

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РАСЧЕТ БЮДЖЕТА РАДИОЛИНИИ В НАЗЕМНОЙ СИСТЕМЕ БЛИЖНЕЙ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОСПУТНИКОВ

Р. Б. Ковалев² ✉, В. Н. Ратушняк¹, П. Ю. Зверев¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

²АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва, г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

В настоящее время бóльшая часть работы специалистов в области навигации сводится к улучшению таких параметров навигационных систем, как помехоустойчивость и точность. Во всем мире сейчас все более актуален интерес потребителей высокоточной навигационной информации и производителей аппаратуры к системам ближней навигации, являющихся дополнением к существующим спутниковым радионавигационным системам, позволяющим увеличить их точность и помехоустойчивость. В статье проведена оценка параметров и обобщенный алгоритм расчета радиолинии в системе ближней навигации на основе псевдоспутников. Разработана модель расчета энергетики радиолинии при различных конфигурациях расположения псевдоспутников. Разработанная программа расчета характеристик радиолиний системы ближней навигации на основе псевдоспутников позволяет быстро оценивать не только ее энергетические характеристики, но и реализует наглядную визуализацию результирующей диаграммы направленности системы псевдоспутников в соответствии с конфигурируемой зоной навигации потребителей и требуемым уровнем мощности навигационных сигналов в условиях естественных радиотрасс.

Ключевые слова: радионавигационная система ближней навигации, псевдоспутник, радиолиния наземных псевдоспутников, потери распространения навигационных сигналов, локальные системы навигации.

Введение

Важной частью проектирования систем ближней навигации на основе псевдоспутников является анализ бюджета канала распространения навигационных сигналов между передатчиком и приемником сигнала. В настоящее время все больше проявляется интерес потребителей высокоточной навигационной информации и производителей аппаратуры к системам ближней навигации, являющихся дополнением к существующим спутниковым радионавигационным системам (СРНС), позволяющим увеличить их точность и помехоустойчивость. Для повышения данных показателей и требуемой безопасности на ответственных участках навигации подвижных объектов всех классов предлагается использовать распределенную радиотехническую систему (РРС) на основе «псевдоспутников» наземного базирования, ис-

пользующей аналогичные сигналы навигационных космических аппаратов (НКА).

В таких радиотехнических системах ближней навигации на основе псевдоспутников (ПС) в настоящее время предполагается интеграция приема сигналов ПС с существующими навигационными сигналами СРНС, и по своей функциональной структуре приемная аппаратура потребителей (антенная система, аналоговый и цифровой тракты) должна обеспечивать надежный прием как сигналов СРНС, так и навигационных сигналов ПС. Данная интеграция не приведет к кардинальным изменениям навигационной аппаратуры потребителей (НАП), а только лишь дополнится цифровой обработкой сигналов ПС.

Исходя из границ динамического диапазона НАП и геометрической зоны навигации объектов, а также возможностей формирования требуемых диаграмм направленностей передатчиков ПС (например, в местности со сложным рельефом), требуется сконфигурировать расположение ПС в РРС ближней навигации таким образом, чтобы зону навигации охватывали все ПС и их резуль-

✉ kovalyovrb@iss-reshetnev.ru

тирующая диаграмма направленности перекрывает зону навигации с требуемым уровнем мощности навигационных сигналов от -165 дБВт до -140 дБВт. Мощность навигационных сигналов в пределах зоны навигации РРС не должна иметь больших колебаний, поскольку сигналы ПС на близкой дистанции действуют как источники помех, а на большой дистанции имеют недостаточную мощность для их эффективного использования. Следовательно, при конфигурировании искусственного навигационного поля РРС на основе ПС распределение энергетики радиолинии в зоне навигации потребителей определяется исходя из размеров зоны навигации потребителей, уменьшения погрешностей измерения радионавигационных параметров сигналов, а также исключения перегрузки приемных трактов потребителей мощными полезными сигналами.

1. Бюджет радиолинии в радионавигационной системе на основе псевдоспутников наземного базирования

Проанализируем зависимость мощности навигационного сигнала, принимаемого НАП, от угла места ПС, коэффициента усиления передающей антенны, затухания сигнала в свободном пространстве и затухания, вносимого тропосферой. Затухание амплитуды навигационных сигналов связано с их рассеянием, главным образом, кислородом, парами воды и так называемыми гидрометеорами. Зависимости поглощения от температуры, давления, влажности и частоты получены Ван Флеком в разработанной им теории поглощения электромагнитных волн [1].

Тропосфера является недиспергирующей средой вплоть до частот 15 ГГц, поэтому величина задержки одинакова для наблюдений на частотах 1–2 ГГц как для измерений псевдодальностей, так и для фазы несущей. При моделировании принято выделять две составляющие тропосферы – сухую (гидростатическую) и влажную.

Значение сухой составляющей для зенитного направления ПС, находящегося на высоте 5000 метров, составляет около метра и зависит только от давления и температуры, а величина влажной составляющей может колебаться до нескольких сантиметров и зависит, главным образом, от влажности. При переходе от зенитного направления к наклонным направлениям задержка увеличивается примерно пропорционально секансу угла места, достигая вблизи горизонта (при удалении от ПС на 50–60 км) до 5 м. Тропосферную задержку можно вычислить, используя значения температуры, давления и влажности, которые являются входными данными для одной из многих моделей атмосферной рефракции. Такие модели могут учитывать

примерно до 90 % задержки, соответствующей преимущественно гидростатическому компоненту, однако остальные 10 % (в основном из-за влажного компонента) будут серьезно влиять при высокоточном определении местоположения.

Мощность сигнала P_c , принимаемого антенной с эффективной площадью $S_{пр}$, на расстоянии R от источника излучения с изотропной излучающей антенной в безвоздушном пространстве определяется из выражения:

$$P_c = \frac{P_{пер}}{4\pi R^2} S_{пр}, \quad (1)$$

где $P_{пер}$ – мощность передающего устройства, Вт; $S_{пр}$ – эффективная площадь приемной антенны, м².

Для ПС, антенна которого обладает усилением $G_{пер}$ в направлении R ,

$$P_c = \frac{P_{пер} G_{пер}}{4\pi R^2} S_{пр}. \quad (2)$$

Эффективная площадь антенны является параметром, характеризующим качество антенн. Чтобы перейти от площади антенны к коэффициенту усиления $G_{пр}$, можно воспользоваться формулой:

$$S_{пр} = \frac{G_{пр}}{4\pi} \lambda^2, \quad (3)$$

где λ – длина волны излучаемого сигнала, м.

В этом случае с учетом (3) и того, что $\lambda = \frac{c}{f}$,

где f – несущая частота излучаемого сигнала, а c – скорость света ($c = 299\,792\,458$ м/с), формула (1) запишется в следующем виде:

$$P_c = \frac{P_{пер} G_{пер} G_{пр}}{L}, \quad (4)$$

где $L = (4\pi)^2 R^2 \left(\frac{f}{c}\right)^2$ – затухание сигнала в свободном пространстве.

Трасса распространения сигнала от ПС до НАП включает в себя тропосферу, которая вносит затухание $B_{тр}$. Учитывая это затухание, перепишем формулу (4):

$$P_c = \frac{P_{пер} G_{пер} G_{пр}}{L B_{тр}} \quad (5)$$

или, в логарифмической форме:

$$10\lg(P_c) = 10\lg(P_{пер}) + 10\lg(G_{пер}) + 10\lg(G_{пр}) - (10\lg(L) + 10\lg(B_{тр})) \quad (6)$$

Тропосфера простирается до высот 8–10 км в полярных широтах, до 10–12 км – в умеренных широтах и до 16–18 км – в тропиках.

Для рассматриваемой длины волны $\lambda \approx 18,7$ и 24 см затухание радиоволн в тропосфере незна-

чительно и его можно не учитывать при наблюдении ПС при больших углах места, где величина проходимого расстояния в тропосфере незначительна. На малых же углах места ПС доля тропосферы на трассе распространения сигнала резко увеличивается и ее влиянием пренебрегать уже нельзя.

Поглощение и рассеяние волн в тропосфере ведет к снижению плотности потока мощности радиоволн с расстоянием по экспоненциальному закону. Коэффициент поглощения в тропосфере $B_{тр}$ зависит от коэффициента затухания α_z , измеряемого в дБ/км, и расстояния $R_{тр}$, проходимого радиоволнами в тропосфере:

$$B_{тр} = \exp(0,23\alpha R_{тр}). \quad (7)$$

Коэффициент α зависит, прежде всего, от длины волны (рис. 1) и погодных условий. На волны длиннее 10 см метеорологические условия существенного влияния не оказывают, поэтому будем считать, что коэффициент α_z вдоль всей трассы постоянен.

По различным источникам [2; 3] значение коэффициента поглощения в тропосфере колеблется от 0,008 до 0,01 дБ/км. Согласно [1], значение коэффициента α_z для длины волны $\lambda \approx 18,7$ см приблизительно равно 0,007 дБ/км, для длины волны $\lambda \approx 24$ см – 0,005 дБ/км.

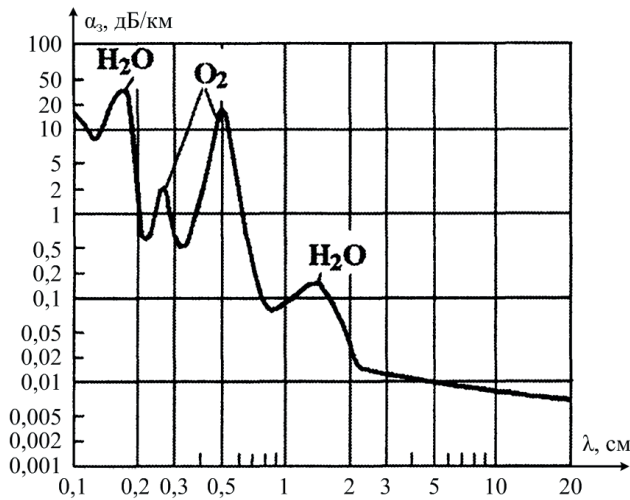


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения в тропосфере от длины волны

Необходимо отметить также, что за счет возможности формирования группировкой «псевдоспутников» выделенной зоны повышенной мощности приема навигационных сигналов, можно повысить надежность навигационных определений в условиях воздействия помех и уменьшить среднеквадратическое отклонение шумовой погрешности типовой некогерентной схемы слежения за огибающей, которая определяется следующим выражением [3]:

$$\sigma = \tau_s \left[\frac{k_1 \Pi_{сцз}}{P_c / N_0} + \frac{k_2 \Pi_{сцз} \Pi_{пч}}{(P_c / N_0)^2} \right]^{0,5}, \quad (8)$$

где τ_s – длительность элемента кода ПС; k_1, k_2 – постоянные коэффициенты, зависящие от выбранной схемы слежения; $\Pi_{сцз}, \Pi_{пч}$ – односторонняя ширина полосы замкнутой схемы слежения и тракта промежуточной частоты соответственно; $q_{с/п} = P_c / N_0$ – энергетический потенциал радиолинии (отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности внутреннего шума приемника).

2. Моделирование энергетических характеристик радиолинии системы ближней навигации на основе псевдоспутников при различных конфигурациях их расположения

Проведем расчет радиолинии для различных конфигураций расположения ПС на плоскости с использованием математического моделирования и языка программирования C++.

2.1 Конфигурация 1

Диаграмма распределения мощности навигационного сигнала одиночного ПС в естественной радиотрассе при $P_{пер} = 1,15 \cdot 10^{-4}$ Вт представлена на рис. 2. Уровень мощности навигационного сигнала –165 дБВт соответствует внешней полусфере радиусом 70 км, а –140 дБВт соответствует внутренней полусфере радиусом ≈ 4 км.

В первой конфигурации расположим восемь ПС по периметру прямоугольника со сторонами 100×200 км, при этом они условно находятся на поверхности Земли на одной высоте. Такая конфигурация расположения ПС может использоваться для обеспечения навигации надводных объектов в морских портах, проливах, устьях рек, а также наземных объектов. На рис. 3 приведена результирующая диаграмма распределения мощности системы псевдоспутников.

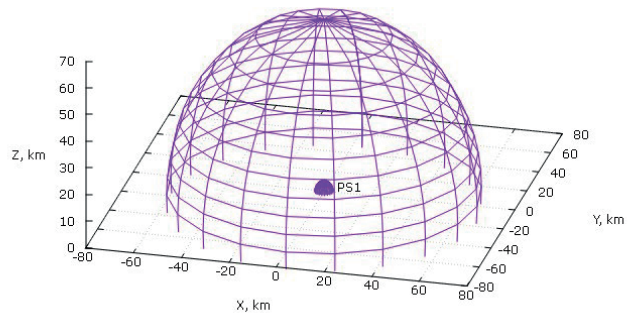


Рис. 2. Диаграмма распределения мощности навигационного сигнала одиночного ПС

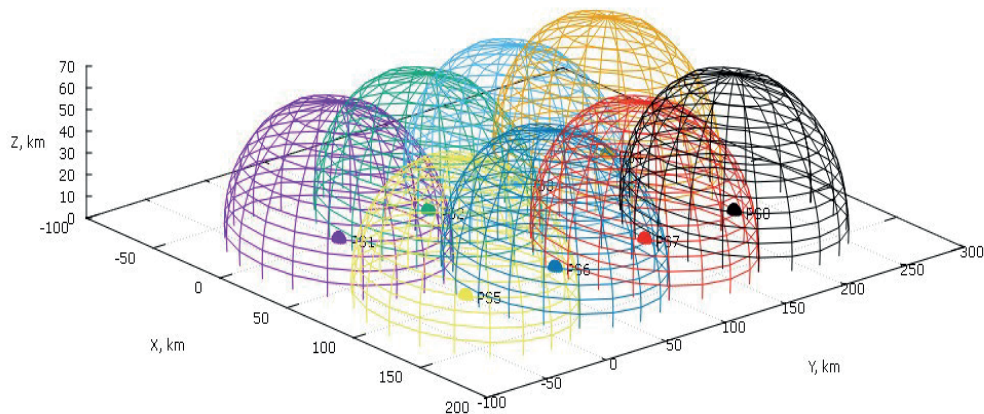


Рис. 3. Конфигурация 1: восемь ПС расположены по периметру прямоугольника

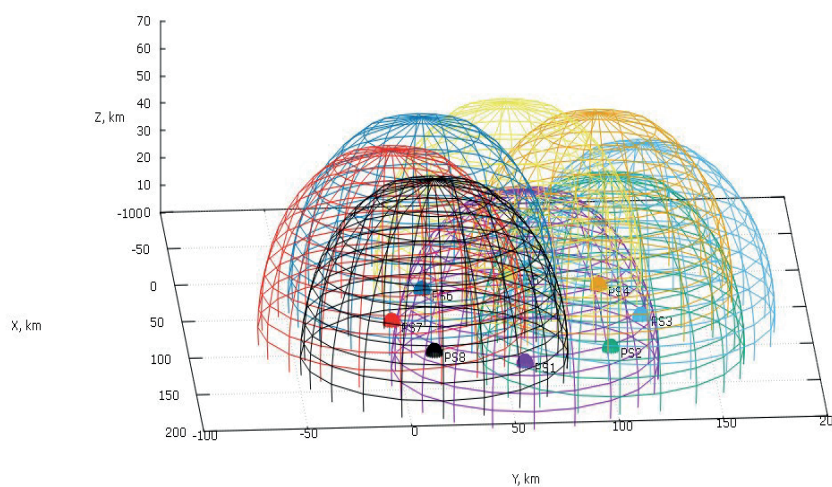


Рис. 4. Конфигурация 2: восемь ПС располагаются по окружности

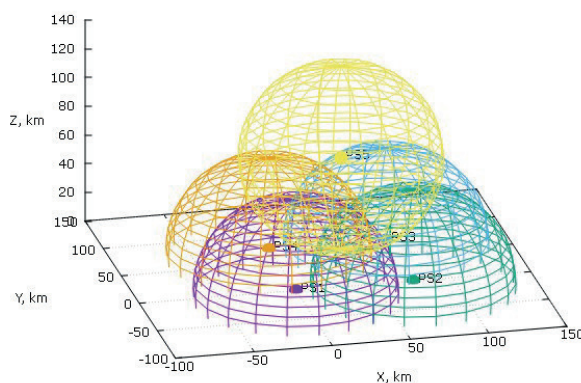


Рис. 5. Конфигурация 3: четыре ПС находятся в углах квадрата, пятый ПС поднят на высоту

2.2 Конфигурация 2

Рассмотрим вторую конфигурацию расположения ПС на местности: восемь ПС располагаются на высоте 0 м на окружности радиусом 100 км. (рис. 4). Данная конфигурация расположения ПС может использоваться для обеспечения навигации воздушных объектов в районах аэродромов.

2.3 Конфигурация 3

Рассмотрим третью конфигурацию расположения ПС – четыре ПС находятся в углах квадрата (расстояние между ними составляет 70 км), а один ПС условно поднят на высоту 65 км (рис. 5). В данном случае несколько ПС, размещенных равномерно по периметру зоны обслуживания, и 1–2 ПС, размещенных на разных высотах, обе-

спечивают повышение точности измерения вертикальной координаты объектов за счет уменьшения геометрического фактора.

Заключение

Возможность создания области навигации с требуемыми характеристиками при помощи распределенной радиотехнической системы на базе псевдоспутников на ответственных участках навигации подвижных объектов всех классов ведет к улучшению таких показателей, как автономность навигации, точность измерения координат и пространственной ориентации, помехоустойчивость и безопасность движения объектов в целом.

Разработанная программа моделирования характеристик радиолинии системы ближней навигации на основе псевдоспутников позволяет быстро оценивать не только ее энергетические характеристики, но и реализует наглядную визуализацию результирующей диаграммы направленности системы псевдоспутников в соответствии с конфигурируемой зоной навигации потребителей и требуемым уровнем мощности навигационных сигналов в условиях естественных радиотрасс.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10089).

Список литературы

- [1] Долуханов М. П. Распространение радиоволн : учеб. для вузов. М. : Связь, 1972. 336 с.
- [2] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ.; изд. 2-е, испр. М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
- [3] Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
- [4] Борсоев В. А., Галеев Р. Г., Гребенников А. В., Кондратьев А. С. Использование псевдоспутников ГЛОНАСС/GPS в системах посадки воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 164. С. 17–23.
- [5] 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 // Сборник «Радионавигационные технологии». Сер. «Радиосвязь и радионавигация». М., 2017, С. 78–84.
- [6] Компьютерная модель системы ближней навигации на основе псевдоспутников: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017619991 Российская Федерация / Н. С. Кремез, В. Н. Ратушняк, А. Б. Гладышев, М. А. Голубятников. – № 2017616963; заявл. 14.07.17; опубл. 13.09.17.
- [7] 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 // Сборник «Современные проблемы радиоэлектроники». Сибирский федеральный университет, 2017, С. 120–124.
- [8] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Veysov E. A., Tyapkin V. N. A hardware-software complex for modelling and research of near navigation based on pseudolites // Journal of Physics: Conference Series, 2017, vol. 803, 012048.
- [9] Голубятников М. А. Компьютерная модель навигационного поля локальной системы навигации на основе псевдоспутников // Материалы XX Всерос. семинара «Моделирование неравновесных систем», 2017, С. 32–36.
- [10] Фатеев Ю. Л., Гладышев А. Б., Ратушняк В. Н., Голубятников М. А. Организация и структура радиотехнической системы ближней навигации на основе псевдоспутников // Сборник «Радионавигационные технологии». Сер. «Радиосвязь и радионавигация». М., 2017, С. 34–37.

RESEARCH OF PARAMETERS AND CALCULATION OF THE BUDGET OF THE RADIO LINE IN THE GROUND-BASED SYSTEM OF NEAR NAVIGATION ON THE BASIS OF PSEUDO-SATELLITES

R. B. Kovalyov², V. N. Ratushnyak¹, P. Yu. Zverev¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

²JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

At present time the most of the work of specialists in the field of navigation is to improve the parameters of navigation systems such as noise immunity and accuracy. At all the world is more and more actual

the interest of consumers of high-precision navigation information and equipment manufacturers to near navigation systems, which are an addition to the existing satellite radio navigation systems, allowing them to increase their accuracy and noise immunity. Assessment the parameters is made in the article and algorithm for calculating the radio line in the near-navigation system based on pseudosatellites is generalized. A model for calculating the energy of a radio line has been developed for various configurations of the location of pseudosatellites. The developed program for calculating the characteristics of radio lines of a near-navigation system based on pseudo-satellites allows to quickly evaluate not only its energy characteristics, but also realizes pictorial visualization of the resulting directional diagram of pseudo-satellite systems in accordance with the configured navigation zone of consumers and the required power of navigation signals in natural radio routes.

Keywords: radio navigational system of near navigation, pseudo-satellite, radio line of land pseudo-satellites, losses of distribution of navigation signals, local systems of navigation.

References

- [1] Dolukhanov M. P. *Rasprostraneniye radiovoln* [Propagation of radio waves]. Moscow, Svyaz', 1972, 336 p. (In Russian)
- [2] Sklyar B. *Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical bases and practical application]. Moscow, Izdatelskiy dom Vilyams, 2003, 1104 p. (In Russian)
- [3] Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russian)
- [4] Borsoev V. A., Galeev R. G., Grebennikov A. V., Kondratiev A. S. *Ispol'zovanie psevdosputnikov GLONASS/GPS v sistemah posadki vozdukhnykh sudov* [Use of GLONASS/GPS pseudosatellites in aircraft landing systems] // Civil Aviation High TECHNOLOGIES, 2011, no. 164, pp. 17–23. (In Russian)
- [5] Tyapkin V. N., Garin E. N., Dmitriev D. D., Ratushnyak V. N., Fateev Yu. L. *Ocenka pogreshnostey izmereniya navigacionnykh parametrov v sisteme blizhney navigacii na osnove psevdosputnikov* [Estimation of measurement errors of navigation parameters in the near-navigation system based on pseudospacial satellites] // Collection «Radio-navigation technologies». Series «Radio communication and radio navigation». Moscow, 2017, pp. 78–84. (In Russian)
- [6] Kremez N. S., Ratushnyak V. N., Gladyshev A. B., Golubyatnikov M. A. *Komp'yuternaya model' sistemy blizhney navigacii na osnove psevdosputnikov* [Computer model of near-navigation system based on pseudo-satellite] / Certificate of state registration of computer programs, no. 2017619991, 2017.
- [7] Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N., Ryzhkov D. N., Bogachuk A. A., Golubyatnikov M. A. *Laboratornyy kompleks dlya modelirovaniya sistemy blizhney navigacii na osnove psevdosputnikov* [A laboratory complex for modeling a near-navigation system based on pseudo-satellites] // Collection «Modern Problems of Radio Electronics». Siberian Federal University, 2017, pp. 120–124. (In Russian)
- [8] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Veysov E. A., Tyapkin V. N. A hardware-software complex for modelling and research of near navigation based on pseudolites // Journal of Physics: Conference Series, 2017, vol. 803, 012048.
- [9] Golubyatnikov M. A. *Komp'yuternaya model' navigacionnogo polya lokal'noj sistemy navigacii na osnove psevdosputnikov* [Computer Model of the Navigation Field of a Local Navigation System Based on Pseudo-Satellites] // Proceedings of the XX All-Russian seminar «Modeling of non-equilibrium systems», 2017, pp. 32–36. (In Russian)
- [10] Fateev Yu. L., Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N., Golubyatnikov M. A. *Organizatsiya i struktura radiotekhnicheskoy sistemy blizhney navigacii na osnove psevdosputnikov* [Organization and structure of the radio engineering system for near navigation based on pseudosatellites] // Collection «Radio-navigation technologies». Series «Radio communication and radio navigation». Moscow, 2017, pp. 34–37. (In Russian)