

# БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ, ОСНАЩЕННЫЕ СРЕДСТВАМИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ИЗ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В. В. Шахов, Д. А. Мигов, О. Д. Соколова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия

---

УДК 004.72

Беспроводные сенсорные сети являются очень перспективной технологией для создания принципиально новых промышленных приложений. Ожидается, что большая часть узлов указанных сетей будет пользоваться возобновляемыми источниками энергии. Однако разработка и внедрение беспроводных сенсорных сетей, оснащенных средствами сбора энергии из окружающей среды, сопровождаются новыми исследовательскими задачами, обусловленными стохастическим характером и ненадежностью источников энергии. Кроме того, потребуется модификация существующих протоколов, используемых в традиционных сенсорных сетях. В данной статье приводится обзор исследовательских проектов по данной тематике. Также уделяется внимание постановке оригинальных задач, разработанных авторами, решение которых открывает возможности для создания инновационных технологий.

**Ключевые слова:** беспроводные сенсорные сети, возобновляемые источники энергии.

A significant part of the energy demand in wireless sensor networks is expected to be met through renewable electricity in the near future. The energy harvesting wireless sensor networks becomes promising technology for industrial applications. However, development and implementation of the mentioned networks generates new research challenges due to a stochastic characteristic and unreliability of energy sources. Traditional wireless sensor networks protocols have to be modified as well. This work presents a review of research projects in this field. A particular attention is paid to some original problem statements, which hold opportunity for future wireless sensor networks applications.

**Key words:** Energy Harvesting Wireless Sensor Networks.

**Введение.** В настоящее время активно проводятся исследования беспроводных сенсорных сетей, оборудованных средствами получения энергии из окружающей среды (Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, EH-WSNs). Оснащение сенсоров средствами получения энергии из окружающей среды позволяет значительно уменьшить время пребывания сенсоров в неактивном состоянии. При данной модификации рабочего цикла сенсоров существенно улучшается такой показатель качества обслуживания как задержка сообщения. Другой основной показатель качества обслуживания — скорость потерь пакетов — также улучшается за счет уменьшения вероятности переполнения буфера транзитного узла и уменьшения вероятности отбраковки пакетов по причине истечения времени их жизни. Однако характер поступления энергии из окружающей среды может изменяться во времени. Для обеспечения надлежащего качества обслуживания компоненты беспроводной

сенсорной сети должны адаптироваться к этим изменениям. Кроме того, разработка эффективных технологий, основанных на EH-WSNs, требует решения следующих проблем [1]:

- разработки стратегий обеспечения наиболее надежного функционирования EH-WSNs;
- модификации рабочего цикла сенсора с учетом не только спящего режима, но и режима подзарядки;
- оценки минимальных требований к снабжению внешней энергией;
- запаса энергии, требуемого в узлах, чтобы обеспечить нужную производительность приложений;
- выявления компонент системы, потребляющих больше всего энергии.

Таким образом, актуальность исследований, направленных на решение указанных проблем, не вызывает сомнений.

В ходе исследований была впервые поставлена и исследована задача поиска компромисса между структурной надежностью сети и расписанием рабочего цикла сенсоров. Действительно, увеличение радиуса передачи сенсора (transmission range) позволяет увеличить связность топологии сети. В то же время существенно увеличивается расход энергии на передачу сообщений, следовательно, сенсор больше времени проводит в состоянии „сна“ или в режиме сбора энергии (иногда с временным отключением от сети). Доступность (надежность) сенсора уменьшается. Наоборот, уменьшение радиуса передачи влечет уменьшение количества связей. Однако сенсор тратит меньше энергии, его доступность увеличивается.

Для анализа поведения сенсоров использовались новые модели, основанные на Марковских процессах. В отличие от предыдущих аналогичных результатов, предложенные модели лучше подходят под цели данного исследования, в них, в частности, не используются предположения об одинаковом времени на обработку сенсором любого события и о постоянной интенсивности подзарядки узла. Кроме того, в зависимости от развития конкретной ситуации предлагается использовать несколько моделей с одинаковыми состояниями, но разными характеристиками переходов между состояниями. Одно и то же состояние может являться поглощающим в одной модели и не являться таковым в другой.

Представленные результаты могут использоваться для разработки и теоретических средств исследования сенсорных сетей и практических механизмов повышения эффективности технологий, основанных на EH-WSNs. Так, оптимизация рабочего цикла при ограничении на надежность сети позволяет оценить радиус передачи для сенсора. Отметим, что величина радиуса передачи оказывает серьезное влияние на алгоритмы агрегирования трафика и производительность MAC протоколов.

**1. Задачи и методы исследования EH-WSNs.** Несмотря на применение новейших технологий в области аппаратной и программной реализации, проблема эффективного использования ресурсов БСС ощущается особенно остро. Задача разработки схемы обмена данными между большим количеством сенсорных узлов может быть решена на основе информации о составе, размере сети и функциональности ее отдельных узлов с помощью системы управления запросами для организации сбора и передачи данных в БСС, позволяющей сократить время для принятия решения организации потока данных и минимизировать энергопотребление сенсорной сети.

В русскоязычной литературе почти нет статей, исследующих задачу возобновления энергии узлами беспроводной сенсорной сети (БСС). Рассматриваются в основном задачи

о минимизации энергопотребления, составлении оптимального расписания для повышения общей энергоэффективности сети.

В статье [2] исследуется задача организации маршрутов передачи данных в БСС. В качестве модели используется случайный граф. Предложено с целью увеличения продолжительности работы сети использовать дерево передачи данных, построенное на ограниченной выборке датчиков БСС. Рассматриваются вопросы использования кода Прюфера, приведен алгоритм построения кода. Использование кода Прюфера может помочь при разработке оптимального расписания работы элементов БСС и тем самым повысить общую энергоэффективность сети.

В тех случаях, когда речь идет о передаче данных в БСС, интерес могут представлять модели на основе теории перколяции и кода Прюфера. В [2] описан способ управления сенсорными узлами, разработанный с целью максимизации времени жизни сети. Основная идея заключается в получении выборки определенного количества датчиков, удовлетворяющих условиям, предъявляемым к зоне покрытия пользователем. Выбор этого количества датчиков основан на теории геометрической вероятности и случайной выборки при постоянной вычислительной сложности без обмена управляющей информацией с ближайшими соседями. Выбранные датчики формируют дерево передачи данных, для того чтобы избавиться от задержек при ожидании трансляции, которые имеют место при работе со случайными датчиками. Все датчики имеют одинаковую возможность отправлять собранные данные с некоторой периодичностью, так что вся исследуемая площадь покрывается с фиксированной задержкой. Процесс сбора данных со всей исследуемой области осуществляется циклически. Один цикл состоит из определенного количества сессий, в каждой из которых участвует некоторое количество сенсорных узлов, не покрывающих исследуемую область полностью. Длительность цикла, количество сессий и сенсорных узлов варьируются в зависимости от типа приложения. Предложено разбивать все множество датчиков БСС на подмножества, которые обеспечивали бы последовательное полное покрытие заданной площади. Разработан алгоритм построения дерева передачи данных в БСС. Сформированное дерево передачи данных кодируется кодом Прюфера для снижения интенсивности обмена информацией между узлами, что позволит увеличить время жизни БСС. Приведен алгоритм формирования кода Прюфера для дерева, сформированного для конкретной выборки.

В [3] описан разработанный автором алгоритм определения зоны покрытия узлов БСС, который является основой для создания математической модели определения дерева передачи данных в условиях неопределенности. Доказано, что в БС код Прюфера может быть использован не только для кодирования дерева передачи данных между узлами, но и для системы управления запросами к сенсорным узлам. Рассмотрены вопросы повышения эффективности применения базы данных для информационной поддержки процесса управления БС. Разработана система запросов к сенсорным узлам БС на основе SQL-подобных языков.

Во многих БСС замена разрядившихся батарей без прерывания функционирования сети экономически нецелесообразна из-за трудности доступа к громадному числу сенсорных устройств. Одно из решений — беспроводная зарядка батарей от специально выделенных источников или других узлов. Другим перспективным подходом к продлению времени жизни батарей является получение энергии от побочных внешних источников (energy harvesting): вибрации, ветер, перепад температуры, солнечное излучение и т. д. Однако, поскольку подобные источники могут стать недоступны, такой подход не обеспечивает

надежного непрерывного функционирования сети.

Использование возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии — не новая концепция. Возобновляемые источники энергии, которые в настоящее время используются для выработки электроэнергии, — это солнце, ветер, вода и тепловая энергия. Солнечная энергия является наиболее распространенным источником для сбора энергии. Однако этот источник имеет недостаток — он в состоянии генерировать энергию только тогда, когда есть достаточно солнечного или искусственного света. Колебательная, кинетическая и механическая энергия, генерируемая от перемещения объектов, также могут быть использованы. Вибрации в настоящее время особенно заметны в мостах, на дорогах и железнодорожных путях. Энергия генерируется, когда существует разница температур между двумя стыками проводящих материалов. Сбор тепловой энергии использует разницу температур, например, между человеческим телом и окружающей средой. Устройства с прямым контактом с человеческим телом могут собирать энергию, излучаемую из человеческого тела, с помощью теплогенераторов. Бесперебойной работы сенсорной сети можно добиться, если для подзарядки батарей использовать энергию из внешних источников. Такую энергию мог бы поставлять мобильный робот, который выполняет функции интеграции данных, а заодно служит „перевозчиком“ энергии. Хотя в принципе все узлы сети могли бы посещаться роботом индивидуально, более практично использовать многоуровневый подход и поставлять энергию в узлы в „многоскачковом“ (multihop) режиме.

В статье [1] проблема получения энергии от побочных внешних источников рассмотрена достаточно подробно. Авторы отмечают, что из-за роста стоимости поддержки функционирования, а также в связи с расширением рынка микроэлектроники с исключительно низким уровнем энергопотребления, все меньше встраиваемых сетевых систем опирается на питание от батарей. Системы могут черпать энергию из окружающей среды и эффективно сохранять ее в конденсаторах большой емкости. Например, в беспроводных сенсорных сетях теперь используются различные источники энергии, включая солнечные фотоэлементы, ветер, пьезоэлектрические элементы, реагирующие на вибрацию и дрожание, радиочастотные излучения и т. д. Встраиваемые системы могут переводить энергию из одной формы в другую до ее окончательного преобразования в электрическую энергию (например, солнечная энергия сначала может преобразовываться в тепловую энергию). Таким образом, одновременно могут использоваться источники энергии разных видов. Далее авторы статьи отмечают, что поскольку энергия, доступная из окружающей среды, может изменяться во времени, программные и аппаратные компоненты сети должны адаптироваться к этим изменениям, чтобы обеспечить бесперебойное функционирование сети. Чтобы осуществить моделирование беспроводных сенсорных сетей с питанием от побочных внешних источников, необходимо ответить на ряд вопросов, в частности, каковы минимальные требования к снабжению внешней энергией, и какие стратегии обеспечивают наиболее надежное функционирование системы.

Авторы статьи предлагают использовать моделирование на основе графов связей (Bond Graph, BG). BG-модель состоит из ориентированного графа с объектно-ориентированным описанием и иерархически структурированной подсистемы поддержки моделирования. Графы связей являются непрерывными и позволяют моделировать источники энергии, буферы и коммуникационные связи. BG-моделирование можно использовать для введения ограничений на энергопотребление и исследования возможности их соблюдения в различных прикладных сценариях. Можно также использовать автоматически генерируемые

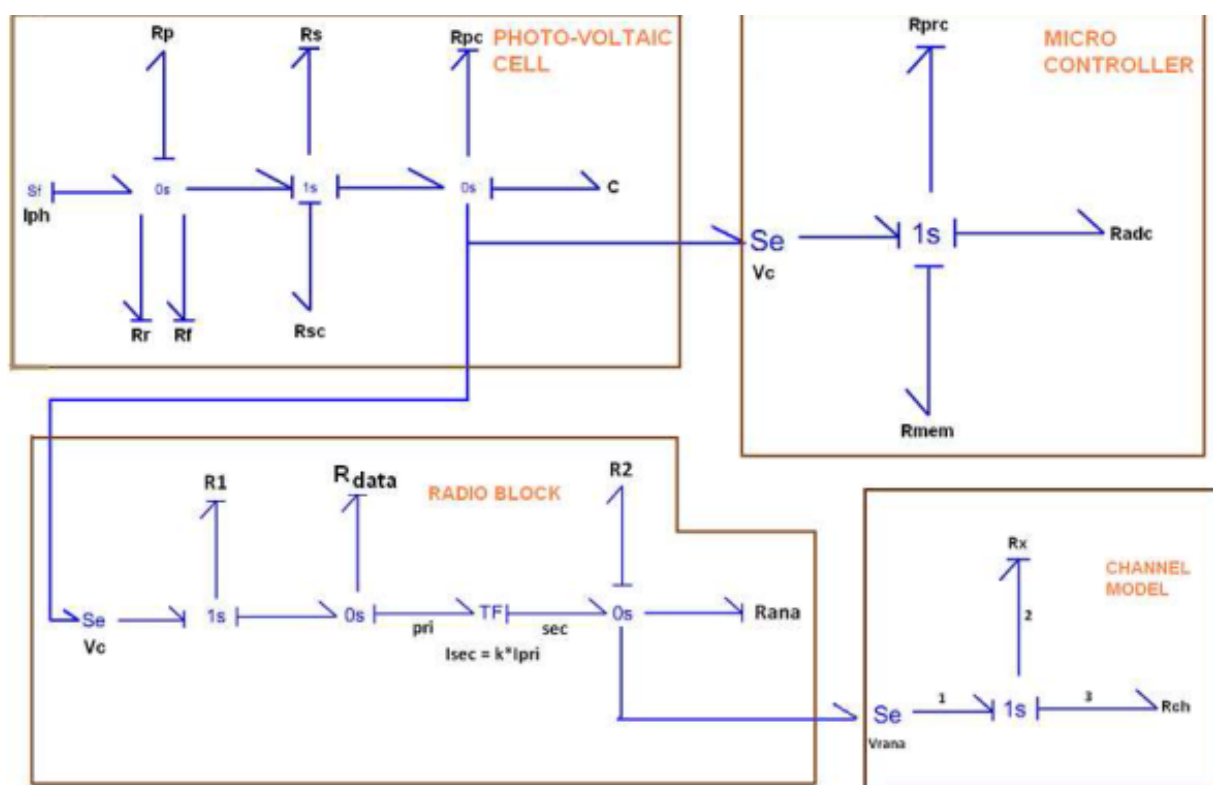


Рис. 1. BG-модель для беспроводного канала

уравнения в пространстве состояний для более глубокого изучения областей стабильности системы, что позволяет получить дополнительные данные об операционных требованиях, не связанных с энергопотреблением. Авторы статьи замечают, что EHWSN-узлы могут получать энергию двумя способами: питание идет непосредственно от источника сбора энергии; питание доставляется к узлу не от источника, а через хранилище. Рассмотрен второй способ (энергия накапливается в конденсаторах), для такой модели строится BG-граф.

Беспроводной канал моделируется как простая линия связи с хорошим временем когерентности, и, таким образом, этот статический канал с потерями на пути распространения вносит свой вклад в ослабление сигнала. BG-модель для беспроводного канала показана на рис. 1.

Интересные результаты получены в статье [4]. Авторы используют модель, основанную на Марковских цепях. Процесс получения энергии узлами БСС моделируется двумя состояниями цепи Маркова, т.е. предполагается, что устройства находятся в одном из двух состояний — активном или неактивном, и в конце каждого временного интервала устройство может переходить из активного состояния в неактивное с вероятностью  $r$ , и из неактивного в активное с вероятностью  $w$ . Следовательно, вероятность того, что устройство находится в активном или неактивном состояниях,  $1 - r$  и  $1 - w$  соответственно. Предполагается, что устройство сбора энергии собирает энергию со средней скоростью  $m$  в активном состоянии и не собирает никакой энергии в неактивном состоянии. Рассматривается простая модель трафика: в каждом временном интервале событие происходит с вероятностью  $p$ . Кроме того, авторы предполагают, что каждое событие имеет пол-

ную энергию  $E$ , которая включает в себя энергию, потребляемую датчиком, энергию, потребляемую для обработки сигналов, а также для передачи или приема соответствующих данных. Чтобы объединить модель энергии и модель трафика, рассматривается единица времени, равная отрезку времени, требуемому для сбора энергии, достаточному для одного события, учитывая, что устройство находится в активном состоянии. Затем авторы моделируют состояние узла с использованием  $2N$  состояний цепи Маркова. Состояние узла будет определяться его состоянием сбора энергии (активное или неактивное), а также количеством энергии, хранящимся в батарее. В [5] также используются цепи Маркова для моделирования сенсорных датчиков на теле человека.

В [6] рассматривается задача управления процессом сбора энергии из окружающей среды. Алгоритмы для решения таких задач должны обеспечить удовлетворение требований качества обслуживания и в то же время минимизировать потребляемую мощность. В то время, когда доступно большое количество энергии из окружающей среды, система должна обеспечивать высокое качество QoS только за счет получаемой из среды энергии. Такие периоды, однако, чередуются с интервалами, когда получение энергии ограничено или совсем отсутствует. В такие периоды управление должно быть отрегулировано так, чтобы обеспечить работу узла с заданным QoS только от батареи, до того как снова появится возможность получения энергии из среды. Процесс сбора энергии и подзарядки моделируется с использованием параметра  $\beta$ , который является функцией от энергии, доступной из окружающей среды. Например, для солнечных панелей  $\beta$  — функция интенсивности света. Параметр  $\beta$  моделирует как эффективность сбора энергии, так и эффективность регулирования напряжения. Этот параметр выражается в амперах и указывает скорость, с которой сборщик энергии может зарядить батарею фиксированным количеством энергии из окружающей среды. Хотя все узлы оснащены одинаковым оборудованием для сбора энергии, они могут иметь разные периоды сна-пробуждения, т. к. энергия в окружающей среде различна в разных местах. Авторы рассматривают топологию „дерево кластеров“ (cluster-tree), показанную на рис. 2. Такая топология является частным случаем mesh-сети, где существует единственный путь между любой парой узлов. В таком виде сети существует единственный координатор (sink) и один маршрутизатор на кластер — узлы C и N2 (на рис. 2) соответственно. Узел N2 (то есть маршрутизатор) обеспечивает сервис синхронизации в дочерних узлах (N0 и N1), и N2 может также отправлять свои сообщения координатору, а также пересылать сообщения, поступающие от узлов N0 и N1.

В настоящее время реализуются несколько крупных проектов в данной области. Например, проект „Эффективное управление энергией в EH беспроводных сенсорных сетях: подход на основе распределенного ограниченного мониторинга“ (Efficient Energy Management in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks: An Approach Based on Distributed Compressive Sensing). Проект реализуется UCL (University College London). Партнеры: Cambridge Innovation and Knowledge Centre for Smart Infrastructure and Construction, Thales, Fujitsu Laboratories of Europe, STMicroelectronics и AquaMW.

Основная цель данного проекта заключается в разработке сетевых технологий, которые могут быть использованы в сочетании с текущими или будущими возможностями сбора энергии, позволяющими разворачивать энергетически нейтральные беспроводные сенсорные сети с уровнем сбора данных, значительно превышающим ныне существующий.

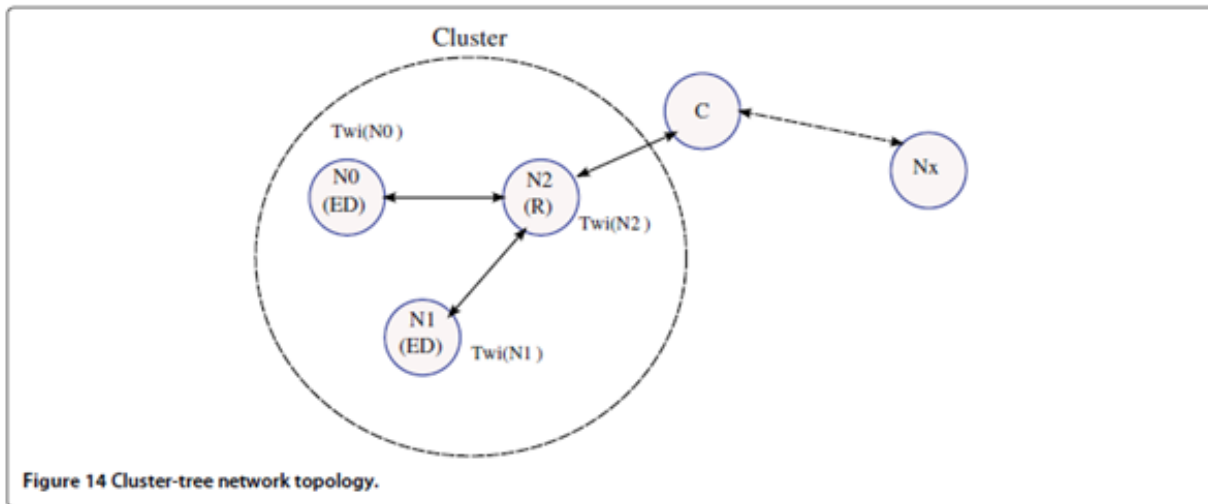


Рис. 2. Пример топологии „Дерево кластеров“

**2. Выбор стратегии функционирования EH-WSNs.** Эффективность функционирования беспроводных сенсорных сетей, оснащенных механизмом получения энергии из окружающей среды, зависит от параметров рабочего цикла, надежности сети (вероятности наличия возможности обмена пакетами для двух узлов в течение выбранного интервала времени) и радиуса передачи сообщения.

Для нахождения оптимального соотношения между надежностью EH-WSNs и параметрами рабочего цикла сенсоров нами предложен следующий подход. Топология сети моделируется случайным графом. Надежность вершины (доступность сенсора) можно оценить по формуле:

$$p = 1 - \frac{S}{T},$$

где  $S$  — среднее суммарное время пребывания сенсора в неактивном состоянии в течение рабочего цикла,  $T$  — длительность рабочего цикла. Поскольку пока не рассматриваются вопросы, связанные с затуханием сигнала, интерференцией, экранированием и т. п., ребра графа предполагаются абсолютно надежными.

Заметим, что надежность сенсора  $p$  является монотонно убывающей функцией от радиуса передачи  $r$ :

$$r_1 > r_2 \Rightarrow p(r_1) < p(r_2).$$

Количество ребер в графе ( $m$ ) отрицательно коррелирует с  $p$ ,  $m$  — неубывающая функция по  $r$ :

$$r_1 > r_2 \Rightarrow m(r_1) \geq m(r_2).$$

В самом общем виде задача оптимизации надежности сети выглядит следующим образом:

$$R(G(n, m(p), p(S))) \rightarrow \max_S.$$

Используя указанные выше свойства, получаем решение

$$r = \arg \max_{r \in \Omega_r} R(G(n, m(r), p(r))).$$

Здесь  $\Omega_r$  — множество допустимых дистанций для  $r$ .

В некоторых случаях целесообразно ограничить максимальную степень вершин в графе. Это может быть обусловлено спецификой MAC протоколов или интерференцией. Тогда задача может быть сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned} R(G(n, m(p), p(S))) &\rightarrow \max_S, \\ \deg(v_i) &\leq a, \forall i \in V. \end{aligned}$$

Исследованы свойства функций, входящих в формулировку задачи, предложены ее методы решения.

Для анализа ряда показателей эффективности функционирования EH-WSNs, в том числе для оценки значений  $p$ , предложен подход, основанный на моделировании состояний сенсора непрерывной цепью Маркова. При этом выбор модели определяется развитием ситуации, спецификой работы протокола, поведением источника энергии и т. п. Предложенные ранее модели, основанные на Марковских цепях, не вполне подходят под цели исследования. В частности, в предложенных моделях не используются предположения об одинаковом времени на обработку сенсором любого события и о постоянной интенсивности подзарядки узла [4], кроме того, сокращено количество состояний, поскольку нет необходимости получать информацию о конкретном уровне заряда сенсора, если его энергии достаточно для решения насущных задач.

**3. Выбор стратегии использования заряжающих устройств.** Один из подходов, позволяющих обеспечивать возобновление заряда батарей сенсоров, заключается в использовании подзаряжающих устройств. Для этого применяются, как правило, мобильные подзаряжающие устройства, которые осуществляют подзарядку либо при условии непосредственного контакта с сенсором, либо на расстоянии. Вариант осуществления подзарядки на расстоянии становится все более популярным с развитием технологий беспроводной передачи энергии, что также дало возможность использования статических подзаряжающих устройств. В частности, появилась возможность осуществления одновременной беспроводной подзарядки группы сенсоров, расположенных в окрестности подзаряжающего устройства, имеющей определенный радиус [7, 8].

При использовании мобильных подзаряжающих устройств одной из основных задач является сокращение длины пути, преодолеваемого мобильным устройством, и, соответственно, сокращение времени обхода. Для этого применяются методы оптимального планирования фиксированного маршрута, обход которого совершается периодически. В качестве таких маршрутов рассматривают, например, гамильтонов цикл графа. Другим подходом являются методы динамической коррекции маршрута с учетом поступающих запросов от сенсоров о необходимости подзарядки.

Мы предлагаем использовать возможность осуществления одновременной беспроводной подзарядки группы сенсоров для решения указанной выше задачи определения оптимального маршрута мобильного подзаряжающего устройства. Мобильное устройство при



этом посещает места, наиболее подходящие для одновременной подзарядки группы сенсоров. Таким образом, возникает задача нахождения необходимого количества данных мест (точек), зависящих от максимального расстояния эффективной беспроводной подзарядки ( $R_{WCD}$ ), и задача расположения этих точек. Найдя данные точки, мы можем далее решать задачу планирования маршрута мобильного подзаряжающего устройства одним из известных методов: например, нахождением гамильтонова цикла графа или методами динамической коррекции маршрута в зависимости от поступающих запросов. При этом сложность решаемой задачи существенно сокращается, как и длина получаемого в итоге маршрута. Например, гамильтонов цикл ищется уже в графе существенно меньшей размерности, так как в качестве вершин графа уже выступают найденные точки, а не все сенсоры сети. Аналогично, при формировании фиксированного маршрута другим способом нет необходимости посещать каждый сенсор мобильным устройством, достаточно посетить только найденные точки. При использовании методов динамической коррекции маршрута мобильное устройство теперь останавливается в местах, подходящих для беспроводной подзарядки группы сенсоров, а не только одного сенсора, что сокращает общее число запросов. В случае, если используются статические подзаряжающие устройства, они могут быть также размещены в этих точках.

Сформулируем следующим образом описанную выше задачу нахождения мест для осуществления беспроводной подзарядки группы сенсоров при помощи мобильного подзаряжающего устройства, а также для оптимального размещения статических подзаряжающих устройств. Для множества сенсоров  $S$ , распределенных в области  $\Omega$ , требуется найти множество точек  $L \subseteq \Omega$  с минимальным количеством элементов, таким, что:

$$\forall s \in S \exists l \in L : d(s, l) \leq R_{WCD}. \quad (1)$$

Для сужения области поиска предлагается перейти к дискретному аналогу области  $\Omega$ , что можно сделать, например, наложением координатной сетки. Далее из этого множества необходимо исключить точки, заведомо не подходящие для размещения подзаряжающих устройств, что может быть обусловлено, например, особенностями ландшафта. На рис. 1 приведен пример дискретизации области и выбора мест для осуществления беспроводной подзарядки (мобильным или статическим подзаряжающим устройством), а также вариант маршрута для обхода этих мест мобильным подзаряжающим устройством. Обозначим полученное в результате множество как  $V$ . Введем в рассмотрение граф  $G = (S \cup V, E)$ , в котором ребро существует, если и только если одна из инцидентных ему вершин из  $S$ , другая из  $V$ , и расстояние между ними не превосходит  $R_{WCD}$ . Таким образом, сформулированная задача нахождения мест для осуществления беспроводной подзарядки группы сенсоров может быть переформулирована как модифицированная задача о размещении р-центра в графе. Несмотря на определенные отличия этой задачи от классической задачи о размещении р-центра, решаться она может аналогичными методами, модифицированными для этой цели.

Предложенный подход можно сделать еще более эффективным, если дополнительно минимизировать потери при беспроводной передаче энергии. Беспроводная передача энергии существенно теряет эффективность с ростом расстояния, даже если оно не превосходит  $R_{WCD}$ . Определим функцию потери энергии при беспроводной передаче на расстояние  $d$ :  $E_{los}(d) = E_{sent}(d)/E_{received}(d)$ . Данная функция может иметь различный вид, определяемый многими факторами. В качестве грубого приближения можно рассмотреть функцию

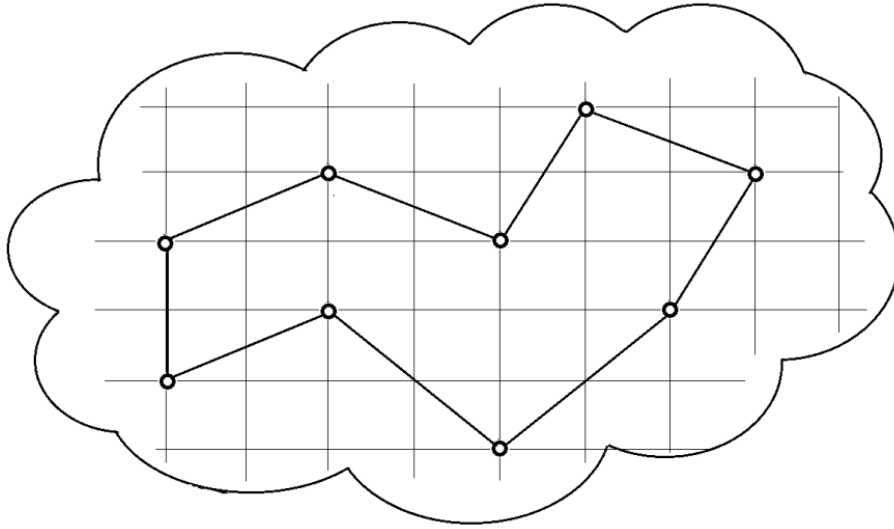


Рис. 3. Пример дискретизации области покрытия БСС

вида  $\alpha d^\beta$ . При этом если  $d > R_{WCD}$ , то значение  $E_{received}(d)$  становится близким к нулю, поэтому полагаем  $E_{los}(d > R_{WCD}) = \infty$ .

Таким образом, для уменьшения потерь при передаче энергии для сети в целом необходимо найти набор точек для осуществления беспроводной подзарядки, при котором достигается минимума функция

$$SumEnLos = \sum_{s \in S} E_{los}(d(s, nearestWC)), \quad (2)$$

где  $d(s, nearestWC)$  — расстояние от сенсора  $s$  до ближайшей точки, откуда может осуществляться его беспроводная подзарядка.

Для решения этой задачи предлагается перейти к дискретному аналогу области  $\sigma$  и графу  $G = (S \cup V, E)$ , подобно тому, как это было сделано для решения задачи (1). Тогда задача (2) может быть переформулирована как модифицированная задача о размещении  $p$ -медианы в графе. Несмотря на определенные отличия этой задачи от классической задачи о размещении  $p$ -медианы, решаться она может аналогичными методами, модифицированными для этой цели.

Таким образом, предложены новые подходы нахождения оптимальных мест для осуществления беспроводной подзарядки группы сенсоров при помощи мобильного подзаряжающего устройства, а также для оптимального размещения статических подзаряжающих устройств. Предложенные методы основаны на методах решения известных задач из теории графов — размещение  $p$ -медиан и  $p$ -центров, модифицированных для рассматриваемого случая. Целевая функция для оптимизации — сумма расстояний от каждого сенсора до ближайшего места, откуда может осуществляться беспроводная подзарядка.

**Заключение.** Полученные результаты, их модификация с учетом отзывов имеют хорошие перспективы для создания теоретических и практических средств разработки эффективных технологий EH-WSNs. Предложенные алгоритмы расчета некоторых показателей качества, в частности, надежности, имеют общетеоретическое значение. Например, это относится к алгоритмам вычисления показателей связности вторичных

(логических) сетей, реализованных в ненадежных физических сетях на моделях гиперсетей с ненадежными узлами и/или каналами. Практическая значимость заключается в возможности применения предложенных моделей для анализа реальных сетей. Параллельные реализации алгоритмов дадут возможность расчета характеристик сетей большой размерности с применением суперкомпьютеров.

## Список литературы

1. PRAVNAKAR T. V, AKSHAY UTTAMA NAMBI S. N., VENKATESHA PRASAD, IGNAS NIEMEGERERS. Bond Graph Modeling for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks // Computer. Sept. 2012. V. 45, I. 9.
2. ИВАНОВА И. А., ШЕСТАКОВ А. А. Построение дерева передачи данных в беспроводных сенсорных сетях // Автоматизация и управление в технических системах (электрон. журн.). № 4.2. 2013.
3. ИВАНОВА И. А. Метод и алгоритмы управления потоками данных в беспроводных системах промышленного мониторинга (дисс.). [Электрон. рес.]. <http://tekhnosfera.com/metod-i-algoritmy-upravleniya-potokami-dannyh-v-besprovodnyh-sistemah-promyshlennogo-monitoringa/>
4. SEYEDI A., SIKDAR B. Modeling and analysis of energy harvesting nodes in wireless sensor networks / in Proc. of the 46th Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing. Sept. 2008. P. 67–71.
5. VENTURA J., CHOWDHURY K. R. Markov modeling of energy harvesting body sensor networks / Proc. IEEE 22nd Int. Symp. Personal Indoor Mobile Radio Commun. 2011. P. 2168–2172.
6. CASTAGNETTI A., PEGATOQUET A., BELLEUDY C., AUGUIN M. A framework for modeling and simulating energy harvesting WSN nodes with efficient power management policies // EURASIP Journ. on Embedded Systems. 2012.
7. KURS A., MOFFATT R., SOLJACIC M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices // Appl. Phys. Lett. Jan. 2010. V. 96. P. 044102–1–044102-3.
8. XIE L., SHI Y., HOU Y. T., SHERALI H. D. Making sensor networks immortal: An energy-renewal approach with wireless power transfer // IEEE/ACM Trans. on Networking. Dec. 2012. V. 20. N 6. P. 1748–1761.

*Шахов Владимир Владимирович — канд. физ.-мат. наук,  
старш. науч. сотр. Института вычислительной математики  
и математической геофизики СО РАН;  
e-mail: shakhov@rav.sccc.ru*

*Мигов Денис Александрович — канд. физ.-мат. наук,  
науч. сотр. Института вычислительной математики  
и математической геофизики СО РАН;  
e-mail: mdinka@rav.sccc.ru*

*Соколова Ольга Дмитриевна — канд. техн. наук, старш.  
науч. сотр. Института вычислительной математики  
и математической геофизики СО РАН;  
e-mail: olga@rav.sccc.ru*

*Дата поступления — 10.11.2014*