

Моделирование процедуры уточнения луча передачи нисходящего канала 5G NR, с использованием CSI-RS

Д. С. Рябиков

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

ryabikov.ds@sut.ru

Аннотация. В 5G NR частотный диапазон 2 (FR2) работает на частотах миллиметрового диапазона (mmWave) от 24,25 ГГц до 52,6 ГГц. С увеличением частоты, переданный сигнал подвержен высокой потере в тракте и потере проникновения, что влияет на бюджет канала связи. Для улучшения усиления и направленности передачи и приема сигналов на более высоких частотах, необходимо управлять лучом. Управление лучом представляет собой набор процедур уровня 1 (физический уровень) и уровня 2 (управление доступом к среде), для установления и сохранения оптимальной пары лучей (луч передачи и соответствующий луч приема) для обеспечения достаточного уровня соединения. Данная работа рассматривает процедуру (p-2) уточнения луча с помощью NZP-CSI-RS, для идентификации луча на передачу, который будет более оптимален.

Ключевые слова: 5G, NR, CSI-RS, RSRP, SSB, UE, gNB

I. УПРАВЛЕНИЕ ЛУЧЕМ В 5G NR

В [1] определено управление лучами определено как три процедуры [2].

Процедура 1 (P-1): Эта процедура сосредоточена на первоначальном захвате на основе блоков сигналов синхронизации SSB (Synchronization Signal Blocks). Во время первоначального захвата происходит сканирование луча как на передающей, так и на принимающей стороне, чтобы выбрать лучшую пару лучей на основе измерений RSRP (Reference Signal Received Power). Как правило, выбранные лучи являются широкими и могут не быть оптимальной парой лучей для передачи и приема данных.

Процедура 2 (P-2): Эта процедура сосредоточена на уточнении луча на стороне передачи, где развертка луча происходит на стороне передачи при фиксированном луче приема. Процедура основана на CSI-RS (Channel State Information Reference Signal) с ненулевой мощностью NZP-CSI-RS (Non-Zero-Power CSI-RS) для уточнения луча на стороне передачи по нисходящему каналу и опорном сигнале зондирования SRS (Sounding Reference Signal) для уточнения луча на стороне передачи по восходящему каналу.

После первоначального установления луча для получения одноадресной передачи данных с высокой направленностью и высоким коэффициентом усиления требуется луч, гораздо более точный, чем луч SSB. Поэтому настраивается набор ресурсов опорного сигнала CSI-RS, которые передаются в разных направлениях с использованием более точных лучей в пределах углового диапазона луча от первоначального

процесса захвата. Затем пользовательское оборудование UE (User Equipment) или узел сети доступа (gNB) измеряет все эти лучи, улавливая сигналы с помощью фиксированного приемного луча. Наконец, на основе измерений RSRP всех передающих лучей выбирается лучший передающий луч.

Процедура 3 (P-3): Эта процедура сосредоточена на настройке луча на принимающей стороне, где развертка луча происходит на принимающей стороне с учетом текущего луча передачи. Этот процесс направлен на поиск оптимального луча приема, который может быть соседним лучом или уточненным лучом. Для этой процедуры набор ресурсов опорного сигнала (NZP-CSI-RS для нисходящего канала и SRS для восходящего канала) передается с тем же лучом передачи, а UE или gNB принимает сигнал, используя различные лучи из разных направлений, охватывающие угловой диапазон. В результате чего, лучший приемный луч выбирается на основе измерений RSRP по всем приемным лучам.

В этом моделировании основное внимание уделяется уточнению луча [3] нисходящего канала на передатчике. Сценарий работает как для частотного диапазона 1 (FR1), так и для частотного диапазона 2 (FR2) NR 5G. На рис. 1 изображена процедура уточнения луча на стороне передатчика с учетом четырех ресурсов NZP-CSI-RS, передаваемых в четырех разных направлениях.

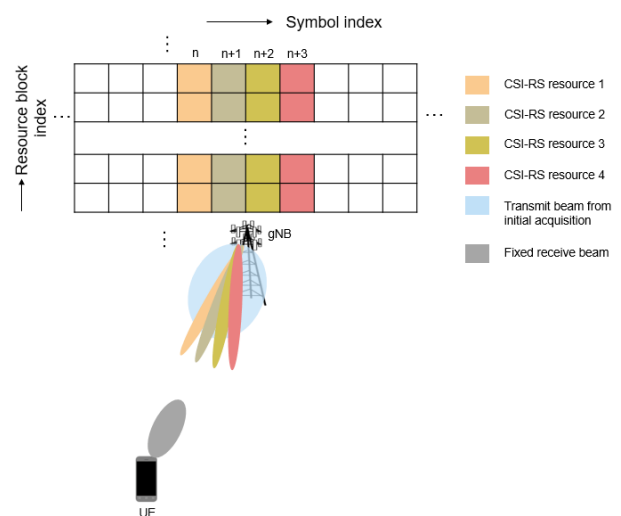


Рис. 1. Процедура уточнения луча на стороне передатчика с учетом четырех ресурсов NZP-CSI-RS, передаваемых в четырех разных направлениях

На рис. 2 показаны основные этапы обработки в данном моделировании, этапы, связанные с процессом уточнения луча на стороне передачи, выделены цветом.

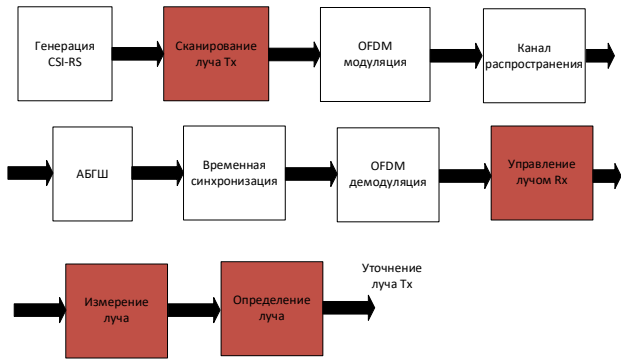


Рис. 2. Основные этапы обработки лучей

II. НАСТРОЙКА СЦЕНАРИЯ

В данном пункте будут представлены шаги для построения модели.

Создание объекта конфигурации несущей, представляющий собой несущую с частотой 50 МГц с интервалом между поднесущими 30 кГц.

```
carrier = nrCarrierConfig;
% Максимальная пропускная
% способность канала конфигурация
% для несущей частоты 50 МГц с
% интервалом между поднесущими 30
% кГц
carrier.NSizeGrid = 133;
carrier.SubcarrierSpacing = 30;
carrier.NSlot = 0;
carrier.NFrame = 0
```

Создание объекта конфигурации CSI-RS, представляющий собой набор ресурсов NZP-CSI-RS с количеством ресурсов NZP-CSI-RS, равным numNZPRes. Для измерений RSRP уровня 1 все ресурсы CSI-RS в наборе будут настроены с одинаковым количеством антенных портов (однопортовых или двухпортовых), как указано в [4] или [5]. Данный сценарий подходит для однопортового CSI-RS.

```
numNZPRes = 12;
csirs = nrCSIRSConfig;
csirs.CSIRSType =
repmat({'nzp'},1,numNZPRes);
csirs.CSIRSPeriod = 'on';
csirs.Density =
repmat({'one'},1,numNZPRes);
csirs.RowNumber =
repmat(2,1,numNZPRes);
csirs.SymbolLocations =
{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11};
csirs.SubcarrierLocations =
repmat({0},1,numNZPRes);
csirs.NumRB = 25
% Проверка портов антенны CSI-RS
validateCSIRSPorts(csirs);
% Получение двоичного вектора,
% представляющего наличие каждого
% ресурса CSI-RS в указанном слоте
csirsTransmitted =
```

```
getActiveCSIRSRes(carrier,csirs);
```

Далее необходима настройка масштабирования мощности всех ресурсов NZP-CSI-RS [6] в децибелах (дБ).

```
powerCSIRS = 0;
```

Генерация символов и индексов CSI-RS [7] с помощью объектов конфигурации carrier и csirs. Чтобы различать каждый выход ресурса CSI-RS отдельно, будут указаны пары имя-значение OutputResourceFormat, „cell“.

```
csirsSym =
nrCSIRS(carrier,csirs,'OutputResourceFormat','cell')
csirsInd =
nrCSIRSIndices(carrier,csirs,'OutputResourceFormat','cell')
```

Настройка несущей частоты [8] и скорости распространения сигнала.

```
% Установка несущей частоты
fc = 3.5e9;
freqRange = validateFc(fc);
% Установка скорости
% распространения
c = physconst('LightSpeed');
% Вычисление длины волны
lambda = c/fc;
```

Настройка размера антенных решеток [9] передачи и приема в виде вектора из двух элементов, где первый элемент представляет количество строк, а второй — количество столбцов в антенной решетке.

```
txArySize = [8 8];
rxArySize = [2 2];
```

Расчет общего количества элементов передающей и приемной антенн.

```
nTx = prod(txArySize);
nRx = prod(rxArySize);
```

Настройка положения антенных решеток передатчика и приемника. Затем рассчитайте потери в свободном пространстве [10] на основе пространственного расстояния между положениями антенных решеток передатчика и приемника.

```
% Настройка положения антенных
% решеток
txArrayPos = [0;0;0];
rxArrayPos = [100;50;0];
% Расчет потери сигнала в
% свободном пространстве
toRxRange =
rangeangle(txArrayPos,rxArrayPos);
spLoss = fspl(toRxRange,lambda);
```

Создание объекта System object вектора управления для антенной решетки передачи.

```
txArrayStv =
phased.SteeringVector('SensorArray',txArray,'PropagationSpeed',c);
```

Расчёт угла положения рассеивателя по отношению к антенной решетке передатчика [11].

```
% Указание на положение первого
% рассеивателя в случае
% наличия нескольких рассеивателей
[~,scatAng] =
rangeangle(scatPos(:,1),txArrayPos
);
```

Настройка азимутальную и угловую ширину луча SSB-передачи из начального процесса захвата (P-1).

```
% В градусах
azTxBeamWidth = 30;
elTxBeamWidth = 30;
```

Получение направления луча SSB-передатчика, которое (частично или полностью) совпадает с положением рассеивателя, используя ширину луча в плоскостях азимута и угла возвышения.

```
ssbTxAng =
getInitialBeamDir(scatAng,azTxBea
Width,elTxBeamWidth);
```

Расчет направления лучей (пары азимута и угла возвышения) для всех активных ресурсов CSI-RS в угловом диапазоне, охватываемом лучем передачи SSB.

```
% Получение количества лучей
% передачи на основе количества
% активных ресурсов CSI-RS в слоте
numBeams = sum(csirsTransmitted);
% Получение диапазона
% азимутальной развертки на основе
% направления луча SSB-передачи
% и его ширины луча в азимутальной
% плоскости
azSweepRange = [ssbTxAng(1) -
azTxBeamWidth/2 ssbTxAng(1) +
azTxBeamWidth/2];
% Получение диапазона изменения
% угла возвышения на основе
% направления луча SSB-передатчика
% и его ширины в плоскости
% возвышения
elSweepRange = [ssbTxAng(2) -
elTxBeamWidth/2 ssbTxAng(2) +
elTxBeamWidth/2];
% Получение пары азимута и угла
% возвышения для всех лучей передачи
% N2P-CSI-RS
azBW =
beamwidth(txArray,fc,'Cut','Azimu
h');
elBW =
beamwidth(txArray,fc,'Cut','Eleva
tion');
csirsBeamAng =
hGetBeamSweepAngles(numBeams,azSw
eepRange,elSweepRange,azBW,elBW);
```

Расчет векторов управления для всех активных ресурсов CSI-RS.

```
wT = zeros(nTx,numBeams);
for beamIdx = 1:numBeams
tempW =
txArrayStv(fc,csirsBeamAng(:,beam
dx));
wT(:,beamIdx) = tempW;
end
```

Генерация волны во временной области, с применением OFDM-модуляции.

```
% Выполнение OFDM модуляции
[tbfWaveform,ofdmInfo] =
nrOFDMModulate(carrier,bfGrid);
```

```
% Нормализация формируемой пучком
% волны во временной
% области по количеству передающих
% антенн
tbfWaveform =
tbfWaveform/sqrt(nTx);
```

Выполнение синхронизации во времени путем перекрестной корреляции принятых опорных символов с локальной копией символов NZP-CSI-RS.

```
% Генерация опорных символов и
% Индексов
refSym = nrCSIRS(carrier,csirs);
refInd =
nrCSIRSIndices(carrier,csirs);
% Оценка временного смещения
offset =
nrTimingEstimate(carrier,rxWavefo
m,refIn,refSym);
if offset > maxChDelay
offset = 0;
end
```

% Корректировка временного смещения
syncTdWaveform = rxWaveform(1+offset:end,:);
Демодуляция синхронизированной волны во временной области с помощью OFDM.

```
rxGrid =
nrOFDMDemodulate(carrier,syncTdWa
eform);
```

Создание объекта системы «Вектор управления» для приемной антенной решетки.

```
rxArrayStv =
phased.SteeringVector('SensorArra
',rxArray,'PropagationSpeed',c);
```

Расчет угла положения рассеивателя по отношению к приемной антенной решетке. Это принимается за направление приемного луча из начального процесса захвата с использованием SSB.

```
% Направление на положение первого
% рассеивателя в случае наличия
% нескольких рассеивателей
[~,scatRxAng] =
rangeangle(scatPos(:,1),rxArrayPo
```

```
);
```

Настройка азимутального и угловой ширины луча приема из процесса первоначального захвата (P-1).

```
% В градусах
azRxBeamWidth = 30;
elRxBeamWidth = 30;
```

Получение начального направления приемного луча, которое выровнено (частично или полностью) по положению рассеивателя, используя ширину луча в плоскостях азимута и угла возвышения из P-1.

```
rxAng =
    getInitialBeamDir(scatRxAng, azRxBeamWidth, elRxBeamWidth);
    Расчет вектора управления для угла приема.
    wR = rxArrayStv(fc, rxAng);
```

Для выполнения цифрового формирования луча на приемной стороне применяются весовые коэффициенты к rxGrid, исходя из предположения, что в rxGrid нет других сигналов (сценарий с одним UE).

Объединение сигналов от всех элементов приемной антенны в случае FR2, как указано в [4].

```
temp = rxGrid;
if strcmpi(freqRange, 'FR1')
    % Формирование луча без
    Объединения
    rbfGrid =
        reshape(reshape(temp, [], nRx) .* wR',
            size(temp, 1), size(temp, 2), []);
else % 'FR2'
    % Формирование луча с
    Объединением
    rbfGrid =
        reshape(reshape(temp, [], nRx) * conj(
            wR, size(temp, 1), size(temp, 2), []);
end
```

Настройка канала распространения MIMO на основе рассеивания с помощью системного объекта phased.ScatteringMIMOChannel (Phased Array System Toolbox). Эта модель канала применяет к входу временную задержку, коэффициент усиления, доплеровский сдвиг, изменение фазы, потери в свободном пространстве и, опционально, другие атмосферные затухания.

```
chan =
    phased.ScatteringMIMOChannel;
    chan.PropagationSpeed = c;
    chan.CarrierFrequency = fc;
    chan.Polarization = „none“;
    chan.SpecifyAtmosphere = false;
    chan.SampleRate =
        ofdmInfo.SampleRate;
    chan.SimulateDirectPath = false;
    chan.ChannelResponseOutputPort =
        true;
    % Настройка параметров передающей
    антенной решетки
    chan.TransmitArray = txArray;
```

```
chan.TransmitArrayMotionSource =
    „property“;
chan.TransmitArrayPosition =
    txArrayPos;
    % Настройка параметров приемной
    антенной решетки
chan.ReceiveArray = rxArray;
chan.ReceiveArrayMotionSource =
    „property“;
chan.ReceiveArrayPosition =
    rxArrayPos;
    % Настройка рассеивателей
chan.ScattererSpecificationSource =
    „property“;
chan.ScattererPosition = scatPos;
chan.ScattererCoefficient =
    ones(1, numScat);
    % Получение максимальной задержки
    канала путем передачи случайного
    сигнала
[~,~,tau] =
    chan(complex(randn(chan.SampleRate
        *1e-3, nTx), ...
        randn(chan.SampleRate*1e-3, nTx)));
    maxChDelay =
        ceil(max(tau)*chan.SampleRate);
```

Добавление нулей в конец передаваемого сигнала, чтобы очистить содержимое канала, а затем пропустите сигнал во временной области через рассеивающий канал MIMO. Эти нули учитывают любую задержку, возникающую в канале.

```
% Добавление нулей к передаваемой
    волне, чтобы учесть задержку
    канала.
    tbfWaveform = [tbfWaveform;
        zeros(maxChDelay, nTx)];
    % Пропускание волны через канал.
    fadWave = chan(tbfWaveform);
```

Настройка и применение коэффициента усиления приема к затухающей волне, чтобы компенсировать потери в тракте. Затем применение AWGN к полученной волне.

```
% Настройка усиления приема
rxGain = 10.^((spLoss)/20);
    % Усиление в линейном масштабе
    % Применить усиление
    fadWaveG = fadWave*rxGain;
    % Настройка SNR в дБ
    SNRdB = 20;
    SNR = 10^(SNRdB/10); % SNR в
    линейном масштабе
    % Расчет стандартного отклонения
    для AWGN
    N0 =
        1/sqrt(2.0*nRx*double(ofdmInfo.Nf
            t)*SNR);
    % Генерировать AWGN
    noise =
        N0*complex(randn(size(fadWaveG)),
            andn(size(fadWaveG)));
    % Применить AWGN к волне
```

```
rxWaveform = fadWaveG + noise;
```

Построение графика сценария рассеяния ММО (включая антенные решетки передачи и приема, положения рассеивателей и их траектории, а также все диаграммы направленности антенных решеток передачи и приема). Диаграммы направленности на этом рис. 3 похожи на диаграммы мощности в линейном масштабе.

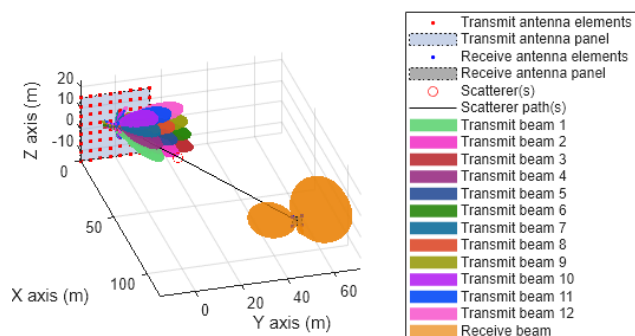


Рис. 3. Сценарий ММО

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование подтвердило, что уточнение луча на основе CSI-RS (процедура P-2) является критически важным механизмом для работы 5G NR в высокочастотных диапазонах (FR2).

Использование сигналов CSI-RS позволяет перейти от широких лучей SSB (начальный доступ) к узконаправленным лучам для передачи данных, что значительно увеличивает коэффициент усиления антенной системы.

Алгоритм выбора оптимального луча на основе L1-RSRP доказал свою точность в условиях среды с рассеивателями, позволяя эффективно находить наилучшую пару «передатчик-приемник».

Рассмотренная процедура моделирования полностью опирается на технический отчет [1], что гарантирует достоверность результатов и их применимость к реальным сетям. Таким образом, применение CSI-RS для уточнения лучей позволяет минимизировать потери сигнала и оптимизировать производительность нисходящего канала в режиме подключения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 3GPP TR 38.802. Study on New Radio access technology physical layer aspects // 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
- [2] Фокин Г.А. Модели управления лучом в сетях 5G NR Часть 1. Выравнивание лучей при установлении соединения // Первая миля. 2022. № 1. С. 42-49.
- [3] Фокин Г.А. Модели управления лучом в сетях 5G NR Часть 2. Выравнивание лучей при ведении радиосвязи // Первая миля. 2022. № 1. С. 62-68.
- [4] 3GPP TS 38.215. NR; Physical layer measurements // 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
- [5] 3GPP TS 38.214. NR; Physical layer procedures for data // 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
- [6] 3GPP TR 38.843, Study on Artificial Intelligence (AI)/Machine Learning (ML) for NR air interface // 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
- [7] 3GPP TR 38.901, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz // 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
- [8] Giordani, M., M. Polese, A. Roy, D. Castor, and M. Zorzi. A tutorial on beam management for 3GPP NR at mmWave frequencies // IEEE Comm. Surveys & Tutorials, vol. 21, No. 1, Q1 2019.
- [9] 3GPP TS 38.211. "NR; Physical channels and modulation." 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
- [10] Giordani, M., M. Polese, A. Roy, D. Castor, and M. Zorzi. Standalone and non-standalone beam management for 3GPP NR at mmWaves // IEEE Comm. Mag., April 2019, P. 123-129.
- [11] Onggosanusi, E., S. Md. Rahman, Modular and high-resolution channel state information and beam management for 5G NR // IEEE Comm. Mag., March 2018, P. 48-55.