

УДК 621.398

# МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГОМОГЕННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

В. А. Власова

Аспирант

Кафедра «Сети связи»

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

E-mail: zlata\_ne@bk.ru

*У статті представлена імітаційна модель процесу позиціонування елементів на етапі ініціалізації гомогенної бездротової сенсорної мережі (БСМ), що дозволяє визначити середньоквадратичне відхилення координат, що визначаються за методом RSSI і з поєднаним експериментально-аналітичним циклом. Дослідження моделі показало, що можливе достатньо точне визначення місцезнаходження вузлів БСМ вже на етапі ініціалізації мережі без суттєвих енергетичних витрат*

*Ключові слова: модель, ініціалізація, мот, гомогенний, позиціонування, енергоефективність*

*В статье представлена имитационная модель процесса позиционирования элементов на этапе инициализации гомогенной беспроводной сенсорной сети (БСС), которая позволяет определить средноквадратическое отклонение координат, определяемых по методу RSSI и с совмещенным экспериментально-аналитическим циклом. Исследование модели показало, что возможно достаточно точное определение местоположения узлов БСС уже на этапе инициализации сети без существенных энергетических затрат*

*Ключевые слова: модель, инициализация, мот, гомогенный, позиционирование, энергоэффективность*

## 1. Введение

На сегодняшний день простым и доступным методом проверки и исследования алгоритмов взаимодействия элементов сети или функционирования сети в целом является имитационное моделирование на ПК. Для этого могут использоваться готовые программные продукты, или создаваться новые, учитывающие специфические требования. Примерами имеющихся симуляторов беспроводных сенсорных сетей (БСС) могут являться [1 – 3], но они не решают задачу эмуляции фазы инициализации и определения местонахождения объектов сенсорной сети, а только моделируют стек протоколов (включая маршрутизацию), энергопотребление, приемопередатчик, канал связи (в том числе ландшафтные особенности) и взаимодействие между объектами. Симулятор позиционирования БСС, описанный в [4], имеет широкую функциональность и моделирует 6 алгоритмов позиционирования, но не содержит модель позиционирования по алгоритму RSSI и реализация алгоритма уточнения по способу [5] затруднена и нецелесообразна. Тогда работа по созданию симулятора взаимодействия объектов сети в процессе позиционирования на этапе инициализации является актуальной. Примером такого симулятора является модель процесса позиционирования, которая описана ниже.

## 2. Наложённые ограничения

Так как модель имитирует только процесс позиционирования, то введены следующие основные ограничения модели рассматриваемой сети: коэффициент ослабления равен коэффициенту ослабления для

свободного пространства ( $k=20$ ), а дополнительное затухание  $A_d$  имеет детерминированные значения для различных направлений; сенсорное поле представляет из себя квадрат (для упрощения геометрических вычислений); базовые станции (БС) размещаются в углах сенсорного поля; антенны БС имеют стандартную диаграмму направленности полуволнового диполя в дальней зоне (вариант исполнения XBeep-PRO XSC RF Module с диполем [6]).

Сам процесс имитационного моделирования предполагает абстрагирование математической модели от реальности, т.к. во-первых абсолютно все аспекты работы сложной системы невозможно учесть и предвидеть, а во-вторых – не все аспекты оказывают существенное влияние на объект. Поэтому, при создании данной модели был сделан ряд допущений и необходимо будет в дальнейшем проанализировать модель на адекватность в сравнении с реальными беспроводными сенсорными сетями.

Рассмотрим подробнее компоненты модели, которые описывают основные процессы и явления, существенные для исследования способа позиционирования.

## 3. Компоненты модели

### 3.1. Модель сенсорной сети:

- сеть состоит из  $N$  узлов, которые случайным образом равномерно распределены на квадратном двумерном сенсорном поле площадью  $S$  и 4-х суперузлов – БС, которые размещены в углах поля; при этом каждая БС содержит 4-е дополнительных узла (однотипных мотам сенсорного поля), которые являются выносными антеннами для данной БС;
- число резервных мотов  $N_{mp} = 50\%$ ;

- максимальный размер поля ограничивается дальностью действия БС и равен площади 46,08 км<sup>2</sup> или длине сторон по 6,788 км (согласно выбранной БС в п. 2);

- глобальные расстояния/координаты считаются абсолютно точными и являются эталонами для оценки точности определения местоположения.

### 3.2. Модель БС:

- в качестве БС используется модуль XBee-PRO XSC RF Module [6], т.к. его характеристики наиболее отвечают требованиям для моделируемой сети;

- БС в широкополосном режиме покрывают все поле;

- дальность действия в открытом пространстве 9,6 км [6] с диполем;

- диаграмма направленности соответствует стандартной диаграмме направленности диполя (симметричного вибратора);

- конструкция выносных антенн представлена в [5].

### 3.3. Модель мота:

- в качестве узлов моделируемой сети используется модуль XBee RF Module [7];

- дальность действия в открытом пространстве 60 м;

- замер контролируемого параметра точечный;

- информация для позиционирования представляет собой массив данных от 8-ми разрядного индикатора RSSI, где содержатся квантованные значения уровня принятого пилот-сигнала от 4 БС и отдельный аналогичный массив для хранения уровней сигнала от соседей;

- моты являются материальными точками.

### 3.4. Модель канала

При передаче радиосигнала в реальной среде распространения имеет место искажение сигнала, характер которого определяется типичными для данной среды условиями. Характеристика канала обычно определяется по структуре принятого пилот-сигнала, который подвергся искажениям при прохождении от передатчика до приемника. Искажения в канале связи зависят от времени, несущей частоты, ориентации антенн и т.п. Кроме этого на сигнал накладываются характерные для радиоканала искажения: многолучевость, затенение, шумы, перекрестные помехи и т.д. Поэтому, модель канала, адекватная реальному, является отдельной и самостоятельной темой исследования, которая выходит за рамки данного анализа.

Согласно [8 – 11] существует множество способов моделирования многолучевого распространения радиоволн. Однако, учитывая то, что степень сложности данной модели не влияет на показатели эффективности метода позиционирования [5], была выбрана простейшая модель – аддитивное изменение уровня сигнала на некоторую случайную величину в выбранном диапазоне, которая может быть как положительной, так и отрицательной.

Таким образом, модель содержит упрощенный эквивалент канала связи и учитывает влияние затухания сигнала и последствий многолучевого распространения радиоволн:

- распространение радиоволн в модели описывается формулой затухания

$$A = (k + \Delta) \cdot \lg\left(\frac{4\pi df}{c}\right), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент ослабления сигнала (для свободного пространства  $k=20$ ),  $\Delta$  – компонента, показывающая ослабление сигнала в реальной среде,  $d$  – расстояние между источником и приемником сигнала,  $f$  – частота сигнала,  $c$  – скорость света.

- многолучевая погрешность носит псевдослучайный характер в диапазоне от 0 до 1 у.е. длины (например, метр);

- коэффициент ослабления для условий моделирования  $k$  выбран равным 20 (для свободного пространства);

- Частота  $f = 2,4$  ГГц в соответствии со стандартом [12].

### 3.5. Модель сенсорного поля:

- физические параметры сенсорного поля не изменяются в течение времени жизни сети;

- сенсорное поле ровное, без преград;

- узлы сенсорной сети однотипны и равноправны и могут выступать в качестве измерителей, ретрансляторов, маршрутизаторов, координаторов (сеть гомогенна).

## 4. Программа моделирования процесса позиционирования с совмещенным экспериментально-аналитическим циклом

На основе способа позиционирования [5], ограничений (п. 2) и разработанного алгоритма взаимодействия элементов сети на этапе инициализации [13] была написана программа (компьютерная модель) для исследования алгоритма определения координат. Программа написана в среде разработки Code Gear C++ Builder 2007 с использованием встроенных модулей и библиотек.

UML-модель процесса позиционирования представлена на рис. 1.

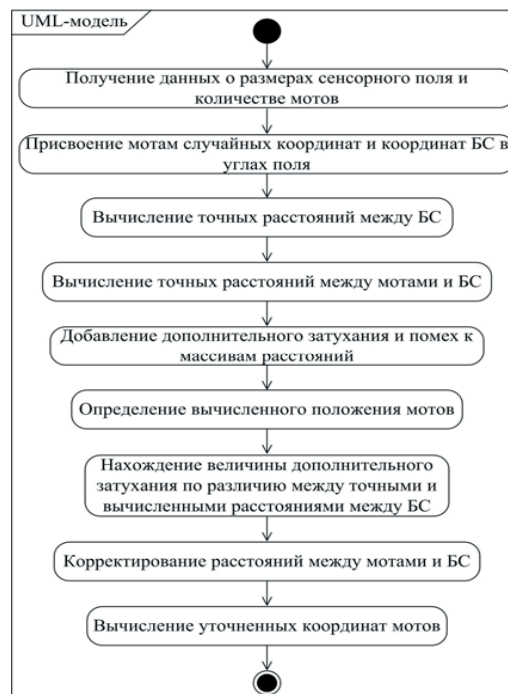


Рис. 1. UML-модель программы моделирования процесса позиционирования с совмещенным экспериментально-аналитическим циклом

Алгоритм работы программы представлен в виде блок-схемы на рис. 2 - 5.

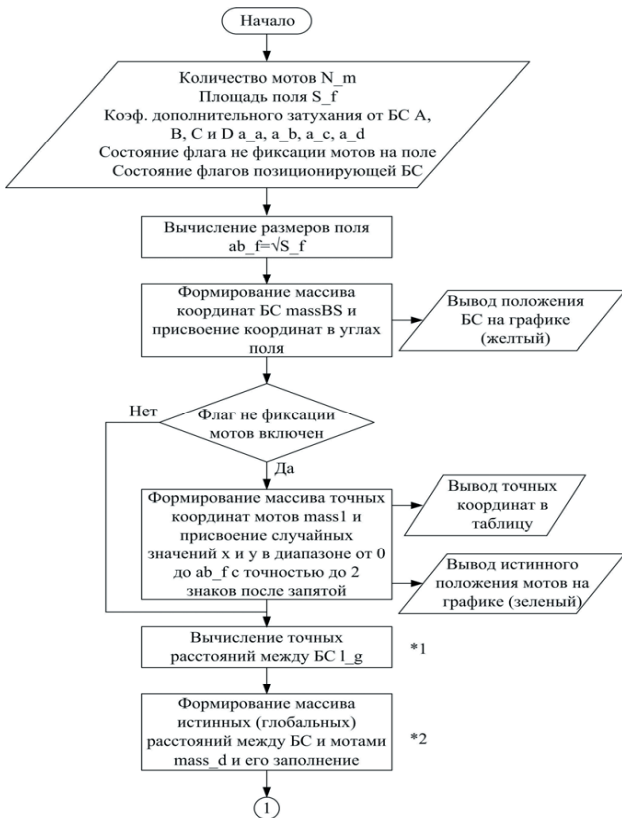


Рис. 2. Блок-схема алгоритма позиционирования (ч. 1)

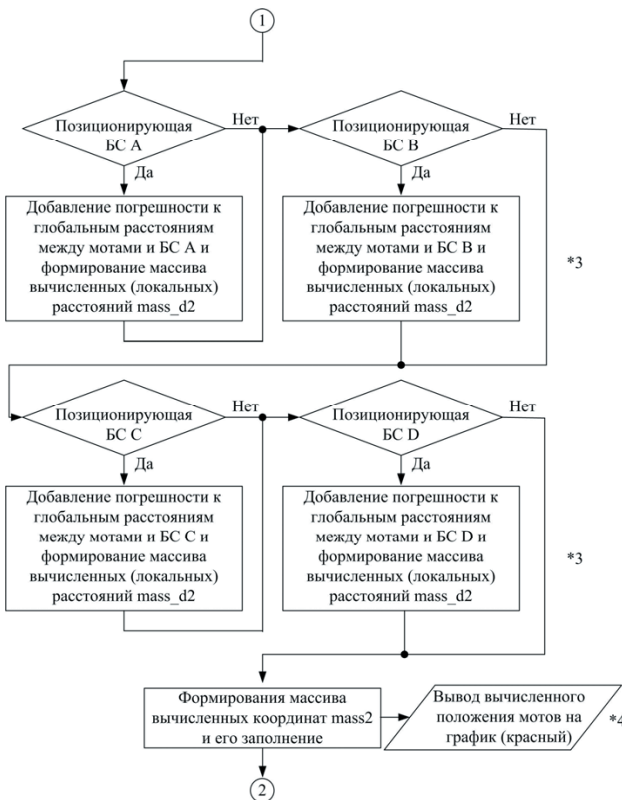


Рис. 3. Блок-схема алгоритма позиционирования (ч. 2)

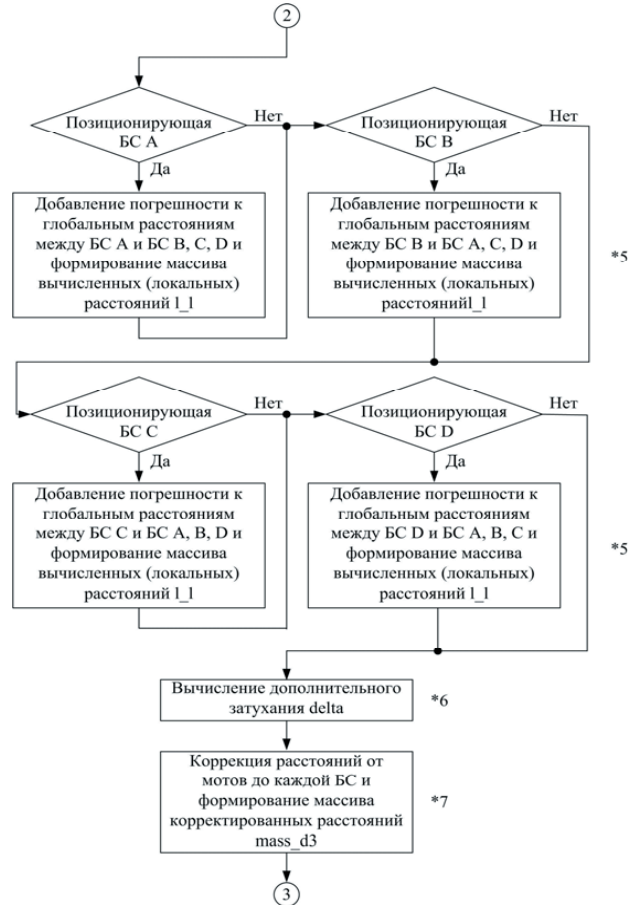


Рис. 4. Блок-схема алгоритма позиционирования (ч. 3)

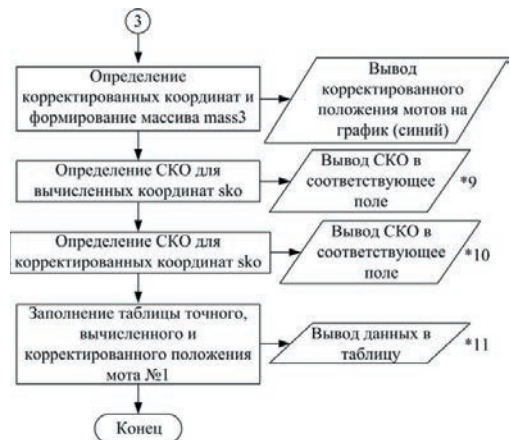


Рис. 5. Блок-схема алгоритма позиционирования (ч. 4)

Описание блок-схемы:

\*1. Вычисление точных (истинных) расстояний между БС определяется геометрически по формуле (2):

$$d_{r_i} = \sqrt{(x_{BC_i} - x_{BC_j})^2 + (y_{BC_i} - y_{BC_j})^2} \quad (2)$$

\*2. Вычисление точных (истинных) расстояний между БС и мотами определяется по формуле (3), аналогичной (2):

$$d_{m_j} = \sqrt{(x_{BC_i} - x_{m_j})^2 + (y_{BC_i} - y_{m_j})^2} \quad (3)$$

\*3. Моделирование увеличения затухания: к коэффициенту ослабления  $k$  прибавляется дополнительное затухание  $\Delta$ , т.е. затухание сигнала:  $A = (k + \Delta) \lg\left(\frac{4\pi df}{c}\right)$ . Тогда вычисленное расстояние через глобальное определяется:

$$d_b = \frac{k+\Delta}{k} \sqrt[k]{d_r \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^{\frac{\Delta}{k}}}. \quad (4)$$

Величина  $\Delta$  различна для 4 БС.

Моделирование многлучевости: к вычисленному расстоянию после затухания прибавляется величина  $(-1)^x \cdot \psi$ , где  $x$  и  $\psi$  – псевдослучайные числа в диапазоне от 1 до 10 и от 0 до 1 соответственно.

Результатирующее вычисленное расстояние имеет вид:

$$d_b = \frac{k+\Delta}{k} \sqrt[k]{d_r \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^{\frac{\Delta}{k}}} + (-1)^x \cdot \psi. \quad (5)$$

\*4. Координаты вычисляются путем решения системы уравнений:

$$(x_m, y_m) = \begin{cases} d_A^2 = (x_A - x_m)^2 + (y_A - y_m)^2 \\ d_B^2 = (x_B - x_m)^2 + (y_B - y_m)^2 \\ d_C^2 = (x_C - x_m)^2 + (y_C - y_m)^2 \end{cases}, \quad (6)$$

где  $d_i$  – расстояние до  $i$ -ой БС,

$x_m, y_m$  – искомые координаты мота,

$x_i, y_i$  – координаты  $i$ -ой БС.

\*5. Добавление погрешности к расстояниям между БС аналогично п. \*3 и имеет те же значения для соответствующих позиционируемых БС.

\*6. Четыре значения дополнительного затухания (от 4 мотов на БС) вычисляется для каждой БС по формуле (7) и усредняется:

$$\Delta = k \cdot \lg \frac{d_{\text{БС}}}{d_{r\text{БС}}}. \quad (7)$$

\*7. Коррекция расстояний от мотов до БС с учетом соответствующего дополнительного затухания:

$$d_k = d_b \frac{k-\Delta}{k} \left(\frac{4\pi f}{c}\right)^{-\frac{\Delta}{k}}. \quad (8)$$

\*8. Аналогично п. \*4.

\*9. Среднеквадратическое отклонение (СКО) для вычисленных координат рассчитывается одновременно для  $x$  и  $y$  по формуле:

$$\sigma_b = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(x_{r_i} - x_{b_i})^2}{2}} + \sqrt{\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(y_{r_i} - y_{b_i})^2}{2}} \right]. \quad (9)$$

\*10. СКО для скорректированных координат вычисляется по формуле (10), аналогичной (9):

$$\sigma_k = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(x_{r_i} - x_{k_i})^2}{2}} + \sqrt{\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(y_{r_i} - y_{k_i})^2}{2}} \right]. \quad (10)$$

\*11. Истинное, вычисленное и скорректированное положение для первого мота приводится для сравнения методов позиционирования. Т.к. каждый новый запуск программы значения координат мотам присваиваются заново и случайно, то первый мот может находиться в любой точке поля.

Интерфейс программы состоит из полей для ввода значений: количество мотов, площадь поля, дополнительного затухания от БС А, В, С и D.

Для фиксации положения мотов на поле предусмотрен CheckBar «Не фиксировать моты», на котором необходимо снять галочку, после чего при нажатии на кнопку «Start» процесс позиционирования будет производиться для мотов со статическими координатами. Для выбора позиционирующей БС есть 4 советующих CheckBar'a. Для удобства в табл. 1 выведены истинные координаты всех мотов, а для сравнения истинных, вычисленных и скорректированных координат в табл. 2 выведены все эти значения для 1-го мота (т.к. координаты мотов генерируются случайным образом, положение мота №1 будет всегда различным, если не снята галочка «Не фиксировать моты»). Кнопка «Start» запускает программу на выполнение.

Результаты работы программы приведены на рис. 6 с н.у.: количество мотов – 200, размеры поля – 100×100 м, дополнительное затухание от А – 0.5, от В – 0.7, от С – 0.3, от D – 0.8.

Понятно, что чем больше удаление от позиционирующей БС, тем больше величина дополнительного затухания (погрешность). Т.к. положение мотов находится как точка пересечения окружностей, то влияние погрешностей при близких по значению расстояниях от БС частично компенсируется. Особенно хорошо это заметно в центре поля, где при равном удалении от всех БС величина погрешности примерно одинакова.

## 5. Заключение

Как видно на приведенном рис. 6, отклонение вычисленных координат в среднем составляет 43,47 м. Утверждение в [13, 14], что в открытом пространстве (вне помещения) точность алгоритма RSSI составляет примерно 0,5d, подтверждает адекватность модели и ее соответствие теоретическим данным. По результатам моделирования можно сделать вывод, что применение способа [5] позволяет получить точность координат 0,65-0,98 м уже на этапе инициализации сети без применения вспомогательных модулей определения местоположения, маяков и без дополнительных энергозатрат (не требуется множество итераций взаимодействия элементов).

Несмотря на то, что метод RSSI характеризуется увеличением погрешности в зависимости от удаления от позиционирующего элемента сети, предложенный метод с совмещенным экспериментально-аналитическим циклом, основанный на методе RSSI, не имеет такой зависимости. Как видно из результатов моделирования, погрешность равномерна на всем сенсорном поле.



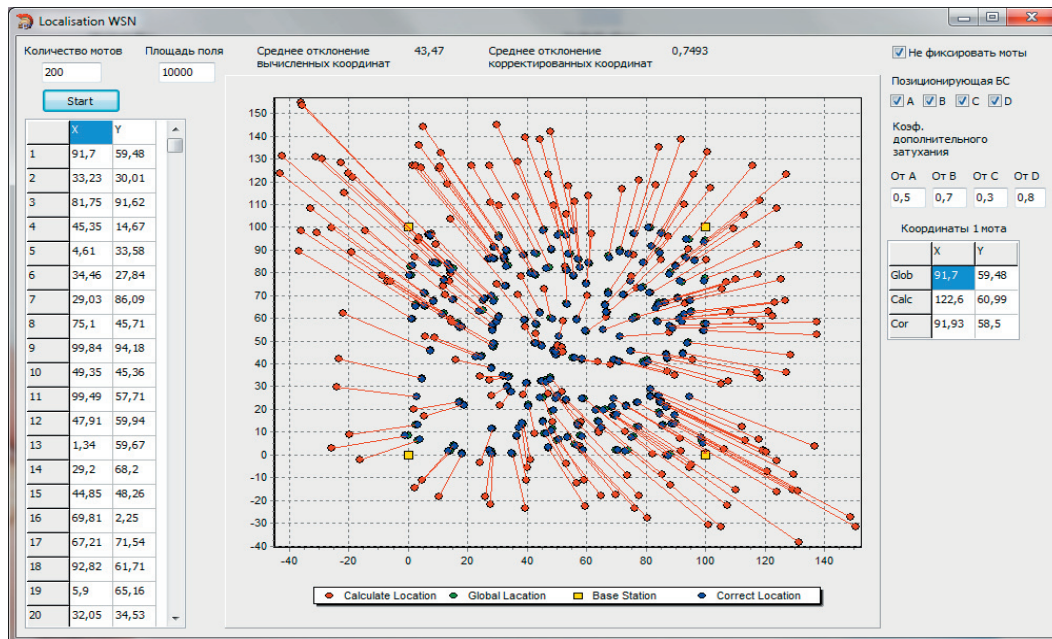


Рис. 6. Результат моделирования процесса позиционирования

## Литература

1. Гавриленко, В.Г. Детальное моделирование физического уровня в симуляторе беспроводных сенсорных сетей [Текст]/ В.Г. Гавриленко, А.Ю. Ельцов, А.А. Кирюшин, С.В. Лобанов, А.Н. Садков// Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54. – №4. – С. 465-475.
2. Park, S. SensorSim: A Simulation Framework for Networks [Text]/ S. Park, A. Savvides, M. B. Srivastava// MSWIM '00 Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems. – 2000. – P. 104-111.
3. Marmol, F.G. TRMSim-WSN, Trust and Reputation Models Simulator for Wireless Sensor Networks [Text]/ F.G. Marmol, G.M. Perez// IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC 2009), Communication and Information Systems Security Symposium. – 2009. – P. 1-5.
4. Naguib, A. Wireless Sensor Network Localization Simulator v1.1 [Electronic resource]/ A. Naguib. – 2011. Режим доступа: <http://www.codeproject.com/Articles/225536/Wireless-Sensor-Network-Localization-Simulator-v1>.
5. Спосіб позиціювання вузлів у польових ZigBee мережах [Текст]: пат. №70948 України: МКП Н 04 W 64/00 Власова В.О. Зеленин А.М.; заявник та власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – u 2011 15709; заявл. 30.12.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. №12. – 7 с.: іл.
6. XBee-PRO XSC RF Module [Text]: Product Manual. – Digi International Inc., 2008. – 45 p.
7. XBee/XBee-PRO RF Modules [Text]: Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol. – Digi International Inc., 2009. – 69 p.
8. Recommendation ITU-R P.1411-6 (02/2012): Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radio-communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. P Series: Radiowave propagation. [Text]/ International Telecommunication Union. – ITU-R: Radiocommunication Sector. – 2012. – 35 p.
9. Поваляев, Е. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Часть 3. Борьба с многолучевостью [Текст]/ Е. Поваляев, С. Хуторной// Инженерная микроэлектроника. – 2002. – №2(65). – С. 23-30.
10. Ке, Я. Многолучевая доплеровская модель [Текст]/ Я. Ке// Системи управління, навігації та зв'язку. – 2009. – №3. – С. 219-221.
11. Аникин, А.А. Разработка и моделирование систем комплексирования разнородных наблюдений [Текст]: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.18/ А.А. Аникин; [Ульяновский государственный технический университет]. – Ульяновск, 2006. –140 с.
12. IEEE Std. 802.15.4-2003. IEEE Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems, Local and metropolitan area networks. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [Текст]/ IEEE Computer Society. – NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2003. – 670 p.
13. Зеленин, А.Н. Фаза инициализации в беспроводных сенсорных сетях [Текст]/ А.Н. Зеленин, В.А. Власова// Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – №26 – С. 55-61.
14. Qi, Y. On relation among time delay and signal strength based geolocation methods [Text]/ Y. Qi, H. Kobayashi// Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE. – Dec. 2003. – Vol. 7. – P. 4079-4083.