

УДК 621.396.969

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-2-25-39>

EDN: XWKJSE

**Позиционирования устройств в сетях LTE.
Часть 1. Исследование влияния ширины полосы сигнала
на точность оценок координат**

Хыа Х. К.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: Точность позиционирования устройств играет важную роль в предоставлении навигационных и геолокационных сервисов, таких как вызовы экстренной помощи, управление трафиком, а также в новых областях применения интернета вещей. Несмотря на высокую точность глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS и ГЛОНАСС, их применение внутри помещений ограничено из-за отсутствия прямой видимости. Это актуализирует необходимость разработки альтернативных методов позиционирования, основанных на сетях связи. **Целью работы является** анализ влияния ширины полосы сигнала на точность позиционирования методом OTDoA PRS. **Используемые методы:** в рамках исследования проводится моделирование передаваемых сигналов от нескольких базовых станций с разными уровнями мощности и задержками, а также вычисление корреляционных функций пользовательским оборудованием с опорными сигналами позиционирования для определения времени задержек и построения гипербол их постоянного интервала. Для оценки точности применяется расчет среднеквадратической ошибки, а анализ выполняется на основе сценария имитационного моделирования, реализованного в LTE System Toolbox в MATLAB. **Новизна** исследования заключается в комплексном анализе влияния ширины полосы сигнала на точность метода OTDoA PRS. Используются конфигурации опорных измерительных каналов от R.5 до R.9, что позволяет оценить влияние ширины полосы сигнала на точность позиционирования. **Результаты.** Исследование показывает, что увеличение ширины полосы сигнала и удачное расположение базовой станцией минимизируют среднеквадратическую ошибку. С увеличением расстояния между базовой станцией и пользовательским оборудованием амплитуды корреляционных пиков опорных сигналов позиционирования уменьшены, точность позиционирования снижается. **Теоретическая / Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы для поиска технических решений в существующих и проектируемых сетях радиодоступа LTE и 5G при решении задач сетевого позиционирования.

Ключевые слова: позиционирование, LTE, OTDoA, TDOA, PRS, ширина полосы сигнала, ресурсный блок, оценка точности, RMSE

Библиографическая ссылка на статью:

Хыа Х. К. Позиционирования устройств в сетях LTE. Часть 1. Исследование влияния ширины полосы сигнала на точность оценок координат // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 2. С. 25–39. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-2-25-39. EDN: XWKJSE

Reference for citation:

Hua H. C. Positioning of Devices in LTE Networks. Part 1. Evaluating Signal Bandwidth's Impact on Coordinate Accuracy. *Telecom IT*. 2024. Vol. 12. Iss. 2. PP. 25–39 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-2-25-39. EDN: XWKJSE

Актуальность

В условиях стремительного развития мобильных технологий вопросы точного позиционирования устройств приобретают особую значимость. Позиционирование является критически важным не только для навигационных и геолокационных сервисов, обеспечения безопасности, управления трафиком, вызовов экстренной помощи, но и для реализации новых сервисов в области интернета вещей (IoT, *аббр. от англ.* Internet of Things). Несмотря на высокую точность глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS, *аббр. от англ.* Global Navigation Satellite System), таких как GPS и ГЛОНАСС, их применение внутри помещений ограничено из-за отсутствия прямой видимости [1]. Это актуализирует необходимость разработки альтернативных методов позиционирования, основанных на сетях связи. Одним из таких методов является метод наблюдаемой разности времен прихода сигналов, далее – метод OTDoA (*аббр. от англ.* Observed Time Difference of Arrival).

Метод OTDoA [2] используется для определения местоположения как базовых, так и абонентских станций. Настоящее исследование направлено на анализ влияния ширины полосы сигнала на точность позиционирования по методу OTDoA PRS (*аббр. от англ.* Positioning Reference Signal). Ширина полосы сигнала, в свою очередь, зависит от формата опорного измерительного канала (RMC, *аббр. от англ.* Reference Measurement Channel).

Постановка задачи

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1. Рассматривается сценарий на плоскости.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
L	– число базовых станций (БС), eNB (<i>аббр. от англ.</i> Evolved Node B)
(x_i, y_i)	– известные координаты БС (eNB_i)
(x, y)	– неизвестные координаты пользовательского оборудования (UE, <i>аббр. от англ.</i> User Equipment)
d_i	– расстояние между eNB_i и UE, м
TOA_i	– время прихода сигналов от eNB_i на UE, с
RMC	– опорный измерительный канал RMC
h_{BS}	– высота антенны БС, м
h_{UT}	– высота антенны UE, м
f_c	– несущая частота, Гц

Методика и порядок исследования

Метод OTDoA PRS был специфицирован для сетей LTE в 9-м релизе [3]. eNB_i , размещенные на расстояниях d_i от UE, синхронизированы по времени и передают сигналы с разными уровнями мощности и задержками. UE выполняет кор-

реляцию с опорными сигналами позиционирования PRS и измеряет времена прихода сигнала TOA $t_i = d_i/c$, полученные от eNB_i, где $c = 3 \cdot 10^8$, м/с – скорость света [4]. Данные сигналы служат для сбора первичных измерений при позиционировании разностно-дальномерного метода OTDoA и передаются в ресурсных элементах, которые распределены в пределах всего частотно-временного домена кадра [5]. Вычисление координат UE производилось в E-SMLC (аббр. от англ. Evolved Serving Mobile Location Centre) с использованием данных о местоположении БС и их синхронизации [6]. Величина OTDoA определялась как наблюдаемый UE интервал между приемом сигналов в канал вниз от двух БС, находящихся в разных сотах через параметр разности времени прибытия (RSTD, аббр. от англ. Reference Signal Time Difference) [7]:

$$RSTD_{i,j} = TOA_i - TOA_j. \quad (1)$$

RSTD позволяют строить гиперболы, которые отображаются относительно координат БС. Искомые координаты UE, как объекта позиционирования, задаются пересечением не менее двух гипербол. Отклонение вычисленного положения UE от истинного оценивается с использованием формулы вычисления среднеквадратической ошибки (RMSE, аббр. от англ. Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{E\{\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|_2\}}, \quad (2)$$

где $\|\cdot\|_2$ – Евклидова норма вектора; $\mathbf{x} = [x_i, y_i]^T$ – истинная оценка координат; $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_i, \hat{y}_i]^T$ – вычисленная оценка координат.

Среднеквадратичная ошибка RMSE [8] используется для количественной оценки отклонения между расчетным и фактическим положением. Формула позволяет объективно сравнивать эффективность различных алгоритмов позиционирования.

В дальнейшем переосмыслим сценарий Matlab (<https://www.mathworks.com>) *Time Difference Of Arrival Positioning Using PRS* (<https://www.mathworks.com/help/lte/ug/time-difference-of-arrival-positioning-using-prs.html>) в интересах исследования алгоритмов точности позиционирования в сетях LTE и анализа ее зависимости от ширины полосы сигнала.

Порядок моделирования

Настройка БС и моделирование сигналов осуществляется с помощью LTE Toolbox (<https://www.mathworks.com/products/lte.html>) в Matlab. Сначала создается массив настроек БС на основе RMC (например R.5), описывающих передачу сигнала в исходящем канале. Параметры PRS настраиваются для каждой БС на основе уникального идентификатора соты (NCellID). Расположение БС задается случайным образом с использованием функции генерации координат. UE находится в начале координат (0,0), а БС распределяются равномерно вокруг последнего со случайными расстояниями между ними. Пример пяти БС на плоскости представлен на рисунке 1. Эти данные служат основой для моделирования сценария.

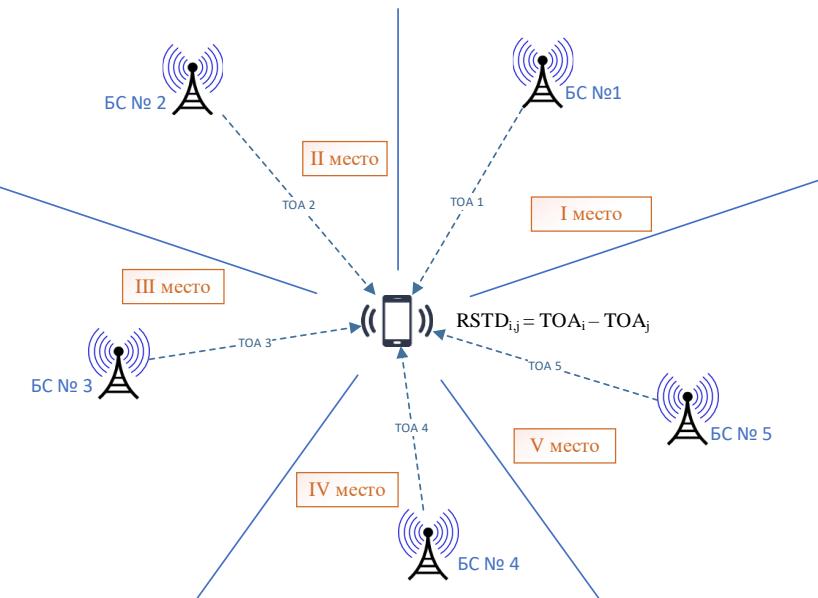


Рис. 1. Расположение БС и пользовательского оборудования

Команды для создания конфигураций БС представлены ниже:

```
for i=1:NeNodeB
    enb{i}=lteRMCDL('R.5'); % Конфигурация на основе RMC
    enb{i}.NCellID = mod((i-1)*2,504); % Задание уникального идентификатора ячейки
    enb{i}.TotSubframes = 1; % Количество генерируемых субкадров
    enb{i}.NPRSRB = enb{i}.NDLRB; % Число ресурсных блоков PRS
    enb{i}.IPRS = 0; % Индекс конфигурации PRS
    enb{i}.PRSPeriod = 'On'; % PRS присутствует во всех субкадрах
end
```

Для сбора ТОА каждая передача от БС включает в себя специальный сигнал PRS, первичный сигнал синхронизации (PSS, *аббр. от* англ. Primary Synchronization Signal), вторичный (SSS, *аббр. от* англ. Secondary Synchronization Signal) и специальный опорный сигнал соты (CRS, *аббр. от* англ. Cell Specific Reference Signal). Сначала создается пустая ресурсная сетка, затем она генерируется и отображает на сетку сигнал PRS с помощью функций:

- ltePRS (<https://www.mathworks.com/help/lte/ref/lteprs.html>);
- ltePRSIndices (<https://www.mathworks.com/help/lte/ref/lteprsindices.html>).

Аналогичным образом, для формирования сигналов PSS, SSS и CRS используются функции:

- ltePSS (<https://www.mathworks.com/help/lte/ref/ltepss.html>);
- lteSSS (<https://www.mathworks.com/help/lte/ref/ltesss.html>);
- lteCellRS (<https://www.mathworks.com/help/lte/ref/ltecellrs.html>).

А для вычисления индексов ресурсных элементов – функции:

- ltePSSIndices (<https://www.mathworks.com/help/lte/ref/ltepssindices.html>);
- lteSSSIndices (<https://www.mathworks.com/help/lte/ref/ltesssindices.html>);
- lteCellRSIndices (<https://www.mathworks.com/help/lte/ref/ltecellrsindices.html>).

Ниже приведены команды, используемые для генерации передач:

```
for i = 1:NeNodeB
    grid = [];
    for nsf = 0:9 % Количество субкадр в 1 кадр
        enb{i}.NSubframe = mod(nsf,10); % Количество кадр в 1 кадр
```

```

sfgrid = lteDLResourceGrid(enb{i});          % Пустой кадр
sfgrid(ltePRSIIndices(enb{i})) = ltePRS(enb{i});    % PRS REs
sfgrid(ltePSSIIndices(enb{i})) = ltePSS(enb{i});    % PSS REs
sfgrid(lteSSSIIndices(enb{i})) = lteSSS(enb{i});    % SSS REs
sfgrid(lteCellRSIIndices(enb{i})) = lteCellRS(enb{i}); % Cell RS REs
grid = [grid sfgrid]; % Создание суммарного субкадров
end
enb{i}.NSubframe = 0;
tx{i} = lteOFDMModulate(enb{i}, grid); % OFDM модуляция
end

```

Результирующая сетка, структура которой представлена на рисунке 2, является OFDM-сигналом, модулируемым для передачи (скрипт 1). Для построения структуры ресурсной сетки используется команда:

`plotResourcesGrid('R.5');`

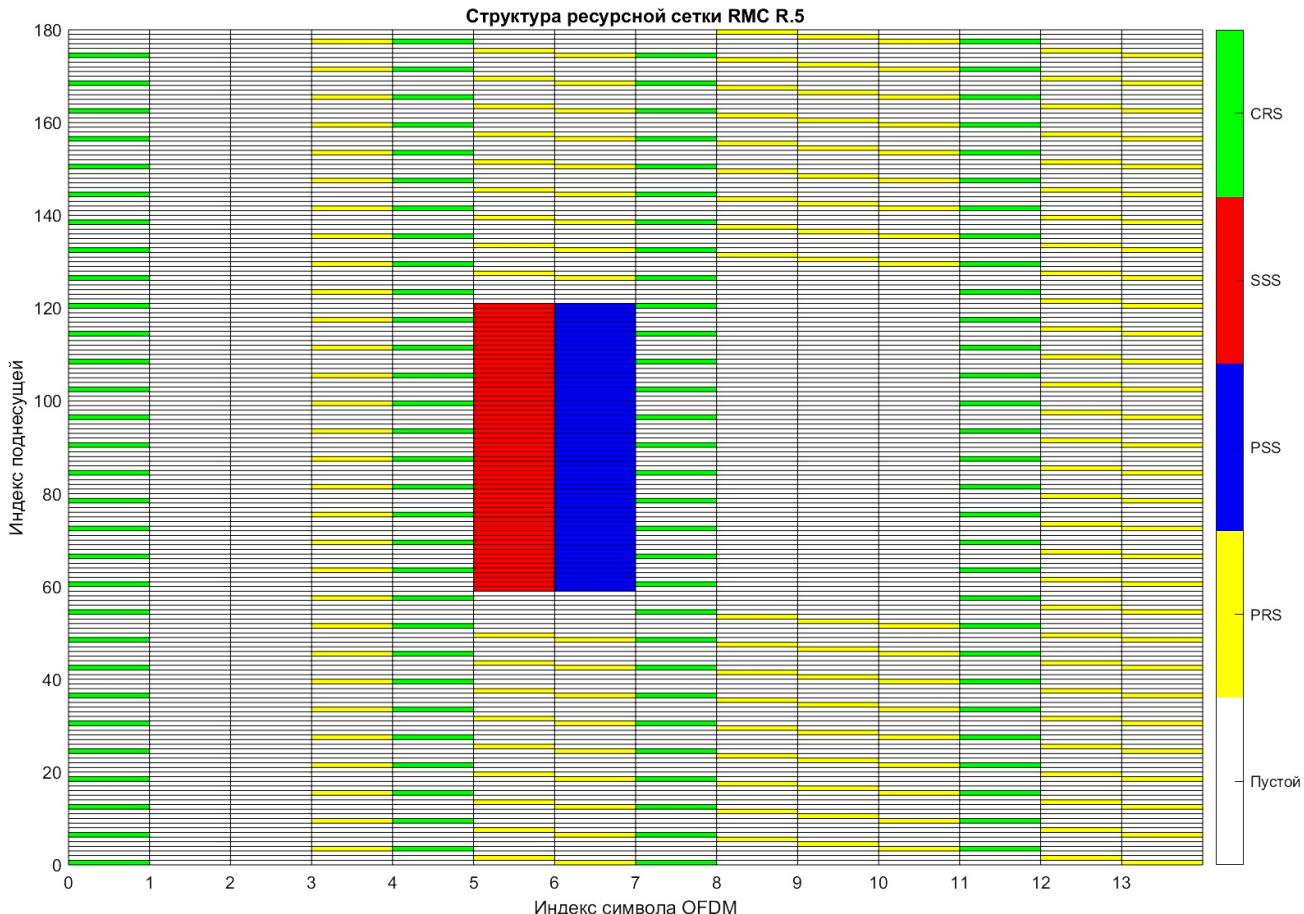


Рис. 2. Структура ресурсной сетки RMC R.5 в одном субкадре

Скрипт 1. Команды инициализации ресурсной сетки базовых станций

```

function plotResourcesGrid(selectedChannel)
    % Вход: selectedChannel - опорный измерительный канал (R.1, R.2, R.3, ...)
    % Выход: Структура ресурсной сетки в одном субкадре
    % Определение конфигурации eNodeB
    enb = lteRMCDL(selectedChannel);
    enb.NCellID = 0;
    enb.TotSubframes = 1;
    enb.NPRSRB = enb.NDLRB;
    enb.IPRS = 0;
    enb.PRSPeriod = 'On';

```

```
% Создание пустой сетки сигнала
grid = lteDLResourceGrid(enb);
% Отображение сигналов на сетке
prs_idx = ltePRSIIndices(enb);
pss_idx = ltePSSIIndices(enb);
sss_idx = lteSSSIIndices(enb);
crs_idx = lteCellRSIIndices(enb);
grid(prs_idx) = 1;
grid(pss_idx) = 2;
grid(sss_idx) = 3;
grid(crs_idx) = 4;
% Добавление дополнительной строки и столбца для отображения полной сетки
grid = [grid, zeros(size(grid, 1), 1)];
grid = [grid; zeros(1, size(grid, 2))];
% % Построение структуры ресурсной сетки
x = 0:14; % Индексы OFDM, включая добавленную колонку
y = 0:size(grid, 1)-1; % Индексы поднесущих, включая добавленную строку
figure;
pcolor(x, y, double(grid));
shading faceted;
set(gca, 'YDir', 'normal');
xticks(0:1:13);
colormap([1 1 1; ...
          1 1 0; ...
          0 0 1; ...
          1 0 0; ...
          0 1 0]); % Серый: Пустой
% Желтый: PRS
% Синий: PSS
% Красный: SSS
% Зеленый: CRS
colorbar('Ticks', 0.4:0.8:3.6, 'TickLabels', {'Пустой', 'PRS', 'PSS', 'SSS', 'CRS'});
xlabel('Индекс символа OFDM');
ylabel('Индекс поднесущей');
title(['Структура ресурсной сетки RMC ' selectedChannel]);
end
```

Моделирование задержек и принятых сигналов осуществляется следующим образом. Для вычисления задержки между БС и UE используется выражение [9]:

$$\tau_{i,j} = \frac{d_i - d_j}{c}, \quad (3)$$

где $d_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$, $i = 1, 2, \dots, L$.

Команды для вычисления задержки между БС и UE представлены ниже:

```
for i = 1:NeNodeB
    [~, radius{i}] = cart2pol(enb{i}.Position(1), enb{i}.Position(2));
    delay = radius{i}/speedOfLight; % Задержка в секундах
    sampleDelay(i) = round(delay*info.SamplingRate); % Задержка в отсчетах
end
```

Для моделирования принятых сигналов учитываются эффекты ослабления и задержки, которые зависят от городской макромодели потерь на пути, описанной в TR 36.814 [10]. Формулу потерь можно записать в следующем виде:

$$PL = \begin{cases} 22 \cdot \log_{10}(d) + 28 + 20 \cdot \log_{10}(f_c), & 10 < d < d'_{BP} \\ 40 \cdot \log_{10}(d) + 7.8 - 18 \cdot \log_{10}(h'_{BS}) - 18 \cdot \log_{10}(h'_{UT}), & \\ + 2 \cdot \log_{10}(f_c), & d'_{BP} < d < 5000 \end{cases} \quad (4)$$

где $d'_{BP} = (4 \cdot h'_{BS} \cdot h'_{UT} \cdot f_c)/c$ – расстояние до точки разрыва; $h'_{BS} = h_{BS} - 1$ – эффективная высота антенны БС; $h'_{UT} = h_{UT} - 1$ – эффективная высота антенны UE. В данном сценарии исходные параметры имеют следующие значения: несущая частота $f_c = 2,1 \cdot 10^9$, Гц; высота антенны БС $h_{BS} = 25$, м; высота антенны UE $h_{UT} = 1,5$, м. Формула (4) представлена в виде функции `hPositioningPathloss`.

Чтобы гарантировать, что все принятые сигналы имеют одинаковую длину, вектора принятых сигналов от каждой БС дополнены нулями. Далее эти сигналы суммируются с учетом потерь и задержек. Они комбинируются в единый сигнал для последующего анализа в UE. Команды для вычисления потерь представлены ниже:

```
for i = 1:NeNodeB
    % Потери на пути для городской среды по TR36.814
    PLdB = hPositioningPathLoss(radius{i}, 2.1e9);
    PL = 10^(PLdB/10);
    % Добавление задержки, дополнение нулями и ослабление
    rx{i} = [zeros(sampleDelay(i), 1); tx{i}; ...
              zeros(max(sampleDelay)-sampleDelay(i), 1)]/ sqrt(PL);
    % Суммирование сигналов от всех eNodeB
    sumrx = sumrx + rx{i};
end
```

Затем выполняется поиск соты и оценка времени поступления. Чтобы установить идентификатор ячейки, на каждой БС выполняется многоэтапный поиск с использованием PRS [5]:

```
% Предполагаемые параметры для поиска ячеек
searchcfg.CyclicPrefix = enb{1}.CyclicPrefix;
searchcfg.DuplexMode = enb{1}.DuplexMode;
searchcfg.NDLRB = enb{1}.NDLRB;
```

Ниже представлены команды для выполнения поиска БС:

```
% Выполнить многосотовый поиск
searchalg.MaxCellCount = NeNodeB;
searchalg.SSSDetection = 'PostFFT';
[cellIDs, offsets] = lteCellSearch(searchcfg, sumrx, searchalg);
```

Для настройки конфигурации каждой выявленной БС применяются следующие команды:

```
for i = 1:searchalg.MaxCellCount
    % Предполагаемые параметры
    rxcfg{i} = enb{1};
    % Использовать обнаруженный идентификатор ячейки
    rxcfg{i}.NCellID = cellIDs(i);
    % Измерить RSRQ
    rxgrid = lteOFDMDemodulate(rxcfg{i}, sumrx(1 + offsets(i):end, :));
    meas = hRSMeasurements(rxcfg{i}, rxgrid);
    RSRQdB(i) = meas.RSRQdB;
end
```

Ячейки считаются обнаруженными, если они соответствуют минимальному порогу показателя качества принятого опорного сигнала (RSRQ, *аббр. от англ. Reference Signal Received Quality*) в 20 дБ. Количество ячеек обнаружения M представляется числом БС, которые определяют моменты прихода сигналов ТОА в UE.

Результаты поиска представляются для определения параметров сигналов и вычисления времени поступления сигналов от каждой БС к UE. Корреляция с локально сгенерированным PRS позволяет определить моменты прихода сигна-

лов ТОА и вычислить разности во времени прибытия $RSTD$. Для вычисления корреляций эталонных и принятых сигналов в приемнике UE инициализируются эталонные сигналы:

```

for i = 1:Ndetected
    % Генерация эталонного PRS
    sfgrid = lteDLResourceGrid(rxcfg{i});
    sfgrid(ltePRSIndices(rxcfg{i})) = ltePRS(rxcfg{i});
    ref{i} = lteOFDMModulate(rxcfg{i}, sfgrid);
    % Корреляция принятого сигнала с каждым эталонным PRS
    c = abs(xcorr(sumrx, ref{i}));
    % Сокращение длины вектора корреляции для определения положения и отображения
    c(1:length(sumrx)) = []; % Удаление бессмысленных результатов в начале
    corr{i} = c(1:info.Nfft); % Извлечение данных для одного символа OFDM
    % Оценка задержки определяется точкой максимальной корреляции
    delayEst(i) = find(corr{i} == max(corr{i})));
end

```

На рисунке 3 представлен пример оценки корреляций PRS для обнаруженных ячеек на местоположении UE в сценарии, при котором размещение БС и UE соответствует конфигурации, изображенной на рисунке 4, а RMC установлен на R.5. Каждая кривая на рисунке 3 имеет наибольшее значение корреляционных пиков сигналов PRS. Момент появления этого пика (по оси времени) указывает на задержку прихода сигнала PRS от БС к UE. Амплитуда корреляционного пика отражает, насколько сильным или слабым является сигнал. Анализ рисунка показал, что при увеличении расстояния между UE и БС амплитуда пика обычно уменьшается из-за возрастания потерь распространения радиоволн и соответствующего снижения отношения сигнал / шум на входе приемника UE (4).

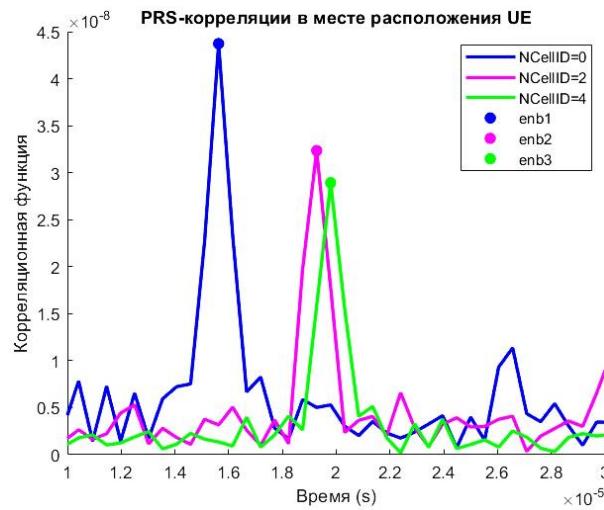


Рис. 3. Корреляции PRS для обнаруженных ячеек на местоположении UE

По формуле (1) вычисляют разности времени прибытия сигналов $RSTD_{i,1}$ между eNB_i , $i = 2, \dots, M$, и eNB_1 , и на основе результатов расчетов построены гиперболы. Их точка пересечения – вычисленное местоположение UE.

На рисунке 4 показано местоположение БС и UE с пересечением гипербол. Рисунок 5 демонстрирует данное пересечение в увеличенном масштабе. Из рисунка видно, что рассчитанные координаты точки и истинное местоположение отличаются.

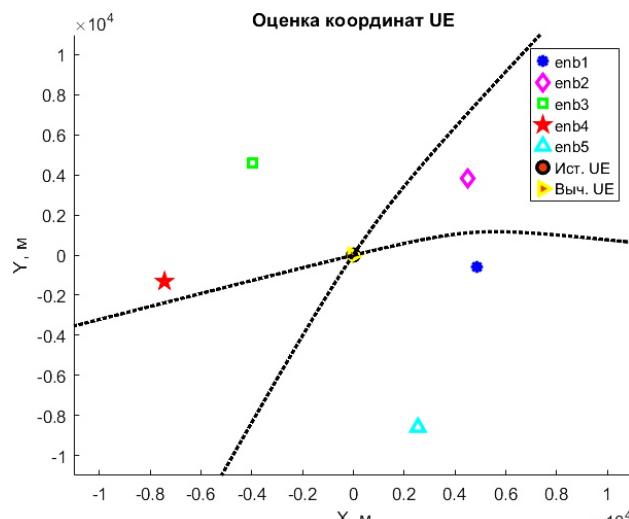


Рис. 4. Местоположение БС и UE
в фактическом масштабе

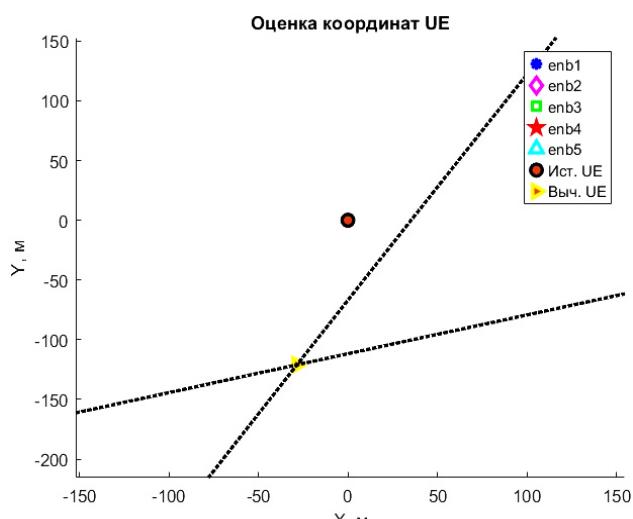


Рис. 5. Пересечение гипербол в увеличенном
масштабе

Для оценки точности позиционирования методом OTDoA PRS рассчитывается RMSE по формуле (2). Оценка координат вычисляется путем усреднения по нескольким точкам пересечения гипербол с использованием следующей команды:

```
estimated_Pos = mean(intersectionPoints,1);
```

В перспективе планируется исследование альтернативных методов вторичной обработки, то есть методов, применяемых к результатам первичного анализа для повышения точности оценок. Среди таких методов рассматриваются как линейные, так и нелинейные алгоритмы, а также оценка точности с использованием нижней границы Крамера – Рао.

Скрипт 2 содержит функцию для нахождения точек пересечения гипербол.

Скрипт 2. Функция нахождения точек пересечения гипербол

```
function intersectionPoints = findHyperbolIntersections(curveX, curveY)
    % Вход: curveX, curveY – координаты гиперболы в плоскости Oxy
    % Выход: intersectionPoints – координаты точек пересечения гиперболы
    n = length(curveX); % Количество гипербол
    % Инициализация списка точек пересечения
    intersectionPoints = [];
    % Сравниваем каждую пару гипербол
    for i = 1:n-1
        for j = i+1:n
            % Получаем пары гипербол i и j
            x1 = curveX{i};
            y1 = curveY{i};
            x2 = curveX{j};
            y2 = curveY{j};
            % Находим точки пересечения этих двух гипербол
            [xIntersect, yIntersect] = findCurveIntersections(x1, y1, x2, y2);
            % Сохраняем результаты
            intersectionPoints = [intersectionPoints; [xIntersect(:), yIntersect(:)]];
```

Функция принимает два массива $\mathbf{curveX}, \mathbf{curveY} \in \mathbb{R}^{(M-1) \times 499}$, которые содержат координаты гипербол на плоскости. Функция начинает работу с получения количества гипербол ($M - 1$) на основе длины массива \mathbf{curveX} (каждая гипербola соответствует паре массивов \mathbf{curveX} и \mathbf{curveY}). Далее используется вложенный цикл для сравнения каждой пары гипербол и поиска точек их пересечения. Чтобы найти точки пересечения, используется функция `findCurveIntersections` (скрипт 3), которая обрабатывает пару гипербол. Результаты сохраняются в массив `intersectionPoints`. На выходе получит массив `intersectionPoints`, который содержит координаты точек пересечения гипербол.

Скрипт 3. Функция нахождения точки пересечения двух гипербол
методом линейной интерполяции

```
function [xIntersect, yIntersect] = findCurveIntersections(x1, y1, x2, y2)
    xIntersect = [];
    yIntersect = [];
    % Вход: x1, y1 - координаты первого гипербола в плоскости Oxy
    %       x2, y2 - координаты второго гипербола в плоскости Oxy
    % Выход: xIntersect, yIntersect - координат точек пересечения между двумя
    % гиперболами в плоскости Oxy
    for k1 = 1:length(x1)-1
        for k2 = 1:length(x2)-1
            % Координаты отрезка на первой гиперболе
            xA = x1(k1); yA = y1(k1);
            xB = x1(k1+1); yB = y1(k1+1);
            % Координаты отрезка на второй гиперболе
            xC = x2(k2); yC = y2(k2);
            xD = x2(k2+1); yD = y2(k2+1);
            % Решаем систему уравнений для нахождения точки пересечения
            [xi, yi] = lineSegmentIntersection(xA, yA, xB, yB, xC, yC, xD, yD);
            % Если точка пересечения найдена, добавляем в результат
            if ~isempty(xi) && ~isempty(yi)
                xIntersect = [xIntersect; xi];
                yIntersect = [yIntersect; yi];
            end
        end
    end
end
```

На входе функция принимает четыре массива. Массивы $\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1 \in \mathbb{R}^{1 \times 499}$ являются координатами первой гиперболы, а массивы $\mathbf{x}_2, \mathbf{y}_2 \in \mathbb{R}^{1 \times 499}$ являются координатами второй гиперболы на плоскости. Функция последовательно перебирает все пары отрезков, где каждый отрезок на каждой гиперболе образован двумя последовательными точками. Отрезок на первой гиперболе задан двумя точками с координатами $[x_A, y_A]^T$ и $[x_B, y_B]^T$, а на второй – двумя точками с координатами $[x_C, y_C]^T$ и $[x_D, y_D]^T$. Точки пересечения отрезков находят с помощью функции `lineSegmentIntersection` (скрипт 4).

Скрипт 4. Функция вычисления точки пересечения двух отрезков

```
function [xk, yk] = lineSegmentIntersection(xA, yA, xB, yB, xC, yC, xD, yD)
    % Вход: xA, yA, xB, yB - координаты отрезка на первой гиперболе в плоскости Oxy
    %       xC, yC, xD, yD - координаты отрезка на второй гиперболе в плоскости Oxy
    % Выход: xk, yk - координат точек пересечения двух отрезков в плоскости Oxy
    % Создаем векторы
```

```

denominator = (xA - xB) * (yC - yD) - (yA - yB) * (xC - xD);
if abs(denominator) < 1e-10 % Отрезки параллельны или совпадают
    xk = [];
    yk = [];
    return;
end
% Вычисляем параметры t и u
t = ((xA - xC) * (yC - yD) - (yA - yC) * (xC - xD)) / denominator;
u = ((xA - xC) * (yA - yB) - (yA - yC) * (xA - xB)) / denominator;
% Проверяем, если t и u находятся в пределах [0, 1], значит есть пересечение
if t >= 0 && t <= 1 && u >= 0 && u <= 1
    xk = xA + t * (xB - xA);
    yk = yA + t * (yB - yA);
else
    xk = [];
    yk = [];
end
end

```

Если точка пересечения найдена, ее координаты $[x_k, y_k]^T$ добавляются в результат. На вход функция `lineSegmentIntersection` принимает координаты четырех точек: $A [x_A, y_A]^T$, $B [x_B, y_B]^T$, $C [x_C, y_C]^T$, $D [x_D, y_D]^T$. При этом отрезок AB определяется точками A и B , а отрезок CD – точками C и D .

Для каждого отрезка можно записать уравнение, где $t, u \in [0,1]$ – параметры, которые изменяются в пределах отрезка.

Отрезок AB :

$$\begin{cases} x = x_A + t \cdot (x_B - x_A) \\ y = y_A + t \cdot (y_B - y_A) \end{cases} \quad (5)$$

Отрезок CD :

$$\begin{cases} x = x_C + u \cdot (x_D - x_C) \\ y = y_C + u \cdot (y_D - y_C) \end{cases} \quad (6)$$

Система уравнений (5) и (6) позволяет найти точку пересечения двух отрезков, там самым определяя значения параметров t и u :

$$\begin{cases} x_A + t \cdot (x_B - x_A) = x_C + u \cdot (x_D - x_C) \\ y_A + t \cdot (y_B - y_A) = y_C + u \cdot (y_D - y_C) \end{cases} \quad (7)$$

Если $t, u \notin [0,1]$, то пересечения в пределах отрезков нет. Используем далее найденные значения t или u , подставив их в систему уравнений (5), (6), чтобы получить искомые координаты точки пересечения двух отрезков на плоскости x_i и y_i .

После этого выполним исследование влияния ширины полосы на точность позиционирования.

Оценка влияния ширины полосы на точность позиционирования

Стандарт LTE [5] на физическом уровне использует технологию OFDM. Весь канальный ресурс разбивается на ресурсные блоки (РБ). Один блок состоит из 12 расположенных рядом поднесущих, занимающих полосу 180 кГц, и одного

временного слота (6 или 7 OFDM-символов общей длительностью 0,5 мс). Каждый OFDM-символ на каждой из поднесущих образует ресурсный элемент. В LTE предусмотрена масштабируемость ширины полосы от 1,4 до 20 МГц. С увеличением ширины полосы возрастает количество поднесущих, а, следовательно, и число доступных РБ. Соотношение между шириной полосы и количеством РБ можно смотреть в таблице 2. В данном исследовании для анализа влияния ширины полосы изменялось количество РБ в канале вниз. Выбор RMC основан на канале, описывающем передачу сигнала в исходящем канале с использованием 64-QAM модуляции. Использование конфигураций R.5, R.6, R.7, R.8, R.9 позволяет выполнить анализ влияния ширины полосы на точность позиционирования от 15 до 100 РБ. Это дает возможность определить влияние ширины полосы сигнала на точность позиционирования в сетях LTE.

Параметры моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры RMC

Reference channel	Число ресурсных блоков	Ширина полосы, МГц
R.5	15	3
R.6	25	5
R.7	50	10
R.8	75	15
R.9	100	20

При измерении RMSE на десятых различных случайных сценариях размещения пяти БС были получены результаты, представленные в таблице 3. На основе этих данных построен график зависимости RMSE от числа РБ (рисунок 6).

Таблица 3 – Результат вычислений RMSE при изменении RMC

№ п/п	RMC				
	R.5	R.6	R.7	R.8	R.9
1.	25,2903	10,4452	21,9267	4,774	4,774
2.	38,5999	7,8269	7,8269	3,7455	3,7455
3.	38,9311	10,8526	5,799	2,8232	2,8232
4.	38,0443	3,6737	3,6737	3,6737	3,6737
5.	12,9057	5,8959	4,8803	4,4902	4,4902
6.	11,3596	11,3596	7,1898	4,1325	4,1325
7.	34,6657	16,8441	3,8829	3,8829	3,8829
8.	28,9736	14,0966	6,3295	7,5637	7,5637
9.	26,614	17,6658	11,0482	7,1611	7,1611
10.	28,4911	22,7098	5,3331	1,6988	1,6988
Среднее значение	28,3875	12,1370	7,789	4,3946	4,3946

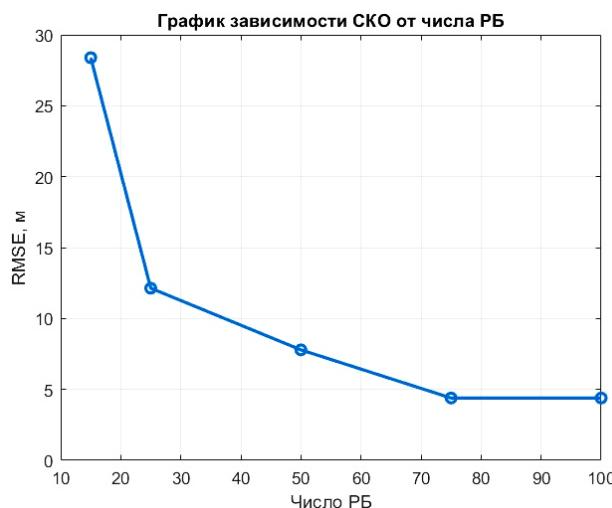


Рис. 6. График зависимости RMSE от числа РБ

Анализ таблицы 3 показывает, что увеличение ширины полосы сигнала приводит к уменьшению RMSE: для пяти БС – снижалась с 28,3875 до 4,3946 м при увеличении ширины полосы от 3 до 20 МГц.

Выводы

По итогам исследования выполнена оценка точности позиционирования устройства в сетях LTE методом OTDoA PRS при изменении опорных измерительных каналов. Увеличение ширины полосы сигнала позволяет минимизировать среднеквадратическую ошибку и тем самым повысить точность позиционирования пользовательского оборудования в сетях LTE. При увеличении расстояния между базовой станцией и пользовательским оборудованием наблюдается снижение амплитуды корреляционных пиков опорных сигналов позиционирования, что связано с ухудшением отношения сигнал / шум и, как следствие, приводит к снижению точности позиционирования.

Полученные выводы имеют важное теоретическое и практическое значение. С теоретической точки зрения работа предлагает комплексный подход к анализу и оптимизации параметров позиционирования. С практической точки зрения результаты могут быть применены для улучшения архитектуры телекоммуникационных сетей в условиях, где использование глобальных навигационных спутниковых систем ограничено, например, внутри зданий. Предложенные методы могут быть адаптированы для использования в сетях 5G, что открывает новые перспективы для развития сервисов на основе позиционирования и высокотехнологичных приложений.

Литература

1. Фокин Г. А. Сетевое позиционирование 5G и вероятностные модели оценки его точности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 12. С. 4–17. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-12-4-17. EDN: DQRXIK

2. Лазарев В. О., Фокин Г. А. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 88–100. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-2-88-100. EDN: FFMJWI
3. 3GPP TS 36.305 V16.2.0 (09/2020). Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in E-UTRAN (Release 16).
4. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
5. Peral-Rosado J., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G, Zanier F., Crisci M. Joint channel and time delay estimation for LTE positioning reference signals // Proceedings of the 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (Noordwijk, Netherlands, 05–07 December 2012). IEEE, 2012. DOI: 10.1109/NAVITEC.2012.6423094
6. Фокин Г. А., Лазарев В. О. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 2. 2D-моделирование // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 65–78. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-4-65-78. EDN: RJHISC
7. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation Theory, Algorithms and Software. New York: John Wiley & Sons, 2001. 582 p. DOI: 10.1002/0471221279
8. Zekavat R., Zekavat R., Buehrer R. M. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. John Wiley & Sons, 2019. 1376 p. DOI: 10.1002/9781119434610
9. Campos R. S., Lovisolo L. RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015. 369 p.
10. 3GPP TR 36.814 V9.0.0. (03/2010). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (GPP TR 36.814 Release 9 2 V9.0.0).

Статья поступила 01 декабря 2024 г.
Одобрена после рецензирования 22 декабря 2024 г.
Принята к публикации 23 декабря 2024 г.

Информация об авторе

Хыа Хю Кыонг – аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: khya.khk@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-2-25-39>

EDN: XWKJSE

Positioning of Devices in LTE Networks.

Part 1. Evaluating Signal Bandwidth's Impact on Coordinate Accuracy

H. C. Hua

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose. The positioning accuracy of device plays an important role in providing navigation and geolocation services, such as emergency calls, traffic management, and in new fields of IoT applications. Despite the high accuracy of global navigation satellite systems (GNSS) like GPS and GLONASS, their application indoors is limited due to the lack of direct line-of-sight. This highlights the need to develop alternative positioning methods based on communication networks. The objective of this study is to analyze the impact of signal bandwidth on the positioning accuracy of the OTDoA PRS method. **Methods.** The study involves modeling signals transmitted from multiple base stations with different power levels and delays, as well as performing correlation by the UE with PRS (Positioning Reference Signal) to determine delay times and construct hyperbolas of constant delay intervals. The accuracy assessment is performed using the root mean square error (RMSE) calculation, and the analysis is based on a simulation scenario implemented in the LTE System Toolbox in MATLAB. **Novelty.** The novelty of the research lies in the comprehensive analysis of the influence of signal bandwidth, on the accuracy of the OTDoA PRS method. For the first time, Reference Measurement Channel (RMC) configurations from R.5 to R.9 are used for constructing hyperbolas, allowing for the optimization of signal parameters to improve positioning accuracy. **Results.** The study demonstrates that increasing the signal bandwidth and optimizing the eNB arrangement minimizes the RMSE. As the distance between the base station and the user equipment increases, the amplitudes of the correlative peaks of PRS signals are reduced, and the positioning accuracy decreases. **Practical relevance.** The results of the study can be used to optimize the architecture of LTE and 5G networks in conditions where GNSS usage is limited. The proposed approaches can also be applied in the development of algorithms for telecommunications equipment to ensure accurate positioning of UE.

Key words: positioning, LTE, OTDoA, TDOA, PRS, signal bandwidth, resource block, accuracy assessment, RMSE

Information about Author

Hua Huy Cuong – The postgraduate student at the Department of Wireless Technologies and Systems (The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: khya.khk@sut.ru