

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.24412/2221-2574-2021-444-27-38

УДК 621.396.969.11

МОДЕЛЬ ПОИСКА ТОПОЛОГИИ ЛОКАЛЬНОЙ ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ 5G ПО ЗАДАННОМУ ГЕОМЕТРИЧЕСКОМУ ФАКТОРУ

Фокин Григорий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича¹.

E-mail: grihafokin@gmail.com

¹Адрес: 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, корп. 1.

Аннотация: Разработана и реализована модель поиска топологии размещения четырёх опорных базовых станций локальной дальномерной системы определения местоположения устройства по заданному геометрическому фактору на примере зоны позиционирования 5G с повышенной точностью. Поиск топологии осуществляется в предположении фиксированного местоположения устройства в зоне позиционирования методом перебора возможных конфигураций базовых станций по критерию заданного геометрического фактора в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Результаты перебора представлены распределениями геометрических параметров, которые позволяют подобрать оптимальную в вероятностном смысле топологию местоположений базовых станций в зоне позиционирования. Для найденной топологии выполняется оценка геометрических факторов, позволяющая уточнить области зоны позиционирования, в которой достигаются заданные требования точности. Результаты поиска топологии дальномерной системы позиционирования по критерию геометрического фактора в горизонтальной и вертикальной плоскостях показали противоречие: в первом случае следует максимально разносить, а во втором - группировать опорные базовые станции в области предполагаемого местоположения устройства.

Ключевые слова: 5G, HDOP, VDOP, геометрический фактор, дальномерный метод, позиционирование.

1. Введение

Определение местоположения (ОМП) устройств с использованием радиотехнических средств сбора и обработки измерений в наземных сетях подвижной связи [1–3] востребовано тогда, когда сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [4, 5] по каким-либо причинам недоступны [6, 7], например, в сценариях отсутствия прямой видимости, внутри помещений и т.д. В таком случае задачи ОМП устройств могут быть решены локальными системами позиционирования [8–12], в которых источниками или приёмниками навигационных сигналов первичных измерений выступают опорные базовые станции (БС) сетей радиодоступа (СРД) с известными координатами.

В настоящее время сетевое позиционирова-

ние устройств с точностью до 1 метра стало особенно актуальным направлением исследований в связи с развитием сетей пятого и последующих поколений [13, 14]. Потенциал повышения точности позиционирования в сетях 5G, помимо более высокого разрешения сбора первичных дальномерных и угломерных измерений за счёт возможностей нового радиointерфейса NR (New Radio), связан также с топологией БС СРД, определяемой концепцией сверхплотных сетей UDN (Ultra-Dense Networks). Увеличение плотности территориального и/или пространственного распределения опорных БС, являющихся источниками или приёмниками навигационных сигналов первичных измерений, позволяет повысить точность ОМП устройства за счёт геометрического фактора точности позиционирования

GDOP (Geometrical Delusion of Precision).

Геометрический фактор показывает, во сколько раз происходит уменьшение точности оценки координат (ОК) объекта позиционирования (ОП) по сравнению с погрешностью первичных измерений в зависимости от топологии БС СРД. В СРД 5G в качестве первичных могут использоваться дальномерные, разностно-дальномерные и угломерные измерения.

Настоящая работа посвящена разработке модели поиска подходящей под заданные требования топологии размещения четырёх синхронизированных между собой опорных БС локальной дальномерной (ДМ) системы ОМП для зоны позиционирования 5G с повышенной точностью. Материал работы организован далее следующим образом. В разделе 2 приводится математическая модель оценки геометрического фактора локальной ДМ системы позиционирования. В разделе 3 приводится формализация имитационной модели (ИМ) оценки геометрического фактора точности локальной дальномерной системы позиционирования, осуществляющей поиск подходящей под заданные требования топологии размещения синхронизированных опорных БС. В разделе 4 приводятся результаты моделирования геометрического фактора локальной дальномерной системы ОМП в зоне позиционирования 5G с повышенной точностью. В разделе 5 приводятся выводы.

2. Математическая модель оценки геометрического фактора точности локальной дальномерной системы позиционирования

Формализуем три фактора геометрического снижения точности DOP (Dilution of precision) при оценке координат ОП дальномерным методом: HDOP (Horizontal DOP) — фактор снижения точности по горизонтали на плоскости в 2D, VDOP (Vertical DOP) — фактор снижения точности по высоте, PDOP (Position DOP) — фактор снижения точности ОП в пространстве

в 3D. Значения DOP рассчитываются из ковариационной матрицы Σ погрешностей ОК $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$ ОП, истинное местоположение которого задается в пространстве координатами $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$. Ковариационная матрица погрешностей в 3D определяется выражением:

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

Элементы σ_x^2 , σ_y^2 и σ_z^2 на главной диагонали Σ в (1) представляют собой дисперсии ОК по осям x , y и z соответственно, а остальные элементы — их ковариации. Процедура вычисления Σ заключается в получении информационной матрицы Фишера $FIM^{-1}(\hat{\mathbf{x}})$, из которой вычисляют нижнюю границу Крамера — Рао (НГКР, CRLB – Cramer–Rao Lower Bound) для прогноза наименьших дисперсий σ_x^2 , σ_y^2 и σ_z^2 ОК $\hat{\mathbf{x}}$ по осям x , y и z соответственно:

$$CRLB(\hat{\mathbf{x}}) = trace \left(FIM^{-1}(\hat{\mathbf{x}}) \right) = trace(\Sigma). \quad (2)$$

Геометрические факторы точности можно представить выражениями:

$$\begin{aligned} PDOP &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} / (c\sigma_\tau); \\ HDOP &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} / (c\sigma_\tau); \\ VDOP &= \sigma_z / (c\sigma_\tau), \end{aligned} \quad (3)$$

где величина в знаменателе $(c\sigma_\tau)$ — среднее квадратическое отклонение (СКО) первичных ДМ измерений; c — скорость света; σ_τ — СКО измерения времени прихода сигнала.

Для ДМ ковариационная матрица погрешностей ОК в 3D, учитывающая исключительно трёхмерную топологию размещения БС в составе СРД, нормируется к дисперсии первичных ДМ измерений и определяется матрицей

безразмерных величин, определяющих далее искомые DOP:

$$\Sigma / (c\sigma_r)^2 = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}, \quad (4)$$

где для дальномерного метода матрица частных производных \mathbf{H} размерности $N \times 3$ определяется:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial x} & \frac{\partial r_1}{\partial y} & \frac{\partial r_1}{\partial z} \\ \frac{\partial r_2}{\partial x} & \frac{\partial r_2}{\partial y} & \frac{\partial r_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_N}{\partial x} & \frac{\partial r_N}{\partial y} & \frac{\partial r_N}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{r_1} & \frac{y-y_1}{r_1} & \frac{z-z_1}{r_1} \\ \frac{x-x_2}{r_2} & \frac{y-y_2}{r_2} & \frac{z-z_2}{r_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_N}{r_N} & \frac{y-y_N}{r_N} & \frac{z-z_N}{r_N} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\mathbf{x}_n = [x_n, y_n, z_n]^T$ — вектор координат n -й НС в пространстве, $n = 1, \dots, N$; N — общее число БС в СРД; r_n — расстояние между ОП и n -й БС в пространстве:

$$r_n = \sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 + (z-z_n)^2}. \quad (6)$$

Значения, задаваемые выражениями (6), а также число станций N являются исходными данными для имитационного моделирования (ИМ).

3. Формализация имитационной модели оценки геометрического фактора точности локальной дальномерной системы позиционирования

Имитационная модель (ИМ) рассчитана на использование 4-х БС СРД. Исходными данными (ИД) являются следующие параметры: а) размер рабочей зоны позиционирования 5G с повышенной точностью на плоскости D ; б) шаг сетки размещения БС на плоскости в рабочей зоне ΔD ; в) максимальная высота расположе-

ния БС V ; г) шаг сетки размещения БС по высоте ΔV ; д) координаты ОП; ОП может располагаться в любой точке рабочей зоны на плоскости при фиксированной высоте; в настоящей ИМ местоположение ОП фиксировано; е) диапазон допустимых значений геометрического фактора точности $[DOP_{min}, DOP_{max}]$; ж) число итераций расчёта K при переборе в ИМ по возможным вариантам топологии размещения НС.

ИМ проводит K итераций расчёта трёх значений DOP для случайных наборов координат четырёх БС, выбранных из сетки доступных значений, которая задается параметрами $D, \Delta D, V, \Delta V$; при этом местоположение ОП не меняется. Конфигурацией (топологией) БС является набор из $N=4$ БС с координатами $\mathbf{x}_n = [x_n, y_n, z_n]^T$, $n=1, \dots, N$. Из полученных перебором конфигураций выбираются те топологии расположения БС, при которых исследуемый DOP находится в заданном интервале целевых значений $[DOP_{min}, DOP_{max}]$. В качестве минимального значения DOP можно принять 1, что соответствует удачной конфигурации БС, однако, если в результате расчёта получается значение DOP меньше единицы, оно ренициализируется в качестве нижней границы. Максимальное значение может быть инициализировано любым, в зависимости от предъявляемый требований: в настоящей ИМ $DOP_{max} = DOP_{min} + 1$. Таким образом, перебор топологий размещения БС производится в диапазоне целевых значений от $DOP_{min} = 1$ до $DOP_{max} = 2$.

Конфигурации с размещениями БС могут анализироваться для трёх случаев, когда в качестве целевых значений выбираются $HDOP, VDOP$ и $PDOP$ соответственно. Для каждого целевого значения DOP в ИМ строятся графики распределения параметров, задающих искомую конфигурацию БС. Такими параметрами в настоящей модели являются: относительные азимутальные углы $\Delta\phi_{1n}$ между БС и ОП, горизонтальные дальности d_n между НС и ОП, высоты БС h_n . Из полученных распределений

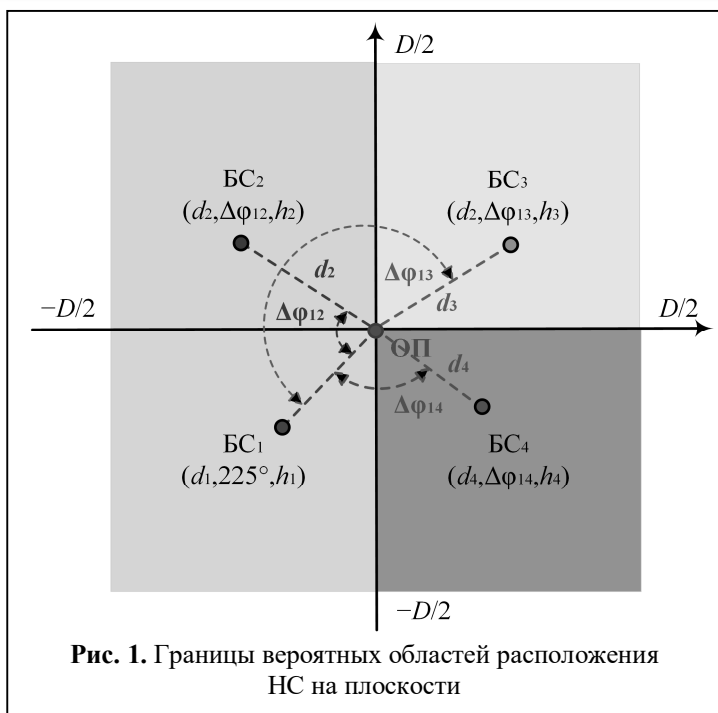


Рис. 1. Границы вероятных областей расположения НС на плоскости

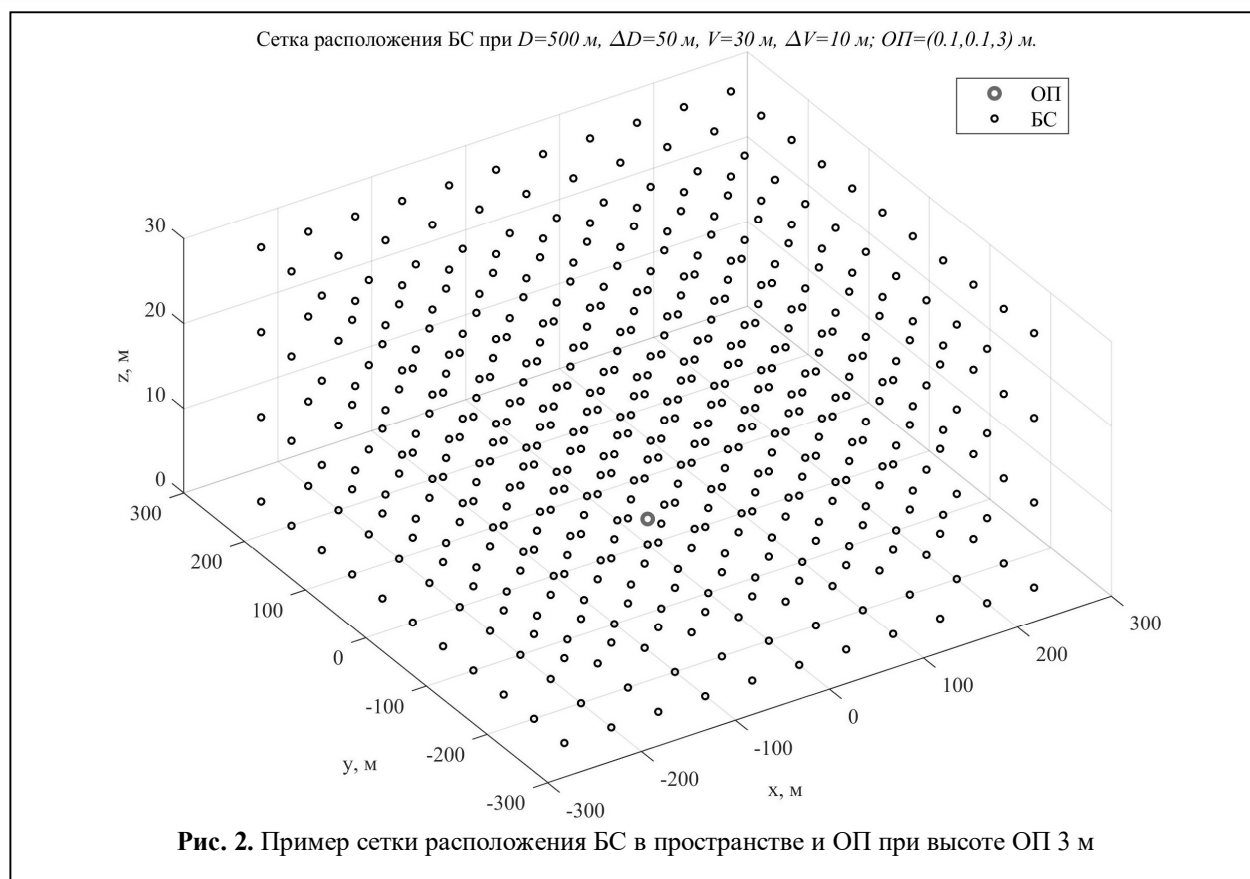
выбираются наиболее характерные (вероятные) значения параметров конфигурации БС, обеспечивающие получение геометрического фактора в заданном диапазоне целевых значений $[DOP_{min}, DOP_{max}]$. Далее по найденным параметрам дальностей d_n , углов $\Delta\varphi_{1n}$ и высот h_n БС вычисляются абсолютные координаты каждой БС. Для этих координат БС в ИМ затем рассчитываются факторы $HDOP$, $VDOP$ и $PDOP$ для всех местоположений ОП в заданной области на плоскости при фиксированной высоте ОП.

Настоящая ИМ имеет следующие ограничения. Во-первых, понятие рабочей зоны, в которой выполняется оценка геометрических факторов ОП, и понятие области возможных расположений БС эквиваленты. Во-вторых, поиск топологии осуществляется в предположении фиксированного расположения ОП в геометрическом центре периметра установки БС, что является обоснованным допущением для случая на плоскости. В-третьих, поиск топологии осуществляется для фиксированной высоты ОП; при варьировании высоты ОП в модель следовало бы добавить дополнительное измерение для перебора конфигураций. Учитывая данные ограничения, очевидно, что тре-

бования по искомому геометрическому фактору $[DOP_{min}, DOP_{max}]$ при варьировании местоположения ОП в заданной области удастся обеспечивать не во всей рабочей зоне, а только в некоторых областях — окрестностях, обеспечивающих в вероятностном смысле оптимальность полученной в результате перебора топологии БС.

Формализуем процедуру вычисления оптимального в вероятностном смысле расположения четырёх БС в рабочей зоне размерами $D \times D$. Перебор топологий размещения БС в ИМ производится при ограничении на $HDOP$, $VDOP$ и $PDOP$ в диапазоне целевых значений от 1 до 2 при условии расположения ОП в центре предполагаемого периметра БС. Достигнутый в результате перебора конфигураций БС в данной точке ОП геометрический фактор DOP будем далее считать оптимистическим, а параметры дальностей d_n , углов $\Delta\varphi_{1n}$ и высот h_n топологии БС, обеспечивающие $[DOP_{min}, DOP_{max}]$, будем далее называть оптимистическими в вероятностном смысле. Для того, чтобы формализовать и упорядочить поиск мест расположения БС, область позиционирования $D \times D \times V$ (рабочая зона ОП или зона областей расположения БС) в рассматриваемом примере разделяется на 4 квадранта в 2D, когда каждая БС на плоскости может располагаться только в заданном квадранте (рис. 1): БС₁ располагается в левом нижнем квадранте, БС₂ в левом верхнем, БС₃ в правом верхнем, БС₄ в правом нижнем. Допустим, угол расположения БС₁ относительно ОП в первом квадранте равен $\varphi_1 = 225^\circ$, тогда угловое расположение остальных БС можно рассчитывать относительно φ_1 .

Будем далее считать, что искомое расположение БС_n задаётся следующими параметрами: расстоянием d_n от ОП до БС, относительным азимутальным углом $\Delta\varphi_{1n}$, а также высотой h_n каждой БС_n. Как показано на рис. 1, углы $\Delta\varphi_{1n}$ считаются относительно 1-й БС как разница азимутального угла между n-й БС и ОП и ази-



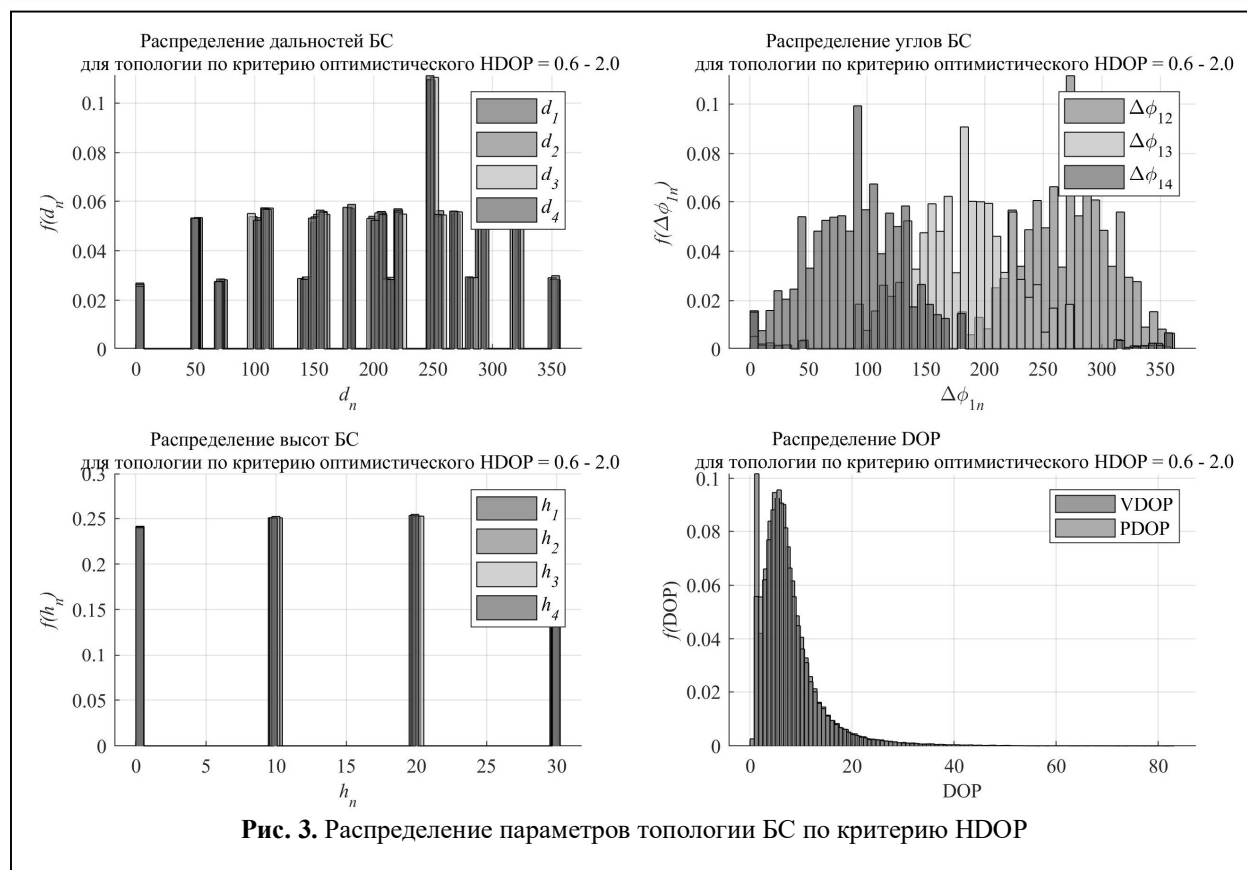
мутального угла между 1-й БС и ОП; дальности d_n вычисляются на горизонтальной плоскости без учёта высот h_n БС и ОП. Для наглядности конфигурации (топологии) при большой разности высот БС и ОП местоположение ОП далее будет показано на плоскости. Для расчёта абсолютных координат БС $\mathbf{x}_n = [x_n, y_n, z_n]^T$ азимутальный угол БС₁ относительно ОП для наглядности выбран равным $\varphi_1 = 225^\circ$ (может быть любым), при этом $\Delta\varphi_{11}=0^\circ$. Значения $\Delta\varphi_{1n}$, d_n и h_n выбираются из гистограмм, полученных в результате перебора возможных конфигураций БС при фиксированном местоположении ОП, и равны среднему значению границ интервала, в котором располагается максимум распределения данного параметра. Вектор координат БС_n вычисляется с помощью матрицы поворота:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_{1n}) & -\sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{1n}) & 0 \\ \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{1n}) & \cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_{1n}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} d_n \\ 0 \\ h_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_n \cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_{1n}) \\ d_n \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{1n}) \\ h_n \end{bmatrix}. \quad (7)$$

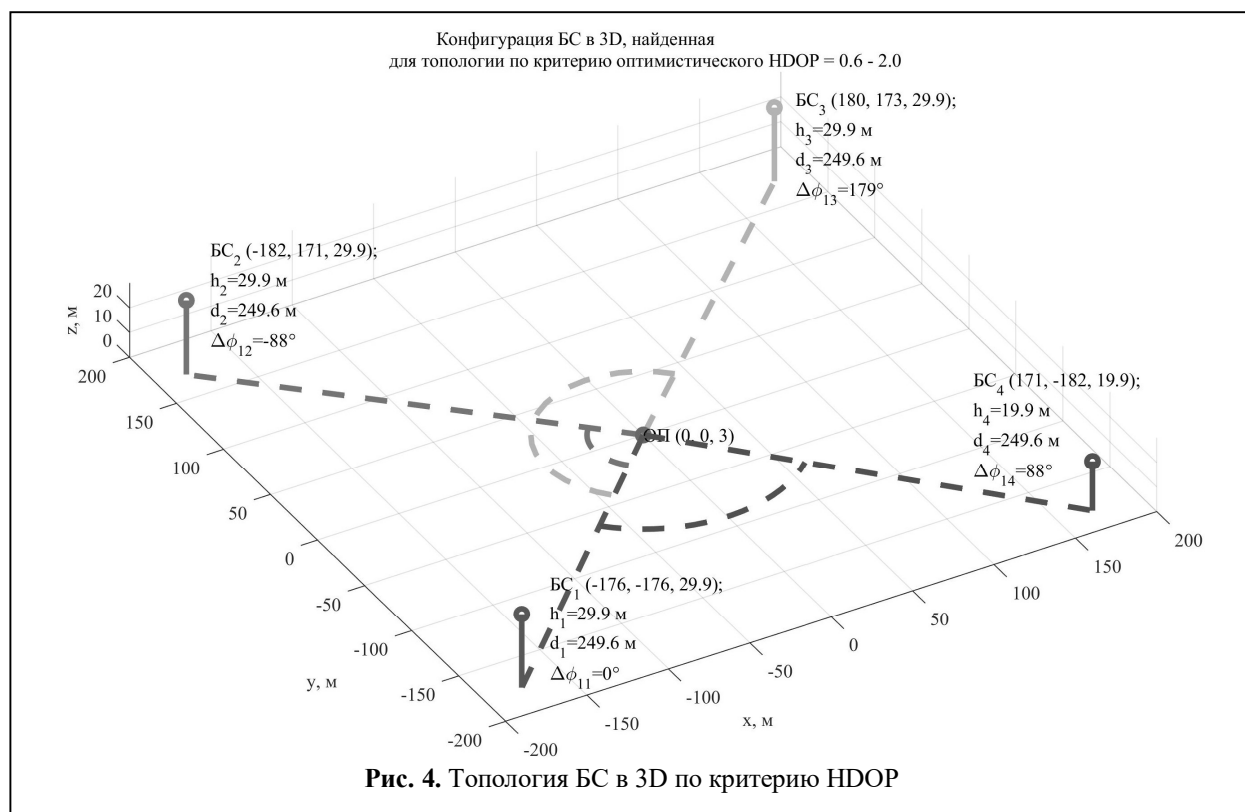
4. Результаты моделирования геометрического фактора в зоне позиционирования 5G с повышенной точностью

Рассмотрим пример инициализации сценария работы ИМ для так называемой зоны позиционирования 5G с повышенной точностью [14]: размер рабочей зоны на плоскости $D = 500$ м, максимальная высота расположения БС $V = 30$ м; примем шаг сетки размещения БС на плоскости в рабочей зоне $\Delta D = 10$ м и шаг сетки размещения БС по высоте $\Delta V = 10$ м; истинные координаты ОП $[x, y, z]$ инициализируются параметром $[0.1, 0.1, 3]$ м. Далее осуществляется формирование сетки координат БС с использованием команд специального программного обеспечения (СПО) Matlab с шагом ΔD по горизонтали и ΔV по вертикали (рис. 2).



На рис. 3 представлены распределения параметров конфигураций БС для числа итераций $K=10^5$, которые из перебора позволяют получить значения HDOP из интервала $[DOP_{min}, DOP_{max}]$. При этом в результате перебора минимальное значение HDOP было реинициализировано значением 0,6. Анализ рис. 3 показывает, что распределения азимутальных углов $\Delta\phi_{1n}$ и дальностей d_n имеют чётко выраженный максимум. Значения, соответствующие этому максимуму, выбираются в качестве параметров для построения искомой конфигурации БС. При этом искомая конфигурация стремится к правильному четырёхугольнику — квадрату, что не противоречит известным результатам на плоскости [1–12]. Распределения высот h_n при поиске топологии по критерию HDOP не имеют чётко выраженного максимума, что говорит о слабой зависимости значений HDOP от высоты БС h_n для заданного на рис. 2 сценария. На рис. 3 также представлены распределения VDOP и PDOP, полученные при заданном HDOP.

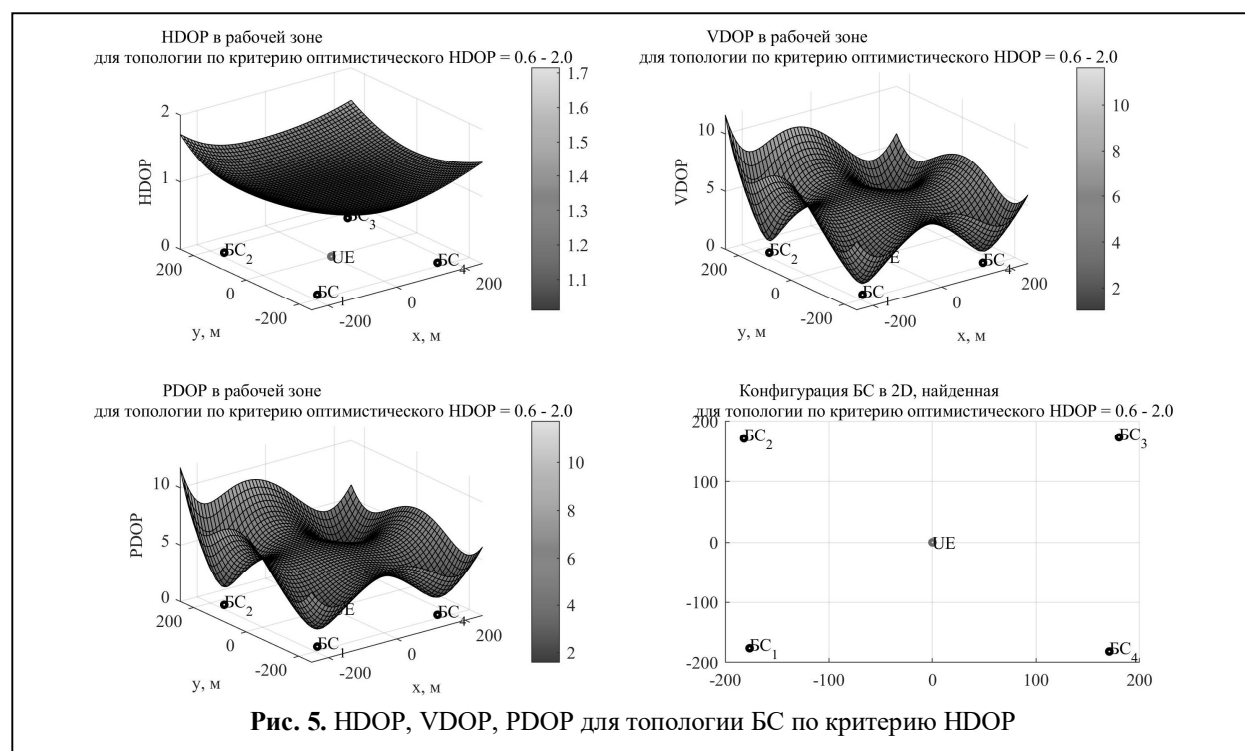
Распределение углов $\Delta\phi_{1n}$ в диапазоне от 0° до 360° на рис. 3 определяется сеткой возможных дискретных местоположений БС, представленной на рис. 3, и принятым допущением о вероятном размещении четырёх БС в квадрантах, представленных на рис. 1. Распределение горизонтальных дальностей d_n между БС и ОП на рис. 3 определяется максимальным расстоянием между ОП в центре плоскости рабочей области, заданной параметрами $D \times D$ с шагом ΔD , а также сеткой возможных дискретных местоположений БС, представленной на рис. 2. Распределение высот БС h_n на рис. 3 определяется максимальной высотой расположения БС V и шагом сетки размещения БС по высоте ΔV , представленной на рис. 2. Значения $\Delta\phi_{1n}$, d_n и h_n выбираются из гистограмм на рис. 3 как среднее значение границ интервала, в котором располагается максимум распределения. На рис. 4 представлена конфигурация БС, полученная по формуле матрицы поворота (7) из наиболее характерных (вероятных) значений параметров $\Delta\phi_{1n}$, d_n и h_n , представ-

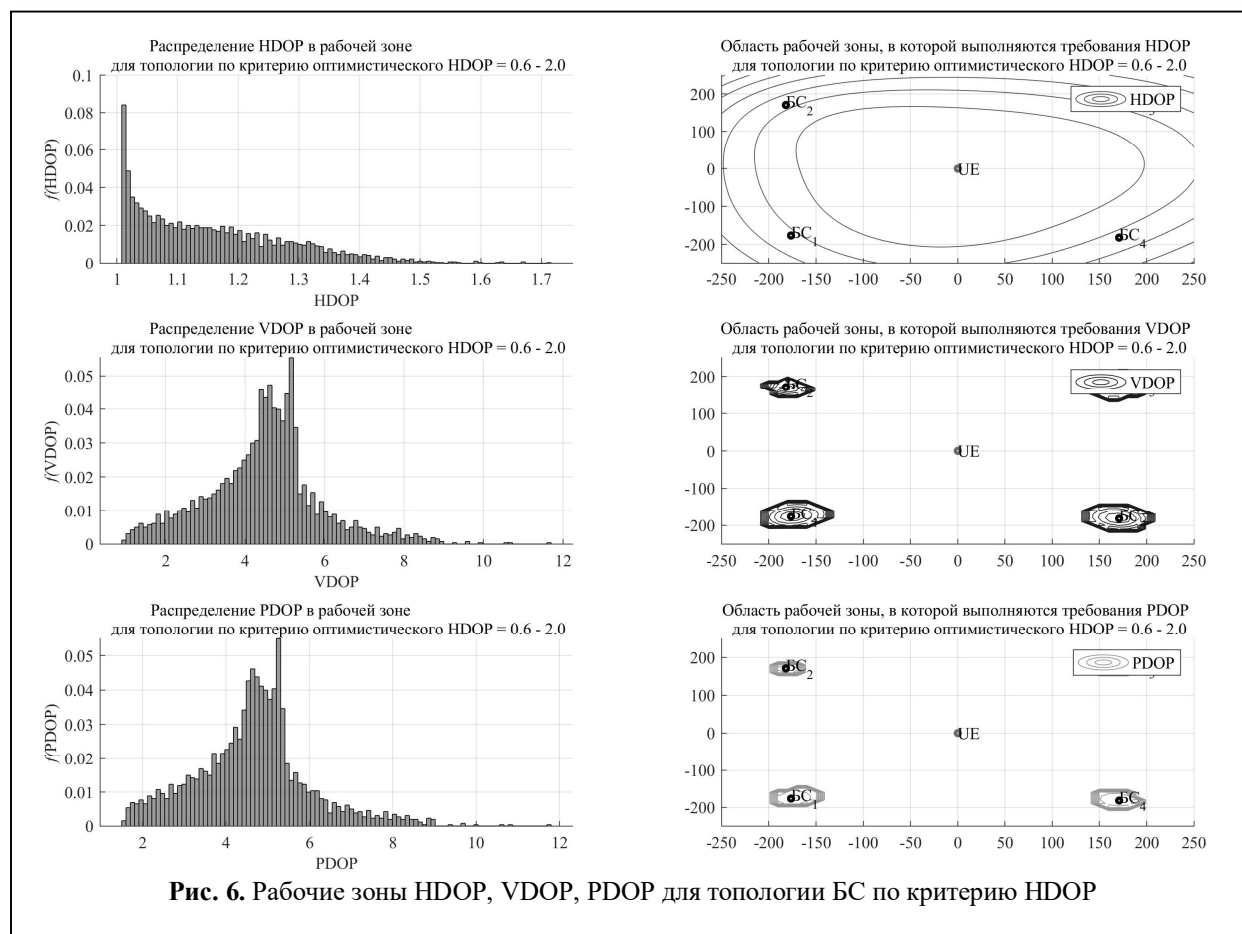


ленных на рис. 3. Как показано на рис. 4, углы $\Delta\phi_{1n}$ отсчитываются относительно БС₁ как разница азимутального угла между БС_n и ОП, и азимутального угла между БС₁ и ОП. Дальности d_n вычисляются на горизонтальной

плоскости без учёта высот БС и ОП.

На рис. 5 представлены геометрические факторы HDOP, VDOP и PDOP, рассчитанные для полученной на рис. 4 по критерию HDOP топологии БС в точках местоположения ОП из





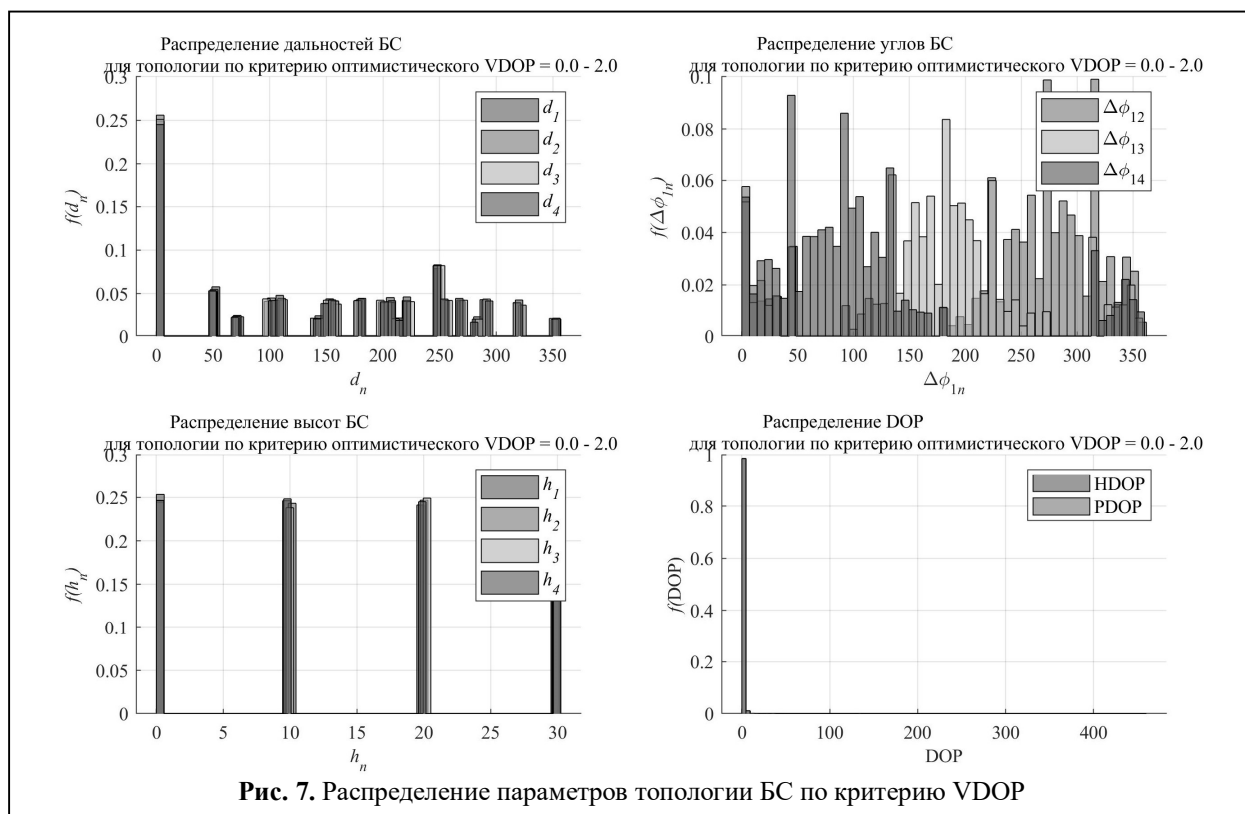
заданной сетки на плоскости $D \times D$ с шагом 10 м при фиксированной высоте ОП 3 м.

Анализ DOP на рис. 5 позволяет сделать следующие выводы для найденной топологии БС по критерию оптимистического HDOP: а) HDOP обеспечивается во всей рабочей зоне; б) VDOP обеспечивается преимущественно в областях над БС; в) PDOP обеспечивается преимущественно в областях рядом с БС, что не противоречит известным результатам [15].

Для уточнения областей рабочей зоны, где выполняются требования $[DOP_{min}, DOP_{max}]$, на рис. 6 представлены распределения DOP во всей рабочей зоне и контуры окрестностей, в которых достигаются заданные значения. Полученные на рис. 6 контуры в 2D повторяют зависимости, показанные трехмерными графиками DOP на рис. 5. В частности, для случая горизонтального геометрического фактора точности из рис. 6 следует, что величина HDOP увеличивается при смещении ОП из

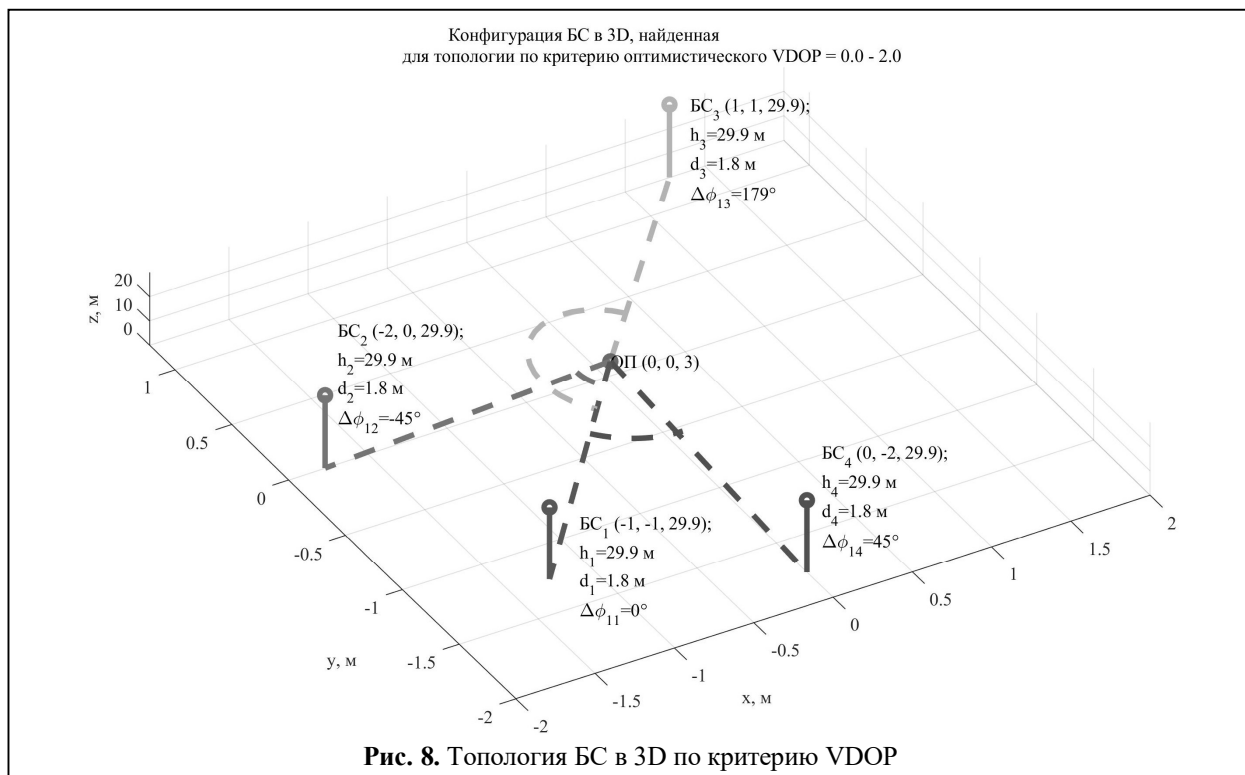
центра к границам рабочей зоны, оставаясь, однако, в заданных пределах $[DOP_{min}, DOP_{max}]$. Ограничивающим условием является геометрический фактор точности по вертикали, который сужает окрестности областей рабочей зоны, в которой выполняются заданные требования, до участков расположения ОП рядом с БС. При этом рабочие зоны для PDOP оказываются меньше, чем для VDOP, что подтверждает корректность ИМ. Для расширения рабочих зон по критериям VDOP и PDOP при поиске мест размещения БС следует снимать ограничение на их расположение в рабочей зоне ОП.

На рис. 7 представлены распределения параметров БС, которые в результате перебора позволяют получить значения VDOP из заданного интервала $[DOP_{min}, DOP_{max}]$. На рис. 8 представлена конфигурация БС, полученная по наиболее характерным (вероятным) значениям параметров конфигурации БС, представленных на рис. 7. Из рис. 7 видно, что, как и для



HDOP, для VDOP распределение высот h_n не имеет чётко выраженного максимума. Из рис. 5 видно, что значения VDOP меньше в точках расположения ОП над БС. Из сравне-

ния полученных топологий по критерию HDOP (рис. 4) и по критерию VDOP (рис. 8) следует, что для обеспечения требуемого геометрического фактора точности по вертикали



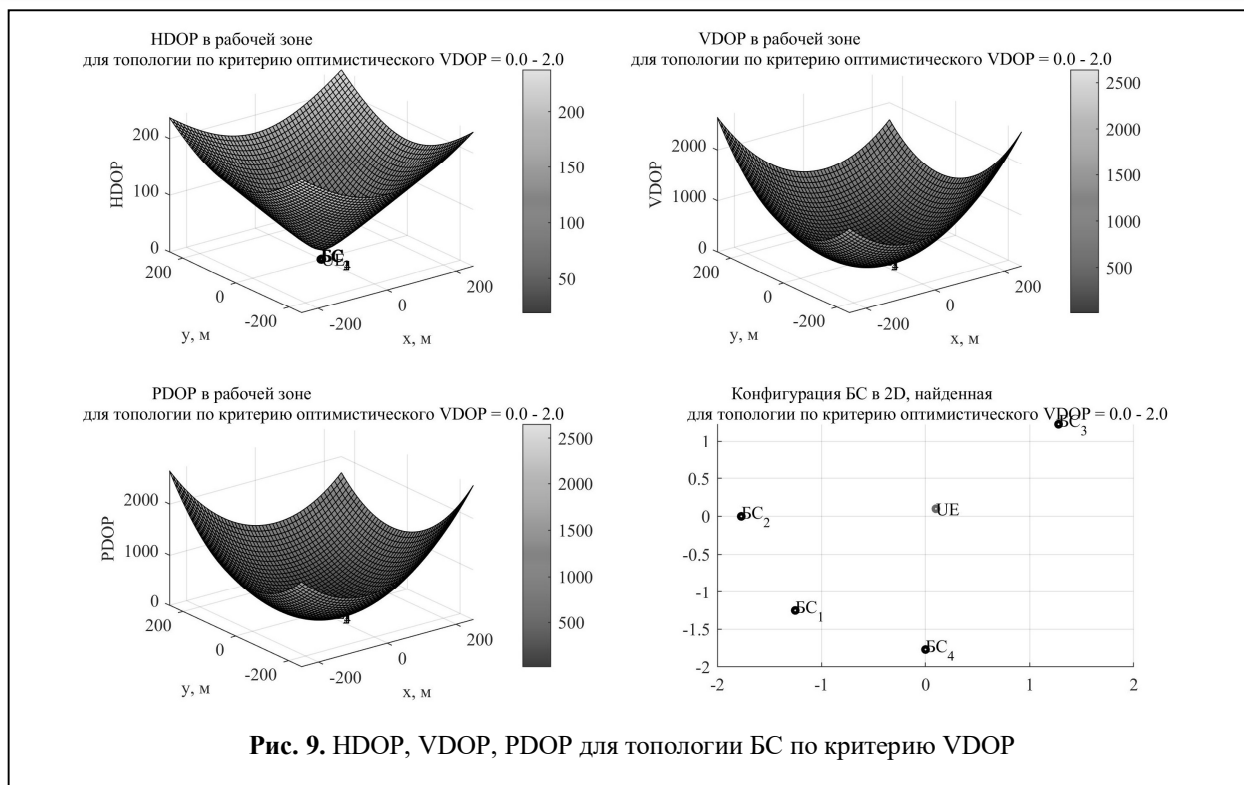


Рис. 9. HDOP, VDOP, PDOP для топологии БС по критерию VDOP

следует располагать БС преимущественно рядом с ОП, т.е. уменьшать дальности d_n : если в первом случае для HDOP они находятся в пределах сотен метров, то во втором случае для VDOP они составляют единицы метров. Противоречие заключается в том, что при выборе дальностей d_n , соответствующих меньшим значениям VDOP, ухудшатся значения остальных DOP вне этой точки расположения ОП. На рис. 9 представлены карты HDOP, VDOP и PDOP в рабочей зоне, рассчитанные для полученной на рис. 8 по критерию VDOP топологии БС в точках местоположения ОП из заданной сетки на плоскости $D \times D$ с шагом 10 м при фиксированной высоте ОП 3 м.

5. Заключение

Представленная модель позволяет производить поиск оптимальной в вероятностном смысле трёхмерной топологии размещения четырёх опорных базовых станций локальной дальномерной системы позиционирования по требуемому геометрическому фактору методом перебора для заданного набора исходных данных. Модель позволяет варьировать конфигурацию

рабочей области и сетку расположения опорных базовых станций. При решении прикладных задач научно-обоснованного планирования мест размещения базовых станций в разработанную модель могут быть введены необходимые ограничения для снижения степеней свободы при осуществляемом поиске. Для практических применений модели при поиске топологии для зоны позиционирования 5G с повышенной точностью перебор должен осуществляться для предположения о расположении устройства в критической для него области рабочей зоны и с учётом имеющихся территориальных и иных ограничений на возможные места размещения БС. В качестве направлений дальнейших исследований при поиске топологии локальной системы позиционирования 5G по заданному геометрическому фактору следует: во-первых, снять ограничение на предположение о фиксированном расположении устройства в геометрическом центре периметра установки базовых станций; во-вторых, рассмотреть комбинацию дальномерных и угломерных измерений ввиду выявленных ограничений локальной дальномерной си-

стемы позиционирования из четырёх БС в части достижения адекватных значений вертикального геометрического фактора.

Литература

1. *Zekavat R., Buehrer R.M.* Handbook of position location: Theory, practice and advances, 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2019. 1376 p.
2. *Campos R.S., Lovisolo L.* RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015. 369 p.
3. *Sand S., Dammann A., Mensing C.* Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley, 2014. 276 p.
4. *Grewal M.S., Andrews A.P., Barton C.G.* Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, 4th Edition. Wiley, 2020. 608 p.
5. *Bensky A.* Wireless Positioning Technologies and Applications (GNSS Technology and Applications). Artech House, 2008. 305 p.
6. *Poisel R.A.* Electronic Warfare Target Location Methods, 2nd Edition. Artech House, 2012. 450 p.
7. *O'Donoghue N.* Emitter Detection and Geolocation for Electronic Warfare. Artech House, 2019. 348 p.
8. *Mahafza B.R.* Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, 3rd Edition. Chapman and Hall/CRC, 2013. 772 p.
9. *Charvat G.L.* Small and Short-Range Radar Systems. CRC Press, 2017. 428 p.
10. *Bar-Shalom Y., Li X.R., Kirubarajan T.* Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. Wiley, 2001. 584 p.
11. *Kay S.M.* Fundamentals of Statistical Processing, Volume I: Estimation Theory. Pearson, 1993. 608 p.
12. *Nguyen N.H., Dogancay K.* Signal Processing for Multistatic Radar Systems: Adaptive Waveform Selection, Optimal Geometries and Pseudolinear Tracking Algorithms 1st Edition. Academic Press, 2019. 188 p.
13. *Фокин Г.А.* Технологии сетевого позиционирования. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2020. 558 с.
14. *Фокин Г.А.* Технологии сетевого позиционирования 5G. Москва: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
15. *Первушин Р.В., Терсин В.В.* Использование суммарно-дальномерной системы разнесённого приёма для измерения трёх географических координат низколетящих воздушных объектов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 2. С. 5–15.

Поступила 8 октября 2021 г.

English

SEARCH MODEL FOR TOPOLOGY OF LOCAL RANGE-MEASURING SYSTEM IN 5G POSITIONING AS PER PRE-SET GEOMETRIC FACTOR

Grigory Alekseevich Fokin — PhD, Associate Professor of Department of Radioreception and Broadcasting, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications¹.
E-mail: grihafokin@gmail.com

Address: 193232, Russian Federation, St. Petersburg, Bolshhevikov Ave., 22/1.

Abstract: Location sensing of devices in landline mobile communications networks is in demand when signals of global navigation satellite systems are not available for any reason, for example, in case of no direct visibility indoors, etc. If so then location sensing problems can be solved by local positioning systems where base stations of radio access networks act as sources or receivers of navigation signals. Currently, device network positioning became a trend of concern in research due to development of 5 and next-generation networks. Capabilities to increase positioning accuracy in 5G networks is also bound by topology of base stations defined by concept of ultra-dense networks. Raising density of base stations enables to enhance positioning accuracy due to geometrical factor. This paper discusses development and implementation of search model for topology to place four reference base stations of local range-measuring system for device location sensing as per preset geometric factor as in the case of 5G positioning area with enhanced accuracy. The search for topology is exercised on the assumption of device's fixed location in positioning area by search method of possible configurations for base stations by the criterion of preset geometric factor in horizontal and vertical planes. Search results are represented by arrangements of geometric parameters that enable to choose probability-wise optimal topology for locations of base stations in positioning area. Geometric factors' evaluation is done for found topology that enables to update positioning area spots in which preset accuracy requirements are achieved. Search results for topology of range-measuring positioning system by the criterion of geometric factor in horizontal and vertical planes revealed the contradiction: in the first instance, reference base stations should be spaced apart at the utmost while in the second instance, they should be clustered in the area of device supposed location.

Keywords: 5G, HDOP, VDOP, geometric factor, range-measuring method, positioning.

References

1. *Zekavat R., Buehrer R.M.* Handbook of position location: Theory, practice and advances, 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2019. 1376 p.
2. *Campos R.S., Lovisolo L.* RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015. 369 p.
3. *Sand S., Dammann A., Mensing C.* Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley, 2014. 276 p.
4. *Grewal M.S., Andrews A.P., Barton C.G.* Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, 4th Edition. Wiley, 2020. 608 p.
5. *Bensky A.* Wireless Positioning Technologies and Applications (GNSS Technology and Applications). Artech House, 2008. 305 p.
6. *Poisel R.A.* Electronic Warfare Target Location Methods, 2nd Edition. Artech House, 2012. 450 p.
7. *O'Donoghue N.* Emitter Detection and Geolocation for Electronic Warfare. Artech House, 2019. 348 p.
8. *Mahafza B.R.* Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, 3rd Edition. Chapman and Hall/CRC, 2013. 772 p.
9. *Charvat G.L.* Small and Short-Range Radar Systems. CRC Press, 2017. 428 p.
10. *Bar-Shalom Y., Li X.R., Kirubarajan T.* Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. Wiley, 2001. 584 p.
11. *Kay S.M.* Fundamentals of Statistical Processing, Volume I: Estimation Theory. Pearson, 1993. 608 p.
12. *Nguyen N.H., Dogancay K.* Signal Processing for Multistatic Radar Systems: Adaptive Waveform Selection, Optimal Geometries and Pseudolinear Tracking Algorithms 1st Edition. Academic Press, 2019. 188 p.
13. *Fokin G.A.* Network positioning technologies. St. Petersburg: SPbSUT, 2020. 558 p.
14. *Fokin G.A.* 5G network positioning technologies. Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2021. 456 p.
15. *Pervushin R.V., Tersin V.V.* The use of a total-rangefinder system of spaced reception for measuring three geographical coordinates of low-flying air objects. Radiotekhnicheskiye i telekommunikacionnyye sistemy. 2021. No. 2. Pp. 5–15.