
ТЕОРИЯ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 621.316.1.303.835.3

ЗАДАЧА УВЕЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ АВТОНОМНОЙ РАБОТЫ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ СБОРА ДАННЫХ И СПОСОБ ЕЕ РЕШЕНИЯ

С. Г. Ефремов, Л. С. Восков

Рассмотрена задача увеличения продолжительности автономной работы беспроводных сенсорных сетей и энергетическая балансировка с использованием мобильного стока как способ ее решения. Приведена универсальная модель энергетической балансировки и ее модификация для случая мобильного центрального узла. Дана количественная оценка преимуществ использования управляемой мобильности и выводятся условия, при которых целесообразно ее применять.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, энергетическая балансировка, управляемая мобильность.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективность и актуальность использования технологии беспроводных сенсорных сетей (БСС) для решения широкого круга задач мониторинга и управления в различных областях, таких как автоматизация предприятий, энергетика, здравоохранение, безопасность, экология привлекли к исследованиям ведущие научные центры и лаборатории мира. К основным преимуществам технологии БСС относится возможность создания самоорганизующихся цифровых сетей датчиков промышленного стандарта 802.15.4, использующих дешевые миниатюрные автономные вычислительные устройства [1].

Однако существуют проблемы, препятствующие массовому внедрению решений на базе БСС. Одна из них — необходимость увеличения времени автономной работы беспроводной сети на батареях или использования для электропитания узлов

сети альтернативных источников энергии.

Анализ литературы показал, что, несмотря на интенсивные исследования, которые ведутся в этой области, не существует общего подхода, который бы комплексно учитывал как время автономной работы отдельных узлов сети, так и показатели времени автономной работы всей сети в целом [2, 3]. Таким образом, становится актуальной постановка и решение проблемы увеличения времени автономной работы беспроводных сенсорных сетей в системах сбора данных.

Способ решения поставленной задачи состоит в разработке оригинальной математической модели, в которой комплексно учитываются как показатели отдельных узлов и всей сети в целом, влияющие на время жизни сети, так и разработка метода и алгоритма, позволяющие получить практические результаты

для увеличения времени автономной работы сети.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

В сенсорной сети есть три типа узлов — оконечные устройства, маршрутизаторы (ретрансляторы) и стоки, от времени жизни которых зависит то, сколько будет работать сеть в целом.

Оконечное устройство служит для считывания показаний с собственных датчиков и передачи их в сеть. Для него очень важно максимизировать время нахождения в режиме низкого энергопотребления. Это можно сделать как оптимизацией вычислений, алгоритмов, так и простым увеличением интервала между последовательными выходами из режима сна.

Маршрутизатор предназначен для ретрансляции приходящих на него сообщений на другие узлы. Большую часть времени он находится в активном состоянии, прослушивая эфир. При

прогнозировании времени автономной работы маршрутизаторов важно оценить потоки данных, которые будут проходить через них. Энергия при этом затрачивается не только на передачу полезных данных, но и на подтверждение передачи каждого кадра. При некоторых условиях возможно переводить всю сеть в спящий режим, в этом случае резко увеличивается время ее жизни.

Сток предназначен для накопления данных со всей сети и их передачи для последующей обработки на компьютер. Он получает питание от постоянных источников электропитания, на время жизни сети не влияет.

Анализ литературы показал, что у авторов нет единого подхода к определению того, что именно считать временем автономной работы распределенной сети. Различают группы показателей, основанные на количестве работающих устройств, на размере зоны покрытия сети, на связности графа сети, на задержках передачи данных, на времени самовосстановления сети [2].

С точки зрения сети задача увеличения времени ее автономной работы заключается в эффективном использовании энергии всей сети в целом, так как часто после выхода из строя первого элемента в ней остается еще более 90 % начальной энергии [4]. Способ энергетической балансировки сети, состоящий в том, чтобы все узлы сети выходили из строя одновременно или почти одновременно, решает эту проблему.

Способ может быть реализован различными методами: индивидуальным подбором емкости батарей и расположения узлов сети, использованием специальных протоколов маршрутизации, выбором мобильности

ретрансляторов [2]. Однако все они имеют те или иные недостатки. В статье исследуется один из наиболее перспективных методов — использование мобильности отдельных сетевых компонентов [4, 5].

Предлагается универсальная модель энергетической балансировки — модель управляемой мобильности стоков, заключающаяся в использовании динамических протоколов маршрутизации на мобильном стоке и использовании эвристических методов решения задачи частично целочисленного линейного программирования на основе предложенной модели.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОЙ МОБИЛЬНОСТИ СТОКОВ

Возьмем за основу универсальную модель энергетической балансировки, описанную в [7]. Рассмотрим беспроводную сеть, состоящую из n автономных маршрутизаторов.

Пусть i -й узел сети имеет некоторый начальный запас энергии E_i ($1 \leq i \leq n$). Предположим, что после перехода сети в установившийся режим работы каждый узел имеет постоянную потребляемую мощность p_i , ($1 \leq i \leq n$). Обозначим через S_k набор $\{p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_n^{(k)}\}$, пред-

ставляющий собой k -ю схему энергопотребления сети.

На рис. 1 приведены две различные схемы энергопотребления одной и той же сенсорной сети с разным положением центрального элемента, в которых потребляемая мощность каждого узла измеряется в условных единицах и равна количеству подключенных дочерних устройств. В реальных сетях зависимость сложнее, для моделирования будет использована методика расчета, предложенная в статье [2].

В зависимости от имеющихся возможностей для балансировки имеется фиксированное количество m таких схем, которые можно менять. В нашем случае сети с мобильным стоком(-ами) смена энергетической схемы осуществляется путем перемещения стока(-ов). Смена энергетических схем может быть сопряжена с дополнительными накладными расходами внутри сети.

Обозначим через e_i^{j-k} дополнительную энергию, затрачиваемую i -м узлом при переходе от схемы j к схеме k ($1 \leq j, k \leq m$). В общем случае задача энергетической балансировки состоит в определении последовательности $(S_{\pi(1)}, S_{\pi(2)}, \dots, S_{\pi(q)})$ применения q ($q \leq m, 1 \leq \pi(q) \leq m$)

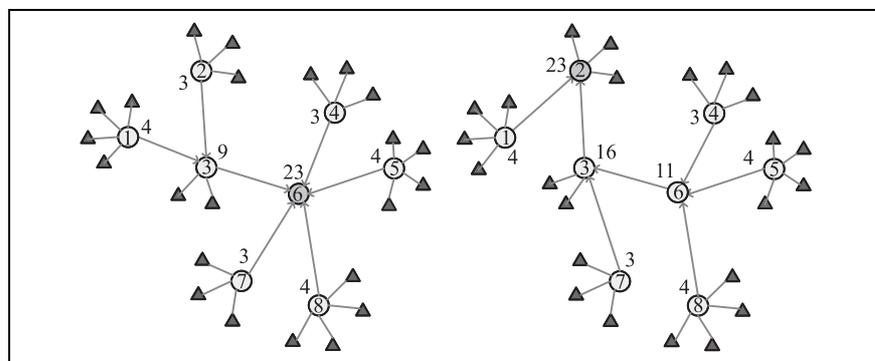


Рис. 1. Примеры схем энергопотребления БСС:
▲ — сенсор, ○ — ретранслятор, ● — сток

схем и времени действия $t_{\pi(i)}$ ($1 \leq i \leq q$) каждой из них с целью максимизации общего времени автономной работы сети.

Ниже приведена постановка задачи в терминах частично целочисленного линейного программирования (ЧЦЛП):

$$\max T = \sum_{k=1}^m t_k \quad (1)$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{k=1}^m p_i^k t_k + \sum_{k=1}^m \sum_{j=1, j \neq k}^m x_{jk} e_i^{j-k} \leq E_i, \quad (i = \overline{1 \dots n}); \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{jk} = y_k, \quad (k = \overline{1 \dots m}); \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{0k} = 1; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{k, m+1} = 1; \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^m x_{jk} = \sum_{j=1}^{m+1} x_{kj}, \quad (k = \overline{1 \dots m}); \quad (6)$$

$$u_j - u_k + m x_{jk} < m, \quad \forall j, k \in [1 \dots m], \quad (7)$$

где y_k — признак использования k -й схемы (посещения k -й позиции):

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{если } t_k > 0, \\ 0, & \text{если } t_k = 0. \end{cases}$$

Обозначение T в выражении (1) представляет собой общее время автономной работы сети, складывающееся из суммарной продолжительности действия всех энергетических схем.

Ограничения (2) гарантируют работу каждого узла в рамках его начального запаса энергии.

Ограничения (3)—(6) аналогичны тем, которые авторы используют в работе [8] для построения маршрута мобильного агента. Для этого создаются виртуальные позиции с индексами 0 (начальная точка) и $m + 1$ (ко-

нечная точка маршрута). Равенство (4) обеспечивает начало маршрута (из виртуальной точки 0 в одну из позиций стока), равенство (5) — окончание маршрута (из последней точки маршрута в виртуальную точку $m + 1$). Ограничения (6) выравниваются входящий и исходящий потоки каждой вершины.

Ограничения (7) нужны для предотвращения образования изолированных циклов, не связанных с основным маршрутом. После решения задачи ЧЦЛП переменным u_j ($1 \leq I \leq m$) присваиваются индексы в соответствии с порядком движения стока через них: если $x_{jk} = 1$, то $u_j < u_k$.

Однако, очевидно, что задача (1) является в общем виде NP-сложной и не может быть решена за допустимое время для большого количества m . Поэтому рационально использовать эвристические алгоритмы, дающие приемлемое на практике решение исходной задачи.

Одним из способов решения приведенной выше задачи является ее декомпозиция на две части. На первом этапе будет решаться задача линейной оптимизации (1) только с учетом ограничений (2), при этом из последних будет исключена вторая сумма, в которой фигурируют

величины x_{jk} , что оправдано на практике, так как в большинстве случаев e_i^{j-k} пренебрежимо малы. На втором этапе по найденному множеству позиций, для которых $t_k > 0$, будет решаться задача поиска маршрута. Учитывая, что сток не ограничен в ресурсах, маршрут необязательно должен быть оптимальным с точки зрения длины или числа повторных посещений вершин. Для поиска можно воспользоваться эвристиками, например, “идти в ближайшую непосещенную вершину”.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Получим количественные оценки преимуществ использования управляемой мобильности на основе модели и метода решения задачи ЧЦЛП, описанных в предыдущем разделе. В качестве исходной точки для сравнения возьмем сценарий сети со стационарным стоком. При моделировании будем использовать следующие параметры.

Ретрансляторы размещаются в двумерной области размером $L \times L$ ($L = 300$ м), координаты x, y узлов выбираются случайным образом из равномерного распределения от 0 до L . К каждому ретранслятору подключено одинаковое количество дочерних оконечных устройств,

Параметры, используемые при моделировании

Параметр	Значение
Размер области L , м	300
Число позиций стока m	25 (решетка 5×5)
Начальная энергия i -го ретранслятора E_i , Дж	10 000
Средняя мощность при передаче кадра P_{tx} , мВт	43
Потребляемая мощность при приеме данных P_{rx} , мВт	57
Потребляемая мощность в режиме сна P_s , мВт	0,003
Среднее время передачи кадра размером 100 байт с последующим приемом подтверждения t_{frame} , мс	6,8
Суммарный поток пакетов λ , генерируемый оконечными устройствами для каждого ретранслятора (кадров/с)	0,2

генерирующих суммарный поток $\lambda = 0,2$ кадра/с, размер каждого пакета равен 100 байт. Возможные позиции стока организованы в виде решетки 5×5 . Методика расчета величин p_i^k взята из [2].

Параметры потребляемой мощности в различных режимах возьмем из спецификации одного из доступных беспроводных модулей [9]. Все используемые параметры приведены в таблице.

В качестве целевой функции будем рассматривать относительное приращение времени жизни сети δ_r , определяемое следующим образом:

$$\delta_r = \frac{t_m - t_s}{t_s} \cdot 100 \%,$$

где t_m — время жизни сети с мобильным стоком, t_s — время жизни сети со стационарным стоком.

И t_s , и t_m определяются как продолжительность работы сети до выхода из строя первого по счету узла.

Прежде всего необходимо понять, как размещение узлов и радиус зоны покрытия приемопередатчика влияют на параметр δ_r . На наш взгляд, в других работах [4, 5, 8] этому вопросу не было уделено достаточного внимания.

Влияние размещения узлов

Возьмем сеть из 100 узлов и смоделируем 100 различных случайных их размещений в двумерной области размером $L \times L$. Радиус действия приемопередатчика R будем считать постоянным и равным 50 м.

Результат моделирования показан на рис. 2. На гистограмме виден большой разброс результатов: при среднем значении $\delta_r = 81 \%$ среднеквадратическое отклонение составило 31 %. Не-

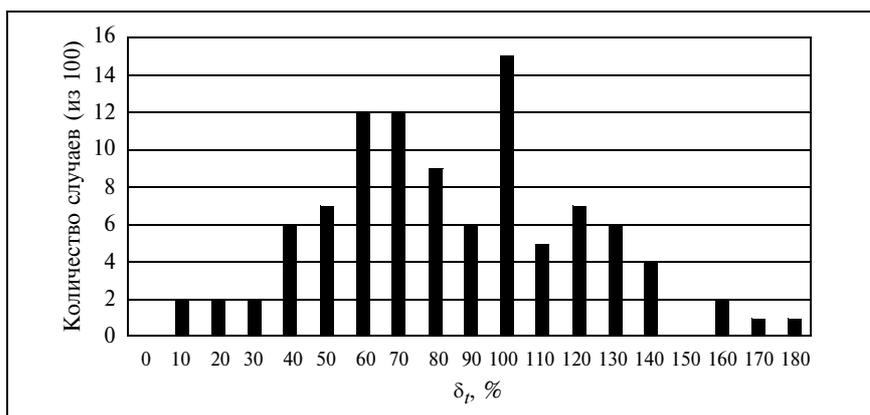


Рис. 2. Гистограмма распределения δ_r



Рис. 3. Зависимость δ_r от радиуса действия приемопередатчика

смотря на то, что в подавляющем большинстве случаев управляемая мобильность дает приращение времени жизни сети более 40 %, в отдельных сценариях ее использование не приводит к желаемым результатам. Такие отклонения объясняются тем, что в ряде случаев размещение оказывается очень удачным для использования неподвижного стока, и применение мобильности дает значение δ_r чуть более 10 %.

Есть и отклонения в другую сторону — при некоторых размещении узлов достигается почти трехкратное увеличение продолжительности работы за счет мобильного стока. Такой разброс объясняется неизменным

радиусом действия приемопередатчиков.

Влияние радиуса действия приемопередатчика

Рассмотрим три случайных расположения элементов сети и в каждом случае определим зависимость δ_r от радиуса покрытия приемопередатчика. Результаты моделирования приведены на рис. 3. На графике можно заметить несколько важных особенностей. В каждом из трех случаев в зависимости от конкретного местоположения узлов сети есть свой оптимальный радиус действия приемопередатчика, при котором потенциальное приращение времени жизни сети за счет энергетической балансировки максимально. Есть

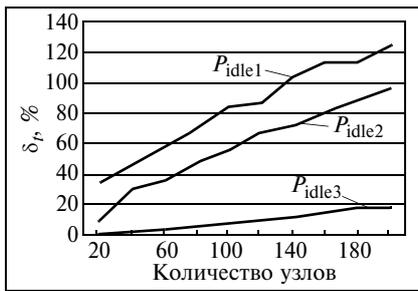


Рис. 4. Зависимость δ_r от числа узлов сети

и несколько локальных максимумов, что лишний раз подчеркивает, что для достижения наилучших результатов энергетическая балансировка должна применяться в совокупности с протоколами маршрутизации и выбором мощности передатчиков (в тех случаях, когда ею можно управлять).

Влияние количества узлов сети

На рис. 4 показана полученная в ходе моделирования зависимость δ_r от числа узлов сети для трех значений потребляемой мощности приемопередатчика в режиме ожидания P_{idle} (на графике $P_{idle1} = 0,01$ мВт, $P_{idle2} = 0,6$ мВт, $P_{idle3} = 10$ мВт). Для каждого числа узлов и значения P_{idle} выбиралось среднее значение δ_r по 50 различным размещениям. Из графика видно, что для больших сетей, содержащих более чем 150 узлов, можно добиться более чем двукратного увеличения продолжительности автономной работы. Необходимым условием, однако, является переход узлов в режим низкого энергопотребления ($P_{idle} \ll P_{rx}, P_{tx}$) для обеспечения разницы в потребляемой мощности между режимом ожидания и режимом передачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Время жизни сенсорных сетей является ключевым показате-

лем, определяющим их применимость на практике. На сегодняшний день можно отметить множество разных исследований, имеющих конечной целью увеличение данного показателя. Учитывая специфику сенсорных сетей как распределенных сетей сбора данных и возникающих в связи с этим проблем, распространение получили методы энергетической балансировки, направленные на выравнивание потребляемой мощности узлов сети. Одним из перспективных методов является использование мобильности отдельных сетевых компонентов.

В настоящей статье была рассмотрена универсальная модель энергетической балансировки и ее проекция на случай управляемой мобильности стоков. Была описана одна из возможных методик расчета ключевых параметров модели, проведено имитационное моделирование.

В ходе моделирования были получены количественные оценки использования управляемой мобильности, исчисляемые увеличением времени жизни вплоть до нескольких раз. Однако важно отметить, что есть целый ряд факторов, влияющих на итоговый результат. Ключевыми из них являются размер сети, разница в потребляемой мощности устройств в различных режимах, а также конкретное расположение элементов относительно друг друга и возможных позиций стока. Последняя зависимость подтверждает то, что управляемая мобильность должна использоваться в сочетании с другими методами увеличения времени автономной работы сети — маршрутизацией, основанной на остаточной энергии устройств, динамической регулировкой мощности приемопередатчиков и другими.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов В. С. Проблемы и задачи проектирования беспроводных сенсорных сетей // Информационные, сетевые и телекоммуникационные технологии: сборник научных трудов / Под ред. Жданова В. С. — 2009.
2. Ефремов С. Г., Восков Л. С. К вопросу о времени автономной работы сенсорных сетей // Качество, Инновации, Образование. — 2012. — № 7. — С. 61–67.
3. Dietrich I. and Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks // ACM Trans. Sen. Netw. 5, 1. Article 5 (January 2009). — P. 5:1–5:39.
4. Wang Z. M., Basagni S., Melachrinoudis E. and Petrioli C. Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime // Proc. of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island Hawaii. — 2005. — P. 287–295.
5. Shah R. C., Roy S., Jain S. and Brunette W. Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks // Proc. of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, SNPA-2003, Anchorage, AK (May 11, 2003). — P. 30–41.
6. Tong L., Zhao Q. and Adireddy S. Sensor networks with mobile agents // Proc. of the IEEE Military Communication Conference, MILCOM-2003. Vol. 1. Boston, MA (October 13–16, 2003). — P. 705–710.
7. Ефремов С. Г. Применение энергетической балансировки в беспроводных сенсорных сетях // Науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, посвященная 50-летию МИЭМ. — М.: МИЭМ, 2012. — С. 78–79.
8. Basagni S., Carosi A., Melachrinoudis E. et al. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime // Wirel. Netw. 14, 6 (December 2008). — P. 831–858.
9. Описание модулей NXP JN5148 от 12.09.2012 [Электронный ресурс] // URL: <http://www.jennic.com/support/datasheets/> (дата обращения 01.2013).

Сергей Геннадьевич Ефремов — магистр техники и технологии по направлению “Информатика и вычислительная техника”, аспирант Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики” (МИЭМ НИУ ВШЭ);

☎ +7 (910) 421-72-64

E-mail: sfrefremov@hse.ru

Леонид Сергеевич Восков — канд. техн. наук, профессор, доцент МИЭМ НИУ ВШЭ.

☎ +7 (910) 401-35-71

E-mail: lvoskov@hse.ru □