

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 681.586:681.52

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ КАК СПОСОБ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ¹

Л. С. Восков, М. М. Комаров

В статье дается обзор и анализ механизмов позиционирования датчиков беспроводных сенсорных сетей. Предлагается метод позиционирования с весовыми функциями в качестве способа энергосбережения в беспроводных сенсорных сетях. Проведена экспериментальная реализация различных методов позиционирования. Полученные экспериментальные результаты показывают эффективность предложенного метода для снижения энергопотребления при приеме и передаче данных.

Ключевые слова: позиционирование датчиков; беспроводные сенсорные сети; fingerprinting; энергосбережение.

ВВЕДЕНИЕ

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) — класс беспроводных систем, представляющих собой распределенную, самоорганизующуюся и устойчивую к отказу отдельных элементов сеть миниатюрных электронных устройств с автономным источником питания. Узлы такой сети ретранслируют сообщения по цепи, обеспечивая значительную площадь покрытия системы при малой мощности.

Базовым стандартом для беспроводных сенсорных сетей на сегодняшний день служит IEEE 802.15.4 (ZigBee).

Качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях (QoS) основывается на специфике технологии беспроводных сенсорных сетей [1, 2].

В современных зданиях и объектах инфраструктуры все больше используются сетевые технологии для контроля и управления. Чаще всего беспроводные сенсорные сети используются в рамках концепции интеллектуальных зданий, где обя-

зательно требуется организация автономной работы датчиков, применяемых в сети, например, при возникновении чрезвычайных ситуаций (пожар, землетрясение и т. д.). Одним из важных показателей автономной работы беспроводной сенсорной сети является ее энергопотребление [3–6]. В рамках поддержки качества предлагаемых услуг в беспроводной сенсорной сети одной из проблем называется проблема энергетической балансировки, которая позволяет увеличить время автономной работы системы, но не уменьшает энергопотребление и не является методом энергосбережения [1, 2].

Мало кто использует позиционирование как один из способов энергосбережения. Многие исследователи занимаются определением позиции узлов на местности по уровню принятого радиосигнала, по времени приема радиосигнала, с использованием оптических, ультразвуковых, инерциальных систем [7–9].

Стандартом IEEE 802.15.4 предусмотрено узел сети определять по уровню мощности принимаемого сигнала, что позволяет ему подключаться к наиболее "энергетически" выгодному узлу сбора данных (ретранслятору). Но данное условие

не всегда выполнимо в силу особенностей радиоканала и среды передачи данных. На определенном расстоянии приемник узла сбора данных может вообще не принять данные от оконечного узла, хотя уровень сигнала будет высоким.

Мы предлагаем сначала рассмотреть механизмы, которые можно применять для определения расстояния между узлами, а далее в зависимости от расстояния, а не от уровня мощности принимаемого сигнала регулировать мощность приемопередатчика для приема данных от оконечного узла, что позволит снизить затраты энергии на передачу или прием данных [11].

МЕХАНИЗМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Механизм позиционирования по уровню принятого радиосигнала (RSSI) использует множество формул для расчета расстояния между узлами в зависимости от мощности принятого сигнала (формула Фрица, степенные функции и т. д.).

Наиболее точный, оптический механизм позиционирования, исследовался нами в рамках использования оптических устройств в качестве датчиков для беспроводных сенсорных сетей [20].

¹ Работа выполнялась в рамках Гранта Президента РФ на обучение за рубежом в 2010–2011 гг. в Университете г. Бирмингем, Великобритания.

Механизм позиционирования по времени прохождения радиосигнала (TOF) от приемника до передатчика [13] находит широкое применение, но является менее точным в закрытых пространствах (так называемое позиционирование внутри помещений) и на расстояниях десяти-двадцати метров (типичные расстояния для помещений). Так, погрешности определения расстояния в помещении площадью 50–70 м² составляют от 5 до 10 м. Поэтому в таких условиях применяются либо механизмы, не связанные с распространением радиосигнала, либо механизм позиционирования по уровню принятого радиосигнала.

Для механизма RSSI разработано множество способов фильтрации данных [12], уменьшения влияния интерференции радиосигнала. Например, в [14] используется фильтрация путем начальной калибровки системы, определении поправочного коэффициента и его использовании в итерационном процессе по формуле Тейлора. Таким образом достигается абсолютная погрешность определения позиции 2,5 м. Исходя из этого, мы будем рассматривать механизм RSSI, обеспечивающий наиболее точное позиционирование.

В качестве выражения для определения расстояния между узлами используем выражение Фрииса:

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

где P_{rx} — мощность принятого радиосигнала, дБ; P_{tx} — мощность переданного радиосигнала, дБ; λ — длина волны радиосигнала, м; R — расстояние между приемником и передатчиком, м.

Мощность радиосигнала зависит от энергии приемопередатчика, т. е. чем больше мощность передаваемого радиосигнала, тем больше затрачивается энергии на передачу. Таким образом, определив расстояние гарантированной отправки и приема сообщений между узлами (ретранслирующими узлами с автономными источниками питания), можно уменьшить энергопотребление приемопередатчика.

Пространственное положение узла может определяться при помо-

щи различных методов: например, триангуляции, методов “отпечатков пальцев” и др.

Часть систем позиционирования, работающих по уровню принятого радиосигнала, используют так называемую технику “фингерпринтинга” (ФП — метод “отпечатков пальцев”), отличающейся от обычного определения местоположения объекта по уровню принятого радиосигнала (RSS) повышенной точностью [15–17, 19]. Этот метод основан на регистрации RSS во время развертывания сети на различных несущих частотах и составлении карты уровней принятого радиосигнала, похожей на отпечаток пальца. В обычном режиме сеть пытается провести соответствие измеренного уровня принятого радиосигнала мобильного узла и карты ФП, которую она хранит для оценки реальной позиции объекта.

Существует также метод ФП с использованием весовых функций [19]. Основное отличие данного метода от классического ФП заключается в том, что при составлении карты ФП пользователь (или система) на основании полученных данных выбирает стационарный узел, данным от которого можно “доверять”. Таким образом, при определении местонахождения объекта будет отдаваться предпочтение (большее значение весовой функции) выбранному узлу, т. е. при использовании алгоритма выбора позиции согласно карте ФП с учетом минимального совокупного отклонения уровней сигналов от стационарных узлов вес отклонения от выбранного узла будет выше, чем вес отклонения от остальных стационарных узлов, и уже с учетом этого будет выбираться позиция из карты ФП.

Абсолютная погрешность таких методов может лежать в пределе одного метра, но изменения среды функционирования сенсорной сети (открытая дверь была закрыта, открытые окна и т. д.) могут привести к большим погрешностям процесса позиционирования.

Для учета влияния расстояния между узлами необходимо исследовать и реализовать механизм позиционирования узлов. Самой сложной и трудно прогнозируемой средой для передачи данных является

пространство внутри зданий [12, 14]. Рассмотрим применение механизма позиционирования для снижения энергопотребления к наименее исследованному этапу отправки подтверждения получения данных узла-приемника узлу-передатчику.

Рассмотрим три различных метода определения местонахождения объекта внутри здания — метод триангуляции, метод ФП и метод ФП с весовыми функциями.

В качестве аппаратной части для реализации методов позиционирования (а в дальнейшем и предложенного метода энергетической балансировки) будет использована аппаратная платформа на базе микроконтроллеров компании NXP-Jennic (NXP-JN5148) ввиду того, что существующие на рынке платформы избыточны по наличию периферийных устройств, датчиков, что значительно повышает энергопотребление всего устройства в целом.

МЕТОД ТРИАНГУЛЯЦИИ

В рамках практической реализации системы позиционирования выбран современный протокол, используемый в автономных сенсорных сетях — ZigBee Pro. Данный протокол позволяет в автоматическом режиме формировать ячеистую топологию сети, в которой у каждого из ретранслирующих узлов и центрального узла сети в автоматическом режиме формируется таблица окружающих узлов с уровнями принятых от них сигналов.

Была реализована следующая структура: координатор сети ожидает данные от роутера, оконечные узлы являются опорными точками в помещении, определяется позиция роутера, который находится в помещении, оконечные узлы подключаются только к данному роутеру и отправляют сигнальные пакеты, роутер принимает сигнальные пакеты, определяет уровень принятого радиосигнала, вычисляет расстояния и отправляет информацию координатору.

Абсолютная погрешность определения расстояния (при условии отсутствия других беспроводных соединений, работающих в частотном диапазоне 2,4–2,5 ГГц) составляет 50 см на расстояниях 2–3 м. При

увеличении расстояния между узлами, наличием рабочих сетей, передающих в частотном диапазоне ISM (2,4–2,5 ГГц) абсолютная погрешность определения расстояния сопоставима с самим расстоянием между узлами, что делает метод триангуляции не подходящим для определения местонахождения объекта (узла).

МЕТОД “ФИНГЕРПРИНТИНГА”

Основная идея метода заключается в использовании уровня принятого сигнала как основного параметра местоположения. Данный метод подразумевает два этапа. На первом этапе происходит предварительное построение карты ФП (карты помещения) и запись полученных уровней сигналов от стационарных узлов в рамках набора значений для каждой отдельной позиции в помещении [15, 17]. Второй этап — этап позиционирования — включает в себя сравнение полученных данных уровней сигналов после предварительной фильтрации с данными, которые хранятся в базе данных таким образом, что позиция определяется с наименьшим отклонением от полученных данных. Для этапа позиционирования в классическом методе ФП используется алгоритм сравнения с ближайшим соседом. Основная идея данного алгоритма заключается в определении минимального расстояния между измеренными значениями расстояний и записанными в базу данных. Минимальное расстояние вычисляется следующим образом:

$$D_i = \frac{1}{N} \left(\sum_{l=1}^N |r_i - dbr_l|^p \right)^{1/p}, \quad (1)$$

где N — число узлов; r_i — полученный уровень сигнала, дБ; dbr_l — уровень сигнала в базе данных. Значение p равно 2 и при этом расстояние называется расстоянием Евклида [17]. После проведения расчетов выбирается набор с минимальным расстоянием. Данная позиция считается искомым местонахождением узла. Поскольку уровень сигнала может быть подвержен влиянию внешних факторов (помех и т. д.), то алгоритм позиционирования классического метода ФП может выдавать неверные результаты.

МЕТОД “ФИНГЕРПРИНТИНГА” С ВЕСОВЫМИ ФУНКЦИЯМИ

В методе ФП с весовыми функциями используется алгоритм с весовыми функциями для ближайших соседей. Это означает, что если данные от одного из узлов являются надежными, т. е. не подвержены влиянию внешних факторов, то вычисляется расстояние между мобильным узлом и стационарным узлом (узлом, чья позиция известна) согласно следующему выражению:

$$d = \sum_{i=1}^k w_i d_i, \quad (2)$$

где w_i — весовая функция узла i ; d_i — рассчитанное расстояние от узла i .

Весовая функция w_i определяется согласно выражению:

$$w_i = \frac{1/d_i}{\sum_{i=1}^k 1/d_i}, \quad (3)$$

где d_i — расстояние до точки i карты ФП, k — общее число точек на карте ФП.

Для того чтобы сделать данные более точными, используется медианная фильтрация с использованием доверительных вероятностей полученным значениям:

$$RSS = RSS_i P_{cur} + RSS_k P_{prev}, \quad (4)$$

где RSS_i — текущее значение уровня сигнала, дБ; P_{cur} — доверительная вероятность полученного значения уровня сигнала; RSS_k — предыдущее значение уровня сигнала, дБ; P_{prev} — доверительная вероятность предыдущего значения уровня сигнала.

При экспериментальной проверке описанных методов определялась позиция мобильного узла в двумерном пространстве. В качест-

ве помещений для проведения экспериментов были выбраны два помещения с одинаковой площадью (~ 72 – 78 м 2), но разной геометрической формы — коридор ($28 \times 2,7$ м) и холл (18×4 м), где были установлены стационарные узлы сбора данных, как показано на рис. 1.

Каждое из помещений было разделено на зоны размером 2×2 м, в коридоре 14 зон, в холле 16 зон. В результате вычислений по методу триангуляции абсолютная погрешность определения расстояния составила 12,5 м, и данный метод был сразу отклонен.

По методу ФП для коридора и холла было получено, что абсолютная погрешность метода составляет 3,7 м. По методу ФП с весовыми функциями для коридора и холла абсолютная погрешность метода составила 2,5 м. Абсолютная погрешность ΔR рассчитывается согласно следующему выражению:

$$\Delta R = |R_{\text{расч}} - R_{\text{факт}}|, \quad (5)$$

где $R_{\text{расч}}$ и $R_{\text{факт}}$ — рассчитанное и фактическое расстояние, м.

Результаты эксперимента показали, что отклонение фактического расстояния от измеренного по оси Y не превышало 2 м, поэтому оценка эффективности метода велась для оси X . Отклонения полученных результатов от фактических значений для координаты X в рамках эксперимента за время t (время эксперимента 344 с) показаны на рис. 2 (сплошная линия — измеренные значения по оси X ; пунктирная линия — фактические значения по оси X).

Большие значения отклонений измеренных данных от фактических возникают в условиях нестабильности получаемых данных от стационарных узлов.

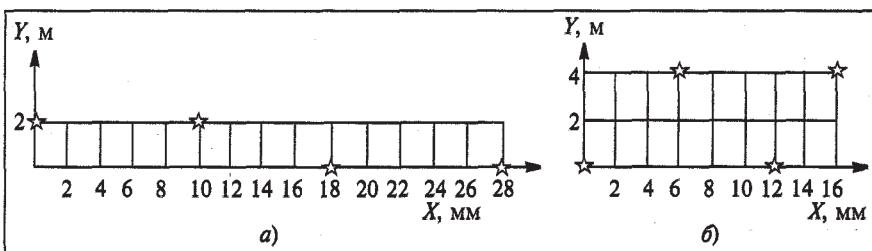


Рис. 1. Разбиение на зоны помещений коридора (а) и холла (б) со стационарными узлами сбора данных

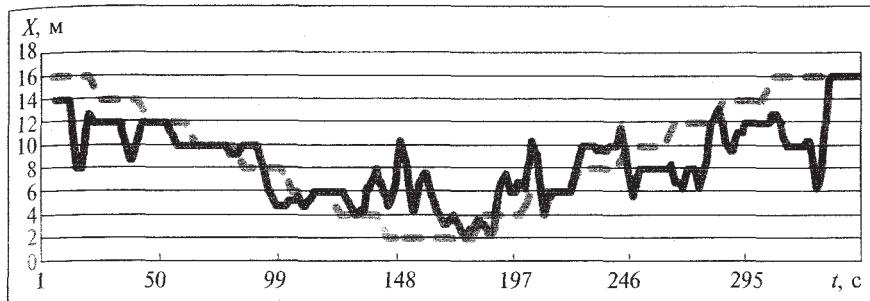


Рис. 2. Фактические и измеренные значения координаты по оси X по методу ФП с весовыми функциями

По результатам проведенных экспериментов метод ФП с весовыми функциями позволяет более точно определять расстояние между узлами.

При использовании механизмов позиционирования для определения расстояния между мобильным и стационарным узлами можно наглядно показать, какую величину энергии можно сэкономить при передаче подтверждения получения данных от оконечного узла ретранслятором. В рамках экспериментов, описанных выше, где узел сети находился в зоне размерами 2×2 м, мы получаем, что в случаях, когда измеренные и фактические данные совпадают, т. е. когда отклонение фактического значения расстояния от измеренного не более 2 м (рис. 2) можно уменьшить мощность приемопередатчика. Максимальная мощность приемопередатчика для данных экспериментов составляет 10 мВт [20]. При уменьшении мощности до 3 мВт (учитывая радиообстановку) гарантированная передача ведется в радиусе 5 м, поэтому на участках, где отклонение фактического значения расстояния от измеренного составляет от 2 до 4 м, можно уменьшить мощность приемопередатчика с 10 до 3 мВт. Время автономной работы и

энергопотребление рассчитывается согласно выражениям [8, 12], также учитывается потребление энергии вспомогательной периферии на платформе 8,04 мА. Таким образом, получим следующие результаты, представленные в таблице.

Экспериментальные данные показывают, что в общем случае с учетом определения расстояния между мобильным и стационарным датчиками мы имеем 45 % от всего объема измерений, где можно уменьшить мощность приемопередатчика и сэкономить 20,8 % (10,85 мА) от общей затрачиваемой энергии на передачу подтверждения о приеме данных от оконечных узлов и увеличить время автономной работы датчика на 34 мин (на 1,5 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При развертывании беспроводной сенсорной сети с автономными источниками энергии (или с использованием преобразователей энергии от альтернативных источников энергии, которые позволяют преобразовать ограниченный объем энергии) возникает ряд задач при реализации механизма поддержки качества предлагаемых услуг беспроводной сенсорной сети. Одной из таких задач является задача энергетичес-

кой балансировки системы, а также минимизация энергии, затрачиваемой на передачу подтверждения о приеме данных от датчиков сбора данных.

Проанализированы различные механизмы позиционирования датчиков беспроводных сенсорных сетей для применения в помещениях. В результате анализа была определена целесообразность использования механизма позиционирования по уровню принимаемого радиосигнала.

Были реализованы различные методы позиционирования датчиков и проведена оценка их точности определения расстояния между мобильным и стационарным датчиками. На основании полученных данных было предложено уменьшать мощность приемопередатчика при передаче подтверждения о приеме данных от оконечного узла узлом сбора данных. Было показано, что это ведет к уменьшению энергопотребления и увеличению времени работы узла сбора данных. Таким образом, полученные экспериментальные результаты подтверждают эффективность предложенного метода для снижения энергопотребления при приеме и передаче данных от датчиков (на примере передачи подтверждений о приеме данных).

ЛИТЕРАТУРА

- Chen D., Varshney P. K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey // In Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004), Las Vegas, Nevada, USA (June 2004).
- Holger K. Quality of service in wireless sensor networks: mechanisms for a new concept. ESF Exploratory Workshop on Wireless Sensor Networks // ETH Zurich, April 1-2, 2004.
- Вишневский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. — Москва: Техносфера, 2005.
- “Sensor Networks” / Thomas Haenselmann, 5th April 2006.
- Desclives C. Understanding ZigBee transmission // RF Design Magazine. — March, 2006. URL: <<http://rfdesign.com>> (дата обращения 03.2011).
- Семенов Ю. А. Беспроводные сети ZigBee и IEEE 802.15.4. URL: <<http://>

Результаты экспериментального исследования

Показатель	Значение “До”	Значение “После”
Мощность приемопередатчика, мВт	10	3
Энергопотребление при передаче подтверждения о приеме данных	0,927 мА	0,278 мА
Среднее потребление тока при отправке данных	14,19 мА	13,54 мА
Общий объем энергии, затрачиваемый на передачу подтверждения о приеме данных	521,48 мА	515,46 мА
Время автономной работы	36 ч 31 мин	37 ч 5 мин

- book.itep.ru/4/41/zigbee.htm> (дата обращения 03. 2011).
7. *Tian He, Sudha Krishnamurthy, John A. Stankovic, et al. Energy-Efficient Surveillance System Using Wireless Sensor Networks. // MobiSYS'04, June 6–9, 2004, Boston, Massachusetts, USA.*
 8. "Sensor Networks" / Thomas Haensmann, 5th April 2006.
 9. *Khin Thanda Soe. Increasing lifetime of target tracking wireless sensor networks // World academy of science, engineering and technology, 42, 2008 (410–415).*
 10. Голяницкий И. А. Математические модели и методы в радиосвязи. — М.: Экотрендз, 2005.
 11. Комаров М. М. Использование механизма позиционирования по уровню принятого сигнала в решении задачи энергетической балансировки беспроводной стационарной сети сбора данных / Тез. докл. Ежегодной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. — 2011. — С. 138–139.
 12. *Mao G., Fidan B. Localization algorithms and Strategies for Wireless Sensors Networks // Information Science Reference, Hershey, 2009.*
 13. *Lanzisera S., Lin D. T., Pister K. J. S. RF Time of Flight Ranging for Wireless Sensor Network Localization // University of California, Berkley, 2006.*
 14. *Erin-Ee-Lin Lau, Boon-Guin Lee, Seung-Chul Lee, Wan-Young Chung. Enhanced RSSI-based high accuracy real-time user location tracking system for indoor and outdoor environments // Dongseo University, Busan, 2008.*
 15. *Joshua A. Tauber Indoor Location Systems for Pervasive computing, 2002.*
 16. *Lionel M. NI and Yunhao Liu Yiu Cho Lau and Abhishek P. Patil. LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID, Wireless Networks 10, 701–710, 2004.*
 17. *Krishnakumar A. S., Krishnan P. Theory and Practice of Signal Strength-Based Localization in Indoor Environments, Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks, Chapter X // Information Science Reference, Hershey, 2009.*
 18. *Lloret J., Tomas J., Garcia M., Canovas A. A hybrid stochastic approach for self-location of wireless sensors in indoor environments // Sensors 9, 3695–3712, 2009.*
 19. *Koyuncu H., Hua Yang S. A 2D positioning system using WSNs in indoor environment // IJECIS-IJENS 11, №3, 70–77, 2011.*
 20. Описание модулей JN5148 от 03.08.2011. URL: <<http://www.jennic.com/support/datasheets/>> (дата обращения 08.2011).
 21. Пат. № 2429549. Способ многоользовательского дистанционного управления компьютером для графических приложений / Л. С. Восков, С. Г. Ефремов, М. М. Комаров.
- Работа выполнена на кафедре "Вычислительные системы и сети" Московского государственного института электроники и математики.
- Леонид Сергеевич Восков — канд. техн. наук, профессор кафедры;
 ☎ (495) 125-06-73, (910) 401-35-71
 E-mail: voskov@narod.ru
- Михаил Михайлович Комаров — аспирант кафедры.
 ☎ (495) 475-69-86, (906) 760-40-80
 E-mail: michmanK@mail.ru

УДК 62-50:62-525:628

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДОЗИРОВАНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАЛЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В. С. Безменов, В. А. Ефремов, А. С. Дударь

Проведен критический анализ имеющихся на рынке промышленных установок для дозирования лакокрасочных материалов (ЛКМ) и предложены разработанные в лаборатории газогидродинамических средства автоматизации Института проблем управления РАН пневматические системы автоматизированного дозирования ЛКМ для предприятий малого и среднего бизнеса.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы (ЛКМ), система автоматизированного дозирования жидкостей, малое производство ЛКМ, минизаводы по производству ЛКМ, пневмоавтоматика.

Процесс производства современных лакокрасочных материалов (ЛКМ) высокого качества представляет собой достаточно сложную технологическую цепочку, оснащенную современными высокоточными и интеллектуальными промышленными узлами и агрегатами. При изготовлении оборудования, применяемого в производстве ЛКМ, наиболее сложными задачами, с точки зрения достижения требуемых технологическим регламентом выходных параметров, являются пооперационная транспортировка компонентов, отмеривание жидкостных компонентов, а также фасовка готовой продукции.

Малые лакокрасочные производства предъявляют к фасовочному оборудованию дополнительные специфические требования, среди которых: возможность быстрой переналадки на различные типы жидкостей по их физико-химическим свойствам (вязкость, агрессивность, пенообразование, содержание твердых частиц и т. п.) и типоразмеры тары, простота эксплуатации и обслуживания. Немаловажным фактором является также и стоимость оборудования.

В настоящее время список поставщиков оборудования указанного назначения, удовлетворяющего на-