

УДК 621.396

## МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ УЗЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ



[П.В. ГАЛКИН](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – The article provides an analysis of methods, techniques and algorithms for determining the coordinates of the nodes of wireless sensor networks. Detailed consideration and analyzed methods measure the distance to the wireless sensor network nodes with known coordinates. A model is proposed for determining the coordinates of the wireless sensor network nodes using RSSI techniques and ToF. Also, an algorithm sharing methods RSSI and ToF (ToA). In the initialization phase the wireless sensor network nodes is performed based on the distance measurement method RSSI, for more parts of the network, namely the piconet where there are units with built-in sensors of the global positioning system, a piconet nodes binds to global coordinates, for the rest of the network, and piconets without sensors is a global positioning system, a method for determining the distance ToF to three nodes with known coordinates. The results of experimental studies on the effect on the adjacent channel measurement RSSI, the influence of the nearby radio emission measurements RSSI, as well as the influence of the distance to the level of RSSI. Taking into account the conducted experiments are prompted to enter the limit for the distance measurement method RSSI up to 10 meters, as well as be able to correct nodes that are within 1 meter. The developed model positioning can be used for all modes of the wireless sensor network.

**Анотація** – В роботі проведено аналіз методів, методик та алгоритмів визначення координат вузлів безпроводових сенсорних мереж. Запропоновано модель визначення координат для вузлів бездротової сенсорної мережі з використанням методів RSSI і ToF. Запропоновано ввести обмеження для вимірювання відстані за методом RSSI до 10 метрів, а також виконати коректування вузлів, що знаходяться в межах 1 метра. Розроблена модель визначення координат може застосовуватися для всіх режимів роботи бездротової сенсорної мережі.

**Аннотация** – В работе проведен анализ методов, методик и алгоритмов определения координат узлов беспроводных сенсорных сетей. Предложена модель определения координат для узлов беспроводной сенсорной сети с использованием методов RSSI и ToF. Предложено ввести ограничение для измерения расстояния по методу RSSI до 10 метров, а также выполнить корректировку узлов, находящихся в пределах 1 метра. Разработанная модель определения координат может применяться для всех режимов работы беспроводной сенсорной сети.

### Введение

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) представляет собой распределённую в пространстве систему, работа которой основывается на радиовзаимодействии между большим числом автономных узлов. Узлы БСС могут собирать определённую информацию о состоянии окружающей среды при помощи различных датчиков, которые подключаются к микроконтроллеру. Кроме этих двух элементов узел также состоит из памяти, для обслуживания микроконтроллера, радиоприемопередатчика, для обмена информацией с другими узлами сети, а также автономного источника питания. Иногда узлы БСС могут содержать интерфейсы для взаимодействия с исполнительными устройствами. В этом случае сеть может не только собирать информацию, но и управлять распределёнными в пространстве устройствами, например для реализации концепции «Умный дом», «Умный город» и «Интернет вещей». Поэтому уже на этапе проектирования разработчик сталкивается с тем, что каждая сеть – индивидуальная система [1].

В научных работах последних лет рассматриваются разные вопросы функционирования БСС. К таковым относятся модели сбора информации, алгоритмы кластеризации, энергоэффективная маршрутизация, методы и модели определения

координат узлов БСС и другие вопросы, с которыми приходится сталкиваться при разработке подобных сетей.

Как показано в диссертационной работе [2], задача определения местоположения узлов БСС является актуальной на этапе инициализации сети. Следует отметить, что актуальность определения координат не пропадает по мере функционирования сети. В данной работе предлагается рассматривать модель определения координат в привязке к модели сбора информации с целью снижения энергозатрат в БСС на основе «синергии» двух моделей.

## **I. Анализ существующих методов и моделей определения координат узлов в беспроводной сенсорной сети**

Важным фактором для систем мониторинга и контроля является привязка собранных всей системой данных к географическим координатам для возможности отображения собранной информации на карте и последующего их анализа. Поэтому задачу определения координат узла БСС (еще встречается название «локализация») начали рассматривать с момента создания таких сетей.

Процесс определения координат будет отличаться для трех этапов работы БСС: момент инициализации сети, активный обмен данными, спящий режим работы сети.

Как показано в работах [1-2], задача определения местоположения узлов БСС при отсутствии информации о топологии сети (момент инициализации сети) может быть решена с помощью метода определения координат объектов сенсорной сети с совмещенным экспериментально-аналитическим циклом за счет корректирующих коэффициентов, полученных сравнением расстояний, рассчитанных по методу ToF (Time of Flight – измерение времени прохождения сигнала) и RSSI (Received Strength Signal Indication – индикация уровня принятого сигнала). В работе [2] утверждается, что такой метод практически не имеет зависимости от расстояния между позиционируемыми и позиционирующими узлами, что значительно упрощает процедуру определения координат в БСС. Данный метод рассматривался в привязке к гомогенной беспроводной сенсорной сети, где сеть представлена как однородная структура. Но БСС не всегда гомогенна, она может иметь более сложную топологию, например кластерное дерево или кластеризацию определённых групп узлов, что в свою очередь требует доработки методов, предложенных в [1-2]. Также в качестве структуры беспроводные сети можно представить в виде гиперграфа, а информационный обмен описать при помощи потоковых моделей [3].

Иногда встречаются БСС, в которых некоторые узлы являются быстро движущимися объектами. В таких случаях для определения координат уже необходимо применять Smart-антенны, как например в работе [4], где приведена методика повышения быстродействия наведения луча для быстро движущихся узлов. Но как правило, в большинстве проектируемых и эксплуатируемых БСС узлы имеют антенны с круговой диаграммой направленности, и реже – секторальной.

Существующие методы определения координат в БСС проанализированы и систематизированы в диссертационной работе [5]. Как отмечает автор, измерение рас-

стояния между двумя объектами может быть основано на различных физических принципах, но наиболее часто упоминаемыми в литературе являются методы RSSI и ToA (Time-of-Arrival) – измерение расстояний на основе измерения времени распространения сигнала от передатчика к приемнику. Следует заметить, что ToA и ToF – это слова синонимы описывающие один метод измерения расстояний на основе измерения времени распространения сигнала от передатчика до приемника, который является одним из методов TDoA (Time Difference of Arrival – оценка разности времён прихода сигналов). Используя результаты методов RSSI и ToF (ToA) в системах позиционирования в режиме реального времени (Real-time Locating Systems – RTLS), применяют метод определения координат на основе измерения расстояния от узла к трем узлам с известными координатами, который называют трилатерацией (рис 1 а), при большом количестве узлов – мультилатерацией (рис. 1 б).

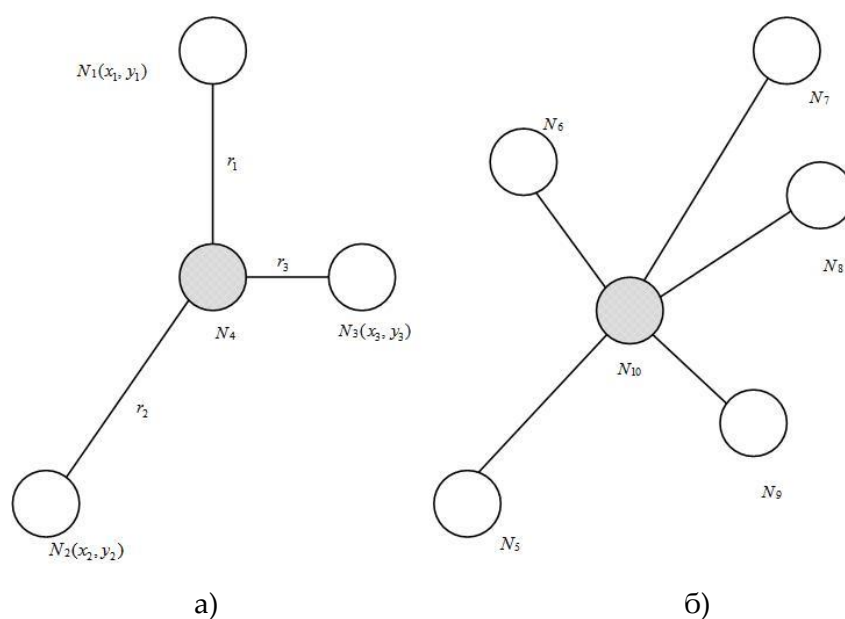


Рис. 1. Метод трилатерации (а) и мультилатерации (б) определения координат узла БСС

По методу трилатерации для нахождения координат \$(x, y)\$ узла \$N\_4\$ (рис. 1.а) необходимо решить систему уравнений, состоящую из трех уравнений, а по методу мультилатерации (рис. 1.б) из \$n\$:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = r_1^2; \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = r_2^2; \\ \dots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = r_n^2, \end{cases} \quad (1)$$

где \$n\$ – число узлов с известными координатами; \$r\_1 \dots r\_n\$ – расстояние от узла, для которого вычисляются координаты, к узлам с известными координатами.

Безусловно, каждый узел БСС можно оснастить датчиком определения глобальной системы координат (СК) на основе GPS или ГЛОНАСС системы, однако такое решение сильно удорожит всю сеть [6]. Для привязки координат узлов к гло-

бальной системе координат только небольшое количество узлов БСС оснащают датчиками систем глобального позиционирования. В идеальном случае достаточно трех-четырех таких узлов в БСС для перевода координат в глобальную СК [5]. И эту задачу можно довольно легко решить, так как уже существуют алгоритмы APS, MDS, ABC, AFL для определения глобальных координат для узлов, оснащенных приемниками сигнала GPS [7].

Анализ методов позиционирования в БСС [8] показал, что кроме методов RSSI и ToF (ToA) для определения расстояния между узлами БСС можно применить один из наиболее точных и универсальных методов - SDS-TWR (Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging), но он требует больших вычислительных мощностей. Суть метода состоит в вычислении двух задержек, которые возникают при распространении сигнала между двумя узлами БСС. В методе используются два пакета: пакет-запрос (test packets) в прямом направлении и пакет подтверждения (ack packet) – в обратном, (рис. 2). То есть узел, инициирующий связь, направляет запрос, а в ответ получает подтверждение.

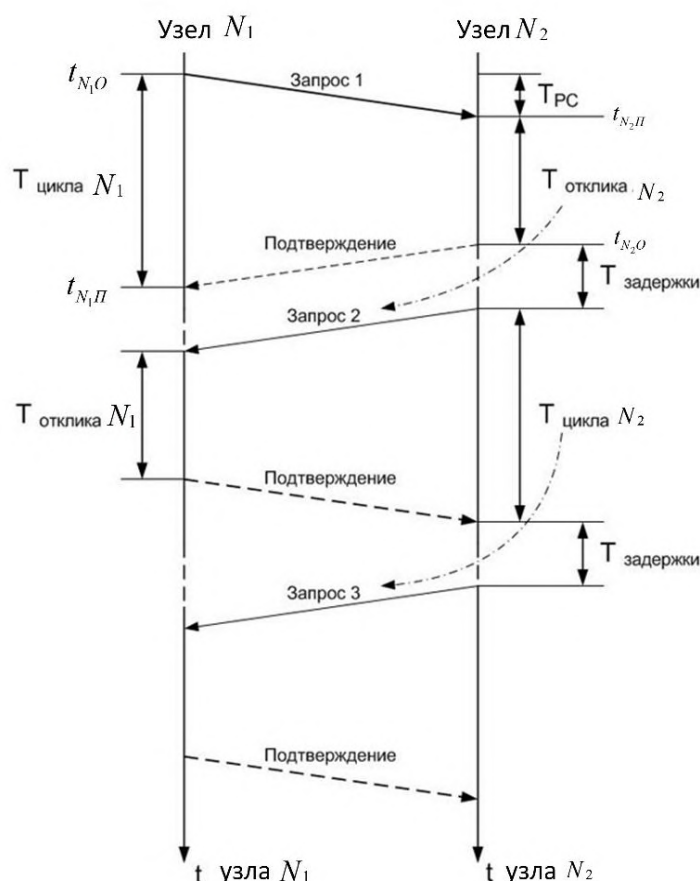


Рис. 2. Обмен пакетами данных в процессе измерения расстояния методом SDS-TWR между узлами БСС

Непосредственный процесс измерения методом SDS-TWR состоит из двух симметричных встречно направленных (зеркальных) циклов (рис. 2). В первом цикле узел  $N_1$  направляет узлу  $N_2$  пакет-запрос (test packets). Узел  $N_1$ , получив запрос, об-

рабатывает его и отправляет узлу  $N_2$  пакет-подтверждение (ack packet). При этом  $N_2$  отправляет подтверждение с задержкой ( $T_{отклика}N_2$ ). Узел  $N_1$ , получив подтверждение, определяет время цикла измерения ( $T_{цикла}N_1$ ). Это время равно удвоенному времени распространения сигнала ( $T_{PC}$ ) плюс  $T_{отклика}N_2$ . На этом первый цикл измерения завершается.

Второй цикл измерения начинается с того, что уже узел  $N_2$ , выждав после отправки подтверждения время, необходимое для завершения первого цикла ( $T$  задержки), направляет узлу  $N_1$  пакет-запрос, включив в него в качестве полезной нагрузки значение  $T_{отклика}N_2$ . Узел  $N_1$ , получив запрос, так же, как и  $N_2$  в первом цикле, обрабатывает запрос и возвращает подтверждение узлу  $N_2$ , запоминая  $T_{отклика}N_2$ . Узел  $N_2$ , получив подтверждение от узла  $N_1$ , определяет значение  $T_{цикла}N_2$  и отправляет это значение узлу  $N_1$  со следующим запросом.

Следовательно, за два цикла узел  $N_1$  получает всю необходимую для определения времени распространения сигнала информацию:

$$T_{PC} = \frac{T_{цикла}N_1 + T_{цикла}N_2 - T_{отклика}N_1 - T_{отклика}N_2}{4}. \quad (2)$$

Симметричность метода позволяет практически исключить ошибку, связанную с отсутствием синхронизации. Метод SDS-TWR можно применять только на ограниченном количестве узлов, у которых есть необходимая вычислительная мощность. Иногда для небольших сетей используют систему определения координат, где координаты узла окончательно вычисляются только на координаторе БСС. Такая модель не приемлема для больших БСС, так как трафик к координатору сети растет экспоненциально от увеличения количества узлов, для которых необходимо определить координаты [9].

Для RTLS применяют также триангуляцию – вычисление координат путем измерения углов направления от узла к трем узлам с известными координатами и полигонометрию – измерение как углов, так и расстояний. Триангуляцией называется процесс разбиения полигональной области со сложной конфигурацией в набор треугольников.

При анализе или синтезе сложных поверхностей их аппроксимируют сеткой треугольников и впоследствии оперируют с простейшими полигональными областями, т.е. с каждым из треугольников. Вычисления расстояния до узла могут проводить двумя способами (рис. 3):

- по котангенсам углов треугольников;
- по котангенсам дирекционных углов направлений.

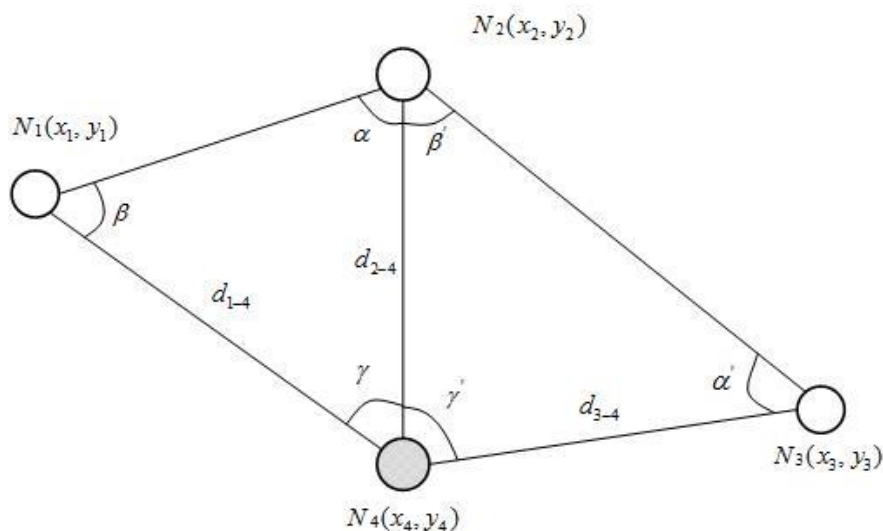


Рис. 3. Методы триангуляции по котангенсам углов треугольников и по котангенсам дирекционных углов направлений

Определение координат по котангенсам углов треугольников происходит по формуле Юнга:

$$\begin{aligned} x_4 &= \frac{x_2 \operatorname{ctg} \beta + x_1 \operatorname{ctg} \alpha + y_1 - y_2}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta}; \\ y_4 &= \frac{y_2 \operatorname{ctg} \beta + y_1 \operatorname{ctg} \alpha + x_1 - x_2}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta}. \end{aligned} \quad (3)$$

Определение координат по котангенсам дирекционных углов направлений происходит по формулам Гаусса:

$$\begin{aligned} y_4 &= y_2 + \frac{(y_2 - y_1) \operatorname{ctg} d_{1-4} + (x_1 - x_2)}{\operatorname{ctg} d_{2-4} - \operatorname{ctg} d_{1-4}}; \\ x_4 &= x_1 + (y_4 - y_1) \operatorname{ctg} d_{1-4}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $d_{1-4}, d_{2-4}$  – дирекционные углы направлений с исходных узлов  $N_1$  и  $N_2$  на определяемый узел  $N_4$ .

Методы трилатерации и мультитлатерации подходят для БСС, поскольку результатом применения методов RSSI и ToF(ToA) есть расстояние к узлам с известными координатами. Метод триангуляции возможно применять при использовании секторальных, а лучше остронаправленных антенн. Полигонометрия является сочетанием трилатерации и триангуляции.

На базе известных методов определения расстояния RSSI и ToF(ToA) строятся алгоритмы и модели определения координат. Так, в БСС на базе метода RSSI находят применение нейросетевые модели для нахождения локализации сети [10]. В качестве аппаратного решения применяются секторальные антенны [11], которые позволяют улучшить не только определение координат, но и оптимизировать передачу данных по секторам антенны. В случае совпадения направления сектора и направления на

узел, с которым нужно связаться, удастся уменьшить расход на прием-передачу информации. В зависимости от известного расстояния к узлу можно адаптивно управлять мощностью передатчика для экономии затрат энергии на передачу данных [12]. Методы RSSI и ToF (ToA) являются основными для определения координат в БСС [13].

Алгоритм определения координат с измерением расстояния по методу RSSI для сетей внутри помещения рассмотрен в работе [14]. Проблема увеличения точности локализации рассматривалась в работе [15] и была решена за счет предложенного DRLA (Double-Radius Localization Algorithm) – алгоритма.

Измеренное расстояние и координаты соседних узлов возможно учесть при выборе маршрутов передачи информационных потоков с учетом их величин. В качестве модели потока в синтезируемой сети можно использовать модель фрактального броуновского движения [16].

К высокоточным методам определения координат в БСС относят радиоинтерференционную систему позиционирования (RIPS), в основе которой лежит идея использования интерференции между радиосигналами, близкими по частоте, а также метод TWTT, работающий на основе вычисления времени двусторонней передачи [17].

В открытом пространстве мощность радиосигнала может быть рассчитана по формуле Фриса [17]:

$$P_{rx} = \frac{P_{tx}}{(4\pi d / \lambda)^2}, \quad (5)$$

где  $P_{rx}$  – мощность сигнала на принимающем узле,  $P_{tx}$  – мощность сигнала на передающем узле,  $d$  – расстояние между узлами в метрах,  $\lambda$  – длина волны в метрах, соответствующая частоте передачи (для БСС зачастую применяют диапазон 2,4 ГГц, что соответствует 10-сантиметровому диапазону).

Соответственно, зная мощность сигнала, можно вычислить расстояние между узлами 1-2 в БСС:

$$d_{1,2} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{tx}}{P_{rx}}}. \quad (6)$$

В реальных условиях в выражения (5-6) вводят коэффициенты усиления антенн, а также коэффициент, который показывает влияние канала передачи данных. Диапазон 2,4 ГГц характеризуется многолучевым характером распространения радиоволн [2], большим количеством сетей, работающих на данной частоте, что приводит к перекрестным помехам.

Метод RSSI, как базовый для определения координат, также рассматривался в работе [18]. Для определения локальной группы узлов, в которой необходимо определить координаты, можно применить зонный принцип [19]. Ошибка определения местоположения узла может быть вызвана целым рядом причин:

- опрашиваемый узел находился в спящем режиме;
- потерян пакет данных;
- низкая точность измерения RSSI;

- случайное значение RSSI;
- мешающий соседний канал связи.

Для устранения таких ошибок в работе [20] предложен адаптивный алгоритм определения координат.

В использовании метода RSSI приемник с логарифмической амплитудной характеристикой принимает сигналы, по которым встроенный индикатор RSSI формирует 8-разрядный код  $P_{rssi\_val}$ . Он получается в результате усреднения по восьми периодам (128 мкс) принятого сигнала и снабжается битом состояния, указывающим, когда приемник имел возможность принять по крайней мере восемь периодов. Мощность принятого сигнала  $P$  (дБм) вычисляется по формуле [6]:

$$P = P_{rssi\_val} + P_{rssi\_offset}, \quad (7)$$

где  $P_{rssi\_offset}$  – эмпирически подбираемая постоянная (порядка –45 дБм).

С целью построения адекватной модели канала передачи и определения дополнительного затухания в реальной среде распространения можно использовать измеренное несоответствие расстояний, которые определены по методу RSSI ( $d_{rssi}$ ) и ToF ( $d_{ToF}$ ) [2]:

$$A_0 = k \cdot \lg\left(\frac{d_{rssi}}{d_{ToF}}\right), \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент ослабления сигнала;  $d_{rssi}$  – расстояние между узлами, измеренное по методу RSSI;  $d_{ToF}$  – расстояние между узлами, измеренное по методу ToF.

Проблема локализации подвижных узлов рассмотрена в работе [21], где предложен алгоритм Sequential Uniformly Reweighted Sum-product Algorithm (SURW-SPA), который базируется на распределённом belief propagation (BP) алгоритме с последовательным проходом по дереву-алгоритму tree-reweighted message passing (TRW-S). Комбинированные алгоритмы с использованием метода трилатерации и многомерного измерения приведены в работе [22].

С целью увеличения общей энергоэффективности сети модель определения координат узла в БСС следует строить таким образом, чтобы уменьшить среднее время работы узла в режиме передачи [23].

В широкополосных сетях для локализации применяют методы ILS и DS, которые основываются также на измерении расстояния к подвижному узлу [24]. Расстояние к узлу БСС можно использовать для нахождения зависимости вероятности успешного приема пакетов в условиях многолучевого распространения сигналов [25]. В случае подвижных узлов возможно найти оптимизированную схему расположения сенсоров для размещения их в наиболее оптимальных точках и при наличии отклонений параметров приемопередатчика от номинальных значений. Для повышения зоны покрытия и решения проблемы низкой связанности сети в случае неоднородного размещения беспроводных узлов можно применить когерентное сложение. В литературе [26] рассматривается способ передачи информации в беспроводных сенсорных сетях,

что основывается на сложении полей, излучаемых близко расположенными узлами БСС, и позволяет увеличить дальность передачи информации.

Проанализировав методы для измерения расстояния для определения координат в БСС, можно сделать вывод, что наиболее применимыми являются два метода: RSSI и ToF (ТоА). Так, в работе [27] приведена модель измерения расстояния на основе RSSI. Для построения модели определения координат возможно примените муравьиных оптимизационных систем, как, в работе [28], где рассматривается задача нахождения оптимального соотношения между радиусом локализации и длиной пути маршрута. Оценка вероятности нахождения точного места положения узла MLE на основе RSSI приведена в работе [29]. Алгоритм, использующий RSSI для определения координат показан также в работе [30].

В методе ToF расстояние к узлам с определенными координатами находится по соотношениям [31]:

$$\begin{cases} \tau_{i,j} = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{c}; \\ \tau_{i,k} = \frac{\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}}{c}; \\ \dots \\ \tau_{i,n} = \frac{\sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2}}{c}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\tau_{i,j}, \tau_{i,k}, \tau_{i,n}$  – время распространения сигнала от узла  $i$  к узлам  $j, k, n$ , координаты которых  $(x_j, y_j), (x_k, y_k), (x_n, y_n)$  известны;  $c$  – скорость света, что соответствует скорости распространения электромагнитной волны.

При измерении времени распространения сигнала от одного узла к другому возможны задержки, которые связаны с переключением режима работы микроконтроллера узла, а также настройкой на несущую частоту. Распределённый алгоритм нахождения координат с неизвестной величиной задержки рассмотрен в работе [31].

Так же, как и в работе [2], в иностранных источниках, например [32], встречается комбинация двух методов RSSI и ToF в рамках одного алгоритма определения координат.

В последнее время также появились приемопередатчики на 2,4 ГГц стандарта IEEE 802.15.4 с функцией определения расстояния [33], как например приемопередатчик компании Atmel – AT86RF233. Метод основан на измерении разности фаз радиосигналов – PhDM (Phase Difference Measurement), генерируемых узлами сети, демонстрирует значительно лучшую точность, чем методы, основанные на RSSI. Метод PhDM работает следующим образом: вначале узел  $N_1$  инициирует запрос на измерение расстояния, отправляя его узлу  $N_2$ ; принятая фаза сигнала измеряется узлом  $N_2$ , после чего второй узел выступает в роли инициатора и отправляет запрос на

измерения на другой частоте узлу  $N_1$ . Расстояние между двумя узлами вычисляется как разность между измеренными фазами сигнала по формуле[33]:

$$d_{(N_1, N_2)} = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{-1 \cdot \sum_{n=1}^{n-1} \Delta\varphi_n}{(n-1) \cdot \Delta f}, \quad (10)$$

где  $c$  – скорость света,  $n$  – количество измерений,  $\Delta f$  – разность частот,  $\Delta\varphi$  – разность фаз.

Измерения как минимум на двух частотах вместе с повторяющимся измерением фаз на каждой частоте улучшает надежность и точность результата[33]. Метод PhDM по программной реализации похож на SDS-TWR.

Проведенный анализ и сравнение существующих методов, алгоритмов и моделей определения координат узлов беспроводных сенсорных сетей можно представить в виде соответствующих таблиц (табл. 1–3).

Таблица 1. Методы измерения расстояния между узлами БСС

Метод	Принцип	Точность в открытом пространстве, м	Необходимость дополнительной аппаратной реализации в узле	Необходимость большой вычислительной мощности узла
RSSI	измерение уровня принимаемого радиосигнала	3-5	-	-
ToF	измерение времени прохождения сигнала	1-3	-	-
ToA	измерения времени распространения сигнала	1-3	-	-
SDS-TWR	вычисление времени распространения сигнала за два симметричных цикла	< 1	-	+
PhDM	измерение разности фазы сигнала	< 1	+	-
RIPS	использования интерференции между радиосигналами	< 0.1	-	+
TWTT	вычисления времени двусторонней передачи	0.3-1	-	+

Проанализировав табл. 1, можно сделать вывод, что использование методов RSSI и ToF (ToA) для определения расстояния к узлам с известными координатами выглядит наиболее обоснованным, так как методы не требуют ни дополнительного оборудования, ни дополнительной вычислительной мощности на узлах БСС.

Как видно из табл. 2, методы трилатерации и мультитлатерации обладают преимуществом, перед триангуляцией и полигонометрией, так как не требуют секторальной или остронаправленной антенны.

Таблица 2. Методы определения координат узлов БСС

Метод	Принцип	Необходимое количество узлов с известными координатами узлов	Необходимость в секторальной антенне
Трилатерация	измерение расстояния до узлов с известными координатами	3	-
Мультилатерация	измерение расстояния до узлов с известными координатами	4 или больше	-
Триангуляция	измерения углов направления до узлов с известными координатами	3	+
Полигонометрия	измерение, как углов, так и расстояний до узлов с известными координатами	3	+

Алгоритмы и модели определения координат, которые рассматривались в анализе, в основном используют для определения расстояния методы RSSI и ToF (ToA) или их комбинацию и соответственно при своей реализации методы трилатерации (мультилатерации). Общим недостатком рассмотренных моделей и алгоритмов есть то, что в основном комбинация методов RSSI и ToF (ToA) применялась лишь для проверки или дополнительного уточнения расстояния. В то же время не учитывалась точность, которая может изменяться в зависимости от расстояния. Единственная попытка дать количественную оценку была сделана в работе [6]. Следовательно, ставится задача разработать алгоритм совместного использования методов RSSI и ToF (ToA) с учётом изменения точности определения расстояния, которая изменяется от расстояния.

Для построения модели определения координат будем использовать методы RSSI и ToF (ToA). Модель должна учитывать алгоритмы маршрутизации и модель сбора данных в БСС. С этой целью необходимо привести модель сбора данных в БСС.

В работе [17] указано, что точность метода RSSI в открытом пространстве составляет 3-5 м. В то же время в работе [6] утверждается, что метод определения расстояния между узлами на основе RSSI пригоден для измерений на небольших расстояниях (до 10 м) и имеет точность около 3 м. Поэтому с целью выяснения применимости и точности метода необходимо провести эксперимент по измерению дальности методом RSSI.

Таким образом, в ходе исследования необходимо решить следующие задачи:

- описать концепцию модели сбора данных в БСС;
- разработать алгоритм совместного использования методов RSSI и ToF (ToA) с учётом их особенностей;
- разработать модель определения координат;
- провести эксперимент по измерению дальности методом RSSI;
- при необходимости скорректировать модель определения координат по полученным данным.

## II. Разработка модели определения координат узлом БСС

### 2.1. Модель построения беспроводной сенсорной сети

Модель БСС представим гиперграфом [35]  $G(N, I)$ , где  $N$  – вершины гиперграфа, каждая вершина представляет собой пикосеть (специально объединенное подмножество узлов БСС), индекс  $\Theta$  показывает, что это множество является пикосетью,  $I$  – ребра гиперграфа, которые являются информационными потоками между несколькими пикосетями (два и более).

Пример БСС на основе разбиения ее на пикосети приведен на рис. 4, при этом показан частный случай, когда  $I$  соединяют только две вершины, что является по сути мультиграфом, когда ребро может соединять только две вершины.

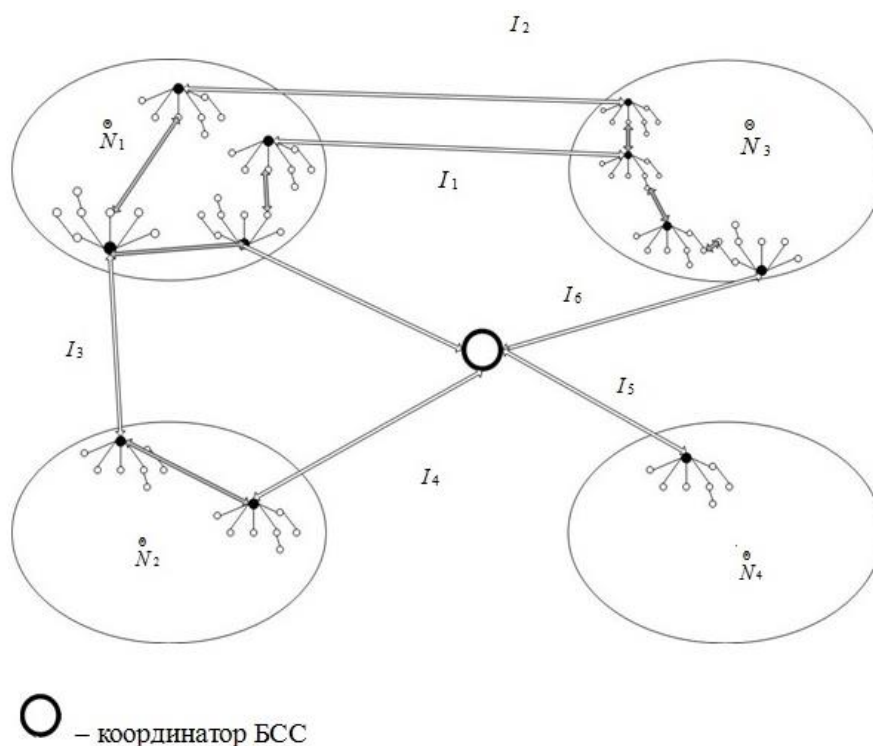


Рис. 4. Модель сети БСС на основе разбиения сети на пикосети

Множество вершин гиперграфа состоит из  $p$  -пикосетей, образованных в БСС:

$$N = \{N_1, N_2, \dots, N_p\}, \quad (11)$$

где  $p$  – количество пикосетей в БСС.

Множество ребер гиперграфа является множеством информационных потоков, возникающих между пикосетями:

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_j\}, \quad (12)$$

где  $j$  – количество информационных потоков в БСС.

При подходе к построению математической модели БСС на основе гиперграфа модель учитывает, что каждое ребро гиперграфа соединяет не только два узла сети БСС, но и любое подмножество узлов. Каждая пикосеть может быть с внутренней кластеризацией. Способ представления БСС в виде гиперграфа обладает высокой наглядностью. Гиперграфовая модель БСС и ее частная реализация в виде мультиграфа приведена с целью показать, что такое пикосети и как они могут взаимодействовать между собой. Вторая задача – показать, что пикосеть может быть с внутренней кластеризацией и, следовательно, это нужно учитывать при построении модели определения координат. Третья – показать, что пикосеть можно рассматривать отдельно от остальной сети и внутренние взаимодействия в ней представить тоже в виде гиперграфа или мультиграфа, но это уже задача другого исследования.

## 2.2. Алгоритм совместного использования методов RSSI и ToF (ToA) в пикосети

Результаты экспериментальных измерений расстояния для сети из узлов JN5148 методами RSSI и ToF [6] приведены на рис. 5. Они показывают, что погрешности при использовании метода ToF существенно меньше, чем при RSSI.

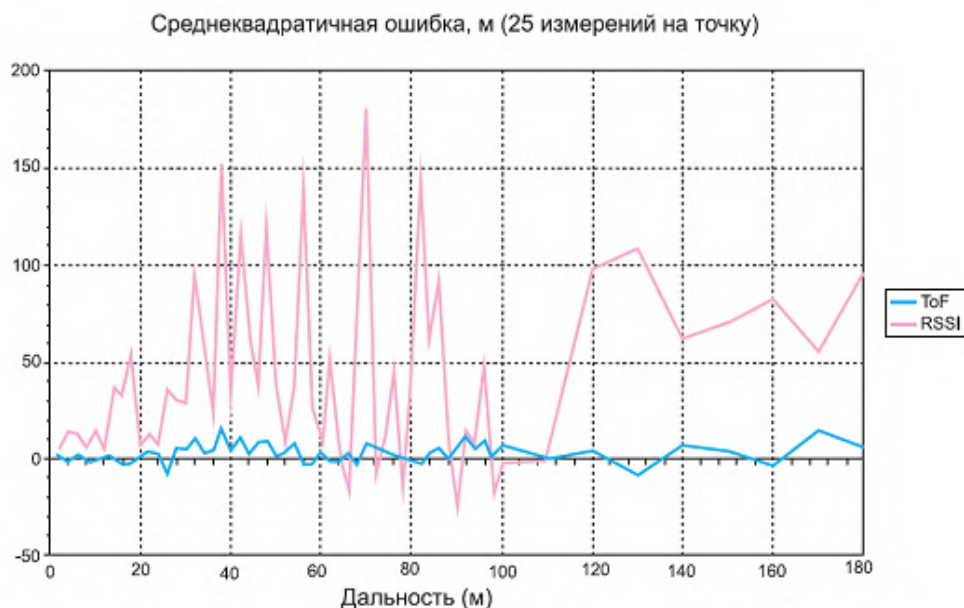


Рис. 5. Зависимость ошибок измерения расстояния методами RSSI и ToF от расстояния

При использовании метода RSSI уже на дальностях более 30 м ошибки измерений превышают само значение дальности. Таким образом, метод определения расстояния между узлами на основе RSSI пригоден для измерений на небольших расстояниях (до 10 м).

С целью использования преимуществ методов RSSI и ToF предлагается следующий алгоритм их совместной работы.

На этапе инициализации работы сети происходит установление системы координат, (рис. 6). Как известно из работы [5], система координат в БСС, полученная по

системам GPS или ГЛОНАСС, может быть локальной или глобальной. Совокупные издержки на использование датчиков GPS или ГЛОНАСС пропорциональны числу узлов, оснащенных ими [5]. Поэтому вариант оснащение всех узлов БСС модулями определения глобальной системы координат в беспроводной сенсорной сети видится экономически необоснованным. Вторым фактором является то, что энергопотребление для определения координат с использованием GPS (ГЛОНАСС) датчиков является не энергоэффективным. Для однократного определения координат, например для модуля DGM-100, требуется 4мВт·ч [5] при условии, что емкость современных малогабаритных батарей составляет порядка 20-40мВт·ч.

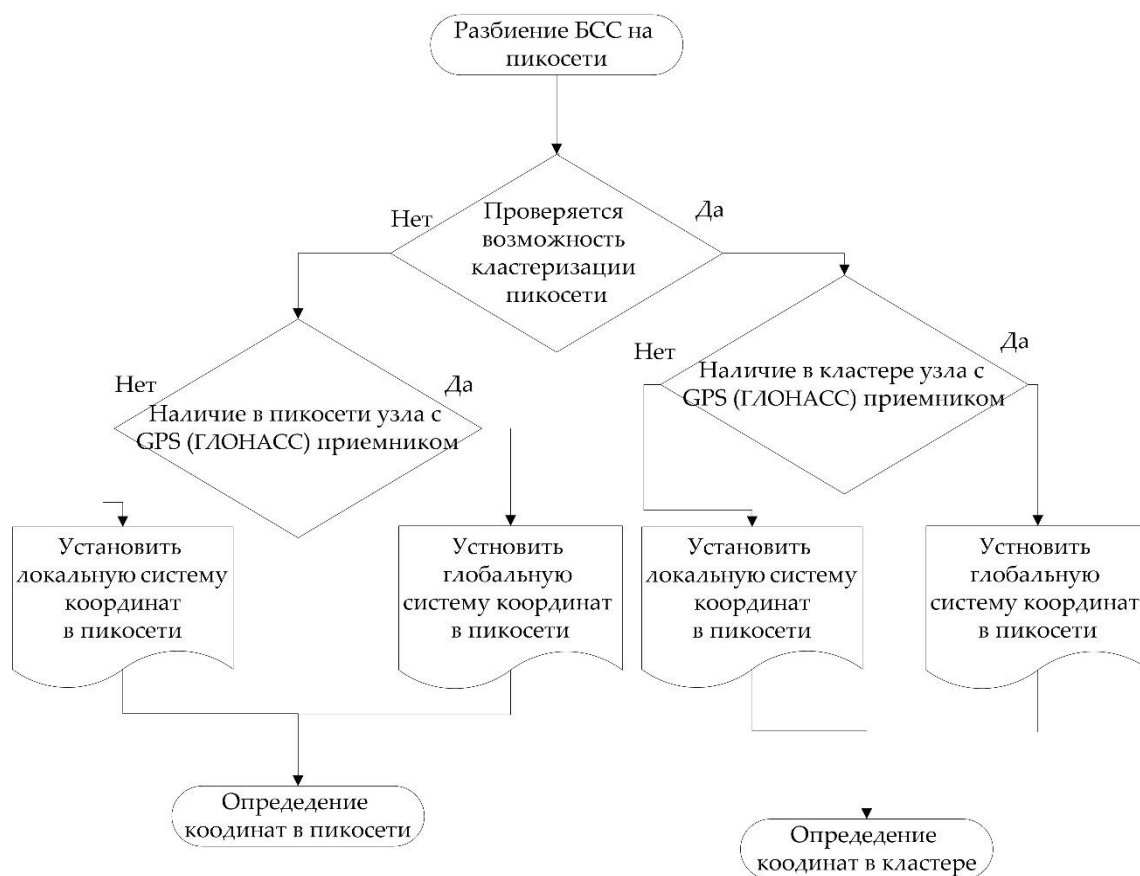


Рис. 6. Алгоритм установления системы координат при инициализации БСС

После инициализации системы координат возможно применить методы RSSI и ToF (ТоА) для определения расстояний к узлам пикосети, (рис. 7) или кластера (рис. 8).

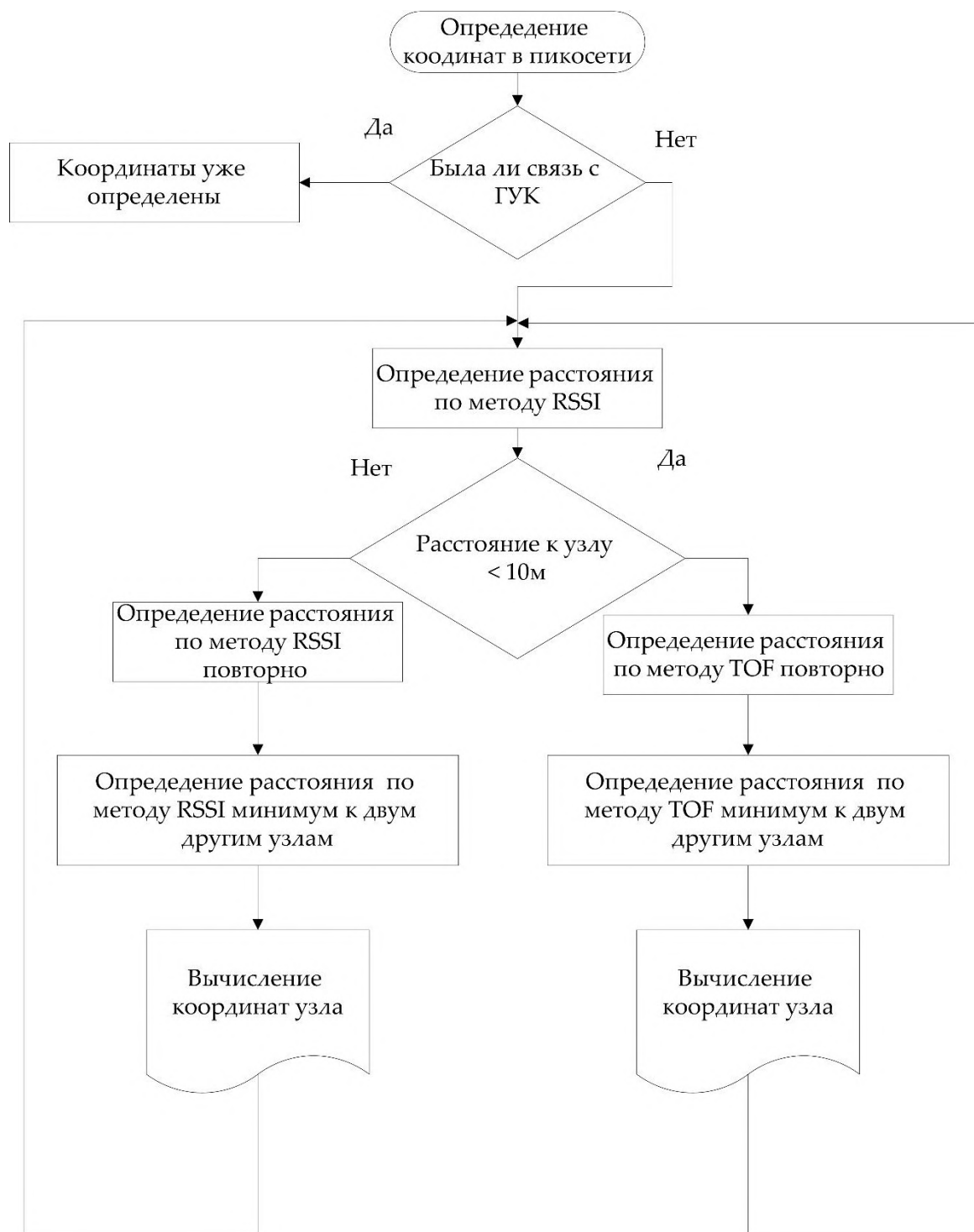


Рис. 7. Алгоритм определения координат узлом в пикосети

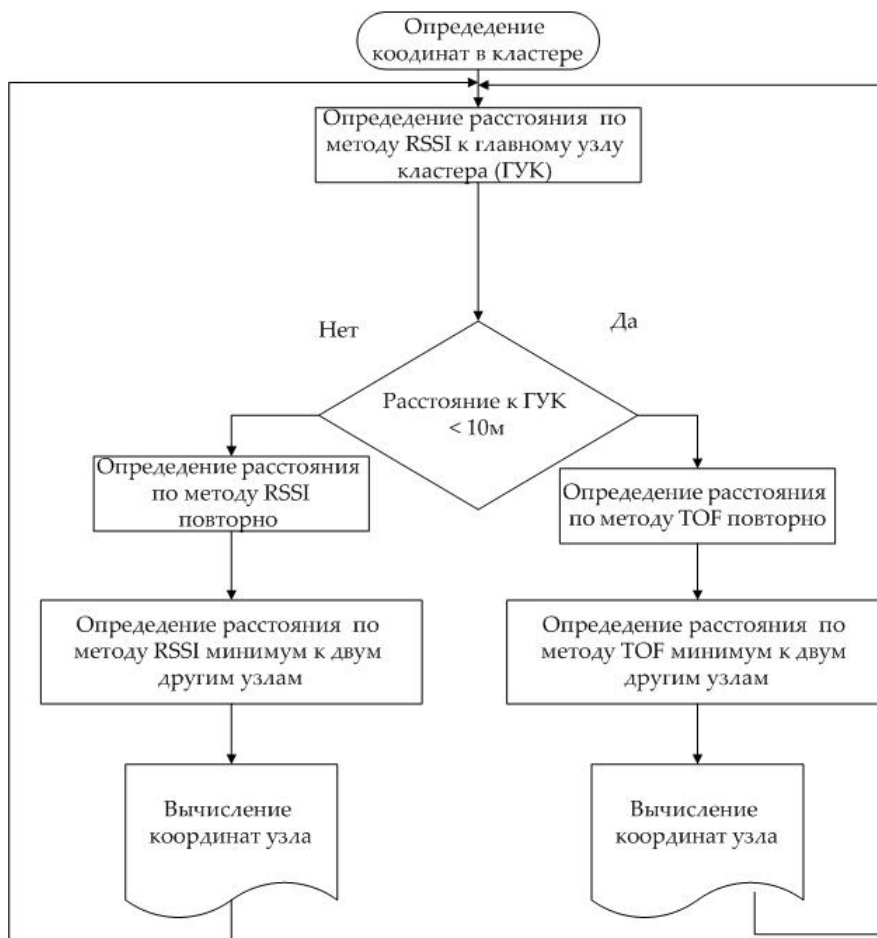


Рис. 8. Алгоритм определения координат узлом в кластере

### 2.3. Модель определения координат

Модель определения координат должна быть эффективной с точки зрения энергопотребления, а также колерироваться с алгоритмами маршрутизации и сбором данных в БСС.

Предлагается использовать преимущества и учитывать недостатки методов RSSI и ToF для модели определения координат. На этапе инициализации сети, когда нет четкой топологии сети, а узлы еще не объединились в кластер или пикосеть, предлагается проводить измерения расстояния на основе метода RSSI. Следовательно, узел проводит измерения расстояний и последующее их уточнение по методу RSSI, если:  $n_k \notin \overset{\ominus}{N}_p$ , где  $n_k$  – узел, которому необходимо определить координаты,  $\overset{\ominus}{N}_p$  – пикосеть в БСС.

Ограничение определения координат (до 10 м) по методу RSSI целесообразно вводить, если:

$$\forall N_{rssi} \in \overset{\ominus}{N}_p, N_{rssi} \notin \overset{\ominus}{N}_k, \quad (13)$$

где  $N_{rssi}$  – множество узлов в зоне радиовидимости узла  $n_k$ ,  $N_{rssi}$  входит только в одну пикосеть.

Таким образом, выражение (13) показывает, прошла ли инициализация сети и кластеризация на пикосети.

Возможно, что узел в пикосети имеет встроенный датчик глобальной системы позиционирования. С этой целью введем множество  $N_{gps}$  – множество узлов со встроенными устройствами с GPS (ГЛОНАСС) датчиками. Следовательно, привязка в пикосети к глобальным координатам может быть выполнена, если:  $N_{gps} \in \overset{\ominus}{N}_p$ .

В случае отсутствия в пикосети узлов из множества  $N_{gps}$  предлагается использовать метод ToF для определения расстояния к трем узлам из  $N_{gps}$ , что позволит создать в пикосети минимум три узла с координатами, которые определены по более точному методу.

После осуществления привязки к глобальным координатам задача определения координат будет окончательно решена.

С целью уменьшения ошибки измерений по методу RSSI предлагается ввести ограничение в измерении расстояния до 10 метров.

Таким образом, модель определения координат с использованием методов RSSI и ToF на плоскости будет выглядеть, как показано на рис. 9.

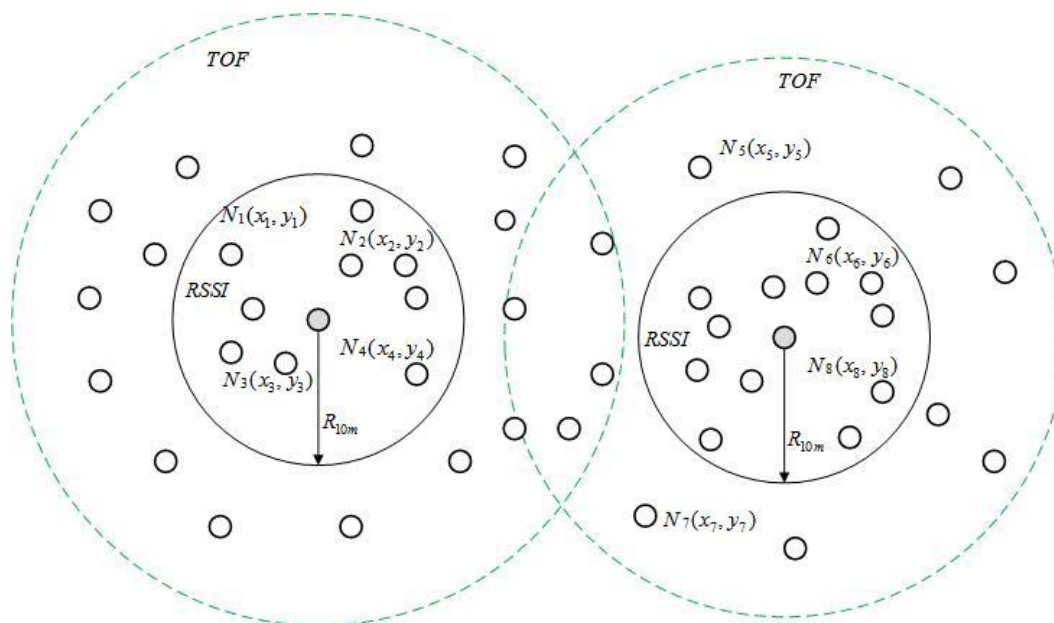


Рис. 9. Модель совместного использования методов RSSI и ToF для определения координат

Из рис. 9 видно, что узел  $N_4(x_4, y_4)$  и  $N_8(x_8, y_8)$  имеют одинаковые радиусы определения координат по методу RSSI и разные – по методу ToF. Такой вариант возможен, если узел  $N_8(x_8, y_8)$  имеет меньший радиус радиовидимости, чем  $N_4(x_4, y_4)$ . Ведь измерить время прохождения сигнала от определённого узла можно только при наличии радиовидимости. Хотя возможно измерить такое прохождение через промежуточные узлы.

Как было показано в анализе методов определения координат в БСС для определения координат достаточно трех узлов с известными координатами. На рис. 9 узел  $N_4(x_4, y_4)$  может измерить такое расстояние от узлов  $N_1, N_2, N_3$  по методу RSSI в то время, как узел  $N_8(x_8, y_8)$  по этому методу – только от узла  $N_6$ . К остальным узлам применяется метод ToF.

### III. Экспериментальные исследования измерения координат узлом БСС по методу RSSI

#### 3.1. Постановка задачи эксперимента

Для метода RSSI применяют протокольную функцию оценки качества связи LQI- Link Quality Indicator, которая есть в любом беспроводном канале по стандарту IEEE 802.15.4 [6]. LQI – определяет мощность принятого сигнала. Результат этого измерения можно вывести, откалибровать по известному расстоянию и оценить дальность до источника.

Исследования проводились на базе отладочного комплекта CC2530 ZDK, в котором используется приемо-передатчик CC2530 американской компании Texas Instruments. В качестве программного обеспечения для мониторинга на персональном компьютере (ПК) применялось бесплатно распространяемое программное обеспечение Smart RF Studio v.7, полученное вместе с отладочным комплексом CC2530 ZDK в рамках программы European University Programm.

Исследования проводились по измерению уровня принимаемого сигнала по методу RSSI для двух узлов БСС с приемо-передатчиками CC2530, рис. 10.

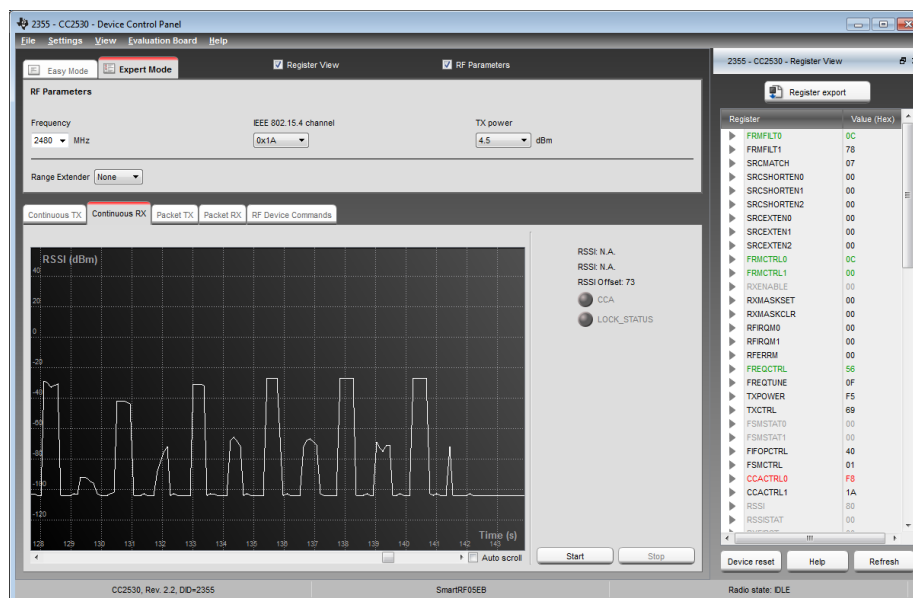


Рис. 10. Индикация уровня принимаемого сигнала (RSSI) в программе Smart RF Studio

Целью исследования было определение зависимости изменения RSSI от расстояния, а также влияние уровня помех на соседнем канале ZigBee или близким по ча-

стоте соседним радиоизлучением. Как известно, по стандарту IEEE 802.15.4, который описывает первые два нижних уровня модели OSI, на частоте 2,4 ГГц, для организации БСС выделено 16 каналов с шириной 2 МГц (рис. 11), что находятся в пределе от 2405 до 2480 МГц.

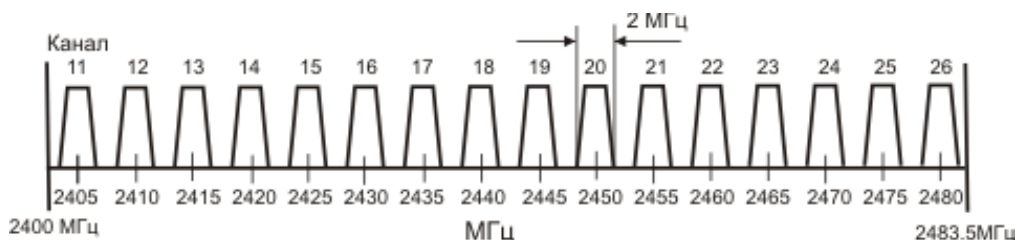


Рис. 11. Распределение радиоканалов, используемых для БСС на частоте 2,4 ГГц по стандарту IEEE 802.15.4

Следовательно, для исследования передач на соседних каналах будем использовать распределение по частотам, что показано на рис 9.

Необходимо выполнить три эксперимента:

1. Исследование влияния соседнего канала на измерения RSSI;
2. Исследование влияния соседнего радиоизлучения на измерения RSSI;
3. Исследование влияния расстояния на уровень RSSI.

### 3.2. Исследование влияния соседнего канала на измерения RSSI

Исследование влияния соседнего канала на измерения RSSI проводилось в несколько этапов. В первом случае передающий узел передавал сигнал мощностью 1 dBm с изменением частоты в интервале от 2460 МГц до 2480 МГц. Изменение частоты проходило с шагом 1 МГц за 500 мс. Принимающий узел работал на канале 2480 МГц, результат измерений приведен на рис. 12.

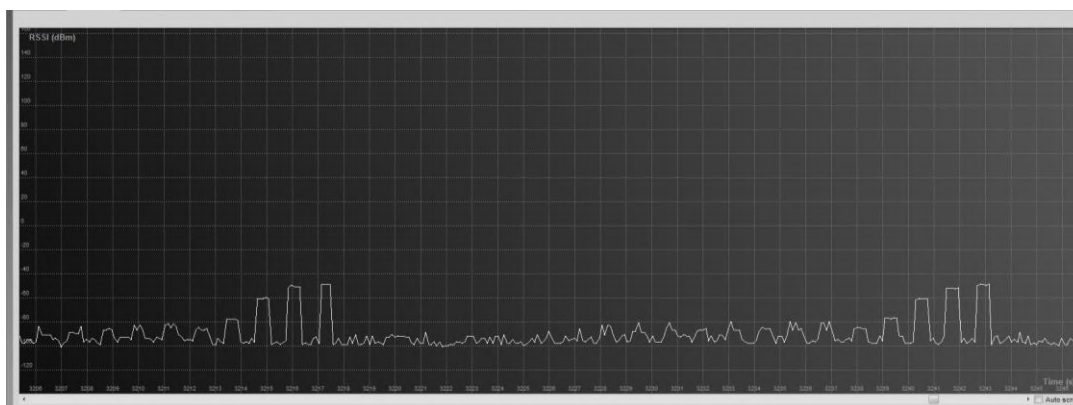


Рис. 12. Исследования влияния соседнего канала на измерения RSSI в интервале от 2460 МГц до 2480 МГц с шириной канала 1 МГц

Как видно из рис. 12, самое большое влияние оказывает работа радиопередатчика на совпадающем диапазоне 2479-2480 МГц, а также близким к каналам частотам

2476-478 МГц. Работа на канале, который отличается более чем на 5 МГц, оказывает влияние не более 20 dBm, рис. 13.



Рис. 13. Исследование влияния соседнего канала на измерения RSSI в интервале от 2460 МГц до 2480 МГц с шириной канала 5 МГц

### 3.3. Исследование влияния соседнего радиоизлучения на измерения RSSI

Исследование влияния соседнего радиоизлучения на измерения RSSI проходило с разным вариантом ширины помехи.

В первом случае принимающий узел работал на частоте 2470 МГц, мешающий радиопередатчик работал с изменением частоты от 2465 МГц до 2475 МГц. Результаты исследований приведены на рис. 14.



Рис. 14. Исследование влияния соседнего радиоизлучения с шириной помехи 1 МГц

Как видно из рисунка 14, помеха вносила разное влияние на принимающий узел. Больше всего влияние проявлялось, когда частота помехи совпала с частотой канала. Ширина канала принимающего узла 2 МГц и лежит в диапазоне от 2469 до 2471 МГц. Защитный интервал, что предусмотрен IEEE 802.15.4, позволяет избежать влияния работы соседнего канала, хотя влияние на соседних каналах есть, и оно равно 20 dBm. Разница между работой соседнего канала как помехи, рис. 15а, и нормальной передачи, рис. 15б, составляет порядка 30 dBm.



а) 2474-2476 МГц



б) 2474-2476, 2469-2471 МГц

Рис. 15. Исследование влияния соседнего радиоизлучения с шириной помехи 5 МГц на принимающий узел, работающий в диапазоне 2469-2471 МГц (14-й канал IEEE 802.15.4)

Уровень RSSI без внешних помех показан на рис 16.



Рис. 16. Уровень RSSI без внешних помех

### 3.4. Исследование влияния расстояния на уровень RSSI для приемо-передатчика CC2530

Измерение уровня RSSI проходило при изменении расстояния между узлами (табл. 3).

Таблица 3. Измерение уровня RSSI при изменении расстояния между узлами

Расстояние, м	Уровень RSSI, - dBm
2,5	50
1,75	40
4,5	50
1,60	40
0,30	30
0,2	20
0,1	18
0,3	25
0,4	27
0,5	30
1	40
3	50

Изменение уровня RSSI от расстояния для приемо-передатчика CC2530 приведено изображено на рис. 17.

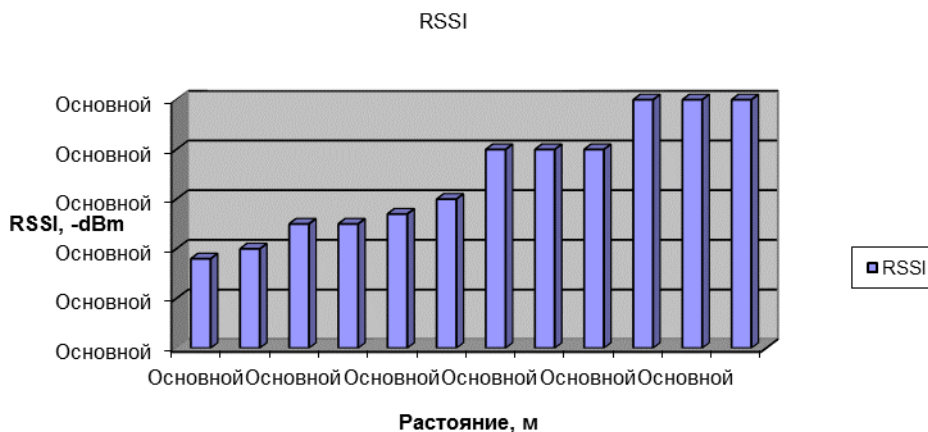


Рис. 17. Изменение уровня RSSI от расстояния для приемо-передатчика CC2530

Как видно из рис. 17, когда узел находится на расстоянии до 1 метра, уровень RSSI изменяется значительно (от 18 dBm при расстоянии 10 см до 30 dBm при расстоянии 0,5 метра). При измерении расстояния от 1 метра до 5 метров изменение RSSI менее заметно. Таким образом, высказывание в источниках [6, 17] частично подтверждено, что точность метода RSSI находится в пределах 3 метров.

В то же время в ходе экспериментов было установлено, что метод RSSI для измерения расстояния от 10 см до 1 метра имеет погрешность около 10-15 см.

Данное явление можно объяснить несколькими явлениями. Во-первых, при малом расстоянии между узлами коэффициент ослабления сигнала мало зависит от помех в канале и возможных флуктуаций. Во-вторых, такое расстояние характерно для ближней зоны действия антенны, радиус которой, в некотором приближении, может быть вычислен из выражения:

$$F_n \approx 10 \cdot \lambda, \quad (14)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Учитывая выражение (14) для частоты 2,4 ГГц, длина волны около 10 см, которая является ближней зоной антенны для приемо-передатчика CC2530, будет радиусом до 1 м. А как известно, ближняя зона антенны – это область, в которой направленные свойства антенны определяются законами геометрической оптики.

#### IV. Корректировка модели определения координат с учетом проведенных экспериментов

В результате проведения экспериментов по измерению расстояния методом RSSI было установлено, что расстояние до близлежащих узлов (до 1 метра) по этому методу имеет достаточно хорошую точность, порядка 10-15 см. Следовательно, этот эффект целесообразно использовать в модели определения координат.

Предлагается производить корректировку координат между узлами, которые находятся на расстоянии до 1 метра. С этой целью один из узлов, что входит во множество  $N_{rssi\_c}$  (все узлы на удалении не более метра) проводит корректировку своих

координат с узлом, что входит во множество  $N_{gps}$  по методу ToF. В случае отсутствия такой возможности проводится уточнение по базовым узлам пикосети также по методу ToF. После такой корректировки все узлы, которые находятся во множестве  $N_{rssi\_c}$ , проводят корректировку своих данных по методу RSSI. Таким образом, удается создать определённые «островки» с уточненными координатами, часть узлов которых возможно использовать, если узел, к которому нужно определить расстояние, находится в спящем режиме.

## Выводы

В работе проведен анализ методов, методик и алгоритмов определения координат узлов беспроводных сенсорных сетей. Предложена модель определения координат для узлов беспроводной сенсорной сети с применением комбинации методов RSSI и TOF(ToA). Предложен алгоритм совместного использования методов RSSI и ToF (ToA) в пикосети. Проведены экспериментальные исследования влияния соседнего канала на измерения RSSI, влияние соседнего радиоизлучения на измерения RSSI, а также влияние расстояния на уровень RSSI. Предложено ввести ограничение для измерения расстояния по методу RSSI до 10 метров, а также выполнить корректировку узлов, находящихся в пределах 1 метра.

## Список литературы:

1. Власова В.А. Аспекты позиционирования в сенсорных сетях // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 4., №. 1(6). – С. 3–4.
2. Власова В.А. Метод определения координат объектов на этапе инициализации гомогенной беспроводной сенсорной сети: дис. ... к. т. н.: 05.12.02. – Х.: ХНУРЭ, 2014.– 165 с.
3. Гаркуша С.В. Разработка потоковой модели маршрутизации в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11, представленных в виде графа Кенига [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций.– 2014.– №1 (13).– С. 20–34.– Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2014/1/1/141\\_garkusha\\_routing.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2014/1/1/141_garkusha_routing.pdf).
4. Беркман Л.Н., Выговский Р.В. Оптимизация критерия адаптации smart-антен для технологии WiMAX // Наукові записки УНДІЗ.–№2(14).– 2010.– С. 5–15.
5. Иванов Е.В. Определение координат в беспроводных сенсорных сетях: дис. ... к. т. н.: 05.12.13. – М., 2008.– 148 с.
6. Еркин А. Расширение возможностей беспроводных сетей ZigBee: измерение координат узлов // Беспроводные технологии. – 2011.– Т. 1, № 22.– С. 12–14.
7. Лень В.Е. Определение координат в беспроводной сенсорной сети // Основні проблеми регіонального управління в Україні: Модернізаційні процеси державного та муніципального управління. – К. : Академія муніципального управління, 2014.– С. 288–290.
8. Киров Д.А. Анализ методов позиционирования в беспроводных сетях // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. – 2011. – №. 1. – С. 107-108.
9. Джарел Б. Определение положения устройства стандарта ZigBee // Беспроводные технологии. – 2007. – №4. – С. 46–48.
10. Chuang, P.-J., Jiang Y.-J. Effective neural network-based node localisation scheme for wireless sensor networks // Wireless Sensor Systems, IET. – 2014. – Vol. 4, Issue 2. – P. 97–103.

11. Hong, S.H., Kim B.K., Eom D.S Localization algorithm in wireless sensor networks with network mobility // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2010. – Vol. 55, Issue 4. – P. 1921–1928.
12. Восков Л.С., Комаров М.М. Позиционирования датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения // Датчики и системы.– 2012.– № 1.– С. 34–38.
13. Власова В. А., Зеленин А.Н., Рыженкова А.С., Минаев Л.Б. Обзор основных методов позиционирования в беспроводных сенсорных сетях // Оралдың ғылым жаршысы. – 2012. – №2 (38). – С. 68–72.
14. Zhu X., Feng Y. RSSI-based Algorithm for Indoor Localization // Communications and Network. – 2013. – Vol. 5 No. 2B. – P. 37–42.
15. Zhao J., Li H., Tang Z., Sun X. Research on WSN Double-Radius Localization Algorithm Based on Partition Judgment Mechanism // Wireless Sensor Network. – 2010. – Vol. 2 No. 8. – P. 639–644.
16. Агеев Д.В. Распределение неразветвленных потоков с учетом эффекта самоподобия // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3., № 4 (63). – С. 60–63. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/14767>
17. Восков, Л.С., Курпатов Р.О. Сравнительный анализ методов локализации в беспроводных сенсорных сетях // Качество. Инновации. Образование.– 2011.– № 3 (70).– С. 35–40.
18. Min Chen, Hui Liu Enhance Performance of Centroid Algorithm in Wireless Sensor Networks // Fourth International Conference on Computational and Information Sciences (ICIS). 2012. – Chongqing. IEEE, 2012. – P. 1066–1068.
19. Лемешко А.В., Гаркуша С.В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4).– С. 139–149. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112\\_lemeshko\\_classification.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_lemeshko_classification.pdf).
20. Fei Ding, , Aiguo Song, Jianqing Li, Guangming Song An adaptive localisation algorithm of mobile node in wireless sensor network // International Journal of Sensor Networks .– 2013.– Vol. 14, No. 1. – P. 42-49.
21. Wei Li, Zhen Yang, Haifeng Hu Sequential Uniformly Reweighted Sum-Product Algorithm for Cooperative Localization in Wireless Networks [Electronic Resource] // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1– 10. – Режим доступа: <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2014/164816/cta/>
22. Patil S., Zaveri M. MDS and Trilateration Based Localization in Wireless Sensor Network // Wireless Sensor Network.– 2011.– Vol. 3, No. 6.– P. 198–208.
23. Галкин П.В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей // ScienceRise. – 2014. – № 2 (2). – С. 55–61.
24. Seong Y.C., Doo Kim Byung Linear closed-form solution for wireless localisation with ultra-wideband/chirp spread spectrum signals based on difference of squared range measurements // Wireless Sensor Systems, IET. – 2013. – Vol. 3, Issue 4. – P. 255–265.
25. Галкин П.В., Ключник И.И. Актуальные проблемы создания системы "Умный дом" // Науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» COMINFO-2009 : Збірник тез. – К. : ДУІКТ, 2009.– С. 108–109.
26. Садков А.Н., Мишагин К.Г., Пастухов В.А., Умнов А.Л. Анализ связанности сенсорной сети с коллективной передачей информации // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Радиофизика. – 2008. – №. 6. – С. 70-76.
27. Xu J., Liu W., Lang F., Zhang Y., Wang Ch. Distance Measurement Model Based on RSSI in WSN // Wireless Sensor Network. – 2010. – Vol. 2, No. 8. – P. 606–611.
28. Yinglong W., Huanqing C., Qiang G., Minglei S. Obstacle-avoidance path planning of a mobile beacon for localization // Wireless Sensor Systems, IET. – 2013.– Vol. 3, Issue 2.– P. 126–137.

29. Renxi Gong, Jiwei Zhao, Yang Huang, Xiaobi Meng WSN Multilateral Localization Algorithm Based on MLE // International Conference on Network Computing and Information Security (NCIS), 2011 (Volume:2) – Guilin: IEEE, 2011. – P. 426– 429.
30. Zhang H., Zhang J., Wu H. An adaptive localization algorithm based on RSSI in wireless sensor networks // 2nd International Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems (CCIS), 2012. – Hangzhou: IEEE, 2012. – P. 1133 – 1136.
31. Yu K., Guo Y.J., Hedley M. TOA-based distributed localisation with unknown internal delays and clock frequency offsets in wireless sensor networks // Signal Processing, IET.– 2009.– Vol.3, Issue 2.– P. 106–118.
32. Gadeke T., Schmid J., Kruger M., Jany J., Stork W., Muller-Glaser K. D. A bi-modal ad-hoc localization scheme for wireless networks based on RSS and ToF fusion // 10th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2013. – P. 1 – 6.
33. Локализация внутри помещений [Электронный ресурс] // Мир беспроводных решений, "ЭФО". – Режим доступа: <http://www.wless.ru/technology/?tech=11#Atmel>
34. Гоголев А., Екимов Д., Екимов К., Мощевикин А., Федоров А., Цыкунов И. Точность определения расстояний с помощью технологии nanoLOC // Беспроводные технологии.– 2008.– № 3. – С. 48 – 51.
35. Галкин П.В. Модель беспроводной сенсорной сети на основе гиперграфа // 17-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Т. 4. – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – С. 71–72.