

МЕТОД ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ БЕСПРОВОДНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С АВТОНОМНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

*Л.С. Восков, кандидат технических наук, профессор кафедры
вычислительных систем и сетей Московского государственного
института электроники и математики (технического университета)*

*М.М. Комаров,
аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Московского государственного
института электроники и математики (технического университета)*

Адрес: г. Москва, ул. Стартовая, д. 33
E-mail: voskov@narod.ru; michmank@mail.ru

Дано обоснование актуальности задачи энергетической балансировки беспроводной стационарной сенсорной сети, приведена модель стационарной БСС с автономными источниками питания, учитывающая влияние внешних факторов. Предложен метод энергетической балансировки беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие повышение эффективности функционирования стационарной БСС с автономными источниками питания за счет применения разработанного метода.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, энергетическая балансировка, автономные сети, стационарные сети.

Введение

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) – класс беспроводных систем, предоставляющих собой распределённую, 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.

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

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

В то время как множество исследований проведены на тему некоторых важных аспектов беспроводных сенсорных сетей, таких как архитектура или проектирование протокола, сохранение энергии и позиционирование, поддержка качества предоставления услуг в беспроводных сенсорных сетях является до сих пор огромным неисследованным полем для деятельности. Это связано с тем, что беспроводные сенсорные сети очень от-

личаются от традиционных сетей. До сих пор не совсем понятно как правильно описать услуги в беспроводных сенсорных сетях тем более для того, чтобы разработать подходы для поддержки качества предоставления услуг.

Так как беспроводные сенсорные сети взаимодействуют с окружающей средой, их характеристики могут очень сильно отличаться от характеристик других обычных информационных сетей. Таким образом, их характеристики порождают новые проблемы [1,2,3]. Проблема энергетической балансировки означает, что для достижения долгого времени жизни сети энергия должна быть равномерно распределена между всеми сенсорными узлами так, чтобы энергия одного узла или группы узлов не закончилась довольно быстро. Поддержка качества предоставляемых услуг должна учитывать этот фактор.

Энергопотребление является одним из важных показателей беспроводной сенсорной сети [4,5,6,7]. Нужно отметить, что в рамках поддержки качества предлагаемых услуг в беспроводной сенсорной сети, как уже было рассмотрено ранее, одной из проблем называется проблема энергетической балансировки сети. Энергетическая балансировка позволяет обеспечить гарантированное время автономной работы узлов сети. Для решения задачи энергетической балансировки требуется разработать метод энергетической балансировки беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания, что позволит повысить эффективность работы беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания за счет увеличения времени автономной работы и уменьшения энергопотребления узлов сети.

Предлагаемый метод энергетической балансировки основывается на разработанной модели беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания, учитывающей влияние внешних факторов.

**Модель беспроводной
стационарной сенсорной сети
с автономными источниками питания**

В структуре сети с единой зоной покрытия узлами сбора данных (рис. 1) имеются M беспроводных узлов сбора данных (маршрутизаторов) с автономными источниками питания с емкостью батареи C . Они находятся в одной точке и имеют

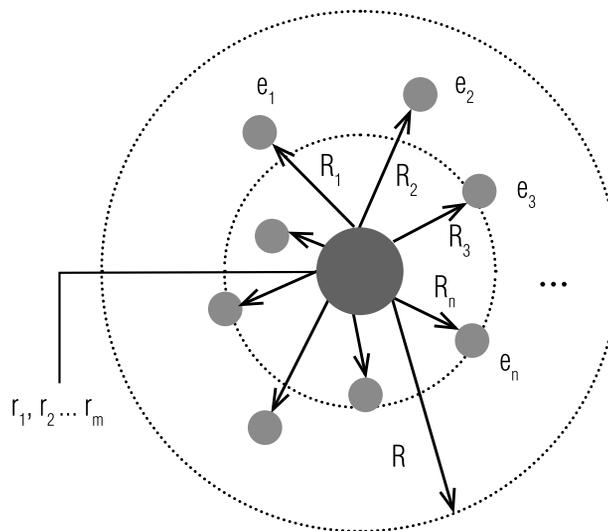


Рис. 1. Структура сети с единой зоной покрытия.

одинаковую зону покрытия R_m , максимальную мощность приемника P_{rx} и передатчика P_{tx} . Узлы подключены к центральному устройству сети проводной шиной. Энергопотребление на передачу данных на центральное устройство сети по проводной шине не учитываем.

В зону покрытия устройствами сбора данных случайным образом установлены n типов оконечных узлов на различных расстояниях r_1, \dots, r_n . Энергопотребление каждого оконечного узла e_1, e_2, \dots, e_n , количество устройств различных типов, соответственно b_1, b_2, \dots, b_n . Каждое из оконечных устройств имеет известный регулярный информационный поток, соответствующий заданному энергопотреблению, с определенной интенсивностью заявок от оконечных устройств. Максимальная мощность приемника и передатчика совпадает с мощностями устройства сбора данных – P_{rx}, P_{tx} . Каждое оконечное устройство может один раз подключиться к тому или иному устройству сбора данных.

Функциональным отказом сети мы будем считать выход из строя хотя бы одного устройства сбора данных.

Требуется так распределить оконечные узлы по устройствам (узлам) сбора данных, чтобы моменты времени выхода из строя всех узлов сбора данных за счет исчерпания энергии автономных источников питания совпадали в максимальной степени. Такой процесс распределения оконечных устройств по устройствам сбора данных назовем энергетической балансировкой сети.

Для корректности приводимых ниже рассуждений и выкладок учтем, что потребляемая некоторым устройством от автономных источников питания с постоянным напряжением $U=const$ за время T энергия ε пропорциональна развиваемой источником мощности P и потребляемым устройством током e , т.е.

$$\varepsilon = PT = eUT = EU,$$

где величина E имеет размерность (Ачас) и при постоянном U может характеризовать энергопотреблением устройства. Этот показатель и будем использовать в дальнейшем. А интервал времени T пропорционален объёму передаваемых данных $V=V_s+V_{ack}$ (бит), при скорости передачи данных $B = const$ (бит/с), где V_s – объем передаваемых данных (бит), V_{ack} –объем данных подтверждения (бит).

Запишем энергопотребление i -го устройства сбора данных (e_i) за 1 цикл передачи данных за интервал времени T (1) и определим потребляемую устройством сбора данных энергию при передаче и приеме данных (E_i) (2):

$$E_i = \sum_{j=1}^n (x_{ij} e_{txj} \frac{V_{sj}}{B} + x_{ij} e_{rxj} \frac{V_{ackj}}{B}), i = \overline{1, m} \quad (1)$$

$$x_{ij} \geq 0;$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \frac{1}{U} (P_{txj} \frac{V_{sj}}{B} + k_{ij} \cdot P_{rxj} \frac{V_{ackj}}{B}), E_i = E \quad (2)$$

Здесь

x_{ij} – количество узлов j -го типа, подключенных или не подключенный к i -му устройству сбора данных;

e_i – энергопотребление i -го устройства сбора данных;

e_{txj} – потребляемая энергия при приеме данных i -м устройством сбора данных от j -го оконечного узла;

V_{sj} – объем данных от j -го узла, которые необходимо принять i -му устройству сбора данных;

e_{rxj} – потребляемая энергия при передаче подтверждения i -м устройством сбора данных на j -й оконечный узел;

V_{ackj} – объем данных подтверждения от i -го устройства сбора данных, переданных на j -й оконечный узел;

U – напряжение на аккумуляторной батарее устройства сбора данных;

B – скорость обмена данными по радиоканалу;

P_{txi} – максимальная потребляемая мощность при приеме i -м устройством сбора данных равна максимальной потребляемая мощности от источника питания при передаче j -м оконечным узлом);

P_{rxj} – максимальная потребляемая мощность при передаче i -м устройством сбора данных равна максимальной потребляемой мощности при приеме j -м оконечным узлом);

k_{ij} – коэффициент энергетического состояния канала передачи данных от i -го устройства сбора данных к j -му оконечному узлу.

При рассмотрении передачи подтверждения от i -го устройства сбора данных можно уменьшить мощность сигнала передаваемого на приемник j -го оконечного узла, с учетом состояния канала (энергетического состояния канала передачи данных от i -го устройства сбора данных к j -му оконечному узлу), что и учитывает коэффициент энергетического состояния канала передачи k_{ij} . Данный коэффициент показывает, с какой потребляемой мощностью от источника питания (или на какой излучаемой мощности) можно вести передачу подтверждения от i -го устройства сбора данных, что позволит, в случае уменьшения потребляемой мощности от источника питания при уменьшении излучаемой мощности, сохранить энергию батареи и увеличить продолжительность функционирования устройства.

Метод энергетической балансировки беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания

Метод энергетической балансировки состоит в распределении нагрузки на устройства сбора данных таким образом, чтобы обеспечить гарантированное время автономной работы устройств сбора данных и, тем самым, всей сети в целом. При распределении нагрузки, мы подключаем оконечные узлы к устройствам сбора данных (ретрансляторам) определенным образом.

Пусть в системе сбора данных необходимо передать трафик от оконечных устройств n типов через m ретрансляторов. Канал связи между различными типами устройств и ретрансляторами с точки зрения энергетики характеризуется собственным значением коэффициента энергетического состояния канала k_{ij} , где $i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n$.

Ретрансляторы r_1, r_2, \dots, r_m передают информацию последовательно через определенные промежутки времени. Последовательность передачи определяется условием предшествования: $r_1 \prec r_2 \prec r_3 \prec \dots \prec r_m$, т.е. ретранслятор r_2 передаст информацию только после того, как информацию передал ретранслятор r_1 , ретранслятор r_3 передаст информацию только после того, как информацию передаст ретранслятор r_2 и т.д.

Требуется так распределить оконечные устройства n -типов между m ретрансляторами, чтобы:

- ◆ соблюдалось условие предшествования;
- ◆ энергопотребление i -ого ретранслятора не превышало E ;
- ◆ энергопотребление E было минимальным.

При выполнении этих условий общее энергопотребление сети не будет превышать $m * E$.

Обозначим через x_{ij} неизвестные величины, принимающие натуральные значения $0, 1, 2, \dots$ и будем считать, что к i -ому ретранслятору подключены x_{ij} оконечных устройств j -ого типа. При $x_{ij} = 0$, к i -ому ретранслятору оконечные устройства j -ого типа не подключены.

Все оконечные устройства обязательно должны быть подключены к ретрансляторам, поэтому

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \text{ где } j = 1, 2, \dots, n.$$

Суммы вида

$$\sum_{j=1}^n e_j x_{ij}, \text{ где } i = 1, 2, \dots, m$$

численно равны суммарному энергопотреблению оконечных устройств всех типов, подключенных к i -ому ретранслятору. На эти суммы накладываются ограничения:

$$\sum_{j=1}^n e_j x_{ij} \leq E, \text{ где } i = 1, 2, \dots, m.$$

Из отношения предшествования, если j -й ретранслятор передает данные раньше k -ого ретранслятора, $j \prec k$ следует, что

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = 0, \text{ при } b_j - \sum_{i=1}^m x_{ij} > 0$$

для всех j и k , для которых $j \prec k$, где $j = 1, 2, \dots, k-1$

Т.е. к k -ому ретранслятору оконечные устройства не подключаются только в том случае, если они уже подключены к j -ому ретранслятору.

Учитывая все ограничения, можно сделать следу-

ющую постановку задачи в терминах целочисленного линейного программирования.

Минимизировать

$$L = E - \sum_{i=1}^n e_j x_{ij} \text{ при ограничениях:}$$

$$E - \sum_{i=1}^n e_j x_{ij} \geq 0, \text{ где } i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \text{ где } j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 0, \text{ при } b_j - \sum_{i=1}^m x_{ij} > 0$$

для всех j и k , для которых $j \prec k$, где $j = 1, 2, \dots, k-1$, $x_{ij} \geq 0; e_j \geq 0; b_j \geq 0$, где $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$, x_{ij}, b_j, e_j – целые, где $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$.

Задача является NP полной, решается методом ветвей и границ с предлагаемыми нами эвристиками направленного перебора, которые позволяют решать практические задачи за допустимое время. Решением задачи являются наборы оконечных узлов, подключаемых к каждому ретранслятору.

Следующим этапом метода энергетической балансировки является учет влияния внешних факторов на передачу подтверждения от устройства сбора данных до оконечного узла. Предлагается определять и учитывать расстояние между оконечным узлом и узлом сбора данных и регулировать мощность передачи подтверждения в зависимости от расстояния. С использованием механизма позиционирования вычисляются расстояния от устройства сбора данных до каждого оконечного узла и, для заданного набора оконечных узлов регулируется мощность приемопередатчика при передаче подтверждения о приеме данных от оконечного узла устройством сбора данных.

Подобный подход использования механизма позиционирования как метода энергосбережения позволяет уменьшить общее энергопотребление устройства сбора данных и тем самым увеличить время его работы.

В качестве механизма позиционирования предлагается использовать «фингерпринтинг» с весовыми функциями [9, 10, 11]. Основная идея заключается в использовании уровня принятого сигнала как основного параметра местоположения.

Метод состоит из двух этапов. Первый этап – предварительное построение карты «фингерпринтинга» (карты помещения), запись набора полученных уровней сигналов от стационарных

узлов для каждой отдельной позиции в помещении. Второй этап – этап позиционирования заключается в сравнении получаемых данных уровней сигналов с данными, которые хранятся в базе данных и определение позиции с наименьшим отклонением.

Для этапа позиционирования в классическом методе «фингерпринтинга» 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 (3):

$$D_i = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |r_i - dbr_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (3)$$

где N – число узлов, r_i – полученный уровень сигнала дБ, dbr_i – уровень сигнала в базе данных. Значение p равно 2 и при этом расстояние называется расстоянием Евклида [11]. 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 «фингерпринтинга» может выдавать неверные результаты.

В предлагаемом методе «фингерпринтинга» с весовыми функциями используется алгоритм с весовыми функциями для ближайших соседей. Это означает, что если мы знаем, что данные от одного из узлов являются надежными, т.е. не подвержены влиянию внешних факторов, то мы вычисляем расстояние между мобильным узлом и стационарным узлом (узлом, чья позиция известна) согласно следующему выражению (4):

$$d = \sum_{i=1}^k w_i d_i \quad (4)$$

где w_i – это весовая функция узла i , d_i – это рассчитанное расстояние от узла i .

Весовая функция w_i определяется согласно выражению (5):

$$w_i = \frac{1/d_i}{\sum_{i=1}^k 1/d_i} \quad (5)$$

где d_i – это расстояние до точки i карты «фингерпринтинга», k – общее число точек на карте «фингерпринтинга».

Для того, чтобы сделать данные более точными используется медианная фильтрация с использованием доверительных вероятностей полученным значениям (6):

$$RSS = RSS_i \cdot P_{cur} + RSS_k \cdot P_{prev} \quad (6)$$

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.

Заключение

В рамках экспериментальной реализации метода, мы получили следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1.

Результаты экспериментального исследования

Показатель	Значение «До»	Значение «После»
Мощность приемопередатчика	10 мВт	3 мВт
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 часов 31 минута	37 часов 5 минут

Проведенные экспериментальные данные подтверждают повышение эффективности функционирования беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания за счет применения разработанного метода. Так, из таблицы видно, что после применения метода, мы сможем сэкономить 20,8% (10,85 мА) от общей затрачиваемой энергии на передачу подтверждения о приеме данных от конечных узлов в рамках проведенного эксперимента (что эквивалентно 10,85 мА) и увеличить время автономной работы датчика на 34 минуты (на 1,5%).

Предлагаемый метод энергетической балансировки так же позволяет учитывать другие внешние факторы: приоритетность передаваемого трафика и помехообстановку [12,13]. Комплексный учет влияния всех предлагаемых внешних факторов является задачей будущих исследований. ■

Литература:

1. 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).
2. 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.
3. Восков Л.С., Цыганов С.В. Повышение качества обслуживания в интеллектуальной публичной беспроводной гетерогенной сети // «Качество. Инновации. Образование», №5-2010. М. : Европейский центр по качеству, 2010.
4. Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. «Широкополосные беспроводные сети передачи информации». Москва: Техносфера, 2005
5. «Sensor Networks» / Thomas Haenselmann, 5th April 2006.
6. Descleves C. Understanding ZigBee transmission [Электронный ресурс] // RF Design Magazine. – March, 2006. URL: <http://rfdesign.com> (дата обращения 03.2011)
7. Семенов Ю.А. Беспроводные сети ZigBee и IEEE 802.15.4 [Электронный ресурс]. URL: <http://book.itер.ru/4/41/zigbee.htm> (дата обращения 03.2011)
8. «Sensor Networks» / Thomas Haenselmann, 5th April 2006.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Mansouri M., Rahim-Amoud R., Richard C. Factors that may influence the performance of wireless sensor networks. Smart wireless sensor networks, Chapter 2, 29-48, Intech, 2010.
13. Восков Л.С., Цыганов С.В. Проблема взаимного влияния беспроводных сетей связи в системах автоматизации промышленных предприятия и способ ее решения // «Датчики и системы», №8.2010. – М. : ООО «СенСиДат-Контрол», 2010. - С. 46-51.