

УДК 621.396.969

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-13-28>

EDN: KONADC

**Позиционирования устройств в сетях LTE.
Часть 2. Исследование влияния топологии базовых станций
на точность оценок координат**

Хыа Х. К.¹ , Фокин Г. А.¹, Нгуен Х. Н.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

Постановка задачи. В последнее десятилетие в сетях четвертого и пятого поколений (4G и 5G) наблюдается активное развитие услуг позиционирования, что обуславливает необходимость повышения точности оценки координат. В первой части исследования, опубликованной в предыдущем номере данного журнала, показано, что ширина полосы сигнала существенно влияет на точность позиционирования. В данной работе исследуется влияние топологии базовых станций на точность оценок координат, которое характеризуется геометрическим фактором снижения точности позиционирования. Целью работы является анализ влияния топологии базовых станций на точность позиционирования методом разности времени прихода сигналов для разных сценариев. **Используемые методы:** в рамках исследования проведено имитационное моделирование вычисления геометрического фактора снижения точности позиционирования разностно- дальномерного метода в сотовых сетях связи 4G LTE с применением среды MATLAB. Математическая модель базируется на двух подходах: обработке абсолютных дальностей и псевододальностей. Анализируется влияние различных сценариев распределения базовых станций на значения геометрических факторов. Новизна исследования заключается в комплексном анализе влияния топологии базовых станций на точность позиционирования, что позволяет выявить наиболее удачные по критерию минимизации геометрического фактора снижения точности позиционирования топологии размещения базовых станций с учетом как их горизонтального, так и вертикального распределения. Это способствует более глубокому пониманию взаимосвязи между территориальной конфигурацией топологии сети и точностью оценки координат. **Результат:** исследование показывает, что не во всех случаях увеличение числа базовых станций в заданной области приводит к снижению геометрического фактора снижения точности позиционирования. С увеличением разности высот базовых станций происходит уменьшение указанного фактора, что положительно сказывается на точности позиционирования по вертикали. Также определена топология базовых станций для оценки координат транспортных средств на дороге в условиях городской застройки. **Теоретическая / Практическая значимость:** результаты работы могут быть использованы для разработки и оптимизации сценариев территориального распределения базовых станций для позиционирования в существующих и проектируемых сетях 4G и 5G, что крайне востребовано в задачах повышения качества навигационных и геолокационных сервисов, а также при решении задач сетевого позиционирования.

Библиографическая ссылка на статью:

Хыа Х. К., Фокин Г. А., Нгуен Х. Н. Позиционирования устройств в сетях LTE. Часть 2. Исследование влияния топологии базовых станций на точность оценок координат // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 3. С. 13–28. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-13-28. EDN: KONADC

Reference for citation:

Hua H. C., Fokin G., Nguyen H. N. Positioning of Devices in LTE Networks. Part 2. Analysis of Base Station Topology Impact on Coordinate Estimation Accuracy. *Telecom IT*. 2024. Vol. 12. Iss. 3. PP. 13–28 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-13-28. EDN: KONADC

Ключевые слова: геометрический фактор, оценка координат, топология, позиционирование, 4G, MATLAB, транспортные средства, метод разности времени прихода сигналов

Введение

В последнее десятилетие с развитием современных технологий в сетях мобильной связи четвертого (4G LTE, *аббр. от англ.* Long-Term Evolution) и пятого поколений (5G NR, *аббр. от англ.* New Radio) наблюдается активное развитие услуг позиционирования [1–3]. Повышение точности позиционирования стало одной из важных задач для улучшения качества мобильных услуг [4]. Было установлено, что точность позиционирования в сетях сотовой связи зависит от нескольких факторов [5]. Проведенный в первой части исследования анализ показал влияние ширины полосы сигнала на точность позиционирования в сетях LTE методом наблюдаемой разности времени прихода сигналов (OTDoA, *аббр. от англ.* Observed Time Difference of Arrival).

В данной работе рассматривается влияние топологии базовых станций (БС) eNB (*аббр. от англ.* Evolved Node B) на точность позиционирования методом разности времени прихода сигналов (TDOA, *аббр. от англ.* Time Difference of Arrival) [6–8]. Влияние топологии БС в пространстве на точность оценок координат характеризуется геометрическим фактором снижения точности позиционирования (GDOP или DOP, *аббр. от англ.* Geometric Dilution of Precision), который показывает, во сколько раз происходит уменьшение точности оценки координат (OK) пользовательского оборудования (UE, *аббр. от англ.* User Equipment) по сравнению с погрешностью первичных разностно-дальномерных измерений [9]: чем ниже DOP, тем выше точность OK [10].

Существуют следующие основные виды DOP: горизонтальный фактор снижения точности HDOP (Horizontal DOP) – характеризует точность OK на плоскости; вертикальный фактор снижения точности VDOP (Vertical DOP) – характеризует точность OK по высоте; пространственный фактор снижения точности PDOP (Position DOP) – характеризует точность OK в пространстве; временной фактор снижения точности TDOP (Time DOP) – характеризует точность синхронизации времени, которая влияет на точность OK; геометрический фактор снижения точности GDOP – характеризует точность OK всех параметров [11–16].

В сетях сотовой связи в качестве первичных измерений могут использоваться дальномерные, разностно-дальномерные и угломерные измерения [12–16]. Настоящее исследование посвящено оценке влияния топологии БС на точность OK в сетях сотовой связи методом TDOA [17]. Далее формализуем исходные данные для постановки и решения задачи исследования.

Постановка задачи

Расположение БС. Проекция БС на плоскость Oxy образует L -сторонний правильный многоугольник, вершины которого являются местом нахождения БС. Расстояние от БС до точки начала координат (0,0) равно радиусу описанной окружности, обозначаемому как a (рисунок 1).

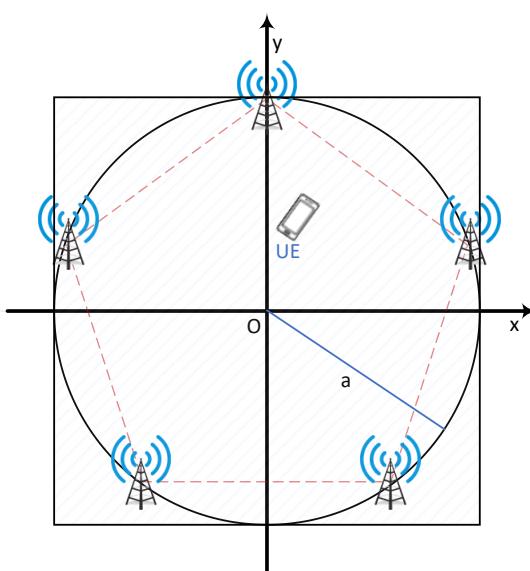


Рис. 1. Примерная область размещения БС

Высота БС может быть настроена для различных сценариев. Чтобы провести сравнение сценариев с разным числом БС, рассмотрим область внутри описанного квадрата в плоскости Oxy (затененная область на рисунке 1) и рассчитаем средний DOP в этой области.

Предположим, что $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ – неизвестные координаты UE; $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ – известные координаты eNB_i, где $i = 1, 2, \dots, L$; L – число БС в заданной области; $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$ – оценка координат UE.

Далее рассмотрим математическую модель оценки DOP позиционирования методом TDOA.

Математическая модель оценки геометрического фактора снижения точности позиционирования методом разности времени прихода сигналов

Существуют два подхода к вычислению DOP: обработка абсолютных дальностей и обработка псевдодальностей [11].

Обработка абсолютных дальностей. Если измерения абсолютных дальностей доступны (пользователь синхронизирован с БС), то расстояние r_i между UE и eNB_i составляет:

$$r_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, i = 1, 2, 3, \dots, L, \quad (1)$$

где $\|\cdot\|$ – Евклидова норма вектора. Тогда ковариационная матрица Σ погрешностей ОК $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$ EU определяется выражением [12]:

$$\Sigma = E\{(\hat{\mathbf{x}} - E[\hat{\mathbf{x}}])(\hat{\mathbf{x}} - E[\hat{\mathbf{x}}])^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} = \sigma_r^2 \cdot (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})^{-1}, \quad (2)$$

где $E\{\cdot\}$ – оператор математического ожидания; $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ – дисперсии ОК UE по осям x, y, z соответственно; остальные элементы матрицы Σ – ковариации ОК; σ_r – среднеквадратическое отклонение.

Исходя из выражения (1), разности дальности $\Delta R_{1,i}$ между eNB_i и eNB₁ можно оценить как:

$$\begin{aligned} \Delta R_{1,i} &= r_1 - r_i = \\ &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \\ i &= 2, 3, \dots, L. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение (3) может быть выражено в векторной форме как:

$$\mathbf{f}_{\text{TDOA}}(\mathbf{x}) = \Delta R_{1,i} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \\ \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} \\ \dots \\ \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_L)^2 + (y - y_L)^2 + (z - z_L)^2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для линейного алгоритма системы (4) запишем матрицу Якоби \mathbf{H} , содержащую частные производные уравнений по координатам приемника [12–16]:

$$\mathbf{H} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}_{\text{TDOA}}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right] = \begin{bmatrix} \frac{x - x_1}{R_1} - \frac{x - x_2}{R_2} & \frac{y - y_1}{R_1} - \frac{y - y_2}{R_2} & \frac{z - z_1}{R_1} - \frac{z - z_2}{R_2} \\ \frac{x - x_1}{R_1} - \frac{x - x_3}{R_3} & \frac{y - y_1}{R_1} - \frac{y - y_3}{R_3} & \frac{z - z_1}{R_1} - \frac{z - z_3}{R_3} \\ \frac{\dot{x} - x_1}{R_1} - \frac{\dot{x} - x_L}{R_L} & \frac{\dot{y} - y_1}{R_1} - \frac{\dot{y} - y_L}{R_L} & \frac{\dot{z} - z_1}{R_1} - \frac{\dot{z} - z_L}{R_L} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Матрица \mathbf{H} используется для расчета ковариационной матрицы ошибок ОК вследствие влияния геометрического фактора \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})^{-1}. \quad (6)$$

Подставляя формулу (6) в формулу (2), получаем:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} = \sigma_r^2 \cdot \mathbf{Q}. \quad (7)$$

По выражению (7) определяют PDOP, HDOP, VDOP и GDOP следующим образом [11]:

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma_r} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}} = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{Q})}, \quad (8)$$

$$HDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}{\sigma_r} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22}}, \quad (9)$$

$$VDOP = \frac{\sqrt{\sigma_z^2}}{\sigma_r} = \sqrt{Q_{33}}, \quad (10)$$

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{Q})}. \quad (11)$$

В этом случае значения GDOP и PDOP совпадают.

Обработка псевдодальностей. При обработке измерений псевдодальностей появляется дополнительная неизвестная – погрешность измерения, обусловленная неточностью синхронизации сигнала приемника [11]. Следовательно, разность расстояний между eNB_i и eNB₁ на UE можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta R_{1,i} &= r_1 - r_i = \\ &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + \Delta t \cdot c, \\ i &= 2, 3, \dots, L, \end{aligned}$$

где Δt – погрешность TDOA; $c = 3 \cdot 10^8$ – скорость света.

Тогда ковариационная матрица Σ погрешностей оценки координат $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \Delta t]^T$ пользовательского устройства, матрица Якоби \mathbf{H} и ковариационная матрица геометрических ошибок \mathbf{Q} определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \Sigma &= \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{tx} & \sigma_{ty} & \sigma_{tz} & \sigma_t^2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{R_1} - \frac{x-x_2}{R_2} & \frac{y-y_1}{R_1} - \frac{y-y_2}{R_2} & \frac{z-z_1}{R_1} - \frac{z-z_2}{R_2} & 1 \\ \frac{x-x_1}{R_1} - \frac{x-x_3}{R_3} & \frac{y-y_1}{R_1} - \frac{y-y_3}{R_3} & \frac{z-z_1}{R_1} - \frac{z-z_3}{R_3} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{x-x_1}{R_1} - \frac{x-x_L}{R_L} & \frac{y-y_1}{R_1} - \frac{y-y_L}{R_L} & \frac{z-z_1}{R_1} - \frac{z-z_L}{R_L} & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{Q} &= (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})^{-1}, \end{aligned}$$

где σ_t – дисперсия погрешности TDOA.

Все факторы DOP рассчитываются по формулам (8–10), за исключением GDOP, поскольку в выражении $(\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})^{-1}$ присутствует дополнительный диагональный элемент, соответствующий TDOP [11]:

$$TDOP = \frac{\sqrt{\sigma_t^2}}{\sigma_r} = \sqrt{Q_{44}}.$$

Для анализа влияния топологии БС на точность ОК рассчитывается DOP для различных вариантов размещения станций [18, 19].

Геометрический фактор снижения точности позиционирования различных вариантов размещения базовых станций

С помощью среды MATLAB (<https://www.mathworks.com>) вычислены значения PDOP, HDOP, VDOP, GDOP по формулам (8–11). Далее используются следующие исходные данные для расчетов: расстояние от БС до начала координат $a = 150$ м; высоты БС $h_{eNB} \in \{15, 25, 50\}$ м; область размещения UE имеет форму квадрата со стороной 300 м; шаг сетки расположения UE на плоскости составляет 1 м; высота UE – $h_{UE} = 2$ м. DOP вычисляется для каждой точки сетки потенциального местоположения UE, после чего определяется среднее его значение в данной области. Для случаев, когда значения DOP в определенном местоположении слишком велико или его не удалось рассчитать, ему присваивается значение 1000.

При использовании измерений абсолютных дальностей результаты расчета DOP представлены в таблице 1 и на рисунке 2, который иллюстрирует значения DOP в заданной области исследования в различных сценариях расположения БС.

Таблица 1 – Результаты вычисления DOP обработкой абсолютных дальностей

Количество БС	Высота БС (h_{eNB}), м	PDOP	HDOP	VDOP
3	[25; 25; 25]	1,6566	1,5945	0,1449
4	[15; 15; 15; 15]	738,8669	19,5766	738,888
4	[25; 25; 25; 25]	219,3005	19,712	278,7128
4	[50; 50; 50; 50]	107,7996	21,0271	105,522
4	[15; 25; 15; 25]	16,3875	1,8411	16,2668
4	[50; 25; 50; 25]	8,8622	2,6554	8,4817
4	[50; 50; 25; 25]	162,2753	41,8568	159,8595
4 (eNB ₁ в центре)	[50; 25; 25; 25]	3,9038	1,9174	3,3681
4 (eNB ₁ в центре)	[25; 25; 25; 25]	15,1557	1,8779	14,9455
5	[15; 15; 15; 15; 15]	519,6189	5,3219	519,5865
5	[25; 25; 25; 25; 25]	104,3081	5,369	103,9914
5	[50; 50; 50; 50; 50]	46,88	5,8106	46,0719
5	[15; 25; 15; 25; 15]	17,422	1,86	17,2628
5	[50; 25; 50; 25; 50]	7,326	2,1917	6,8857
5	[50; 25; 15; 25; 15]	7,2242	1,9736	6,8809
5 (eNB ₁ в центре)	[25; 25; 25; 25; 25]	12,1308	1,37	12,0355
5 (eNB ₁ в центре)	[50; 25; 25; 25; 25]	3,1425	1,3869	2,802
6	[25; 25; 25; 25; 25; 25]	87,2964	4,1914	87,0319

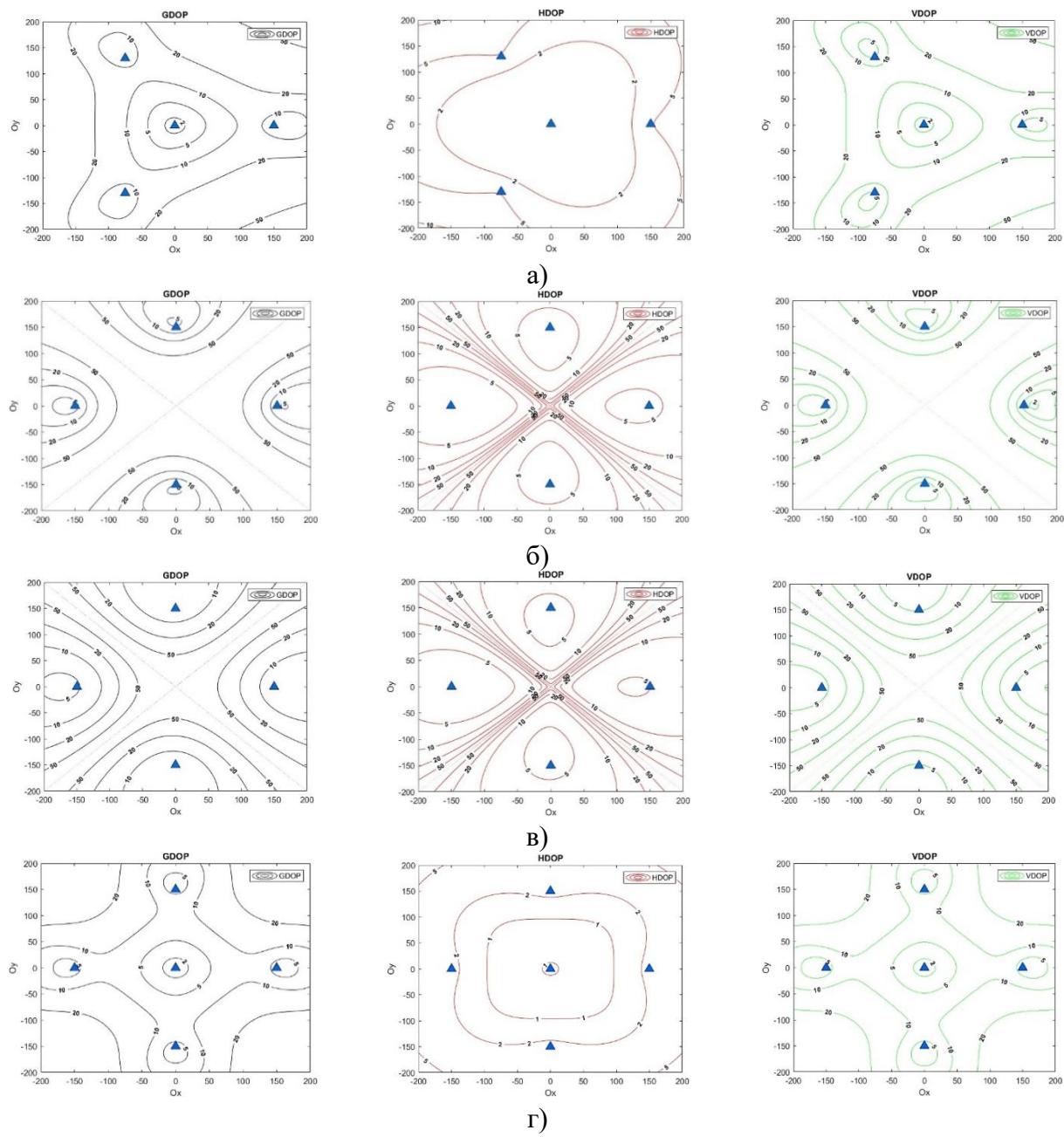


Рис. 2. DOP в разных сценариях при обработке абсолютных дальностей:
а) 4 БС ($h_{eNB} = 25$ м) (eNB₁ в центре); б) 4 БС ($h_{eNB} = 25$ м) равномерно распределены
в) 4 БС ($h_{eNB} = 50$ м) равномерно распределены; г) 5 БС ($h_{eNB} = 25$ м) (eNB₁ в центре)

При использовании измерений псевдодальностей результаты расчета DOP представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2 – Результаты вычисления DOP обработкой псевдодальностей

Количество БС	Высота БС (h_{eNB}), м	PDOP	HDOP	VDOP	GDOP
4	[25; 25; 25; 25]	2,5561	2,486	0,4072	3,404
4	[25; 50; 25; 50]	2,3975	2,0829	0,9854	3,0516
4 (eNB ₁ в центре)	[25; 25; 25; 25]	1,981	1,8789	0,3415	2,1658
5	[15; 15; 15; 15; 15]	211,061	20,2945	210,2858	211,6882
5	[25; 25; 25; 25; 25]	151,5837	20,7276	150,278	152,5515
5	[50; 50; 50; 50; 50]	107,5032	22,8907	105,1098	108,2704

Количество БС	Высота БС (h_{eNB}), м	PDOP	HDOP	VDOP	GDOP
5	[15; 25; 15; 25; 15]	34,3474	9,1081	33,3441	34,5422
5	[50; 25; 50; 25; 50]	16,7176	7,6106	15,1148	16,9639
5	[50; 25; 15; 25; 15]	34,3474	9,1081	33,3441	35,0695
5 (eNB ₁ в центре)	[25; 25; 25; 25; 25]	153,6927	22,4401	152,1307	156,7193
6	[15; 15; 15; 15; 15; 15]	117,5303	7,0403	117,0177	117,9178
6	[25; 25; 25; 25; 25; 25]	78,8711	7,2196	78,0829	79,2228
6	[50; 50; 50; 50; 50; 50]	53,023	8,0725	51,748	53,2425
6	[25; 50; 25; 50; 25; 50]	7,7448	3,0037	6,9439	7,9681
6 (eNB ₁ в центре)	[25; 25; 25; 25; 25; 25]	68,4859	6,3419	67,7903	71,4003

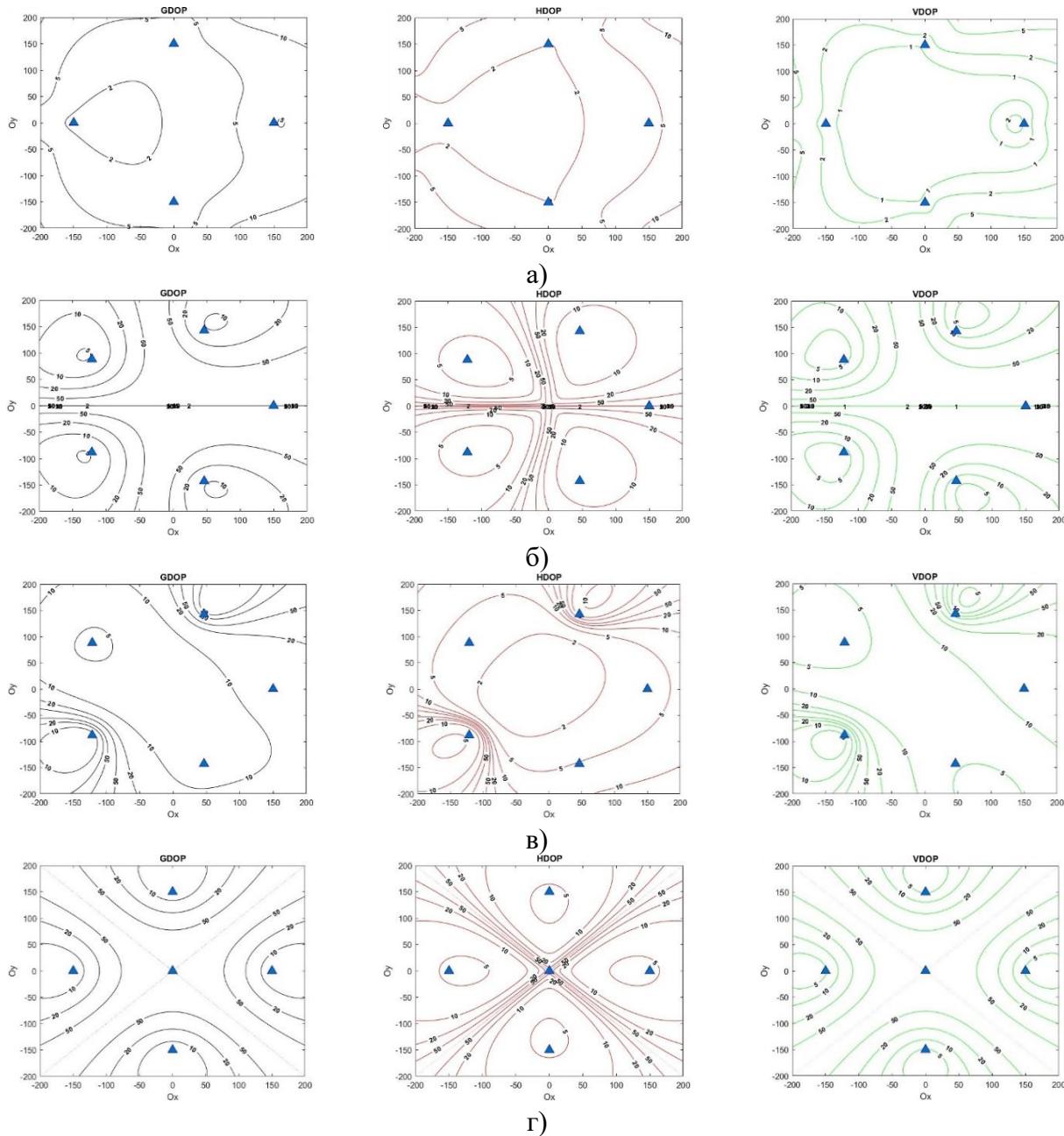


Рис. 3. DOP в разных сценариях при обработке псевдодальностей
 а) 4 БС ($h_{eNB} = 25$ м) равномерно распределены; б) 5 БС ($h_{eNB} = 25$ м) равномерно распределены; в) 5 БС ($h_{eNB} = [50; 25; 50; 25; 50]$) равномерно распределены;
 г) 5 БС ($h_{eNB} = 25$ м) (eNB₁ в центре)

Анализ данных, представленных в таблицах 1 и 2, показывает, что обычно увеличение числа БС приводит к уменьшению DOP (т. е. к повышению точности), однако в некоторых конфигурациях наблюдается его увеличение.

При равномерном распределении одинакового количества L БС в заданном пространстве, как показано выше, наличие одной БС в центре многоугольника обеспечивает более низкое значение DOP по сравнению с равномерным распределением БС по вершинам многоугольника с L сторонами.

Значения DOP, полученные при обработке псевдодальностей, выше, чем значения, полученные при обработке абсолютных дальностей, что обусловлено влиянием погрешностей измерения на точность позиционирования.

При увеличении высоты БС HDOP увеличивается, а PDOP, VDOP и GDOP уменьшаются, что приводит к повышению точности позиционирования [20]. В области с L БС неоднородное распределение их высот способствует снижению DOP, что свидетельствует о повышении точности позиционирования по сравнению с ситуацией, когда все БС располагаются на одинаковой высоте [21]. Кроме того, с увеличением разницы высот БС GDOP уменьшается, что благоприятно влияет на точность вертикального позиционирования [21, 23].

Далее рассмотрим сценарий расположения БС для позиционирования транспортных средств в условиях городской застройки.

Способы расположения базовых станций для позиционирования транспортных средств на дороге

Рисунок 4 иллюстрирует пример сценария топологии БС в условиях городской застройки.

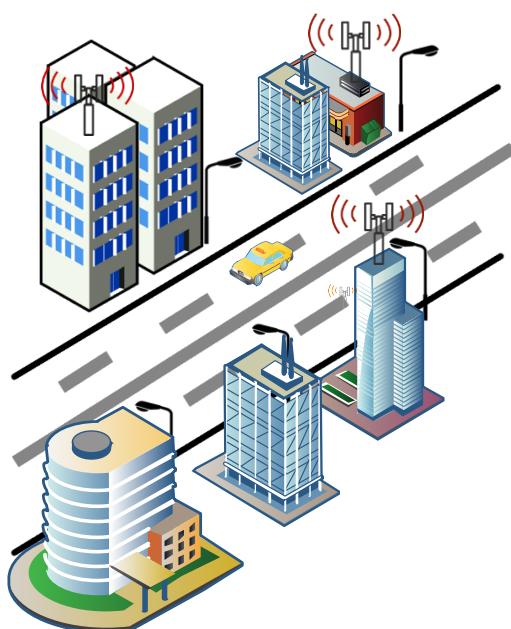


Рис. 4. Пример расположения БС в условиях городской застройки

Моделирование для ситуации, представленной на рисунке 4, проводилось с использованием двух различных сценариев, позволяющих воссоздать обста-

новку типичного города. Каждый сценарий представлял собой городскую улицу шириной 10 м, включающую проезжую часть и тротуары по обеим сторонам. Высота зданий, обращенных к улице, была постоянной. Из-за высокой плотности застройки и большого количества пользователей БС размещаются на крышах многоквартирных домов в каждом сценарии вдоль обочин дороги с обеих сторон, на равном расстоянии 200 м.

В первом сценарии все БС имеют одинаковую высоту 25 м, во втором – высоты варьируются от 15 до 30 м. Моделирование проводилось путем тестирования трех возможных вариантов конфигураций сети связи, различающихся числом и геометрией БС, расположенных вокруг наблюдателя. Варианты топологии приведены на рисунке 5:

- 1-й вариант: 3 БС расположены в вершинах треугольника;
- 2-й вариант: 4 БС расположены в вершинах прямоугольника;
- 3-й вариант: 4 БС расположены в вершинах, а одна БС – в центре прямоугольника.

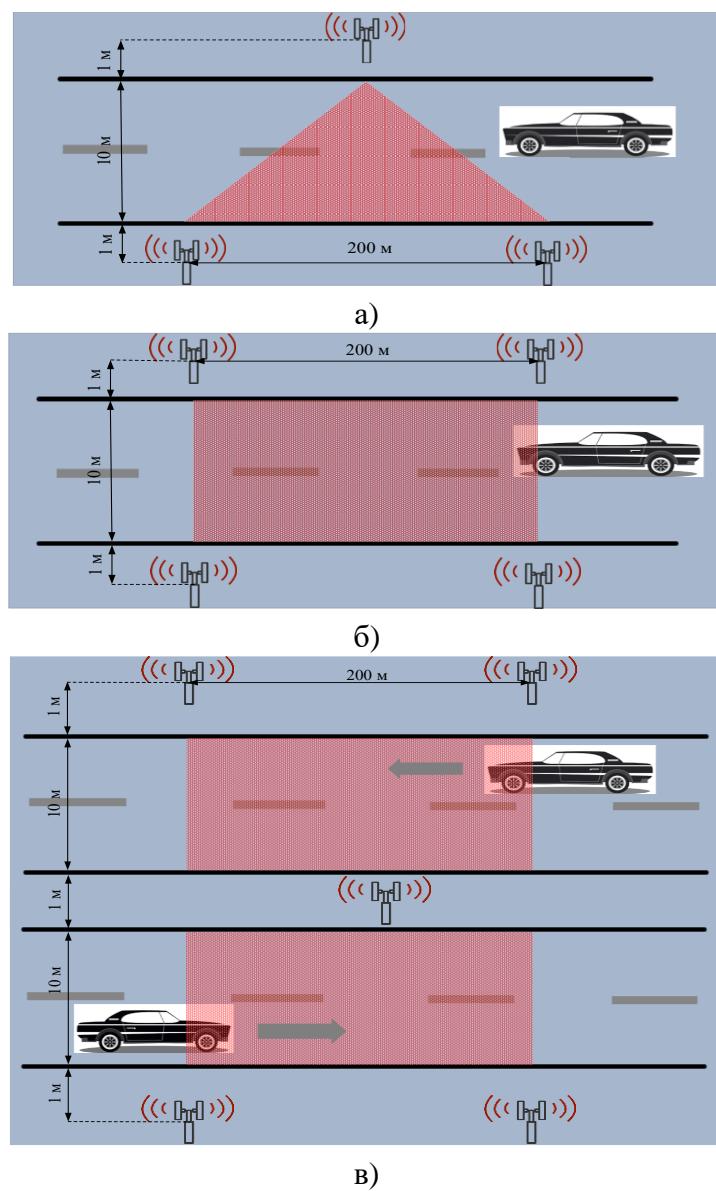


Рис. 5. Размещение БС: а) 1-й вариант; б) 2-й вариант; в) 3-й вариант

В первом сценарии рассмотрим расчет среднего значения DOP для зоны, выделенной на рисунке 5 красным цветом. При использовании обработки абсолютных дальностей получены результаты, представленные в таблице 4 и на рисунке 6а. Изначально рассматривается область для вычисления DOP, имеющая форму прямоугольника: в 1-м и 2-м вариантах – размером 200×10 м, а в 3-м – 200×21 м. Шаг сетки по горизонтали составляет 1 м, по вертикали – 0,1 м. DOP вычисляется для каждой точки сетки расположения UE, после чего определяется среднее значение DOP в выделенной красным области. Если значение DOP оказывается слишком велико или не удается его рассчитать, то ему присваивается значение 1000.

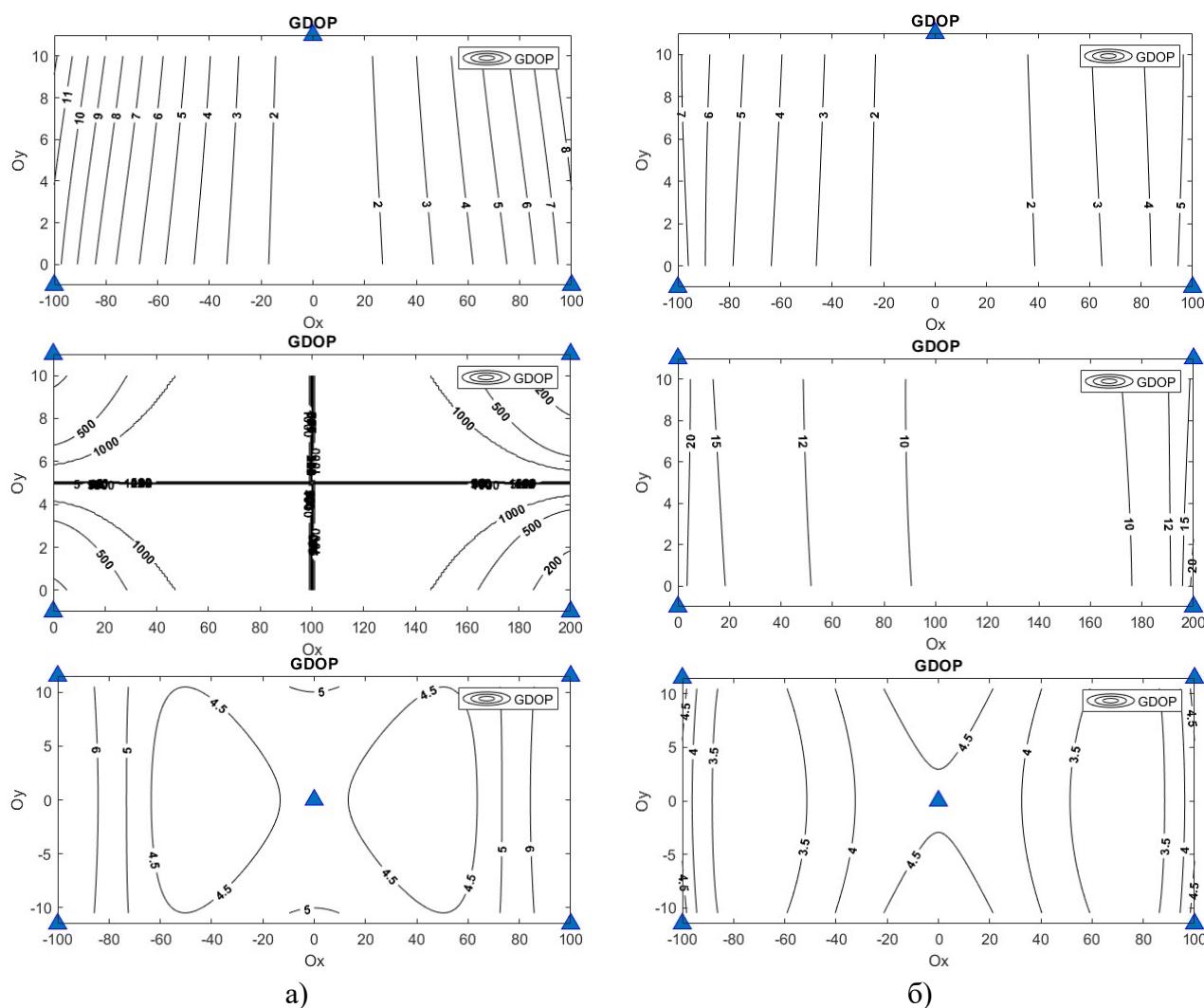


Рис. 6. Расчет GDOP обработкой абсолютных дальностей:
а) первый сценарий; б) второй сценарий

Таблица 4 – Результаты вычисления DOP для первого сценария

Вариант размещения	PDOP	HDOP	VDOP
1-й	3,0533	1,8379	2,397
2-й	850,9302	397,1498	838,754
3-й	5,0548	3,5743	3,2304

Во втором сценарии, где высота БС варьируется в диапазоне 15–30 м, производится расчет минимального среднего значения DOP для той же зоны при обработке абсолютных дальностей. При исследовании высоты БС рассматриваются последовательные значения: 15, 20, 25 и 30 м. На основе данного подхода предлагается методика поиска высоты и пространственного расположения БС, направленная на достижение максимальной точности позиционирования по критерию минимизации GDOP. Результаты исследования второго сценария представлены в таблице 5 и на рисунке 6б.

Таблица 5 – Результаты вычисления DOP для второго сценария

Вариант размещения	Подходящие высоты БС	PDOP	HDOP	VDOP
1-й	[15; 15; 30]	2,313	1,0749	2,0406
2-й	[30; 15; 30; 15]	11,4653	8,217	7,9443
3-й (eNB ₁ в центре)	[30; 15; 15; 15; 15]	3,8498	3,1	1,9419

Исходя из результатов, представленных в таблицах 4 и 5, видно, что в условиях городской застройки при зигзагообразном размещении трех и пяти БС GDOP существенно снижается, что свидетельствует о значительно более высокой эффективности позиционирования. Кроме того, конфигурация по высоте БС оказывает значительное влияние на значения DOP и, как следствие, на точность определения местоположения транспортных средств.

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, увеличение числа БС в большинстве случаев приводит к снижению DOP, что свидетельствует о повышении точности позиционирования. Однако при некоторых конфигурациях наблюдается увеличение DOP, что подчеркивает необходимость оптимизации топологии сети.

Во-вторых, увеличение высоты БС способствует снижению VDOP и GDOP, несмотря на рост HDOP, что в целом улучшает точность позиционирования. С увеличением разности высот БС происходит уменьшение GDOP, что положительно сказывается на точности позиционирования по вертикали.

В-третьих, равномерное распределение БС, особенно с наличием центрального узла в пределах многоугольника, обеспечивает более низкие показатели DOP по сравнению с равномерным распределением БС в вершинах. Кроме того, неоднородное распределение высот БС способствует снижению DOP, что в целом улучшает точность позиционирования.

В-четвертых, в условиях городской застройки для определения местоположения транспортных средств расположение трех и пяти БС в виде зигзагообразной структуры обеспечивает более высокую точность позиционирования по сравнению с симметричной конфигурацией. Такой подход не только снижает значения DOP, но и улучшает качество связи, а также повышает точность

позиционирования, что имеет существенное практическое значение для сетей 4G LTE и 5G NR.

В реальных условиях эффективность предложенных решений может существенно зависеть от воздействия помех различного происхождения, особенностей рельефа местности, затрудняющего распространение сигнала, а также уровня загруженности сети. Для практической реализации предложенных конфигураций рекомендуется следующий подход.

В первую очередь необходимо провести анализ местности с целью выявления зон, где требуется наибольшая точность позиционирования, например, центральные площади, оживленные транспортные узлы, городские улицы или парки с высокой проходимостью. Далее следует оценить уровень помех, определив их потенциальные источники, включая интерференцию между станциями, работающими на одинаковых частотах, и выбрать оптимальные местоположения БС для минимизации их влияния. С учетом рельефа местности БС целесообразно размещать на возвышенностях или в точках с хорошей видимостью, что способствует улучшению распространения сигнала.

Следующим этапом является расчет необходимого количества БС, исходя из предполагаемой загруженности сети и требований к точности позиционирования. После этого следует выбрать оптимальную топологию сети, например, равномерное распределение с центральным узлом или зигзагообразную структуру, в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Наконец, для подтверждения эффективности выбранной конфигурации следует провести моделирование работы сети и ее тестирование в реальных условиях. Такой последовательный подход позволит учесть все ключевые факторы и оптимизировать работу системы.

Литература

1. Roth J. D., Tummala M., McEachen J. C. Fundamental Implications for Location Accuracy in Ultra-Dense 5G Cellular Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68. Iss. 2. PP. 1784–1795. DOI: 10.1109/TVT.2018.2885413
2. Roth J. D., Tummala M., McEachen J. C. Efficient System Geolocation Architecture in Next-Generation Cellular Networks // IEEE Systems Journal. 2018. Vol. 12. Iss. 4. PP. 3414–3425. DOI: 10.1109/JSYST.2017.2701903
3. Fischer S. 5G NR Positioning // 5G and Beyond / Ed. by X. Lin, N. Lee. Berlin, Heidelberg: Springer, 2021. PP. 429–483. DOI: 10.1007/978-3-030-58197-8_15
4. del Peral-Rosado J. A., Raulefs R., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G. Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20. Iss. 2. PP. 1124–1148. DOI: 10.1109/COMST.2017.2785181
5. Xhafa A., del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G. Evaluation of 5G Positioning Performance Based on UTDoA, AoA and Base-Station Selective Exclusion // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 1. P. 101. DOI: 10.3390/s22010101. EDN: OOWVRG

6. 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

7. Müürsepp I., Kulmar M., Elghary O., Alam M. M., Chen T. et al. Performance Evaluation of 5G-NR Positioning Accuracy Using Time Difference of Arrival Method // Proceedings of the International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom, 07–10 September 2021, Athens, Greece). 2021. PP. 494–499. DOI: 10.1109/MeditCom49071.2021.9647652

8. Destino G., Mahmoodi T., Shreevastav R., Shrestha D., Siomina I. A New Position Quality Metric for NR RAT Dependent OTDOA Positioning Methods // Proceedings of the 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC, 23–24 October 2019, Bremen, Germany). 2019. DOI: 10.1109/WPNC47567.2019.8970252

9. Alghisi M., Biagi. L. Positioning with GNSS and 5G: Analysis of Geometric Accuracy in Urban Scenarios // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 4. P. 2181. DOI: 10.3390/s23042181. EDN: XWUQAF

10. Campos R. S., Lovisolo L. RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Boston, London: Artech House, 2015. 369 p.

11. Li B., Dempster A., Wang J. 3D DOPs for Positioning Applications Using Range Measurements // Wireless Sensor Network. 2011. Vol. 3. Iss. 10. PP. 334–340. DOI: 10.4236/wsn.2011.310037

12. Фокин Г. А., Кучеряый А. Е. Размещение устройств сверхплотной сети в пространстве. Часть 1. Модели и методы геометрического фактора // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 32–59. DOI: 10.31854/2307-1303-2022-10-3-32-59. EDN: PUMZTF

13. Фокин Г. А., Кучеряый А. Е. Размещение устройств сверхплотной сети в пространстве. Часть 2. Поиск по критерию геометрического фактора // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 4. С. 27–37. DOI: 10.31854/2307-1303-2022-10-4-27-37. EDN: YVEMNW

14. 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

15. 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

16. Фокин Г. А., Лазарев В. О. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно- дальномерным и угломерным методами. Часть 3. 3D-моделирование // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 87–102. DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-2-87-102. EDN: FKSYIZ

17. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances / Ed. by R. Zekavat, R. M. Buehrer. Hoboken: IEEE Press; John Wiley & Sons, 2019. 1376 p. DOI: 10.1002/9781119434610

18. Wann Ch.-D. Mobile Sensing Systems Based on Improved GDOP for Target Localization and Tracking // 2012 IEEE Sensors Proceedings (28–31 October 2012, Taipei, Taiwan). 2012. PP. 1–4. DOI: 10.1109/ICSENS.2012.6411539
19. Xiwu L., Kaihua L., Po H. Geometry Influence on GDOP in TOA and AOA Positioning Systems // Proceedings of 2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing (24–25 April 2010, Wuhan, China). 2010. PP. 58–61. DOI: 10.1109/NSWCTC.2010.150
20. Chaffee J., Abel J. GDOP and the Cramer – Rao Bound // Proceedings of 1994 IEEE Position, Location and Navigation Symposium – PLANS'94 (11–15 April 1994, Las Vegas, USA). 1994. PP. 663–668. DOI: 10.1109/PLANS.1994.303374
21. Sharp I., Yu K., Hedley M. On the GDOP and Accuracy for Indoor Positioning // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012. Vol. 48. Iss. 3. PP. 2032–2051. DOI: 10.1109/TAES.2012.6237577
22. Kaune R., Hörst J., Koch W. Accuracy Analysis for TDOA Localization in Sensor Networks // Proceedings of 14th International Conference on Information Fusion (5–8 July 2011, Chicago, USA). 2011. PP. 1–8.
23. Kaune R. Accuracy studies for TDOA and TOA localization // Proceedings of 2012 15th International Conference on Information Fusion (9–12 July 2012, Singapore). 2012. PP. 408–415.

**Статья поступила 17 октября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 19 ноября 2024 г.
Принята к публикации 23 декабря 2024 г.**

Информация об авторах

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

Фокин Григорий Алексеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: fokin.ga@sut.ru

Нгуен Ха Нам – аспирант института электроники и телекоммуникаций, ассистент высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: nguyenhanama1@gmail.com

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-13-28>
EDN: KONADC

Positioning of Devices in LTE Networks. Part 2. Analysis of Base Station Topology Impact on Coordinate Estimation Accuracy

H. C. Hua¹✉, G. Fokin¹, H. N. Nguyen²

¹The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, 195251, Russian Federation Russia

Purpose. In recent decades, the development of positioning services in 4G LTE and 5G NR networks has been actively progressing, necessitating improvements in coordinate estimation accuracy. Earlier, the analysis conducted in the first part demonstrated that signal bandwidth significantly impacts positioning accuracy. This study investigates the influence of base station (BS) topology on coordinate estimation accuracy. The primary indicative factor of BS topology in space is the geometric dilution of precision (DOP) in positioning. The objective of this work is to analyze the influence of the BS topology on the positioning accuracy by the method of difference in the time of arrival of TDOA signals for different scenarios. **Methods.** As part of the research, a simulation was conducted to calculate the geometric dilution of precision (DOP) for the range-difference method in 4G LTE cellular networks using MATLAB. The mathematical model is based on two approaches: processing absolute ranges and processing pseudoranges. The influence of various BS distribution scenarios on geometric factors (HDOP, VDOP, PDOP, and GDOP) is analyzed. **Novelty.** The novelty of the research lies in the comprehensive analysis of the impact of base station topology on positioning accuracy, which allows for identifying BS placement schemes considering both horizontal and vertical distribution. This contributes to a deeper understanding of the relationship between network configuration and the quality of coordinate estimation. **Results.** The study shows that increasing the number of BSs in a given area does not always lead to a reduction in DOP values. As the height of base stations increases, the geometric dilution of precision decreases, which positively affects positioning accuracy. The average DOP value in zones where base stations are located at different heights is lower than in areas with BSs at the same height. The topology of the BS is also determined for estimating the coordinates of vehicles on the road in urban areas. **Practical relevance.** The results of this work can be used to develop and optimize positioning algorithms in existing and future LTE and 5G NR networks. This has direct applications for improving the quality of navigation, geolocation services, and solving network positioning tasks.

Key words: geometric factor, DOP (Dilution of Precision), coordinate estimation, topology, positioning, 4G, MATLAB, vehicles, TDOA

Information about Authors

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

Fokin Grigoriy – Ph. D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Wireless Technologies and Systems (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: fokin.ga@sut.ru

Nguyen Ha Nam – Postgraduate Student at the Institute of Electronics and Telecommunications, Assistant of Higher School of Applied Physics and Space Technology (Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University). E-mail: nguyenhanama1@gmail.com