

EDN: EDHWTJ

УДК 527.8

Methodology for Selecting the Configuration of Ground Base Stations of a Local Navigation System to Provide the Lowest Errors of Navigation Definitions

Andrey B. Gladyshev^{*a}, Maksim A. Golubyatnikov^b,
Vasily N. Ratuschnyak^a and Davyd D. Klikno^a

^a*Siberian Federal University*

Krasnoyarsk, Russian Federation

^b*Military Training and Research Center of the Air Force*

«Air Force Academy

named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»

Voronezh, Russian Federation

Received 05.04.2023, received in revised form 28.08.2023, accepted 29.08.2023

Abstract. In this article presents a methodology for choosing the best configuration of ground base stations of a local navigation system. Local navigation systems are actively used for navigation and time support of ground and air objects, the accuracy of determining the coordinates of which depends on the magnitude of the geometric factor – a measure of the deterioration of accuracy in the navigation receiver. The relative location of ground base stations directly affects the value of the geometric factor, and, consequently, the accuracy of determining the coordinates in the navigation equipment of consumers. However, it should be taken into account that the choice of the relative location (configuration) of ground base stations is influenced by the energy availability of signals from ground base stations in the navigation zone, the terrain features on the routes “ground base station – navigation equipment of consumers”, the required size of the area of operation of the local navigation system, the size of the zone in which it is possible to place a ground base station, the presence of direct radio visibility from the ground base station to the navigation equipment of the carriers, attenuation of the signals of the local positioning system on the route of propagation of radio waves “ground base station – navigation equipment of consumers”. This technique takes into account the above limitations and suggests using the arithmetic mean of the geometric factor in the navigation zone as an indicator of efficiency.

Keywords: local navigation system, geometric factor, consumer navigation equipment, accuracy of navigation definitions.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: a-ghonass@yandex.ru



Методика выбора конфигурации наземных базовых станций локальной навигационной системы для обеспечения наименьшей погрешности навигационных определений

**А. Б. Гладышев^а, М. А. Голубятников^б,
В. Н. Ратушняк^а, Д. Д. Клико^а**

*^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

*^бВоенный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
Российская Федерация, Воронеж*

Аннотация. В данной статье приведена методика выбора наилучшей конфигурации наземных базовых станций локальной навигационной системы. Локальные навигационные системы активно применяются для навигационно-временного обеспечения наземных и воздушных объектов, точность определения координат которых зависит от значения геометрического фактора. Взаимное расположение наземных базовых станций напрямую влияет на значение геометрического фактора, а следовательно, на точность определения координат в навигационной аппаратуре потребителей. Однако необходимо учитывать, что на выбор взаимного расположения (конфигурации) наземных базовых станций влияют энергетическая доступность сигналов от наземных базовых станций в зоне навигации, особенности рельефа местности на трассах «наземная базовая станция – навигационная аппаратура потребителей», требуемый размер зоны действия локальной системы навигации, размеры зоны, в которой возможно размещение базовых станций, наличие прямой радиовидимости от базовых станций до потребителя, ослабление сигналов на трассе распространения радиоволн. Данная методика учитывает приведенные выше факторы и в качестве показателя эффективности предлагает использовать среднее арифметическое значение геометрического фактора в зоне навигации.

Ключевые слова: локальная навигационная система, геометрический фактор, навигационная аппаратура потребителей, точность навигационных определений.

Цитирование: Гладышев А. Б. Методика выбора конфигурации наземных базовых станций локальной навигационной системы для обеспечения наименьшей погрешности навигационных определений / А. Б. Гладышев, М. А. Голубятников, В. Н. Ратушняк, Д. Д. Клико // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(7). С. 774–782. EDN: EDHWTJ

Введение

В настоящее время локальные навигационные системы (ЛНС) активно применяются для навигационно-временного обеспечения наземных и воздушных объектов в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) по различным причинам (городская застройка, горная местность, применение противником или своими войсками средств радиоэлектронной борьбы).

Размещение наземных базовых станций (НБС), которые являются элементами ЛНС, зависит от многих взаимозависимых параметров, таких как энергетический потенциал НБС, особенности рельефа местности на трассах «НБС-навигационная аппаратура потребителей (НАП)», требуемый размер зоны действия ЛНС, размеры зоны, в которой возможно размещение НБС, дальность прямой радиовидимости от НБС до НАП, ослабление сигналов ЛНС на трассе распространения радиоволн (РРВ) «НБС-НАП» [1]. Существующие методики [2, 3] не учитывают все возможные варианты расстановки НБС в зоне их размещения, не учитывают рельеф местности и дальность прямой радиовидимости. Поэтому задача по разработке методики выбора конфигурации наземных базовых станций локальной навигационной системы для улучшения точности определения координат НАП является особенно актуальной.

Цель работы – разработка методики выбора конфигурации НБС ЛНС для повышения эффективности применения НАП за счет уменьшения погрешности определения координат в условиях отсутствия сигналов ГНСС.

С целью удобства восприятия дальнейшего материала введём следующие определения:

- зона действия ЛНС – участок местности, в любой точке которого одновременно присутствуют сигналы минимум от трёх НБС, с уровнем мощности, позволяющим принять их в НАП;

- зона расположения НБС – участок местности, на котором имеется возможность разместить и обеспечить непрерывную работу всех НБС из состава ЛНС;

- геометрический фактор (ГФ) является количественной оценкой влияния взаимного расположения НБС на точность определения координат НАП в зоне действия ЛНС. Геометрический фактор показывает, во сколько раз ухудшится точность определения координат НАП в зоне действия ЛНС при заданной расстановке НБС. Данное ухудшение точности определения координат происходит на этапе вторичной обработки информации в НАП [4]. При этом для оценки точности определения горизонтальных координат используется значение горизонтального ГФ [2, 3]. Значение ГФ, превышающее единицу, характеризует ухудшение точности определения координат в НАП [5];

- среднеарифметическое значение геометрического фактора зоны действия ЛНС рассчитывается путем вычисления значения геометрического фактора для каждого участка местности из зоны действия ЛНС, последующего сложения значений геометрического фактора данных участков местности из зоны действия ЛНС и вычисления частного от количества участков местности из зоны действия ЛНС.

В качестве показателя эффективности размещения элементов локальной навигационной системы предлагается использовать наименьшее значение геометрического фактора [6]. Данный показатель является комплексным, так как учитывает, а следовательно, позволяет проводить детальный анализ влияния таких характеристик, как дальность прямой видимости,

энергетическая доступность, перекрытие сигнала от НБС до НАП рельефом местности, на эффективность разворачиваемой ЛНС.

Расчет геометрического фактора и выбор конфигурации НБС с минимальным значением геометрического фактора осуществляется путем последовательного решения следующих частных задач:

- 1) разбиение зоны действия ЛНС и зоны расположения НБС на отдельные точки;
- 2) определение точек из зоны расположения НБС, пригодных для размещения НБС;
- 3) составление всех возможных конфигураций (вариантов размещения) НБС с учетом их количества;
- 4) расчет для составленных конфигураций НБС среднеарифметического значения геометрического фактора в зоне действия ЛНС;
- 5) выбор конфигурации НБС с наименьшим среднеарифметическим значением геометрического фактора в зоне действия ЛНС.

Разбиение зоны действия ЛНС и зоны расположения НБС на отдельные точки

Зона расположения НБС разбивается на отдельные точки, расстояние между которыми по горизонтальной оси равняется величине Δx , а по вертикальной оси – величине Δy . Общее количество точек рассчитывается по следующей формуле:

$$N = \frac{X}{\Delta x} * \frac{Y}{\Delta y}, \quad (1)$$

где N – количество точек в зоне; X – ширина зоны (м); Y – длина зоны (м); Δx – расстояние между точками по горизонтальной оси (м); Δy – расстояние между точками по вертикальной оси (м).

Общее количество конфигураций НБС (A_n^k) в комбинаторике называется комбинациями размещений из n объектов по k и рассчитывается по формуле:

$$A_n^k = \frac{n!}{(n-k)!}, \quad (2)$$

где n – количество точек в зоне, k – количество НБС из состава ЛНС.

Далее точки в зоне расположения НБС будут обозначаться как i -ая.

С учетом возможности современных процессоров количество точек в зоне расположения НБС не должно превышать 20. Если расстояние между точками по горизонтальной и вертикальной оси будет неприемлемым, предлагается последовательно выполнять приведенную методику, масштабируя зону расположения НБС.

Зона действия ЛНС разбивается на отдельные точки аналогичным способом, и общее количество точек должно быть таким же, как и для зоны расположения НБС.

Далее точка в зоне действия ЛНС будет обозначаться как j -ая.

Определение точек из зоны расположения НБС, пригодных для обеспечения зоны действия ЛНС

Точка является пригодной для расположения НБС только при одновременном выполнении следующих условий:

- обеспечение прямой радиовидимости от точки в зоне расположения НБС до каждой точки зоны действия ЛНС;
- обеспечение энергетической (электромагнитной) доступности навигационных сигналов от точки в зоне расположения НБС до каждой точки зоны действия ЛНС;
- обеспечение условия перекрытия навигационного сигнала от НБС до ЛНС особенностями рельефа местности.

Расстояние прямой радиовидимости i -ой НБС с j -ой ЛНС определяется в соответствии со следующим выражением:

$$D_{\text{пр}ij}[\text{км}] = 4,12 \cdot \left(\sqrt{z_{i\text{НБС}}[\text{М}]} + \sqrt{z_{j\text{ЛНС}}[\text{М}]} \right), \quad (3)$$

где $D_{\text{пр}ij}$ – расстояние прямой видимости; $z_{i\text{НБС}}$ – высота участка из зоны расположения НБС [М]; $z_{j\text{ЛНС}}$ – высота участка из зоны действия ЛНС [М] с учетом поднятия антенны.

Далее рассчитывается расстояние между участками из зоны расположения НБС и участками из зоны действия ЛНС:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_{i\text{НБС}} - x_{j\text{ЛНС}})^2 + (y_{i\text{НБС}} - y_{j\text{ЛНС}})^2 + (z_{i\text{НБС}} - z_{j\text{ЛНС}})^2}, \quad (4)$$

где $x_{i\text{НБС}}, y_{i\text{НБС}}$ – координаты i -го участка местности из зоны расположения НБС; $x_{j\text{ЛНС}}, y_{j\text{ЛНС}}$ – координаты j -го участка из зоны действия ЛНС, и проверяется условие (неравенство):

$$D_{ij} < D_{\text{пр}ij}. \quad (5)$$

Если условие (5) выполняется, то обеспечение прямой радиовидимости НБС с ЛНС для i -го участка из зоны расположения НБС считается выполненным.

Энергетическая (электромагнитная) доступность навигационных сигналов от точки в зоне расположения НБС до каждой точки зоны действия НАП проверяется следующим образом.

Рассчитывается мощность навигационных сигналов в точке из зоны действия ЛНС от всех участков из зоны расположения НБС, при этом значение мощности сигнала $P_{\text{свх}}$ от i -го участка из зоны расположения НБС определяется как:

$$P_{\text{свх},i} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{c,i} \cdot G_{c,i}(\gamma_{\text{нс}}) \cdot G_{\text{ан}}(\beta) \cdot \lambda^2}{(4\pi D_{ij})^2} \right) - L_a [\text{дБ}], \quad (6)$$

где $P_{c,i}$ – излучаемая мощность НБС [Вт]; λ – длина волны сигнала [М]; $G_{c,i}(\gamma_{\text{нс}})$ – зависимость коэффициента усиления антенны передатчика j -ой НБС в вертикальной плоскости от угла $\gamma_{\text{нс}}$; L_{aj} – затухание сигнала НБС в атмосфере [дБ].

Зависимость коэффициента усиления антенны НАП ЛНС в вертикальной плоскости от угла места (наблюдения) НБС определяется как:

$$G_{\text{нап}}(\beta) = G_{\text{ан max}} \cdot F^2(\beta), \quad (7)$$

где $G_{\text{ан}}(\beta)$ – зависимость коэффициента усиления антенны НАП ЛНС в вертикальной плоскости от угла места [раз]; $G_{\text{ан max}}$ – коэффициент усиления антенны НАП ЛНС в максимуме ДН [раз].

Форма главного лепестка нормированной ДН по мощности типовой антенны НАП ЛНС аппроксимируется выражением:

$$F^2(\beta) = \left(\exp \left(-1,38 \left(\frac{\beta}{2\Delta\beta} \right)^2 \right) \right)^2, \quad (8)$$

где β – угол места прихода сигнала от НБС; $2\Delta\beta$ – ширина ДН антенны типовой АП.

Далее сравниваются значения $P_{\text{СВХ}, i}$ с чувствительностью НАП ЛНС [7]. Если $P_{\text{СВХ}, i}$ входит в диапазон чувствительности НАП ЛНС, то условие энергетической доступности для i -ой точки из зоны расположения НБС считается выполненным.

Обеспечение условия неперекрывания навигационного сигнала на трассе «НБС-НАП» особенностями рельефа местности рассчитывается путём построения профиля местности от зоны действия ЛНС.

Составление всех возможных конфигураций (вариантов размещения) НБС

Далее составляются все возможные варианты конфигурации НБС из доступных точек в зоне расположения НБС. На рис. 1 приведен пример конфигураций НБС. Черным цветом отмечена зона расположения НБС, белым – зона действия ЛНС. В данном примере конфигурации из 3 НБС составляются из 6 возможных для размещения точек.

После составления всех возможных вариантов конфигураций НБС в соответствии с выбранным показателем эффективности рассчитывается среднеарифметическое значение геометрического фактора в зоне действия ЛНС.

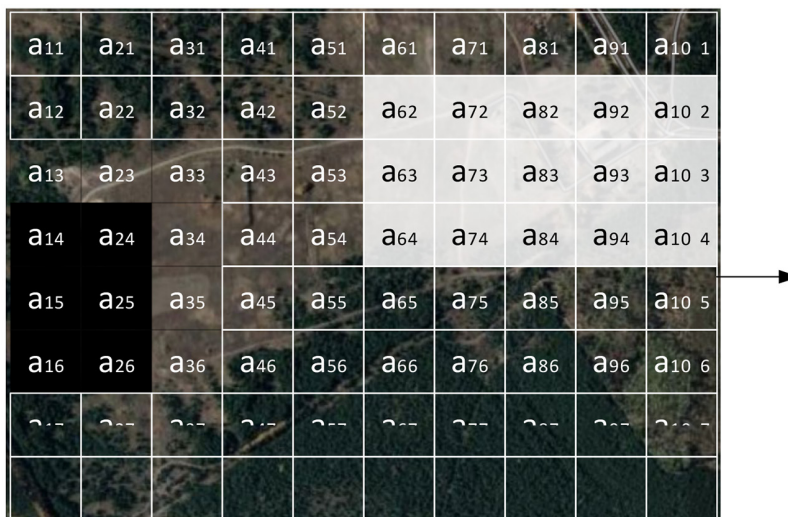


Рис. 1. Пример составления возможных конфигураций НБС

Fig. 1. Example of drawing up possible configurations of the ground base station

**Расчет для составленных конфигураций НБС
среднеарифметического значения геометрического фактора
в зоне действия ЛНС**

Для каждой точки в зоне ЛНС рассчитывается значение геометрического фактора для сформированных конфигураций НБС следующим образом [8]:

$$K_{ij} = \sqrt{D_{xx} + D_{yy}}, \quad (9)$$

где D_{xx} , D_{yy} , D_{zz} – первые три диагональных элемента квадратной четырехмерной матрицы D :

$$D = \begin{vmatrix} D_{xx} & D_{xy}D_{xz} & D_{xb} \\ D_{yx} & D_{yy}D_{yz} & D_{yb} \\ D_{zx} & D_{zy}D_{zz} & D_{zb} \\ D_{bx} & D_{by}D_{bz} & D_{bb} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

$$D = (H^T \cdot H)^{-1}, \quad (11)$$

где H – матрица направляющих косинусов.

Матрица направляющих косинусов H вычисляется по формуле:

$$H = \begin{vmatrix} -\cos(\alpha_1) & -\cos(\beta_1) - \cos(\gamma_1) & 1 \\ -\cos(\alpha_2) & -\cos(\beta_2) - \cos(\gamma_2) & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ -\cos(\alpha_N) & -\cos(\beta_N) - \cos(\gamma_N) & 1 \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где α_i , β_i , γ_i – угол места прихода сигнала от НБС; K – количество видимых потребителей НБС. Направляющие косинусы определяются соотношениями:

$$\cos(\alpha_i) = \frac{x_i - x_n}{R_{i,n}}, \quad (13)$$

$$\cos(\beta_i) = \frac{y_i - y_n}{R_{i,n}}, \quad (14)$$

$$\cos(\gamma_i) = \frac{z_i - z_n}{R_{i,n}}, \quad (15)$$

$$R_{i,n} = \sqrt{(x_{i\text{НБС}} - x_{j\text{ЛНС}})^2 + (y_{i\text{НБС}} - y_{j\text{ЛНС}})^2 + (z_{i\text{НБС}} - z_{j\text{ЛНС}})^2}, \quad (16)$$

где $x_{i\text{НБС}}$, $y_{i\text{НБС}}$, $z_{i\text{НБС}}$ – координаты i -ой НБС, $x_{j\text{ЛНС}}$, $y_{j\text{ЛНС}}$, $z_{j\text{ЛНС}}$ – координаты НАП.

Далее вычисленные значения геометрического фактора для каждой точки из зоны действия ЛНС складываются и делятся на количество точек из зоны действия ЛНС. Среднеарифметическое значение геометрического фактора и i -я конфигурация НБС сохраняются.

**Выбор конфигурации НБС с наименьшим средним значением
геометрического фактора в зоне действия ЛНС**

На данном шаге производится выбор минимального среднеарифметического значения геометрического фактора. Соответствующая данному значению конфигурация НБС является искомой.

Исходные данные, используемые в методике, и их принятые значения при проведении контрольных расчетов:

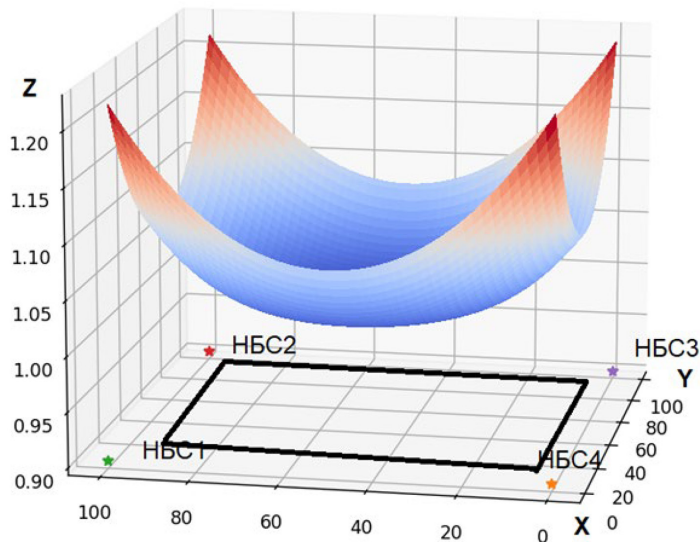


Рис. 2. Трёхмерный график значений геометрического фактора в зоне действия ЛНС для конфигурации НБС

Fig. 2. Three-dimensional graph of the geometric factor values in the area of the local navigation system for the configuration of ground base stations

- количество НБС, (n);
- диапазон чувствительности НАП ЛНС, [дБВт];
- координаты зоны действия ЛНС (набор координатных точек в пространстве), ограниченные параметрами (x_i, y_i, z_i) ;
- координаты зоны расположения НБС (в данном случае набор координатных точек на плоскости) (x_i, y_i, z_i) ;
- рабочая частота ЛНС [МГц];
- энергопотенциал НБС [Вт];
- данные с цифровой матрицы высот местности, (м).

В качестве примера на рис. 2 представлены отдельные результаты контрольных расчетов в виде трёхмерного графика, на котором на оси Z отложено значение геометрического фактора для конфигурации из четырех НБС, равномерно распределенных по оси X, Y – условные координаты местности. Расчеты выполнены с использованием компьютерной модели для ЭВМ [8], реализующей данную методику расчета показателя эффективности – среднего значения геометрического фактора для i -ой конфигурации, которое для заданных условий составило 1,095.

Таким образом, представленная методика позволяет найти наилучшее взаимно-пространственное расположение НБС относительно зоны действия ЛНС по критерию минимума среднеарифметического значения геометрического фактора. Универсальность представленной методики показывает её применимость к любому из перечисленных вариантов расположения ЛНС для обеспечения навигации любого типа НАП.

Список литературы / References

- [1] Гладышев А. Б., Ратушняк В. Н., Рыжков Д. Н., Богачук А. А., Голубятников М. А. Лабораторный комплекс для моделирования системы ближней навигации на основе псевдоспутников. *Современные проблемы радиоэлектроники*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники. 2017, 120–124. [Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N., Ryzhkov D. N., Bogachuk A. A., Golubyatnikov M. A. Laboratory complex for modeling a near-range navigation system based on pseudosatellites. *Modern problems of radio electronics*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics. 2017, 120–124 (in Rus.)]
- [2] Гарин Е. Н., Гладышев А. Б., Ратушняк В. Н., Голубятников М. А. Исследование точностных характеристик наземной радионавигационной системы на основе псевдоспутников. *Информация и космос*. 2019, 2, 35–40. [Garin E. N., Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N., Golubyatnikov M. A. Investigation of the accuracy characteristics of a ground-based radio navigation system based on pseudosatellites. *Information and Space*. 2019, 2, 35–40 (in Rus.)]
- [3] Арефиев Р. О. Методы повышения точности ГЛОНАСС в зоне аэродрома путем оптимизации размещения сети псевдоспутников, автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва: 2017, 162 [Arefiev R. O. *Methods of increasing the accuracy of GLONASS in the airfield area by optimizing the placement of a network of pseudo-satellites*, Thesis ... cand. of tech. Sci. Moscow: 2017, 162 (in Rus.)]
- [4] Устинов А. Ю. Исследование навигационного приемника, работающего по сигналам наземных псевдоспутников, магистер. дис. Москва: 2013, 89 [Ustinov A. Yu., Perov A. I. *Investigation of a navigation receiver operating on signals from ground-based pseudo-satellites*, Master's dissertation. Moscow: 2013, 89 (in Rus.)]
- [5] Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. *Радиотехника*. Москва: 2010, 800 [Perov A. I., Kharisov V. N. GLONASS. Principles of construction and functioning. *Radio engineering*. Moscow: 2010, 800 (in Rus.)]
- [6] Garin E. N., Fateev Y. L., Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N. The organization and short-range navigation radio systems structure based on pseudosatellites. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*. Moscow: 2018, 1–5.
- [7] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н., Дмитриев Д. Д., Ратушняк В. Н., Фатеев Ю. Л. Оценка погрешностей измерения навигационных параметров в системе ближней навигации на основе псевдоспутников. *Радионавигационные технологии. "Радиосвязь и радионавигация"*. Москва: 2017, 78–84 [Tyapkin V. N., Garin E. N., Dmitriev D. D., Ratushnyak V. N., Fateev Yu. L. Estimation of measurement errors of navigation parameters in the near navigation system based on pseudosatellites. *Radio navigation technologies. "Radio communication and radio navigation"*. Moscow: 2017, 78–84 (in Rus.)]
- [8] Свидетельство № 2017619991 Российская Федерация. Компьютерная модель системы ближней навигации на основе псевдоспутников. Гладышев А. Б., Ратушняк В. Н., Кремез Н. С., Голубятников М. А.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». № 2017616963 заявл. 14.07.2017; зарегистр. 13.09.2017. [Certificate No. 2017619991 Russian Federation. *A computer model of the near-range navigation system based on pseudosatellites*. Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N., Kremez N. S., Golubyatnikov M. A.; applicant and copyright holder of the Federal State Educational Institution "Siberian Federal University". No. 2017616963 declared on 14.07.2017; registered. 13.09.2017. (in Rus.)]