более 90% вычислительного времени при несложной реализации алгоритмов трассировки лучей

Моделируется сценарий малой соты в густонаселенной городской среде, место передатчика задается при помощи кода. Площадка передатчика представляет собой базовую станцию, расположенную на мачте с высотой 10 м от уровня кровли здания и обслуживающую окружающую территорию. Передатчик использует изотропную антенну по умолчанию и работает на несущей частоте 28 ГГц с уровнем мощности 10 Вт, также использовался путь с одним отражением на рис. 4.

```
>> viewer = siteviewer("Buildings","chicago.osm","Basemap","topographic");
>> tx = txsite("Name","Small cell transmitter", ...
"Latitude",41.879090, ...
"Longitude",-87.628607, ...
"AntennaHeight",10, ...
"TransmitterPower",10, ...
"TransmitterFrequency",28e9);
show(tx)
>> rtpm = propagationModel("raytracing", ...
"Method","sbr", ...
"MaxNumReflections",0, ...
"BuildingsMaterial","perfect-reflector", ...
"TerrainMaterial","perfect-reflector");
>> coverage(tx,rtpm, ...
"SignalStrengths",-120:-5, ...
"MaxRange",250, ...
"Resolution",3, ...
"Transparency",0.6)
>> rx = rxsite("Name","Small cell receiver", ...
"Latitude",41.878410, ...
"Longitude",-87.628545, ...
"AntennaHeight",1);
los(tx,rx)
>> rtpm.MaxNumReflections = 1;
clearMap(viewer)
raytrace(tx,rx,rtpm)
```

Рис. 4. Технические характеристики оборудования

Результат показывает распространение сигнала по пути с одним отражением, в том числе характеристики распространения, включая полученную мощность, изменение фазы, расстояние и углы отправления и прихода, шелкнув нанесенный путь, показано на рис. 5.



Рис. 5. Модель распространения трех лучей сигнала с 1 отражением

Полученная мощность при идеальном отражении: -59,7 дБм, с погодными условиями и материалами зданий то потери будут больше.

Развитие геометрической теории дифракции, а затем и единой теории дифракции значительно повысило точность расчета дифракции на клиньях. Для определения пути дифрагированного луча был применен принцип наименьшего времени Ферма и сформулирован закон дифракции: угол падения равен углу дифракции. На рис. 6 продемонстрирован код модели пути дифракции и 2-х отраженных лучей.

```
>> ss = sigstrength(rx,tx,rtpm);
disp("Received power using concrete materials: " + ss + " dBm")
Received power using concrete materials: -59.2311 dBm
>> rtPlusWeather = ...
    rtpm + propagationModel("gas") + propagationModel("rain");
raytrace(tx,rx,rtPlusWeather)

ss = sigstrength(rx,tx,rtPlusWeather);
disp("Received power including weather loss: " + ss + " dBm")
Received power including weather loss: -59.8224 dBm
>> rtPlusWeather.PropagationModels(1).MaxNumReflections = 2;
rtPlusWeather.PropagationModels(1).AngularSeparation = "low";

ss = sigstrength(rx,tx,rtPlusWeather);
disp("Received power with two-reflection paths: " + ss + " dBm")
Received power with two-reflection paths: -57.1436 dBm
>> clearMap(viewer)
raytrace(tx,rx,rtPlusWeather)
```

Рис. 6. Технические характеристики распространения лучей

Результатом является принимаемая мощность с путями с двумя отражениями и одной дифракцией: -79,8 дБм, результат отображен на рис. 7.

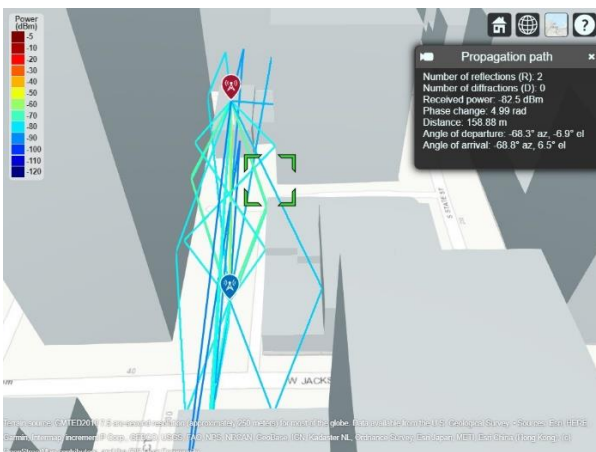


Рис. 7. Модель распространения трех лучей сигнала с 1 отражением

Для достижения оптимального качества связи используется Phased Array System Toolbox™ для оптимального управления лучом, чтобы максимизировать полученную мощность для линии связи, не находящейся в прямой видимости [3]]. Для моделирования будет применяться специальная антенная решетка размером 8x8, показанная на рис. 8.

```
>> azvec = -180:180; % Azimuth angles (deg)
elvec = -90:90; % Elevation angles (deg)
SLA = 30; % Maximum side-lobe level attenuation (dB)
tilt = 0; % Tilt angle (deg)
az3dB = 65; % 3 dB beamwidth in azimuth (deg)
el3dB = 65; % 3 dB beamwidth in elevation (deg)
lambda = physconst("lightspeed")/tx.TransmitterFrequency; % Wavelength (m)

[az,el] = meshgrid(azvec,elvec);
azMagPattern = -min(12*(az/az3dB).^2,SLA);
elMagPattern = -min(12*(el-tilt)/el3dB).^2,SLA);
combinedMagPattern = -min(-azMagPattern + elMagPattern,SLA); % Relative antenna gain (dB)

antennaElement = phased.CustomAntennaElement("MagnitudePattern",combinedMagPattern);
tx.Antenna = phased.URA("Size",[8 8], ...
    "Element",antennaElement, ...
    "ElementSpacing",[lambda/2 lambda/2]);
>> antennaDirectivity = pattern(tx.Antenna,tx.TransmitterFrequency);
antennaDirectivityMax = max(antennaDirectivity(:));
disp("Peak antenna directivity: " + antennaDirectivityMax + " dBi")
Peak antenna directivity: 23.4449 dBi
>> tx.AntennaAngle = -90;

clearMap(viewer)
show(rx)
pattern(tx,"Transparency",0.6)
hide(tx)
```

Рис. 8. Технические характеристики антенны

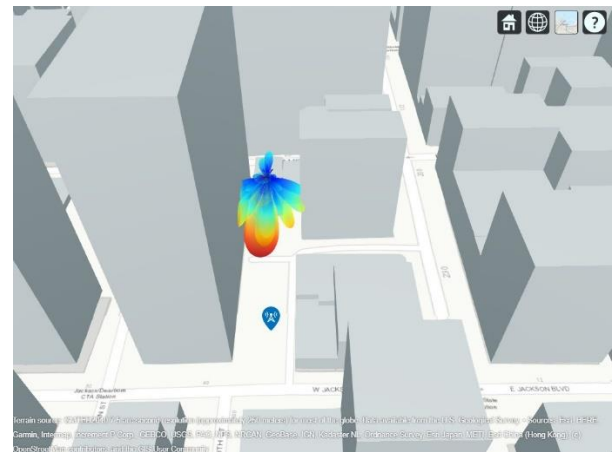


Рис. 9. Модель диаграммы направленности антенной решеткой 8x8

Результатом моделирования служит диаграмма направленности антенны без эффективного управления лучом. Модель показана на рис. 9.

Для моделирования с оптимальным лучом и максимальной получаемой мощностью необходимо изменить направления распространения сигнала на рис. 10.

```
>> rtPlusWeather.PropagationModels(1).MaxNumReflections = 1;
rtPlusWeather.PropagationModels(1).MaxNumDiffractions = 0;
ray = raytrace(tx,rx,rtPlusWeather);
disp(ray{1})
    1x4 Ray array

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

ss = sigstrength(rx,tx,rtPlusWeather);
disp("Received power with beam steering: " + ss + " dBm")
Received power with beam steering: -35.7527 dBm
```

Рис. 10. Экранная форма Command Window для оптимального управления лучом

Результатом моделирования будет служить диаграмма направленности антенны с изменённым направлением распространения сигнала. Модель показана рис. 11.



Рис. 11. ДН антенной решетки 8x8 с оптимальным управлением луча

D. Результаты

В результате анализа было установлено, что трассировка лучей позволяет прогнозировать мощности сигнала для линий связи, где существуют отражения и огибания препятствий на краях пути распространения. Анализ реалистичных материалов оказывает значительное влияние на расчетные потери на трассе и получаемую мощность. Анализ с большим количеством отражений и дифракций приводит к увеличению времени вычислений, но выявляет дополнительные области распространения сигнала. Использование направленной антенны с управлением лучом значительно увеличивает принимаемую мощность для приемников.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трассировка лучей будет играть важную роль в будущих инструментах моделирования распространения. Метод трассировки лучей в сочетании с эмпирическими и другими численными методами может служить основой системы интеллектуального моделирования. Это будет наиболее полезно для решения сложных условий распространения в высокочастотных режимах. Метод трассировки лучей будет встроен в системы беспроводной связи для обеспечения оценки канала в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Yun Z., Iskander M.F. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications // IEEE Access. 2015. Vol. 3. pp. 1089-1100.
- [2] Urban Link and Coverage Analysis Using Ray Tracing. MathWorks. [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/urban-channel-link-analysis-and-visualization-using-ray-tracing.html> (Дата обращения 25.02.2024).
- [3] Фокин Г.А. Методика идентификации прямой видимости в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 78-82.