

**РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ ВОРОНОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*rvoronov@karelia.ru*

**АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ГАЛОВ**

ведущий программист, ЗАО «РТЛ-Сервис» (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*gas@rtlservice.com*

**АЛЕКСЕЙ ПЕТРОВИЧ МОЩЕВИКИН**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*alexmou@lab127.karelia.ru*

**АННА МИХАЙЛОВНА ВОРОНОВА**

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*voronova\_am@petrsu.ru*

**ЗАДАЧА ПРИВЯЗКИ ТРАЕКТОРИИ ОБЪЕКТА К ПЛАНУ ПОМЕЩЕНИЯ\***

Современные мобильные устройства содержат встроенный модуль распознавания движения, позволяющий построить траекторию движения (трек), по которой двигался объект. Привязка трека к плану помещения позволяет отследить перемещения объекта и уточнить его возможное местоположение. Рассмотрена задача наилучшего вписывания трека в план помещения с учетом ограничений для движения объекта в виде стен помещения. Так как траектория строится с некоторой погрешностью, то при вписывании допускаются небольшие ее изменения: сжатия или растяжения отдельных фрагментов и вращения с небольшим углом частей трека относительно друг друга. Предлагается математическая модель привязки трека к плану помещения. Описывается приближенный, основанный на методе динамического программирования, алгоритм решения задачи построения траектории с наилучшей оценкой. Приводится пример работы алгоритма на реальных данных. Предложенный подход может применяться в системах локации мобильных объектов на основе беспроводной сети датчиков, когда требуется одновременно определять местоположение большого числа устройств в режиме экономии эфира.

Ключевые слова: локация мобильных объектов, акселерометр, NanoLOC, RealTrac, локальная система позиционирования

**ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время широкое распространение получают системы определения местоположения объектов внутри помещений. Большинство из них основано на использовании беспроводных сетей таких стандартов, как WiFi, ZigBee, Bluetooth и др. [6], [7], [8], [11]. Такие системы состоят из нескольких базовых станций и мобильного устройства, местоположение которого необходимо определить. Иногда подобные системы требуют предварительного построения шаблонов карт уровней сигналов от базовых станций [1].

Дополнительной информацией для уточнения локации могут являться измерения, полученные с помощью встроенного в мобильное устройство модуля распознавания движения (обычно такие

модули основаны на информации от акселерометра, магнитометра и гироскопа [9]).

Встроенный в мобильное устройство модуль распознавания движения может определять траекторию движения, по которой движется устройство. Если мобильное устройство несет человек, то встроенный модуль может оценить длину и направление каждого шага. Однако данные измерения, как правило, содержат ошибку. Например, погрешность в оценке длины шага может достигать 10 % от длины шага [9], а ошибка в оценке направления движения – нескольких градусов.

Траектория, полученная от встроенного модуля распознавания движения, может быть скорректирована, если принять во внимание информацию о структуре помещения, внутри которого происходит движение. Очевидно, что при движе-

нии человек не может идти сквозь стены. Значит, и полученная траектория не может пересекаться со стенами внутри здания. На рис. 1 показан пример трека, зафиксированного встроенным модулем распознавания движения (слева) и возможный вариант скорректированного трека (справа), который не пересекается со стенами.

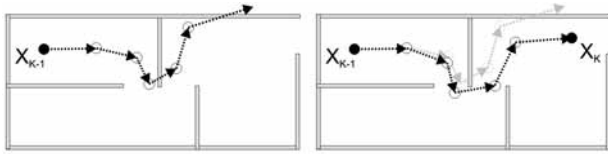


Рис. 1. Зафиксированный (слева) и скорректированный трек объекта (справа)

Задача вписывания трека объекта в план помещения особенно актуальна, когда в локальной системе позиционирования не хватает других данных для расчета локации объекта.

Поскольку радиочастотный диапазон для всех радиотехнологий ограничен, а эфир делится между многими участниками сети, выделяемая полоса пропускания может не обеспечить передачу большого количества данных и проведение дополнительных измерений расстояний.

В таких условиях мобильное устройство рассчитывает собственную траекторию по данным встроенных датчиков движения и лишь изредка передает ее на сервер. Эта ситуация может наблюдаться в системах позиционирования на основе измерения времени распространения сигнала в режиме экономии эфира, например в технологии RealTrac [3], построенной на основе радиостандарта nanoLOC [4], [10] и UWB.

В статье предлагается эвристический алгоритм решения задачи привязки трека к плану помещения.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ПРИВЯЗКИ ТРЕКА

Трек состоит из последовательных точек, заданных в некоторой системе координат, не привязанной к системе координат помещения. Длина единичного отрезка в системе координат трека совпадает с длиной единичного отрезка в системе координат помещения, но на практике могут быть небольшие расхождения и при расчетах следует это учитывать.

Для решения задачи привязки трека к плану помещения необходимо на плане помещения задать точку для совмещения с ней точки начала координат трека и определить угол поворота системы координат трека по отношению к системе координат помещения.

Для того чтобы не учитывать внутреннюю систему координат трека, удобнее будет считать, что трек состоит из последовательных отрезков. Для каждого отрезка задана его длина, а также углы между смежными отрезками трека.

Пусть для плана помещения задана прямоугольная система координат. Множество точек помещения будем обозначать  $X$ . Все точки множества  $X$  являются элементами пространства  $\mathbf{R}^2$  (евклидовой плоскости), для них определены операции сложения, а также умножения на число.

Трек будем представлять в виде ломаной, описываемой  $N$  парами  $(l_i, \varphi_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , где  $l_i$  – длина  $i$ -го звена (отрезка) ломаной,  $\varphi_i$  – угол между  $i$ -м и  $(i-1)$ -м звеньями ломаной (при этом  $\varphi_1 = 0$ ). Пусть  $\Delta_i$  –  $i$ -е звено ломаной, заданное в виде вектора.

Определяя на множестве  $X$  начальную точку ломаной, меняя направление ее первого звена, удлиняя или укорачивая звенья ломаной, изменяя углы между звеньями, можно получать различные ее траектории. Будем оценивать каждую такую траекторию в зависимости от числа изменений длин ее звеньев и углов между звеньями. Чем меньше было изменений, тем лучше. В качестве оценки  $f$  траектории предлагается следующая взвешенная сумма:

$$f = C_1 \sum_{i=1}^N |1 - \gamma_i| + C_2 \sum_{i=2}^N \varphi_i,$$

где  $\gamma_i$  – относительное изменение длины  $i$ -го звена ломаной,  $\varphi_i$  – абсолютное изменение угла между  $i$ -м и  $(i-1)$ -м звеньями ломаной. Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  определяют влияние на величину оценки суммарного относительного изменения длин и суммарного абсолютного изменения углов ломаной. Далее  $C_1$  и  $C_2$  предполагаются равными единице. Задача состоит в поиске вписанной в план помещения траектории, имеющей минимальную оценку. На вход описываемого ниже алгоритма подается начальная точка и зафиксированный трек.

#### АЛГОРИТМ ПРИВЯЗКИ ТРЕКА К ПЛАНУ ПОМЕЩЕНИЯ

В связи с тем что существует бесконечно много различных траекторий ломаной, определим правила, по которым будем строить и оценивать некоторое конечное подмножество траекторий ломаной, выбирать траектории с лучшей оценкой. Ниже опишем правила выбора первых точек траекторий ломаной, изменения длин ее звеньев и углов между звеньями, оценивания полученных траекторий и выбора наилучших из них.

Пусть на план помещения наложена прямоугольная сетка, в результате чего получается разбиение множества  $X$  на квадратные участки, множество которых обозначим  $S$ . Будем предполагать, что участки множества  $S$  не пересекаются. Этого можно добиться, устанавливая некоторые границы участков открытыми. Шаг сетки определяется точностью расчетов. Принадлежность точек  $x \in X$  участкам  $s \in S$  будем обозначать  $x \in s$ .

Первые  $i$  звеньев ломаной будем называть  $i$ -м фрагментом ломаной. Особенностью предложенного метода является то, что для каждого  $i$  и каждого участка  $s \in S$  будем запоминать не более одной траектории  $i$ -го фрагмента ломаной, заканчивающейся на данном участке  $s$ . Пусть  $S_i$  – подмножество участков, для которых существуют заканчивающиеся в них траектории  $i$ -го фрагмента ломаной. Для участка  $s \in S_i$  соответствующую траекторию  $i$ -го фрагмента ломаной будем для краткости называть  $(i, s)$ -траекторией. Каждая  $(i, s)$ -траектория может быть началом различных  $(i+1, s')$ -траекторией, где  $s'$  – некоторые участки.

Если подобрана  $(i, s)$ -траектория, то она фиксируется и в дальнейшем не меняется. Это позволяет существенно сократить число перебираемых вариантов траекторий ломаной. Недостатком подхода является то, что возможна потеря «плохих» начальных фрагментов ломаных в «целом хороших» ломаных. Следовательно, описываемый подход является приближенным. Степень приближения регулируется шагом сетки.

Пусть  $H$  – множество отрезков, соответствующих стенам помещения. Назовем траекторию ломаной допустимой, если содержащие ее звенья не пересекаются с отрезками множества  $H$ .

Обозначим  $\Gamma$  – дискретное множество коэффициентов изменения длины отрезков ломаной (если больше единицы, то увеличение длины; если меньше единицы – уменьшение длины). Например,  $\Gamma = \{0.9, 1.0, 1.1\}$ . Обозначим  $\Phi$  – дискретное множество значений (в радианах), на которые могут изменяться углы между отрезками ломаной. Например,  $\Phi = \{-0.25, -0.2, \dots, 0.25\}$ .

Пусть  $\Delta = (a, b)$  – вектор ломаной, где  $a$  – смещение по оси абсцисс,  $b$  – смещение по оси ординат. Введем обозначение для отображения, вращающего вектор  $\Delta$  на угол  $\varphi$  и растягивающего (сжимающего) его длину в  $\gamma$  раз:

$$G_{\gamma\varphi}(\Delta) = \gamma \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}.$$

Для каждого участка  $s \in S_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) будем определять:

- $f_i(s)$  – оценку  $(i, s)$ -траектории;
- $\xi_i(s)$  – последнюю точку  $(i, s)$ -траектории;
- $\psi_i(s)$  – угол между последним звеном  $(i, s)$ -траектории и осью абсцисс;
- $\zeta_i(s)$  – участок, содержащий предпоследнюю точку  $(i, s)$ -траектории.

Алгоритм состоит из двух этапов: «прямой» и «обратный» ходы.

Опишем первый этап алгоритма. Пусть  $x_0$  – первая точка ломаной. Пусть  $s_0$  – участок, содержащий точку  $x_0$ . Положим  $f_0(s_0) = 0$ ,  $\xi_0(s_0) = x_0$ ,  $\psi_0(s_0) = 0$ ,  $\zeta_0(s_0)$  – не определено.

Рассмотрим построение первых звеньев траекторий ломаной. Для каждого участка  $s$  найдем перебором  $\gamma \in \Gamma$  и  $\varphi \in [-\pi; \pi]$  такие, что точка

$$v = x_0 + G_{\gamma\varphi}(\Delta_1)$$

принадлежит участку  $s$ , отрезок  $(x_0, v)$  не пересекается с отрезками множества стен  $H$  и при этом достигается минимум  $|1 - \gamma|$ . Положим

$$\xi_1(s) := v, \psi_1(s) := \varphi, f_1(s) := |1 - \gamma|, \zeta_1(s) := s_0.$$

Из участков  $s$ , для которых такие точки  $v$  найдены, сформируем множество  $S_1$ .

Далее для всех  $i$ -х звеньев ( $i = 2, \dots, N$ ), для каждого участка  $s$  найдем перебором тройку  $\sigma \in S_{i-1}$ ,  $\gamma \in \Gamma$ ,  $\varphi \in \Phi$ , для которой  $u = \xi_{i-1}(\sigma)$ ,  $\omega = \psi_{i-1}(\sigma)$ , точка

$$v = u + G_{\gamma, \omega + \varphi}(\Delta_i)$$

принадлежит участку  $s$ , отрезок  $(u, v)$  не пересекается с отрезками множества стен  $H$  и при этом достигается минимум  $f_{i-1}(\sigma) + |1 - \gamma| + |\varphi|$ . Положим

$$\xi_i(s) := v, \psi_i(s) := \omega + \varphi,$$

$$f_i(s) := f_{i-1}(\sigma) + |1 - \gamma| + |\varphi|, \zeta_i(s) := \sigma.$$

Из участков  $s$ , для которых такие точки  $v$  найдены, сформируем множество  $S_i$ .

Заметим, что выражение  $|1 - \gamma| + |\varphi|$  равно нулю тогда и только тогда, когда  $\gamma = 1$  и  $\varphi = 0$ , то есть не происходит изменения длины рассматриваемого звена ломаной и изменения угла между текущим и предыдущим ее звеньями. Чем больше  $\gamma$  отличается от единицы и  $\varphi$  от нуля, тем большее значение принимает слагаемое  $|1 - \gamma| + |\varphi|$ .

Опишем, каким образом на втором этапе алгоритма по вычисленным значениям  $f_i(s)$ ,  $\xi_i(s)$ ,  $\zeta_i(s)$  «обратным ходом» определить точки наилучшим образом привязанной к плану помещения траектории ломаной. Пусть  $s_N^*$  – участок множества  $S_N$ , для которого достигается минимум  $f_N(s)$ . Участки  $s_i^*$ , содержащие точки лучшей траектории ломаной, находятся по формуле  $s_i^* = \zeta_{i+1}(s_{i+1}^*)$ ,  $i = N-1, \dots, 0$ . Пусть  $x_i^* = \xi_i(s_i^*)$ ,  $i = 0, \dots, N$ . Полученная последовательность  $x_0, x_1, \dots, x_N$  определяет искомую оптимальную траекторию ломаной, привязанную к плану помещения.

Время работы описанного алгоритма равно  $O(N \cdot |S| \cdot |\Gamma| \cdot |\Phi|)$ .

На рис. 2 приведен пример привязки четырех отрезков ломаной к плану помещения. Помещение поделено на 12 квадратных участков, стены обозначены жирными линиями. Пусть зафиксировано положение первого звена (оканчивающегося точкой 1 на рис. 2). В этом примере для простоты будем менять угол каждого звена ломаной на небольшую величину вправо и влево. Тогда из точки 1 получаем три возможных направления второго звена ломаной. Два из этих звеньев заканчиваются на одном и том же участ-

тке – выбирается один из них, для которого не было вращения ( $\varphi = 0$ ); другой отбрасывается. Остается два возможных варианта второго звена с последними точками, помеченными цифрой 2, расположенными на разных участках. Далее из конечных точек вторых вариантов звеньев откладываются возможные варианты третьего звена ломаной. Среди звеньев, попадающих в один участок, отбрасываются те, путь к которым содержит больше вращений (имеющие худшую оценку). Получаем два варианта третьего звена ломаной, их последние точки помечены цифрой 3. Затем из конечных точек третьего звена откладывается по три варианта возможных направлений четвертых звеньев. Но при этом отсекаются звенья, проходящие сквозь стены; среди звеньев, завершающихся на одном участке, оставляем одно без вращений. Таким образом, получился один вариант привязки ломаной, состоящей из четырех звеньев, на рисунке он заканчивается точкой с цифрой 4.

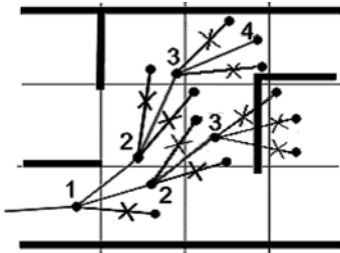


Рис. 2. Пример построения траекторий ломаной

### ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРИВЯЗКИ ТРЕКА К ПЛАНУ ПОМЕЩЕНИЯ

Рассмотрим демонстрацию работы алгоритма привязки трека к плану помещения. На рис. 3 представлен план помещения, на котором имеются несколько комнат и длинный коридор. Также нанесен реальный трек объекта. Начальная точка находится в правой части коридора.

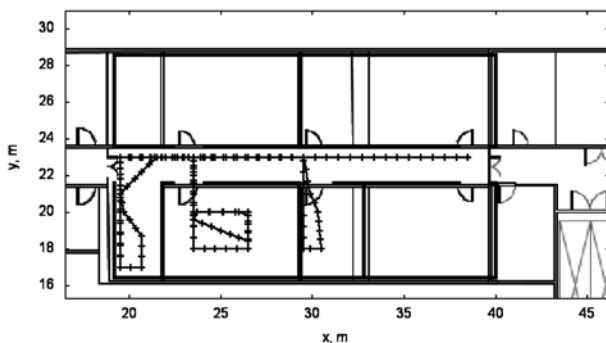


Рис. 3. Реальный трек объекта на плане помещения

На рис. 4 представлен трек, зафиксированный при помощи модуля распознавания движения, состоящий из 171 точки. Начальная точка – в правом верхнем углу. Начальное направление движения объекта относительно сторон света неизвестно.

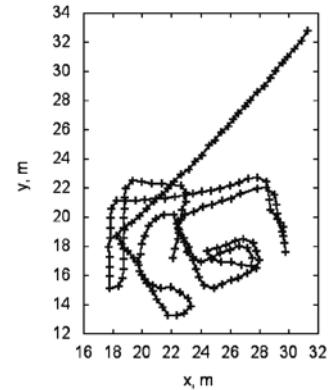


Рис. 4. Зафиксированный трек объекта

На рис. 5 продемонстрирован результат работы алгоритма привязки трека к плану помещения. Шаг сетки был равен одному метру. Видно, что в целом удалось вписать трек в план помещения. Средняя ошибка между истинными положениями объекта и реальными составила 0,8 м.

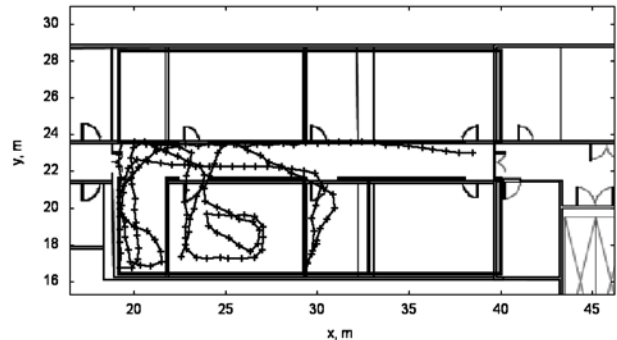


Рис. 5. Трек, привязанный к плану помещения

Предложенный алгоритм был апробирован на том же самом помещении в ходе тестовой эксплуатации системы локации мобильных объектов и показал устойчивость в работе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет информации от встроенного модуля распознавания движения может существенно улучшить точность локации в системе локации на основе беспроводной сети датчиков в случае редкого интервала опроса мобильного устройства. Описанный метод может применяться в системах, требующих одновременного определения местоположения большого количества устройств в системе локации на основе беспроводной сети датчиков в режиме экономии эфира [2], [5], [7] при условии наличия вычислительных мощностей на стороне сервера. В дальнейшем планируется сравнить его работу с алгоритмом привязки трека к плану помещения, основанным на случайном поиске.

\* Исследования, описанные в статье, проводились в рамках деятельности МИП ООО «Наносети» и ЗАО «РТЛ-Сервис», а также поддерживались Петрозаводским государственным университетом (Программа стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов Р. В., Малодушев С. В. Динамическое создание карт уровня wifi-сигналов для систем локального позиционирования // Системы и средства информатики. 2014. Т. 24. № 1. С. 80–92.
2. Иванов Д. А., Суровцова Т. Г., Тяхти Е. А. Анализ активности в беспроводных сетях как инновационный метод изучения поведения покупателей в торговых центрах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 183 (2). С. 271–275.
3. Мосчевикин А. П., Галов А. С., Волков А. С. Локация в беспроводных сетях датчиков стандарта nanoLOC (IEEE 802.15.4a) // Информационные технологии. 2011. № 8. С. 43–47.
4. Мосчевикин А. П., Галов А. С., Волков А. С. Точность расчета локации в беспроводных сетях датчиков стандарта nanoLOC // Информационные технологии. 2012. № 9. С. 37–41.
5. Овчинников С. Системы позиционирования и мониторинга // Технологии и средства связи. 2014. № 2. С. 18–22.
6. Galov A. S., Moschevikin A. P., Voronov R. Combination of RSS localization and ToF ranging for increasing positioning accuracy indoors // 11th International Conference on ITS Telecommunications ITST-2011. P. 299–304.
7. Deak G., Curran K., Condell J. A survey of active and passive indoor localisation systems // Computer Communications. 2012. Vol. 35. № 16. P. 1939–1954.
8. Liu H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems // Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on. 2007. Vol. 37. № 6. P. 1067–1080.
9. Moschevikin A., Galov A., Soloviev A., Mikov A., Volkov A., Reginya S. RealTrac technology overview. // EvAAL 2013. Communications in Computer and Information Science series CCIS. 2013. Vol. 386. P. 60–71.
10. Nanotron Technology GmbH. Available at: <http://www.nanotron.com>
11. Pei Z. et al. Anchor-free localization method for mobile targets in coal mine wireless sensor networks // Sensors. 2009. Vol. 9. № 4. P. 2836–2850.

Voronov R. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Galov A. S., RTL-Service (Petrozavodsk, Russian Federation)

Moschevikin A. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Voronova A. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## ON INDOOR OBJECT'S TRAJECTORY TRACE ADJUSTMENT TO BUILDING'S FLOOR PLAN

A modern mobile device is equipped with an embedded inertial measurement unit. This unit can restore the motion trajectory (trace) of an indoor object. The object's motion indoors is restricted by the walls. Therefore, correlations of the object's motion trajectory (trace) within the structure of the building allow clarification of the object's position. This paper presents an algorithm of the trace adjustment to the building floor plan. Since the trace contains some errors, small corrections to the segments of the trace are applied. During adjustment the direction and the length of different parts of the trace can be varied. A proposed mathematical model for adjustment of the trace is discussed. The approximate algorithm is based on the dynamic programming method. An example of the proposed algorithm application is described. The developed approach might be applied in local positioning systems based on wireless sensors' networks in conditions of high load when a large number of mobile devices are periodically set to energy saving mode.

Key words: positioning of mobile objects, inertial measurement unit, accelerometer, RealTrac, local positioning system

## REFERENCES

1. Voronov R. V., Malodushev S. V. Dynamic Creation of the Wifi-Level Signals for Local Positioning Systems [Динамическое создание карт уровня wifi-сигналов для систем локального позиционирования]. *Sistemy i sredstva informatiki* [Systems and Means of Informatics]. 2014. Vol. 24. № 1. P. 80–92.
2. Ivanov D. A., Surovtsova T. G., Tyakhti E. A. Analysis of Activity in Wireless Networks as Innovative Method for the Study of Consumer Behavior in Shopping Malls [Анализ активности в беспроводных сетях как инновационный метод изучения поведения покупателей в торговых центрах]. *Nauchno-tehnicheskie ведомosti SPbGPU* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal]. 2013. № 183 (2). P. 271–275.
3. Moschevikin A. P., Galov A. S., Volkov A. S. Location of Networks Standard nanoLOC in Wireless Sensor (IEEE 802.15.4a) [Локация в беспроводных сетях датчиков стандарта nanoLOC (IEEE 802.15.4a)]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2011. № 8. P. 43–47.
4. Moschevikin A. P., Galov A. S., Volkov A. S. Calculation Accuracy of Location in the Wireless Sensor Networks Standard nanoLOC [Точность расчета локации в беспроводных сетях датчиков стандарта nanoLOC]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2012. № 9. P. 37–41.
5. Ovchinnikov S. Positioning and Monitoring Systems [Системы позиционирования и мониторинга]. *Tekhnologii i sredstva svyazi* [Communication Technologies & Equipment Magazine]. 2014. № 2. P. 18–22.
6. Galov A. S., Moschevikin A. P., Voronov R. Combination of RSS localization and ToF ranging for increasing positioning accuracy indoors // 11th International Conference on ITS Telecommunications ITST-2011. P. 299–304.
7. Deak G., Curran K., Condell J. A survey of active and passive indoor localization systems // Computer Communications. 2012. Vol. 35. № 16. P. 1939–1954.
8. Liu H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems // Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on. 2007. Vol. 37. № 6. P. 1067–1080.
9. Moschevikin A., Galov A., Soloviev A., Mikov A., Volkov A., Reginya S. RealTrac technology overview. // EvAAL 2013. Communications in Computer and Information Science series CCIS. 2013. Vol. 386. P. 60–71.
10. Nanotron Technology GmbH. Available at: <http://www.nanotron.com>
11. Pei Z. et al. Anchor-free localization method for mobile targets in coal mine wireless sensor networks // Sensors. 2009. Vol. 9. № 4. P. 2836–2850.

Поступила в редакцию 04.07.2014