

УДК 621.396

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-160-165

Разностно-дальномерный метод определения координат потребителя применительно к построению локальных беззапросных систем навигации

Р.С. Куликов, Д.В. Царегородцев, Н.А. Куковьякина, А.А. Шамина, В.А. Лепетюха

Фактическим стандартом навигационных систем являются спутниковые навигационные системы, однако область их применения ограничена открытой местностью, где наблюдается достаточное число сигналов навигационных спутников. Построение навигационных систем для закрытых помещений актуально для ряда практических задач. Существующие решения, позволяющие использовать спутниковые радионавигационные системы в закрытых помещениях, обладают рядом существенных недостатков, что приводит к поиску альтернативных подходов к построению навигационных систем внутри помещений. Они отличаются сложностью и достигаемой точностью навигации. Одним из перспективных направлений в области построения локальных радионавигационных систем считается использование сверхширокополосных сигналов. Рассмотрено построение прецизионной беззапросной разностно-дальномерной локальной навигационной системы для закрытых помещений на базе сверхширокополосных радиомодулей.

Ключевые слова: разностно-дальномерная система, сверхширокополосные сигналы, навигация внутри помещений.

Для цитирования: Куликов Р.С., Царегородцев Д.В., Куковьякина Н.А., Шамина А.А., Лепетюха В.А. Разностно-дальномерный метод определения координат потребителя применительно к построению локальных беззапросных систем навигации // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 160—165. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-160-165.

The Range-Difference Method for Determining the Consumer Coordinates as Applied to Development of Local Non-Enquiry Navigation Systems

R.S. Kulikov, D.V. Tsaregorodtsev, N.A. Kukovyakina, A.A., Shamina, V.A. Lepetyukha

Satellite navigation systems are the de-facto standard of navigation systems; however, the scope of their application is limited to an open terrain in which a sufficient number of navigation satellite signals are observed. At the same time, the development of navigation systems for enclosed spaces is a topical issue for a number of practical applications. Existing solutions that allow satellite radio navigation systems to be used in enclosed premises have a number of significant shortcomings. This circumstance generates the need of searching for alternative approaches to construction of indoor navigation systems. They differ from each other in complexity and achieved navigation accuracy. One of promising lines in constructing local radio navigation systems involves the use of ultra wide-band signals. The article considers the development of a precise non-enquiry range-difference local indoor navigation system on the basis of ultra wide-band radio modules.

Key words: range- difference location system, ultra wide-band signals, indoor navigation.

For citation: Kulikov R.S., Tsaregorodtsev D.V., Kukovyakina N.A., Shamina A.A., Lepetyukha V.A. The Range-Difference Method for Determining the Consumer Coordinates as Applied to Development of Local Non-Enquiry Navigation Systems. MPEI Vestnik. 2018;6:160—165. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-160-165.

Навигационные системы условно делятся на две группы: системы навигации вне и внутри помещений.

К первой группе принадлежат глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС, Global Positioning System (GPS). Они имеют развернутую инфраструктуру, могут использоваться в любой точке Земли и доступны гражданским потребителям. Необходим только приемник, работающий по одной или нескольким ГНСС. Системы Galileo (европейская спутниковая система навигации), BeiDou (китайская навигационная система «Бэйдоу») в настоящее время находятся на этапе разворачивания полной орбитальной группировки и применяются в прецизионных

приемниках для улучшения решения навигационной задачи путем использования сигналов, излучаемых спутниками, уже выведенными на орбиты.

Во второй группе существуют большое количество систем, среди которых нет ни одной, удовлетворяющей большинству требований одновременно. Подобное разнообразие связано, в первую очередь, с тем, что сигналы ГНСС недоступны внутри помещений [1]. Уже существующие решения по использованию сигналов ГНСС внутри помещений обладают высокой погрешностью определения координат и, как правило, высокой стоимостью. Это стимулирует создание альтернативных систем навигации, которые, в свою

очередь, делятся на классы с разворачиваемой инфраструктурой и без нее.

К системам навигации внутри помещений, не требующим разворачивания отдельной инфраструктуры, относятся смартфоны, лидарные и инерциальные системы (классификация по устройствам и технологиям, на которых они основаны).

Смартфон — данная система выполняет навигацию по изменению уровня сигнала, существующего в помещении поля беспроводной локальной сети (Wireless Fidelity (Wi-Fi)). Ее погрешность составляет единицы метров и не позволяет использовать систему для прецизионной навигации и, соответственно, ограничивает область эксплуатации. Тем не менее, ее применяют в аэропортах, больницах, офисах, где не требуется точное определение положения потребителя [2, 3].

Оптические системы, основанные на лидаре, — технологии определения дальности с помощью света. Системы такого рода имеют погрешность определения координат в единицы сантиметров, однако обладают высокой стоимостью и не могут корректно работать при наличии в помещении прозрачных поверхностей (стеклянных стен или дверей). Их используют в навигации подвижных роботов на складах [4].

Инерциальные системы, в них, как правило, работают инерциальные модули класса МЭМС (микроэлектромеханические системы). Использование инерциальных модулей имеет особенность в виде нарастающей с увеличением пройденного пути ошибки. Тем не менее, они нашли применение для навигации, например, внутри тоннелей [5, 6].

В средства навигации, требующие разворачивания отдельной инфраструктуры, входят ультразвуковые навигационные системы и системы, обеспечивающие навигацию по измерениям угла прихода сигналов от базовых станций Wi-Fi.

Ультразвуковые навигационные системы характеризуются хорошей точностью, однако имеют физическое ограничение на ширину полосы частот сигнала (порядка десятков кГц), не позволяющее передавать большие объемы навигационных данных. Они работают в случаях, когда нет необходимости в высокой скорости, низкой задержке измерений и навигации большого числа пользователей.

Основным недостатком систем, обеспечивающих навигацию по измерениям угла прихода сигналов от базовых станций Wi-Fi, является ослабление уровня принимаемого сигнала при удалении от источника сигнала, что существенно увеличивает погрешность определения координат потребителя.

Цель работы — изучение принципов функционирования разностно-дальномерных систем применительно к системам навигации внутри помещений, анализ возникающих особенностей при их построении, формирование на их основе рекомендаций по созданию систем подобного рода и описание полученных характеристик разрабатываемой системы.

Решаемой задачей является моделирование разностно-дальномерных систем на предмет оценки их точностных характеристик, а также проведение экспериментов с уже разработанной системой.

Радионавигационные системы обеспечивают высокий темп и малую задержку измерений, а также большую область навигационного поля [7]. Основным недостатком — явление многолучевого распространения сигнала, снижающее точность производимых измерений. Вариант решения данной проблемы — увеличение полосы частот сигнала. По этой причине в настоящее время в локальных радионавигационных системах активно используются сверхширокополосные (СШП) сигналы [8 — 10]. Зависимость величины погрешности определения координат σ_x , вызванной многолучевоностью, в зависимости от полосы сигнала Δf_c показана на рис. 1 [1].

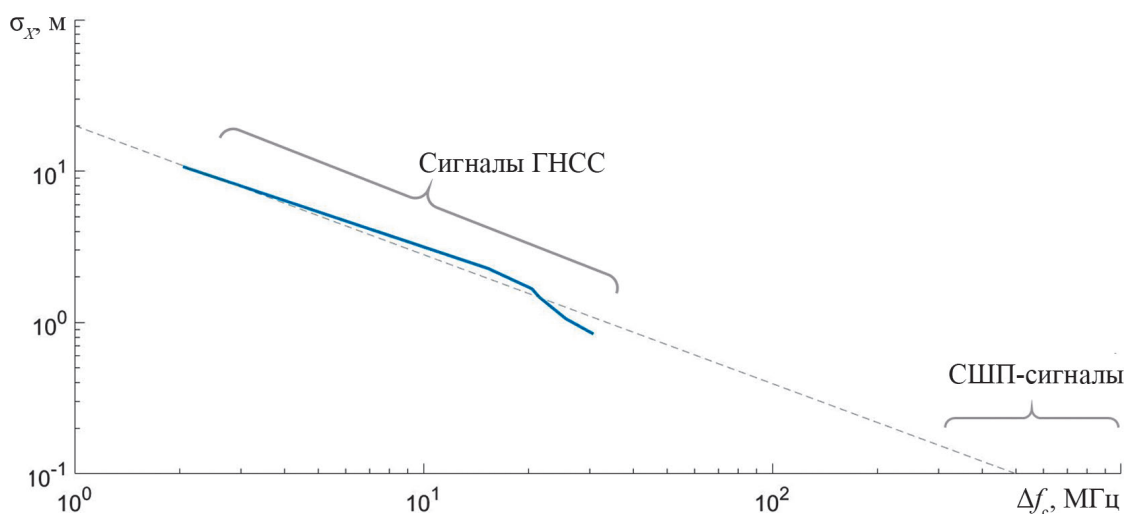


Рис. 1. График зависимости ошибки определения координат от полосы сигнала:

— ошибка определения координат для частот сигналов ГНСС; — экстраполяция зависимости погрешности оценки координат на более высокие частоты

Описываемая в настоящей работе система использует СШП радиомодулей LPS2 Mini производства компании Lologoelectronics, в состав которых входят модуль DW1000 компании DecaWave, а также инерциальный измерительный модуль MPU-9250 [11]. Система является беззапросной. Метод определения координат — разностно-дальномерный. Он основан на определении разности расстояний между радиомаяками (неподвижными излучателями сигналов) до потребителя. Разность расстояний рассчитывают, исходя из разности моментов времени прихода сигнала от каждого маяка [12, 13]. Местоположение объекта определяют путем установления точки пересечения двух или более линий (поверхностей) положения относительно известных ориентиров. Линией (поверхностью) положения называют геометрическое место точек пространства с одинаковым значением навигационного параметра (навигационных параметров). Местоположение объекта указывают координатами точки пересечения двух линий положения (на плоскости) или трех поверхностей положения (в пространстве). В ряде случаев (из-за нелинейности линий положения) две линии положения могут пересекаться в двух или более точках. При этом однозначно найти местоположение можно, используя дополнительную линию положения или иную информацию о местоположении объекта.

Линии положения в случае разностно-дальномерных систем (РДС) имеют вид плоских гипербол для случая определения координат на плоскости и гиперboloида при определении координат в пространстве. При этом в фокусах гипербол находятся радиомаяки, до которых измеряется разность расстояний (рис. 2).

Есть существенное отличие локальных РДС от использующихся в радиотехнических системах дальней навигации (РСДН), например, РСДН-20 («Альфа») или «Омега» (Omega Navigation System). Оно заключается в том, что линии равных разностей расстояний при их отображении на модели Земли (геоиде) — сложные кривые гиперболического типа, в отличие от плоских гипербол, где они являются замкнутыми кривыми. Кроме того, область действия для локальных РДС на несколько порядков меньше, чем для РСДН.

Особенность РДС заключается в том, что при проведении измерений разностей дальностей между ведущим маяком и каждым ведомым (ведущий — ведомый № 1, ведущий — ведомый №2 и т. д.) при использовании трех маяков возникает неоднозначность определения координат (рис. 3).

Как следует из рис. 3, при описанном методе работы РДС возможны ситуации, в которых линии положения пересекаются в двух точках (что обуславливается нелинейностью линий положения). При этом в дальномерном методе такая ситуация наблюдается только при использовании двух маяков (для двумерного случая). Эту проблему можно решить, если дополнительно проводить измерения разности дальностей между ведомыми маяками или увеличить количество маяков.

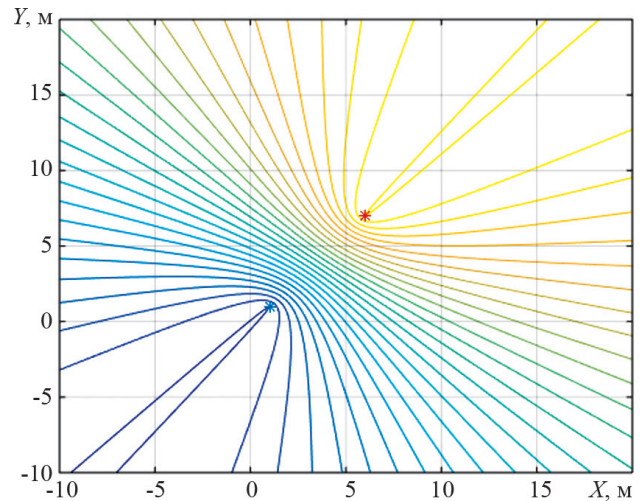


Рис. 2. Линии положения в разностно-дальномерных системах:
* — положение маяков

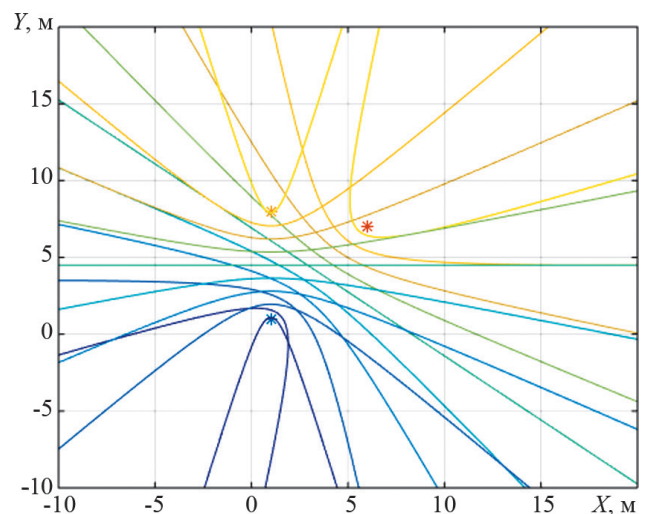


Рис. 3. Неоднозначность измерений:
* — положение маяков

Точность определения координат в существенной мере зависит от взаимного расположения маяков и потребителя и определяется через углы станций и угол между касательными к гиперболом в точке их пересечения [1]:

$$K_{\text{РДС}}(\varphi_1, \varphi_2, \alpha) = \frac{\sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\varphi_2}{2}\right)}}{2 \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) \sin(\alpha)}$$

Здесь $K_{\text{РДС}}(\varphi_1, \varphi_2, \alpha)$ — коэффициент радиальной ошибки РДС, понимаемый как геометрический фактор; φ_1, φ_2 — углы станций, определяемые как углы между отрезками, соединяющими маяк и точку пересечения линий положения (местоположение потребителя), при этом каждый угол откладывается от отрезка, соединяющего ведущую станцию и потребителя; α — угол

между касательными к гиперболам в точке их пересечения.

В зависимости от рабочей зоны РДС даются различные рекомендации по расположению радиомаяков. В общем случае можно говорить об оптимальном с точки зрения минимума значения $K_{\text{РДС}}(\varphi_1, \varphi_2, \alpha)$ расположении маяков. Лучше расположить их таким образом, чтобы углы базы были близки к 90° при возможных положениях потребителя (рабочей зоны).

Отличительной особенностью РДС является невозможность определения координат на прямой, соединяющей фокусы любых гипербол, при нахождении потребителя непосредственно за этими фокусами. В данном случае $K_{\text{РДС}}(\varphi_1, \varphi_2, \alpha) \rightarrow \infty$.

Наиболее предпочтительная рабочая зона на плоскости — область, образованная многоугольником с вершинами, находящимися в точках расположения маяков.

Под движением потребителя (рис. 4) понимается изменение координат фазового центра антенны аппарата потребителя (стрелкой на рис. 4 показана траектория движения).

Рассмотрим изображенную на рис. 5 зависимость изменения геометрического фактора (DOP — dilution of precision — «снижение точности»). При движении геометрический фактор показывает, во сколько раз снижается точность определения координат по сравнению с точностью измерения дальностей, поэтому

$$\sigma_x = \text{DOP} \sigma_{\Delta R},$$

где x — вектор координат потребителя.

По оси абсцисс на рис. 5 отложено евклидово расстояние R от начала координат до местоположения потребителя, соответствующее длине стрелки на рис. 4 для каждого момента времени движения.

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2},$$

где X, Y — координаты.

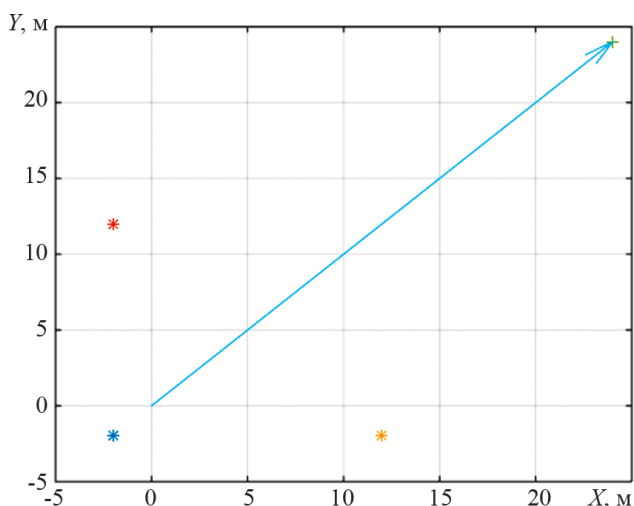


Рис. 4. Движение потребителя относительно радиомаяков:

* — положение маяков; × — конечное положение потребителя

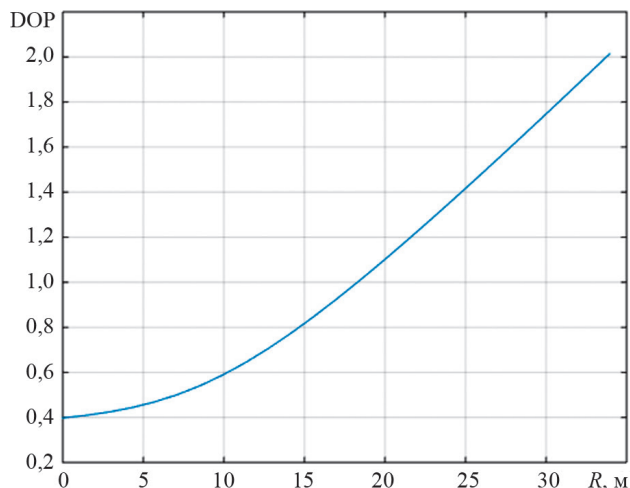


Рис. 5. График зависимости геометрического фактора от положения потребителя

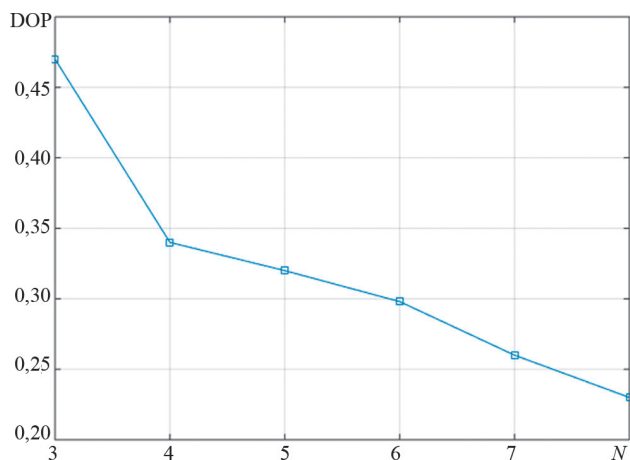


Рис. 6. Кривая зависимости геометрического фактора от количества радиомаяков

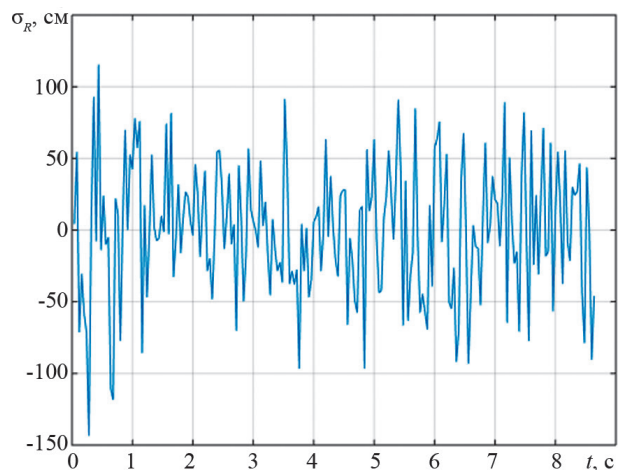


Рис. 7. Зависимость погрешности определения разности дальностей от времени

Помимо положения потребителя на значение геометрического фактора сильное влияние оказывает количество радиомаяков N . Зависимость геометрического фактора от значения N при нахождении потребителя в геометрическом центре многоугольника, образованного радиомаяками дана на рис. 6.

Исходя из полученных данных можно говорить о том, что построение локальных систем навигации на основе РДС является перспективным направлением в области навигации внутри помещений, поскольку обладает хорошими точностными характеристиками и не сопровождается ограничениями на количество потребителей в отличие от запросных систем.

В описываемой системе погрешность определения разности расстояний составила $\sigma_{\Delta R} \approx 0,5$ м (рис. 7), что

в пересчете на погрешность определения координат с учетом геометрического фактора равно $\sigma_x \approx 15$ см.

Таким образом, выполнено моделирование разностно-дальномерных систем при различных взаимных расположениях радиомаяков. Проанализированы особенности работы разностно-дальномерных систем в сравнении с дальномерными. Даны рекомендации по выбору оптимального местоположения маяков по критерию минимума значения геометрического фактора. Приведены количественные характеристики разрабатываемой РДС.

Дальнейшим направлением работы над системой станет использование измерений инерциальных модулей для улучшения точности определения координат потребителей.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010.
2. **Schneider D.** New Indoor Navigation Technologies Work Where GPS Can't [Электрон. ресурс] <https://spectrum.ieee.org/> (дата обращения 26.02.2018).
3. **Dewberry B., Einhorn M.** Ad-hoc Autosurvey with Precision Local Navigation of Mobile Platforms Using a Peer-to-peer Ranging Network [Электрон. ресурс] <https://timedomain.com/> (дата обращения 23.02.2018).
4. **Ross Ph.E.** 5D Robotics Can Locate You To Within An Inch [Электрон. ресурс] <https://spectrum.ieee.org/> (дата обращения 26.05.2018).
5. **Tekla S.P.** Navigating the Great Indoors [Электрон. ресурс] <https://spectrum.ieee.org/> (дата обращения 26.02.2018).
6. **Brandon S.D.** Fused Ultra Wideband Radio, Communications, and Radar with MEMS Aiding for Indoor Navigation and Collision Avoidance [Электрон. ресурс] <https://timedomain.com/> (дата обращения 15.02.2018).
7. **Guo K. e. a.** Ultra-wideband-based Localization for Quadcopter Navigation [Электрон. ресурс] <https://timedomain.com/> (дата обращения 10.02.2018).
8. **Бакулев П.А., Сосновский А.А.** Радионавигационные системы. М.: Радиотехника, 2005.
9. **Dewberry B., Einhorn M.** Indoor Aerial Vehicle Navigation Using UWB Active Two-way Ranging [Электрон. ресурс] <https://timedomain.com/> (Дата обращения 11.02.2018).
10. **Edgar M. e. a.** Characterization of a UWB Transceiver for Mining Applications [Электрон. ресурс] <https://timedomain.com/> (дата обращения 24.02.2018).
11. **Loligo Electronics** [Офиц. сайт] <https://loligoelectronics.com/product/lps2-mini/> (дата обращения 26.02.2018).

References

1. **GLONASS.** Printsipy Postroeniya i Funktsionirovaniya / Pod red. A.I. Perova, V.N. Harisova. M.: Radiotekhnika, 2010. (in Russian).
2. **Schneider D.** New Indoor Navigation Technologies Work Where GPS Can't [Elektron. Resurs] <https://spectrum.ieee.org/> (Data Obrashcheniya 26.02.2018).
3. **Dewberry B., Einhorn M.** Ad-hoc Autosurvey with Precision Local Navigation of Mobile Platforms Using a Peer-to-peer Ranging Network [Elektron. Resurs] <https://timedomain.com/> (Data Obrashcheniya 23.02.2018).
4. **Ross Ph.E.** 5D Robotics Can Locate You To Within An Inch [Elektron. Resurs] <https://spectrum.ieee.org/> (Data Obrashcheniya 26.05.2018).
5. **Tekla S.R.** Navigating the Great Indoors [Elektron. Resurs] <https://spectrum.ieee.org/> (Data Obrashcheniya 26.02.2018).
6. **Brandon S.D.** Fused Ultra Wideband Radio, Communications, and Radar with MEMS Aiding for Indoor Navigation and Collision Avoidance [Elektron. Resurs] <https://timedomain.com/> (Data Obrashcheniya 15.02.2018).
7. **Guo K. e. a.** Ultra-wideband-based Localization for Quadcopter Navigation [Elektron. Resurs] <https://timedomain.com/> (Data Obrashcheniya 10.02.2018).
8. **Bakulev P.A., Sosnovskiy A.A.** Radionavigatsionnye Sistemy. M.: Radiotekhnika, 2005. (in Russian).
9. **Dewberry V., Einhorn M.** Indoor Aerial Vehicle Navigation Using UWB Active Two-way Ranging [Elektron. Resurs] <https://timedomain.com/> (Data obrashcheniya 11.02.2018).
10. **Edgar M. e. a.** Characterization of a UWB Transceiver for Mining Applications [Elektron. Resurs] <https://timedomain.com/> (Data Obrashcheniya 24.02.2018).
11. **Loligo Electronics** [Ofits. Sayt] <https://loligoelectronics.com/product/lps2-mini/> (Data Obrashcheniya 26.02.2018).

12. **Поваляев А.А.** Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника, 2008.

13. **Beck B., Baxley R., Joseph K.** Real-time, Anchor-free Node Tracking Using Ultrawideband Range and Odometry Data // Proc. IEEE Intern. Conf. Ultra-wideband. 2014. Pp. 286—291.

12. **Povalyaev A.A.** Sputnikovye Radionavigatsionnye Sistemy: Vremya, Pokazaniya Chasov, Formirovanie Izmereniy i Opredelenie Otnositel'nyh Koordinat. M.: Radiotekhnika, 2008. (in Russian).

13. **Beck B., Baxley R., Joseph K.** Real-time, Anchor-free Node Tracking Using Ultrawideband Range and Odometry Data. Proc. IEEE Intern. Conf. Ultra-wideband. 2014:286—291.

Сведения об авторах:

Куликов Роман Сергеевич — кандидат технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой радиотехнических систем НИУ «МЭИ», e-mail: coolicoff@gmail.com

Царегородцев Дмитрий Викторович — инженер ООО «Нилар», e-mail: tsdv95@mail.ru

Куковьякина Надежда Андреевна — студент НИУ «МЭИ», e-mail: nadya.3k@gmail.com

Шамина Анна Алексеевна — студент НИУ «МЭИ», e-mail: Shaminann2@gmail.com

Лепетьуха Варвара Александровна — студент НИУ «МЭИ», e-mail: varya.lepetyuha@mail.ru

Information about authors:

Kulikov Roman S. — Ph.D. (Techn.), Acting Head of Radio Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: coolicoff@gmail.com

Tsaregorodtsev Dmitriy V. — Engineer of Open Company «Nilar», e-mail: tsdv95@mail.ru

Kukovyakina Nadezhda A. — Student of NRU MPEI, e-mail: nadya.3k@gmail.com

Shamina Anna A. — Student of NRU MPEI, e-mail: Shaminann2@gmail.com

Lepetyukha Varvara A. — Student of NRU MPEI, e-mail: varya.lepetyuha@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 19.03.2018

The article received to the editor: 19.03.2018