



РАЗМЕЩЕНИЕ УСТРОЙСТВ СВЕРХПЛОТНОЙ СЕТИ В ПРОСТРАНСТВЕ. ЧАСТЬ 2. ПОИСК ПО КРИТЕРИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА

Г. А. Фокин*, А. Е. Кучерявый

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

* Адрес для переписки: grihafokin@gmail.com

Аннотация—Настоящая работа является продолжением исследования, посвященного математическому и имитационному моделированию методов поиска мест размещения устройств базовых станций gNB в пространстве по критерию геометрического фактора снижения точности позиционирования пользовательского устройства UE. Задача в такой постановке актуальна и востребована для сверхплотных сетей миллиметрового (30–300 ГГц) и субмиллиметрового или терагерцового диапазона (0,3–3 ТГц) пятого и последующих поколений соответственно. В качестве критерия пространственного размещения инфраструктуры стационарных сетевых устройств, выступающих в роли базовой станции, точки доступа и/или ретранслятора/маршрутизатора, выступает геометрический фактор снижения точности позиционирования DOP пользовательского устройства. На основе формализованного в предыдущей работе алгоритмического, методического и программного обеспечения для поиска мест размещения gNB в пространстве по критерию геометрических факторов снижения точности позиционирования в горизонтальной плоскости HDOP, вертикальной плоскости VDOP и по местоположению в пространстве PDOP в настоящем исследовании снимается ограничение о фиксированном размещении UE в пространстве, а также предусмотрено увеличение количества gNB более пяти, для которых осуществляется поиск мест размещения. **Предмет исследования.** Статья посвящена математическому и имитационному моделированию методов поиска мест размещения устройств базовых станций в пространстве по критерию геометрического фактора снижения точности позиционирования пользовательского устройства. **Метод.** Итеративный перебор всевозможных мест размещения стационарных базовых станций и подвижных пользовательских устройств с заданным шагом в пространстве для минимизации геометрического фактора снижения точности позиционирования в выбранной области обслуживания. **Основные результаты.** Результатом настоящей работы является формализация алгоритмического, методического и программного обеспечения для получения итоговой конфигурации мест размещения заданного числа стационарных базовых станций в выбранной области обслуживания. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют осуществлять поиск и обоснование мест размещения базовых станций и/или маршрутизаторов в сценариях сверхплотного размещения пользовательских устройств в насыщенном биомассами пространстве.

Ключевые слова—сверхплотная сеть, размещение устройств в пространстве, геометрический фактор снижения точности позиционирования, HDOP, VDOP, PDOP.

Информация о статье

УДК 621.396.969.1

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 28.11.2022, принята к печати 27.12.2022.

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



DEPLOYMENT OF ULTRA DENSE NETWORK DEVICES IN SPACE. PART 2. SEARCH USING GEOMETRIC FACTOR

G. Fokin*, A. Kucheryavy

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

*Corresponding author: grihafokin@gmail.com

Abstract—This work is a continuation of the study devoted to mathematical and simulation modeling of methods for searching for locations of gNB base station devices in space according to the criterion of the geometric factor of reducing the positioning accuracy of the user device UE. The task in this formulation is relevant and in demand for ultra-dense networks of the millimeter (30–300 GHz) and submillimeter or terahertz band (0.3–3 THz) of the fifth and subsequent generations, respectively. As a criterion for the spatial placement of the infrastructure of fixed network devices acting as a base station, access point and / or repeater / router, the geometric factor of reducing the positioning accuracy of the DOP (Dilution of Precision) of the user device is used. Based on the algorithmic, methodological and software, formalized in the previous work for searching for gNB placements in space according to the criterion of geometric factors for reducing positioning accuracy in the horizontal plane HDOP (Horizontal DOP), the vertical plane VDOP (Vertical DOP) and by location in the PDOP (Position DOP) space, this study removes the restriction on the fixed placement of UEs in space, and also provides for an increase in the number of gNBs more than five, for which placements are searched. **Subject of study.** The article is devoted to mathematical and simulation modeling of methods for searching for locations of base station devices in space according to the criterion of a geometric factor for reducing the positioning accuracy of a user device. **Method.** Iterative enumeration of all possible locations of stationary base stations and mobile user devices with a given step in space to minimize the geometric factor of reducing positioning accuracy in the selected service area. **Main results.** The result of this work is the formalization of algorithmic, methodological and software to obtain the final configuration of locations for a given number of stationary base stations in the selected service area. **Practical significance.** The results obtained make it possible to search for and justify the locations of base stations and/or routers in scenarios of ultra-dense placement of user devices in a space saturated with biomass.

Keywords—super-dense network, placement of devices in space, geometric factor of positioning accuracy reduction, HDOP, VDOP, PDOP.

Article info

Article in Russia.

Received 28.11.2022, accepted 27.12.2022.

For citation: Fokin G., Kucheryavy A.: Deployment of Ultra Dense Network Devices in Space. Part 2. Search Using Geometric Factor // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 3. pp. 27–37. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-4-27-37.



Введение

Проведенный в первой части исследования анализ моделей и методов поиска мест размещения стационарных базовых станций gNB по критерию минимизации геометрического фактора снижения точности DOP (*Dilution of Precision*) позиционирования пользовательского устройства UE показал, что данный подход является многопараметрическим. Решение многопараметрической задачи методом перебора осуществляется так называемыми «жадными алгоритмами» (*greedy algorithm*) и может обеспечить нахождение наиболее подходящей под заданные ограничения конфигурации базовых станций gNB. Сформулируем следующие два принципиальных ограничения из предыдущего проведенного анализа.

Во-первых, найденная конфигурация размещения базовых станций в пространстве удовлетворяла критерию максимизации выбранного целевого критерия DOP. При одном критерии DOP, например, по местоположению в пространстве PDOP (*Position DOP*), оставшиеся геометрические факторы снижения точности в горизонтальной плоскости HDOP (*Horizontal DOP*) и вертикальной плоскости VDOP (*Vertical DOP*) получались в лучшем случае «неплохими».

Во-вторых, найденная конфигурация размещения базовых станций в пространстве оказывалась наилучшей для заданного фиксированного расположения пользовательского устройства UE в центре зоны обслуживания. В точках, отличных от центра зоны обслуживания, выбранных с заданным шагом на плоскости, целевой и оставшиеся два геометрических фактора снижались; анализ DOP при варьировании UE по высоте не проводился.

Для анализа сверхплотных сетей пятого и последующих поколений первое ограничение целесообразно принять и далее проводить поиск мест размещения gNB исключительно по наиболее интегральному критерию их местоположения в пространстве PDOP. Что касается второго ограничения, то его в настоящей работе снят, а поиск координат gNB проводится методом итеративного перебора всевозможных мест размещения стационарных базовых станций и подвижных пользовательских устройств с заданным шагом в пространстве для минимизации PDOP в выбранной области обслуживания. Также, поскольку наиболее равномерную рабочую область по критериям HDOP, VDOP и PDOP, а также наименьшие значения геометрического фактора снижения точности по горизонтали, вертикали и в пространстве обеспечивает комбинированный дальномерно (ДМ) – угломерный (УМ) метод, поиск мест размещения базовых станций методом перебора будем далее проводить для совместных ДМ-УМ (TOA-AOA: *Time of Arrival – Angle of Arrival*) первичных измерений.

Алгоритм и методики поиска размещения устройств в пространстве

Алгоритмическое методическое и программное обеспечение поиска мест размещения в пространстве рассчитано на использование n базовых станций gNB при оценке координат одного пользовательского устройства UE с варьируемым в заданной области местоположением. Исходными данными являются: размер области расположения gNB и UE, которые задаются параметрами $sizeh$ и $UEsizeh$



соответственно; максимальная высота gNB sizev; высота расположения UE UEsizhev; шаг сетки местоположения UE на плоскости UEsteph; максимальное число итераций поиска положения одной gNB N; критерий поиска dop_case (HDOP, VDOP, PDOP); начальный шаг поиска размещения gNB на плоскости dSizeHDefault; начальный шаг поиска положения gNB по высоте dSizeVDefault; число циклов алгоритма поиска Nopt; число gNB n. Таблица 1 содержит пространственные параметры процедур поиска мест размещения gNB [1].

Таблица 1.

Пространственные параметры процедур поиска

Обозначение	Описание параметра
n	число базовых станций gNB в заданной области пространства
sizeh	максимальная протяженность области расположения gNB по горизонтали (на плоскости xy)
UEsizeh	максимальная протяженность области расположения UE по горизонтали (на плоскости xy)
sizev	максимальная протяженность области расположения gNB по вертикали (по высоте z)
UEsizev	максимальная протяженность области расположения UE по вертикали (по высоте z)
UEsteph	шаг сетки возможных расположений UE по горизонтали (на плоскости xy)
dSizeHDefault	начальный шаг оптимизации положения gNB по горизонтали (на плоскости xy)
dSizeVDefault	начальный шаг оптимизации положения gNB по вертикали (по высоте z)

Исходные данные для заданной области поиска ниже:

```

sizeh = 500;    % размер стороны квадратной области расположения gNB, м
sizev = 100;   % максимальная высота расположения gNB, м
UEsizeh = sizeh; % размер стороны квадратной области расположения UE, м
UEsizev = sizev; % высота расположения UE, м
UEsteph = 25;  % шаг сетки местоположения UE на плоскости, м
UEstepv = 25;  % шаг сетки местоположения UE на плоскости, м
dop_case = 'PDOP'; % геометрический фактор, по которому выполняется поиск
N = 5;         % макс. число итераций оптимизации положения одной gNB
Nopt = 3;      % число циклов алгоритма оптимизации
% критерий поиска расположений gNB по геометрическому фактору
% calc_case='TOA';
% calc_case='TDOA';
% calc_case='DOA';
calc_case='TOA-DOA';
% calc_case='TDOA-DOA';

```

Модель проводит поиск размещений gNB по критерию минимизации *среднего* DOP по всем точкам расположения UE из сетки, которая задается как $X_{ue} = [-UEsizeh/2:UEsteph:UEsizeh/2]$, $Y_{ue} = [-UEsizeh/2:UEsteph:UEsizeh/2]$, при фиксированной высоте UEsizhev. Процесс поиска положения UE начинается с за-



дания начальных координат gNB. Первые 4 gNB располагаются равномерно относительно начала координат на расстоянии $sizeh/2$ и высоте $sizev/2$. Дополнительные gNB могут располагаться в начале координат либо в точке со случайными координатами из заданной области положения gNB. В первом цикле алгоритма поиска положения базовых станций проводится сначала для 4-х Gnb (как минимального числа gNB для позиционирования UE в пространстве) без учета дополнительных gNB, затем для каждой дополнительной gNB. В последующих $N_{opt}-1$ циклах поиск размещений проводится с учетом всех gNB. Каждая итерация поиска для отдельной gNB включает следующие процедуры:

1. Сначала осуществляется выбор начальных координат gNB, шага поиска на плоскости $dSizeHDefault$ и высоте $dSizeVDefault$.

2. Далее проводится расчет DOP_0 для текущих координат всех задействованных gNB.

3. Затем вычисляются координаты (x_i, y_i, z_i) для N_{next} точек в окрестности выбранной k -й gNB с координатами (x_0, y_0, z_0) . Поиск может проводиться на плоскости, тогда точки (x_i, y_i, z_i) располагаются на окружности (рис. 1) с радиусом d_h и центром (x_0, y_0, z_0) :

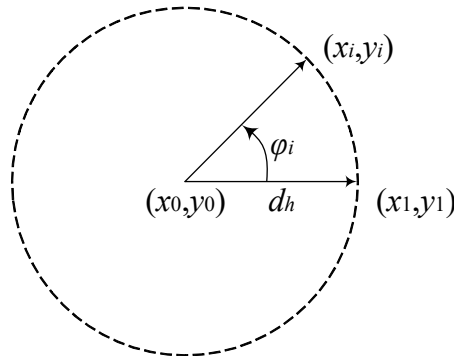


Рис. 1. Модель окрестности поиска

$$x_i = x_0 + \cos(\varphi_i) d_h; \quad (1)$$

$$y_i = y_0 + \sin(\varphi_i) d_h; \quad (2)$$

$$z_i = z_0. \quad (3)$$

Поиск может проводиться по высоте, для этого рассчитываются координаты только двух точек:

$$x_1 = x_2 = x_0; \quad (4)$$

$$y_1 = y_2 = y_0; \quad (5)$$

$$z_1 = z_0 - d_v; z_2 = z_0 + d_v. \quad (6)$$

Поиск может проводиться в пространстве. В этом случае точки располагаются на поверхности эллипсоида с горизонтальными полуосями d_h , вертикальной полуосью d_v и центром точке (x_0, y_0, z_0) :



$$x_i = x_0 + \cos(\theta_i) \cos(\varphi_i) \cos(\theta_i) d_h; \quad (7)$$

$$y_i = y_0 + \cos(\theta_i) \sin(\varphi_i) d_h; \quad (8)$$

$$z_i = z_0 + \sin(\theta_i) d_v; \quad (9)$$

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{n_{next}} i, i = 0 \dots N_{next} - 1; \quad (10)$$

$$\theta_i = \frac{\pi}{n_{next}} i, i = -\frac{N_{next}}{2} \dots \frac{N_{next}}{2}; \quad (11)$$

где $[x_i, y_i, z_i]$ – координаты i -й точки на плоскости в окрестности выбранной gNB; $[x_0, y_0, z_0]$ – начальные координаты gNB; φ_i – азимутальный угол i -й точки; θ_i – угол места i -й точки; d_h – текущий шаг поиска на плоскости; d_v – текущий шаг поиска по высоте. Если координата i -й точки выходит за пределы допустимых значений, то она приравнивается этому пределу. По завершению этого шага имеется N_{next} конфигураций gNB, которые отличаются координатами k -й gNB.

4. Далее проводится расчет DOP_{next} для каждой конфигурации, полученной на предыдущем шаге. Среди полученных значений DOP_{next} находится минимальное значение DOP_{next_min} и соответствующая ему конфигурация gNB.

5. Если выполняется условие $DOP_{next_min} < DOP_0$, то соответствующая этому DOP_{next_min} конфигурация gNB выбирается в качестве начальных координат gNB для следующей итерации процесса поиска и алгоритм продолжает поиск положения k -й gNB согласно п. 2–6.

6. Если $DOP_{next_min} > DOP_0$, то уменьшается шаг поиска положения на плоскости и/или по высоте:

$$d_h = \mu_h d_h, d_v = \mu_v d_v, \mu_h < 1, \mu_v < 1; \quad (12)$$

Коэффициенты уменьшения шага поиска μ_h и μ_v подобраны эмпирически и равны 0,7 и 0,85 соответственно. Алгоритм продолжает работу согласно п. 2–6 до достижения условия завершения работы.

7. Процесс поиска положения выбранной k -й gNB завершается, если выполнено максимальное число итераций, либо шаг поиска положения на плоскости и/или по высоте становится меньше 1 м.

Далее приведен пример результатов расчета для следующих исходных данных: размер области расположения gNB $size_h = 500$ м; размер области расположения пользовательского устройства $UEsize_h = 500$ м; максимальная высота gNB $size_v = 100$ м; высоты, на которых могут находиться (например, на стадионе) пользовательские устройства $UEsize_v = 100$ м; шаг сетки местоположения UE на плоскости $UEsteph = 25$ м; максимальное число итераций поиска положения одной gNB $N = 5$; критерий поиска $dop_case = PDOP$; начальный шаг поиска положения на плоскости $dSizeHDefault = 10$ м; начальный шаг поиска положения по высоте $dSizeVDefault = 1$ м; число циклов алгоритма поиска $Nopt = 3$; число gNB $n = 6$. В процессе работы алгоритма осуществляется поиск положения пер-



вых 4-х gNB по критерию минимального PDOP, далее в конфигурацию gNB добавляются следующие gNB и проводится поиск их размещения. Последующие циклы работы алгоритма проводятся с учетом всех gNB.

Рис. 2 иллюстрирует конфигурацию шести gNB, полученную при поиске их мест размещения по критерию минимизации PDOP.

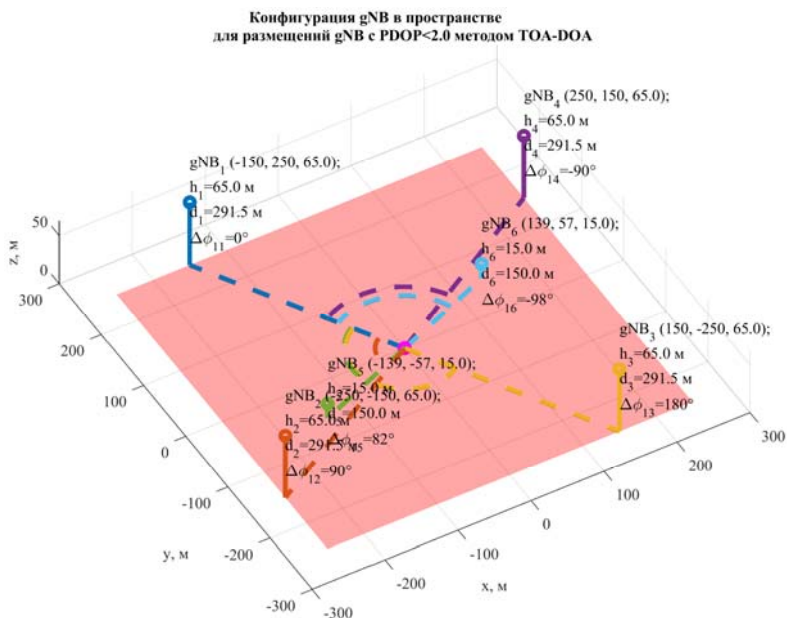


Рис. 2. Конфигурация gNB по критерию минимизации PDOP

Рис. 3 иллюстрирует карты HDOP, VDOP и PDOP в пределах рабочей области, которая выделена красным цветом.

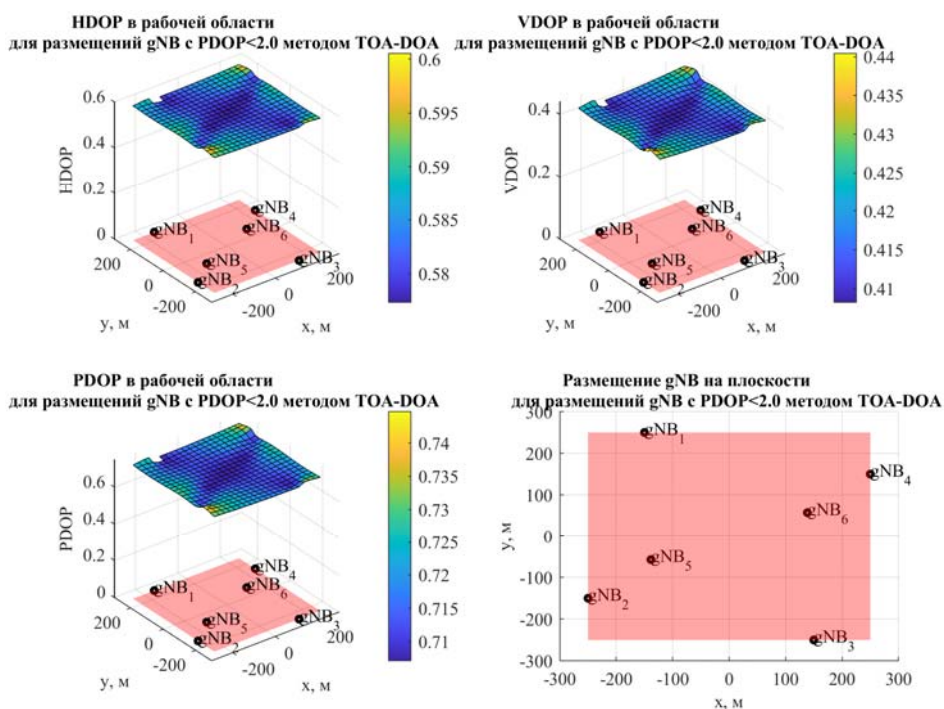


Рис. 3. Средние значения HDOP, VDOP, PDOP в рабочей области



Рис. 4 иллюстрирует распределения HDOP, VDOP и PDOP и контуры рабочей области, удовлетворяющие заданному DOP.

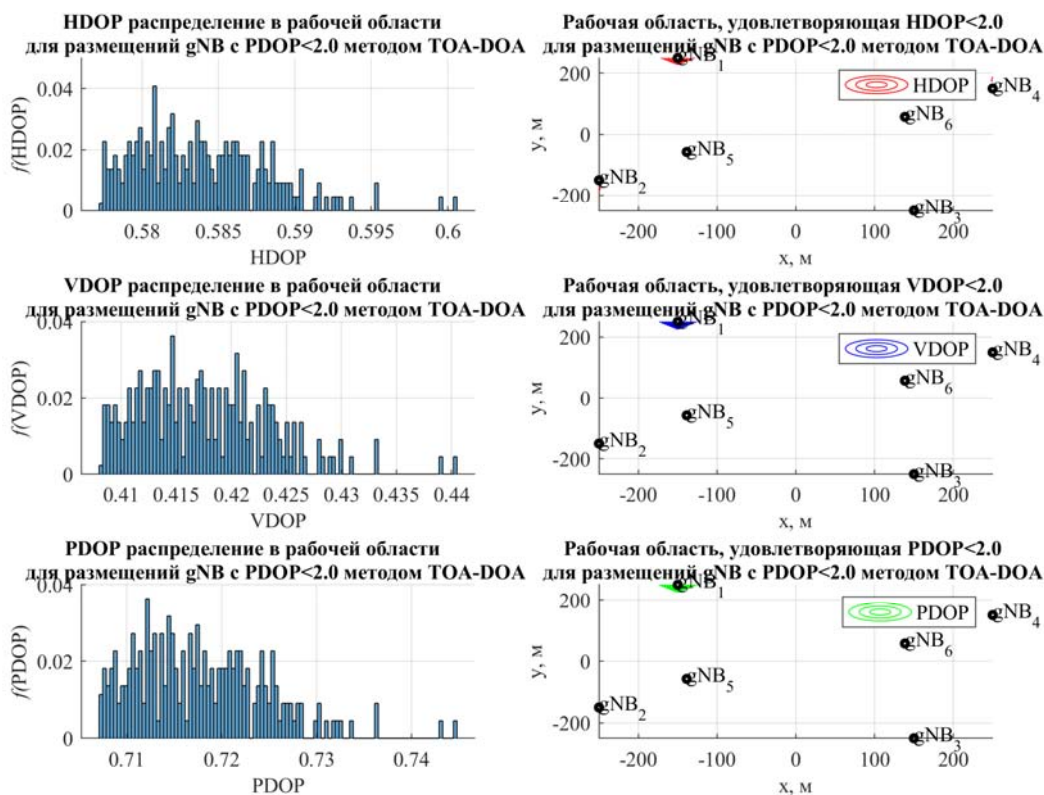


Рис. 4. Распределения HDOP, VDOP и PDOP в рабочей области

Рис. 5 иллюстрирует график изменения PDOP в течение всего процесса поиска размещений gNB.

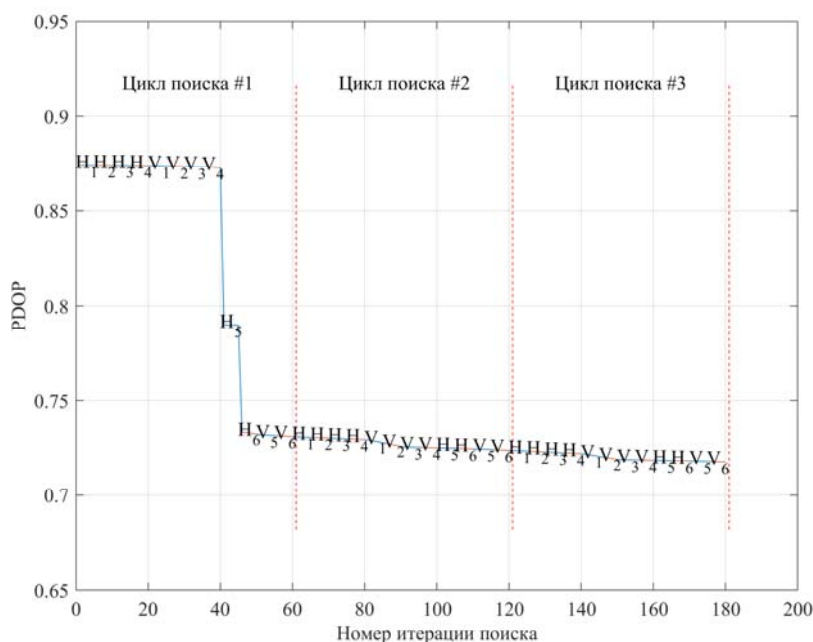


Рис. 5. PDOP в течение процесса поиска мест размещения gNB



На данном графике символами Н и V обозначены процессы поиска размещения gNB на плоскости и по высоте соответственно, а индексом обозначен номер gNB. Границы изменения PDOP для каждого процесса обозначены цветами. Рис. 6 иллюстрирует пример сетки размещений UE при поиске мест размещения gNB.

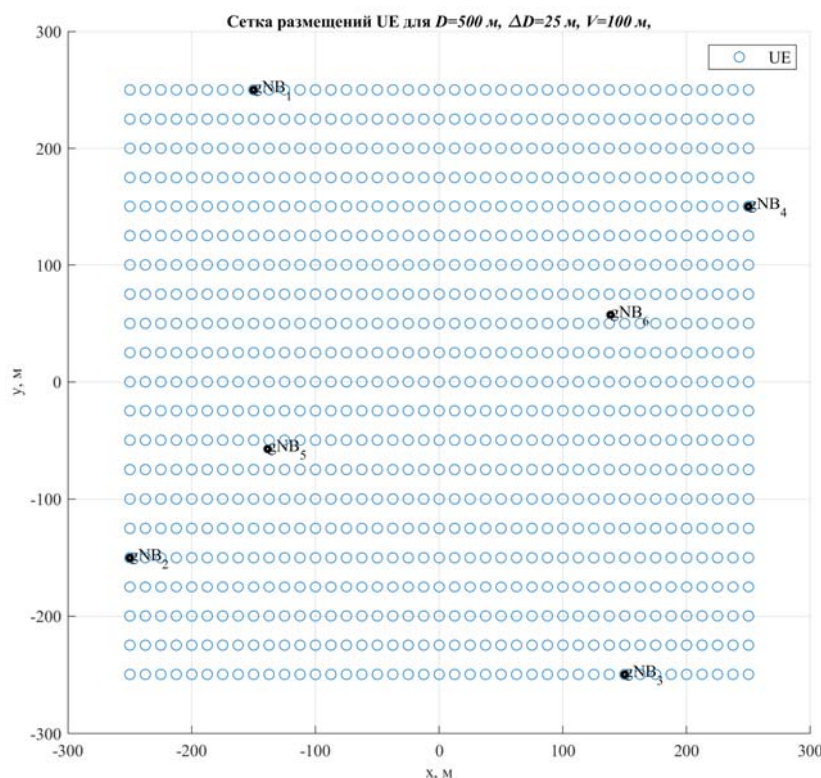


Рис. 6. Пример сетки размещений UE и мест размещения gNB

Рис. 7 (см. ниже) иллюстрирует рабочие области на различных высотах расположения UE в заданной области.

Заключение

В настоящей работе разработано алгоритмическое, методическое и программное обеспечение для итеративного перебора всевозможных мест размещения стационарных базовых станций и подвижных пользовательских устройств с заданным шагом в пространстве для минимизации геометрического фактора снижения точности позиционирования в выбранной области обслуживания. Реализованный инструментарий позволяет осуществлять поиск и обоснование мест размещения базовых станций и/или маршрутизаторов в сценариях сверхплотного размещения пользовательских устройств в насыщенном биомассами пространстве. Для учета и компенсации влияния биомасс на организацию радиолиний прямой видимости при поиске мест размещения можно исключить области пространства, в которых ожидается мешающее воздействие для терагерцового диапазона.

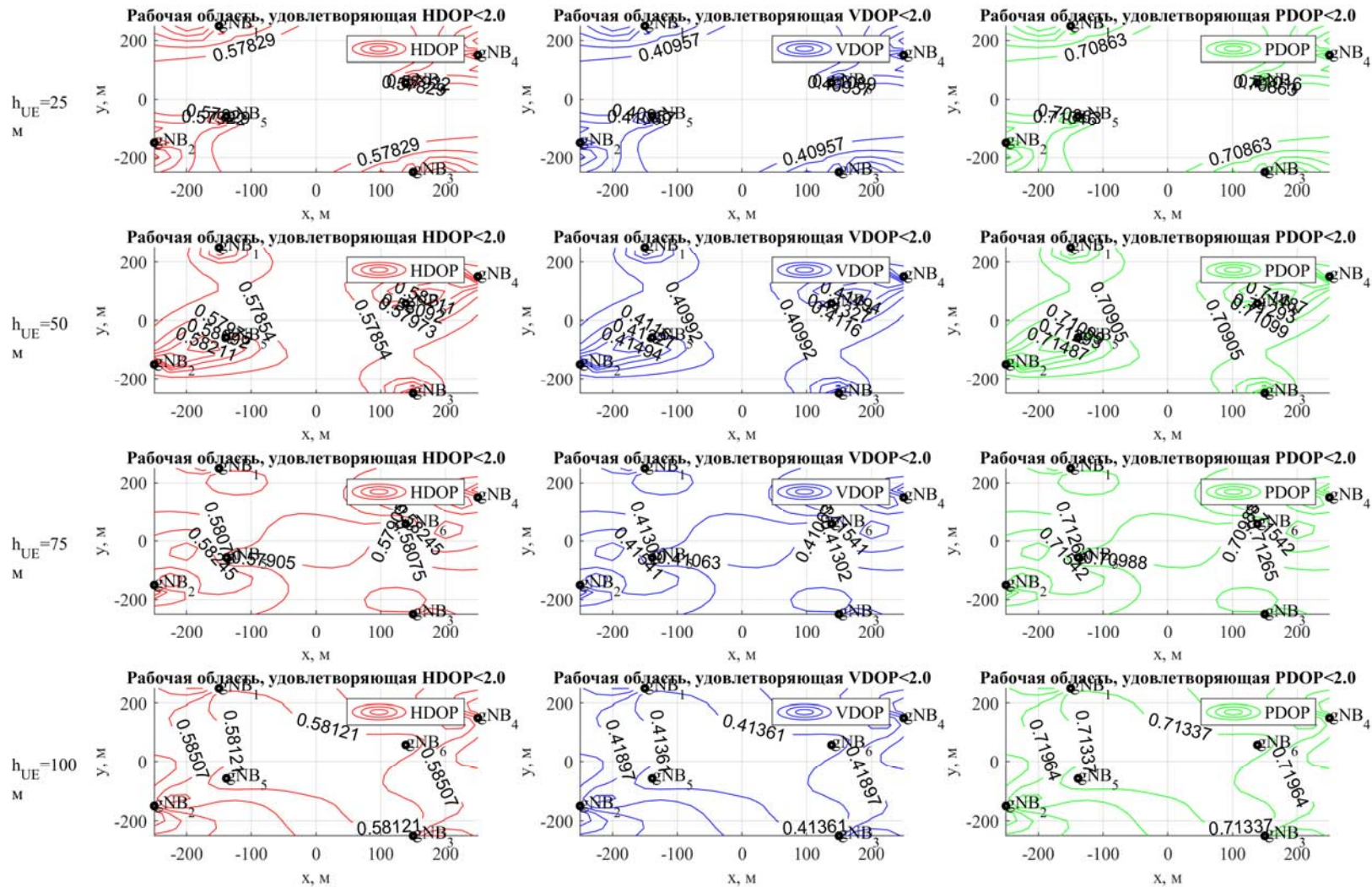


Рис. 7. Рабочие области на разных высотах UE



Научное исследование в ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича выполнено в рамках мегагранта Минобрнауки по соглашению № 075-12-2022-1137.

Литература

1. Фокин Г. А. Программный модуль поиска и оптимизации топологии локальной системы позиционирования по заданному геометрическому фактору для объекта с варьируемым в данной области местоположением. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667737, 02.11.2021. Правообладатель СПбГУТ. Заявка № 2021667003 от 26.10.2021.

References

1. Fokin G.A. A software module for searching and optimizing the topology of a local positioning system by a given geometric factor for an object with a location that varies in a given area. Certificate of state registration of the computer program No. 2021667737, 02.11.2021. Copyright holder SPbSUT. Application No. 2021667003 dated 10/26/2021.

Фокин Григорий Алексеевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, grihafokin@gmail.com

Fokin Grigoriy A.

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, grihafokin@gmail.com

Кучерявый Андрей Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, akouch@mail.ru

Koucheryavy Andrey E.

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Head of the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, akouch@mail.ru