

## ПОСТРОЕНИЕ КРАТЧАЙШЕГО РАСПИСАНИЯ СБОРА ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С ОГРАНИЧЕННЫМ КРИТИЧЕСКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

**А.В. Жевак, В.Ю. Арьков**

*ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный  
технический университет», г. Уфа*

*Рецензент В.Ф. Калинин*

**Ключевые слова и фразы:** беспроводная сенсорная сеть; оптимизация; сбор данных; энергопотребление.

**Аннотация:** Представлен алгоритм построения оптимального, с точки зрения минимизации времени, дерева (и расписания) сбора данных для беспроводной сенсорной сети с ограниченным критическим энергопотреблением, в которой возможна прямая передача данных между любыми двумя узлами. Данный алгоритм может служить базой для создания принципиально новых алгоритмов оптимизации сбора данных в беспроводных сенсорных сетях, основанных на приближении структуры дерева сбора данных к построенной с его помощью идеальной структуре. Представлен простейший эвристический алгоритм, основанный на этом подходе. Результаты имитационного моделирования подтверждают высокий потенциал предлагаемого подхода к оптимизации сбора данных в беспроводных сенсорных сетях.

### Введение

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) состоит из  $n$  сенсорных узлов и одного центрального узла. Сенсорные узлы (СУ) представляют собой измерительные устройства, оборудованные автономными источниками питания (ИП) и радио-приемопередатчиками. Центральный узел также оборудован радио-приемопередатчиком, однако имеет постоянный ИП. БСС предназначена для получения информации о динамике физических вели-

---

Жевак А.В. – аспирант кафедры «Автоматизированные системы управления» Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа; Арьков В.Ю. – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа.

чин и технологических параметров объектов. Для этого, СУ сети устанавливаются на упомянутые объекты, периодически осуществляют необходимые измерения и передают полученную информацию в центральный узел по радиоканалу связи. При этом, в связи с ограниченными возможностями радиосвязи (в частности – ограниченная дальность) не всегда возможна передача данных от каждого узла непосредственно центральному узлу. Таким образом, в БСС возникает необходимость ретрансляции.

От выбора маршрутов и составления расписания передачи данных в большой степени зависят длительность функционирования сети до истощения ресурса автономных ИП СУ, а также оперативность поступления данных в центральный узел. Высокое энергопотребление СУ (вызванное слишком частыми передачами данных) ведет к быстрому выходу их из строя и, следовательно, частой необходимостью их обслуживания. Недостаточная оперативность поступления данных ведет к снижению информативности сети. Все это говорит о необходимости оптимизации сбора данных (СД) в БСС по пути снижения энергопотребления и повышения скорости доставки данных от СУ к центральному узлу.

Основной научной проблемой в области БСС является проблема оптимального СД. По части алгоритмического обеспечения БСС, исследования направлены на создание алгоритмов, обеспечивающих СД с узлов БСС за минимальное время при минимальном потреблении энергии. Учеными предлагаются различные пути достижения этой цели. К примеру, в [1] предлагается вариант адаптивного расписания передач данных (каждый узел сам составляет свое расписание исходя из наблюдаемого поведения соседних узлов). Однако, в большинстве случаев [2, 4], задача сводится к составлению постоянного расписания СД. Разные исследователи формулируют задачу составления расписания по-разному, включая или не включая в нее различные факторы, берут за основу различные вариации БСС. Например, в [5] считается, что известны географические координаты узлов. В [3] рассматриваются мобильные БСС, в которых узлы могут перемещаться в пространстве. Так или иначе, практически все вариации задачи о составлении оптимального расписания для БСС являются NP-полными. Для их решения предлагаются различные алгоритмы. В данной статье предлагается совершенно новый подход, основанный на построении деревьев СД по образу и подобию идеальных деревьев СД для идеальных БСС (в которых возможна прямая передача данных между любыми двумя узлами).

### Модель БСС

БСС представляется в виде графа  $G = (V, E)$ , вершинами которого являются узлы сети (как сенсорные, так и центральный), а ребрами – связи между ними. Ребро между двумя вершинами существует тогда и только тогда, когда между соответствующими узлами БСС возможна устойчивая прямая радиосвязь. СД в БСС осуществляется циклами, в каждом из которых данные со всех СУ поступают в центральный. Все циклы одинаковы. Цикл состоит из временных интервалов (ВИ). В течение ВИ узлы передают друг другу данные. Во избежание коллизий, каждый узел в течение од-

ного ВИ обменивается данными не более чем с 1 узлом. Таким образом, каждый узел в течение одного ВИ выполняет 1 из 3 возможных действия:

- 1) принимает данные от другого узла;
- 2) передает данные другому узлу;
- 3) не осуществляет прием/передачу данных.

В последнем случае узел расходует гораздо меньше энергии за счет временного отключения радио-приемопередатчика, пребывания микропроцессора в спящем режиме и тому подобных мер.

Передавая данные, узел, помимо данных, полученных от собственных датчиков, также направляет всю информацию, полученную им к этому времени от других узлов в течение текущего цикла. Из вышесказанного следует, что одному узлу в течение одного цикла не имеет смысла передавать данные более одного раза.

Исходя из того, что сенсорные узлы в течение одного цикла совершают одинаковое фиксированное число передач, а энергопотребление в спящем режиме много меньше потребления в режиме приема, следует, что минимизация энергопотребления сенсорного узла заключается в минимизации числа ВИ, в которых он находится в режиме приема данных.

Совокупность маршрутов СД в БСС можно представить в виде дерева, множество вершин которого совпадает с множеством вершин графа БСС, а множество ребер является подмножеством множества ребер графа БСС. При этом ребро между двумя узлами существует, если один из них передает данные (в некотором ВИ). Корнем дерева является центральный узел БСС. По дереву СД однозначно определяется длина цикла СД.

Минимизируя энергопотребление сети, имеет смысл говорить о минимизации максимального (критического) энергопотребления среди всех СУ сети, так как необходимость в техническом обслуживании сети появляется, как только выходит из строя хотя бы один из ее узлов. Так как емкость автономных ИП полагается одинаковой у всех СУ, то критическим фактором является минимизация максимального числа передач среди всех СУ сети в течение одного цикла. Число передач узла равно числу сыновей соответствующей вершины дерева СД.

### **Составление расписания СД на основе дерева СД**

Так как энергопотребление каждого узла есть число его сыновей в дереве СД, то есть величина, однозначно определяемая деревом, то при составлении расписания передач данных по имеющемуся дереву, оптимизация осуществляется лишь по одному критерию – по времени СД. Минимизация времени достигается с помощью жадного алгоритма, суть которого заключается в СД на каждом шаге (ВИ) с максимально возможным числом узлов. Такой алгоритм действий оптимален, так как каждый узел, прежде чем передать данные, должен осуществить прием данных от всех своих сыновей по дереву сбора, а, следовательно, очередность, в которой происходит прием данных от сыновей, не имеет значения.

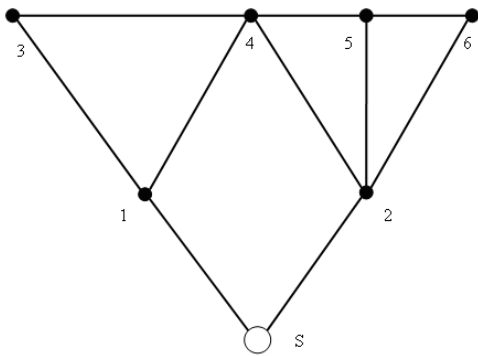


Рис. 1. Граф БСС

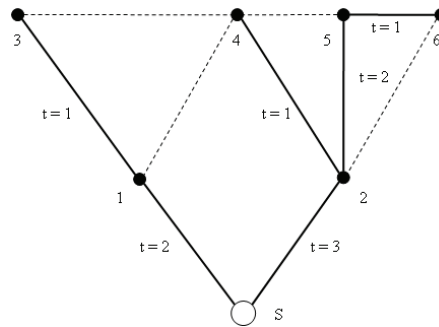


Рис. 2. Оптимальное дерево сбора данных для БСС из рис. 1

Рассмотрим БСС, показанную на рис. 1, и соответствующее ей дерево СД (рис. 2), где пунктирными линиями обозначены ребра графа БСС, не вошедшие в дерево СД. На обоих рисунках обозначение «S» соответствует центральному узлу. Итак, на первом шаге узлы 3, 4 и 6 передают данные узлам 1, 2 и 5, соответственно. На втором шаге узлы 1 и 5 осуществляют передачу узлам S (центральный узел) и 2, соответственно. На последнем – третьем шаге, узел 2 передает данные в центральный узел, на этом цикл СД завершается. Таким образом, время СД в данном примере составляет 3 ВИ, в то время как критическое энергопотребление равно 2 (узел 2 имеет 2 сыновей – узлы 4 и 5).

### Задача построения кратчайшего расписания СД в БСС с ограниченным критическим энергопотреблением

По заданному связному графу БСС, построить дерево СД с критическим энергопотреблением, не превышающим заданного ограничения, обеспечивающее минимальную длину цикла СД.

Дано  $G = (V, E)$  – связный граф,  $E_b$ .

Найти:  $T(G)$ , такое, что  $L(T(G)) \rightarrow \min, E(T(G)) \leq E_b$ ,

где  $T(G)$  – дерево СД, построенное для БСС, заданной графом  $G$ ;  $L(T(G))$  – время СД по дереву  $T(G)$ ;  $E(T(G))$  – критическое энергопотребление согласно дереву  $T(G)$ ;  $E_b$  – ограничение критического энергопотребления.

### Построение идеального дерева СД в «идеальной» БСС

Рассмотрим случай задачи, когда БСС задана полным графом, т.е.  $\forall u, v \exists (u, v) \in E$ , где  $u, v \in V$ . Иными словами, между любыми двумя вершинами графа  $G = (V, E)$  существует ребро. Следовательно, о БСС достаточно знать лишь число узлов  $n$ .

Пусть  $f_s(t, e)$  – максимальное число узлов идеальной БСС со временем СД  $t$  и критическим энергопотреблением  $\leq e$ , тогда для решения поставленной задачи достаточно найти такое минимальное время  $t$ , что  $f_s(t, e) \geq n$ , и  $f_s(t, e)$  есть функция, возрастающая по  $t$  при фиксированном  $e$ , следовательно, искомое значение  $t$  можно определить любым известным

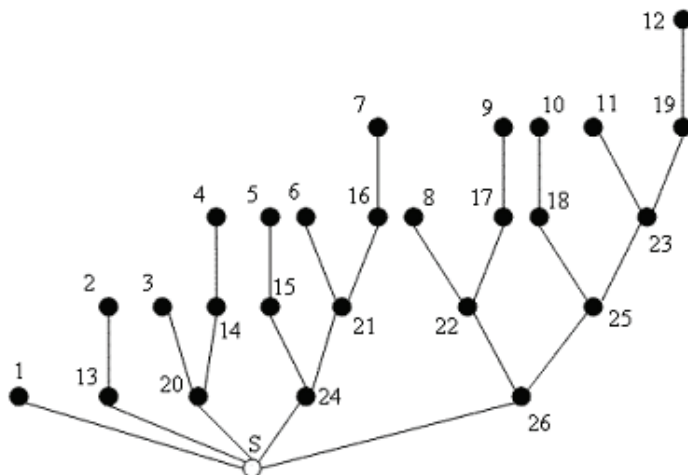


Рис. 3. Идеальное дерево сбора данных для  $t = 5, e = 2$

алгоритмом поиска для монотонных функций, например, двоичным поиском;  $f_s(t, e)$  вычисляется по формуле

$$f_s(t, e) = \sum_{i=1}^t f_p(t-i, e),$$

где  $f_p(t, e) = \sum_{i=1}^{\min(t, e)} f_p(t-i, e)$ .

Функция  $f_s$  применяется для центрального узла, а  $f_p$  – для сенсорного. Таким образом, учитывается тот факт, что энергопотребление центрального узла не влияет на критическое энергопотребление сети. Функции  $f_s$  и  $f_p$  корректны, так как, если со всех узлов некоторого поддерева дерева СД требуется собрать данные за время  $t$ , то максимальное допустимое время СД для непосредственно дочернего узла корня поддерева равно  $t-1$ , когда  $t-1$  «отдано» одному из таких узлов, максимальное допустимое время для оставшихся становится равным  $t-2$  и т.д.

На рис. 3 представлено идеальное дерево СД, построенное согласно функции  $f_s(5, 2)$ , т.е. дерево с критическим энергопотреблением  $e = 2$  и максимальным числом вершин, по которому возможно осуществить СД за время  $t = 5$ . Дерево содержит 27 вершин. На первом шаге (ВИ) передают данные узлы 1–12, на втором – узлы 13–19, на 3-м – 20–23, на 4-м – 24–25, на 5-м – 26.

### Эвристический алгоритм решения задачи для произвольной БСС

Цель алгоритма – по заданному графу БСС общего вида, построить дерево СД наиболее близкое по топологии к идеальному дереву, построенному по описанному выше алгоритму для идеальной БСС с тем же числом вершин, что и у заданной. Дерево СД строится итеративно от корня (центрального узла БСС) к листьям в 2 этапа, второй этап выполняется после первого.

**Этап 1.** На каждом шаге сначала случайным образом выбирается вершина  $u$ , уже включенная в дерево (изначально в дерево включена только

1 вершина – центральный узел), затем, также случайным образом, выбирается вершина  $v$ , не включенная в дерево. Выбор осуществляется так, чтобы выполнялись 2 условия:

1) между  $u$  и  $v$  существует ребро в графе БСС;

2) включение  $v$  в множество сыновей  $u$  не нарушит структуры идеального дерева СД.

Этап завершается как только либо все вершины попадут в дерево, либо не найдется таких  $u$  и  $v$ , для которых выполняются указанные условия.

**Этап 2** аналогичен этапу 1, с тем лишь отличием, что узлы  $u$  и  $v$  должны соответствовать лишь условию 1. Этап завершается как только все вершины будут включены в дерево.

Таким образом, все вершины графа БСС будут включены в дерево СД. Описанный алгоритм выполняется  $k$  раз, среди найденных решений выбирается лучшее.

### Имитационное моделирование

В процесс имитационного моделирования задействованы следующие алгоритмы:

1) алгоритм построения идеального дерева для идеальной БСС;

2) эвристический алгоритм, представленный в статье;

3) эволюционный алгоритм;

4) алгоритм LBDAT (latency bounded data aggregation tree) из [4], модифицированный для решения рассматриваемой задачи.

В алгоритме 3 особью является дерево СД, популяция состоит из 2 особей, число поколений равно  $k$ , в процессе эволюции из предыдущего поколения в следующее переходит только 1 наиболее жизнеспособная из особей (жизнеспособность особи тем лучше, чем меньше время СД соответствующего дерева). Второй особью нового поколения становится новая, заново сгенерированная, особь. Генерация особей осуществляется случайным образом, но таким образом, чтобы не нарушалось ограничение критического энергопотребления.

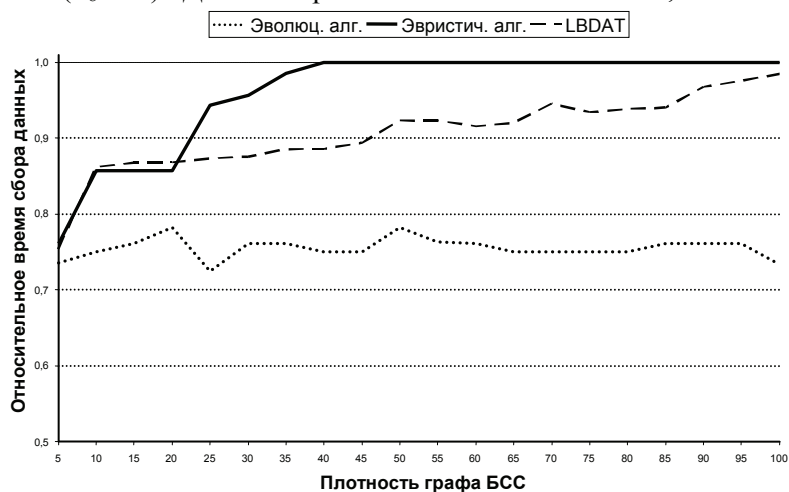
В процессе моделирования константа  $k$  была задана равной 10 как для алгоритма 2, так и для алгоритма 3.

Алгоритм из [4] изначально предназначен для минимизации энергии при заданном ограничении времени, при этом понятие энергии в [4] отличается от понятия энергии в этой статье. Вследствие чего, оригинальный алгоритм был модифицирован для минимизации времени без учета энергии (путем поиска минимального времени, для которого исходный алгоритм сумеет найти хотя бы какое-то дерево СД).

Все тестируемые алгоритмы были реализованы в виде программ на языке C++, которые и были непосредственно подвергнуты тестированию.

Имитационное моделирование проводилось 2 способами.

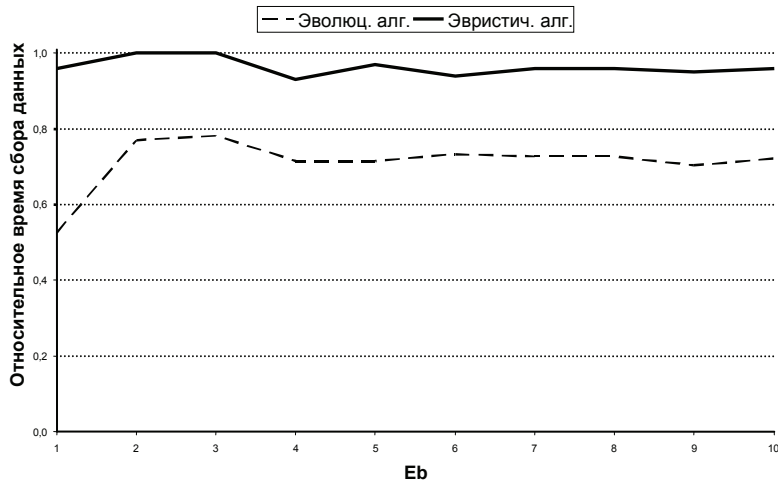
**Способ 1.** Заключается в сравнении возможностей алгоритмов 2, 3 и 4 минимизировать время СД при неограниченном допустимом энергопотреблении ( $E_b = \infty$ ). Для тестирования использованы БСС, состоящие из



**Рис. 4.** Относительное время сбора данных, достигнутое алгоритмами 2, 3 и 4 для БСС различной плотности с 60 узлами

60 узлов (включая центральный), сгенерированные случайным образом с заданными уровнями плотности ребер. Использованы уровни плотности от 5 до 100 % с шагом в 5 %. Результат работы каждого алгоритма на каждом тесте есть относительное время СД, вычисляемое по формуле  $R_o / R_i$ , где  $R_o$  – минимальное время, найденное алгоритмом 1 (для идеальной БСС с  $n = 60$  и  $E_b = \infty$ );  $R_i$  – минимальное время, найденное соответствующим алгоритмом. Для каждого уровня плотности сгенерированно 10 графов БСС. В качестве результата работы каждого алгоритма на очередном уровне плотности взято среднее арифметическое результатов на каждом из 10 графов. Результаты первого этапа имитационного моделирования показаны на рис. 4.

**Способ 2.** Заключается в сравнении алгоритмов 2 и 3 минимизировать время СД при заданном ограничении критического потребления, т.е. решать поставленную в статье задачу. На рис. 5 показаны результаты тести-



**Рис. 5. Относительное время сбора данных, достигнутое алгоритмами 2 и 3 для БСС с  $n = 400$  и плотностью 8 %, при различных  $E_b$**

рования для БСС с 400 узлами и плотностью 8 %. Тестирование осуществлялось следующим образом. Алгоритмы 2 и 3 запускались на 100 тестах – по 10 тестов на каждый уровень ограничения критического потребления  $E_b = 1, 2, \dots, 10$ . Результаты рассчитывались аналогично способу 1 (относительно результатов для идеальной БСС). В случае, если алгоритм не находил допустимого дерева СД, ответ (время) полагался равным числу узлов, т.е. 400. Для каждого  $E_b$  результаты усреднялись с помощью среднего арифметического.

### Выводы

Представленный в статье алгоритм позволяет построить оптимальное допустимое дерево сбора данных для идеальных беспроводных сенсорных сетей, таким образом, достигая теоретического минимального времени сбора данных. Он открывает целое направление в создании алгоритмов оптимизации сбора данных в БСС. Даже предложенный в статье простейший эвристический алгоритм, основанный на новом подходе, позволил получить результаты, сравнимые с результатами других алгоритмов на произвольных графах, а на насыщенных графах – превзошел их, зачастую достигая идеального результата.

Результаты имитационного моделирования показали, что новый алгоритм позволяет уменьшить время сбора данных в БСС из 60 узлов, с плотностью ребер 25 % и более, относительно результатов алгоритма LBDAT из [4] на 2 – 13 %, при этом для БСС, с плотностью 40 % и более, достигается теоретическая нижняя граница оптимизируемой величины.

Создание алгоритмов, основанных на предложенном подходе, оптимизированных для графов со специфической топологией позволит достигать высоких результатов, максимально близких к глобальному оптимуму, особенно на насыщенных графах.

### Список литературы



1. Sharat C. Visweswara, Rudra Dutta, Mihail L. Sichitiu, Adaptive ad hoc self-organizing scheduling for quasi-periodic sensor network lifetime, *Computer Communications* 29 (2006), 3366–3384.
2. Shen, Y. -J., & Wang, M.-S., Broadcast scheduling in wireless sensor networks using fuzzy Hopfield neural network, *Expert Systems with Applications* 2 (2007), 900–907.
3. Yaoyao Gu, Doruk Bozdog, Robert W. Brewer, Eylem Ekici, Data harvesting with mobile elements in wireless sensor networks, *Computer Networks* 50 (2006), 3449–3465.
4. Hongwei Du, Xiaodong Hu, Xiaohua Jia, Energy efficient routing and scheduling for real-time data aggregation in WSNs, data aggregation in WSNs, *Computer Communications* 29 (2006), 3527–3535.
5. Shibo Wu, K. Selcuk Candan, Power-aware single- and multipath geographic routing in sensor networks, *Ad Hoc Networks* 7 (2007), 974-997.
6. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М. : ЦНМО, 1999. – 953 с.

**Designing Brief Schedule of Data Collection  
in Wireless Sensor Network with Limited Energy Consumption**

**A.V. Zhevak, V.Yu. Arkov**

*Ufa State Aviation Technical University, Ufa*

**Key words and phrases:** wireless sensor network; optimization; data collection; energy consumption.

**Abstract:** Algorithm of designing optimal data collection tree (and schedule) for wireless sensor network with limited critical energy consumption is presented; it minimizes the time and enables to transfer data directly between two different points. This algorithm can form the basis for designing completely new algorithms for optimization of data collection in wireless sensor networks; these can be based on approximation of data collection tree structure to an ideal one designed with its help. The paper also presents the simplest heuristic algorithm based on the same approach. The results of simulation modeling prove high potential of the suggested approach to optimization of data collection in wireless sensor networks.

---

© А.В. Жевак, В.Ю. Арьков, 2007