

РКТ.

Результаты проведенных исследований могут быть полезны широкому кругу технических специалистов, планирующих проведение виртуальных испытаний сложных технических систем.

Литература

1. Бахвалов Ю.О., Бизяев Р.В. Структура информационной системы наземно-стендовой отработки РКТ. / Научно-технические разработки КБ «Салют» 2009-2011 гг. – М.: Машиностроение, 2012. – С. 393-410.
2. Mell P., Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. / Special Publication 800-145. – NIST: 2011. – 7 P.

Сведения об авторах

Белкин Андрей Андреевич – начальник лаборатории Государственного космического научно-производственного центра имени М.В. Хруничева
Belkin Andrey Andreevich – head of the laboratory, Khrunichev research and production space center, e-mail: iosifovpa@mati.ru

Иосифов Павел Андреевич – к.т.н., профессор МАТИ
Iosifov Pavel Andreevich – candidate of sciences, professor, MATI,
e-mail: iosifovpa@mati.ru

Киреев Артемий Владимирович – инженер Hewlett-Packard EMEA
Kireev Artemiy Vladimirovich – engineer of Hewlett-Packard EMEA,
e-mail: iosifovpa@mati.ru

УДК 004.75

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОБИЛЬНЫХ СТОКОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БАЛАНСРОВКИ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

С.Г. Ефремов, к.т.н., доц. Л.С. Восков

В статье рассматривается метод энергетической балансировки беспроводных сенсорных сетей сбора данных, основанный на использовании мобильных узлов. Приводится универсальная модель энергетической балансировки и ее модификация для случая сетей с мобильным стоком. Дается количественная оценка преимуществ использования управляемой мобильности и выводятся условия, при которых целесообразно ее применять.

The paper focuses on the problem of energy balancing in wireless sensor networks. In particular, the approach of using mobile nodes is reviewed in detail. We present a universal mixed integer linear programming model for energy balancing and its modification for the mobile sink scenario. The main contribution of this paper lies in the results of a detailed simulation, revealing the conditions, under which controlled sink mobility gives the best results.

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

Keywords: *wireless sensor networks, energy balancing, controlled mobility.*

Введение

За последние десять лет исследования в области беспроводных сенсорных сетей (БСС) [1] охватили ведущие научные центры и лаборатории по всему миру. Главной причиной этому является безусловная перспективность и актуальность базовой идеи применения миниатюрных автономных вычислительных устройств в самых разных областях для задач мониторинга и управления. Однако до сих пор существует целый ряд проблем, мешающих массовому внедрению решений на базе БСС на практике. Ключевой из них остается небольшое время автономной работы (время жизни) сетей, обусловленное питанием от небольших по размерам и, следовательно, емкости батарей.

Малая продолжительность автономной работы объясняется главным образом тем, что для обеспечения постоянной связности и оперативности реакции сети на возникновение событий ряд ретранслирующих устройств должен большую часть времени находиться в активном состоянии, то есть постоянно прослушивать эфир на запросы от других узлов сети. Как следствие, такие ретранслирующие устройства быстрее расходуют энергию своих батарей.

Другой отличительной особенностью сенсорных сетей является то, что они предназначены главным образом для сбора данных. Это означает, что существует один или несколько выделенных узлов, к которым стекается информация со всей сети. Данные узлы (стоки), как правило, имеют постоянный источник питания, интерфейсы сопряжения с локальными, глобальными сетями или с более мощными вычислительными устройствами. Таким образом, в сенсорной сети есть преимущественное направление движения полезного трафика, приводящее к тому, что через маршрутизаторы, находящиеся рядом со стоком(-ами), проходит на порядок больший объем данных.

Последние технологические достижения позволили сделать микропроцессоры с очень малой потребляемой мощностью, способные выполнять широкий спектр задач. Однако для того, чтобы передать данные по беспроводному каналу связи необходимо затратить на порядок больший объем энергии [2]. Как следствие, в беспроводной сети возникает проблема дисбаланса энергопотребления [3], приводящая к тому, что автономные элементы, располагающиеся рядом с центральным узлом (узлами) сбора данных (на рис. 1 – узлы 3 и 4), раньше других выходят из строя из-за разряда собственных аккумуляторов.

В исследованиях, посвященных сенсорным сетям, приводится ряд методов энергетической балансировки, направленных на выравнивание потребляемой мощности узлов сети [3]. В данной статье мы подробно

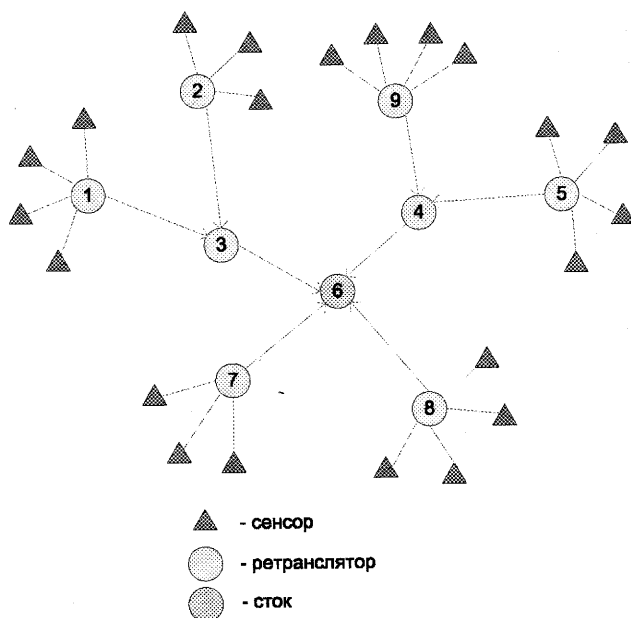


Рис. 1. Типовая структура сенсорной сети

равнивание потребляемой мощности узлов сети [3]. В данной статье мы подробно

остановимся на одном из наиболее перспективных методов, предполагающем физическое перемещение узлов сети.

Структура данной статьи следующая. В первом разделе рассматриваются существующие возможности применения мобильности для улучшения параметров функционирования сети. Во втором разделе описывается общая модель энергетической балансировки и ее модификация для случая мобильных узлов. Третий раздел посвящен моделированию БСС с управляемой мобильностью стоков и сравнению результатов со стационарным сценарием. Основной вклад статьи состоит в получении количественных оценок использования управляемой мобильности и выявлении условий, при которых целесообразно ее применять.

1. Мобильность как ресурс

Концепция мобильности как вспомогательного средства уже рассматривалась в ряде работ по беспроводным сенсорным и ситуационным сетям [4-14]. Цель использования такого типа мобильности – уменьшить количество промежуточных ретрансляторов при передаче данных с удаленных от стока элементов сети. Для этого в структуру сети добавляются мобильные элементы.

В статье Хатцигианнакиса и др. [4] исследуется возможность использования координированного движения малого числа пользователей в сети для достижения эффективного взаимодействия между любой парой мобильных устройств. Часть сетевых узлов действует в качестве агентов переадресации, доставляющих пакеты для других станций. Взаимодействие происходит, когда источник и агент либо агент и сток находятся в зоне приема.

Базовая идея применения мобильных стоков для сбора данных в сенсорной сети была описана в статьях [5]. Специальные мобильные узлы, обозначаемые MULEs (mobile ubiquitous LAN extensions), используются как агенты переадресации. Основная цель состоит в том, чтобы экономить энергию за счет прямых взаимодействий между сенсорным узлом и агентом, а не многосвязной передачи до неподвижного стока. Такая архитектура подходит для приложений, не критичных к задержкам при передаче. Энергия, затрачиваемая на передачу данных, уменьшается за счет увеличения времени ожидания агента в зоне покрытия приемопередатчика.

В ряде статей рассмотрена задача построения и поддержания маршрутов к мобильному стоку по критерию минимизации дополнительных накладных расходов. В [6] предлагается специализированный протокол ERUP для перестроения небольшой части дерева в непосредственной близости от разорванного соединения. Аналогично в [7] описывается динамический протокол перестроения маршрутов во время движения стока. Согласно ему после создания первоначальной древовидной топологии происходит лишь частичное перестроение дерева за счет назначения специальных узлов продвижения сообщений.

Общим во всех вышеперечисленных работах является то, что мобильность стоков рассматривается как случайная и неконтролируемая. Использование мобильных стоков с предсказуемой мобильностью было представлено относительно недавно [8,9]. В этих работах описывается сбор данных с помощью аэропланов, пролетающих над территорией покрытия сенсорной сети. И хотя в данном случае мобильность полностью контролируема, она не зависит от внутренних параметров самой сети, так как траектории движения никак не связаны с сетевыми компонентами, характеристиками трафика или энергопотребления. Основной вклад этих работ состоит в разработке энергоэффективной передачи при условии не-

продолжительного нахождения стока в зоне охвата приемопередатчиков сенсорных узлов.

Задача, связанная с адаптацией сети к движению стоков, описана в [10]. Авторы рассматривают ситуацию, когда шаблон движения стока заранее известен (например, ситуация движения грузов на конвейере). В данном случае можно использовать эту информацию для передачи данных либо перестроения таблиц маршрутизации в определенные моменты времени, когда узел сбора с большой вероятностью находится в зоне покрытия приемопередатчика. Аппаратное решение для динамических стоков представлено в [11]. Описана технология вывода сенсоров из спящего режима при приближении координатора, а также исследуется необходимая дальность передачи для гарантированного сбора данных при заданной скорости движения шлюза, характере трафика в сети, времени, требуемом для передачи одного пакета и необходимом количестве сенсоров, с которых собираются данные.

Впервые сбор данных в сенсорной сети с использованием управляемых мобильных узлов был представлен в статье [12]. В ней описывается решение с автономным мобильным элементом буферизации (роботом), который посещает статически размещенные сенсоры, собирает с них данные и доставляет их к стоку. Эта идея аналогична ранее описанной концепции с агентами переадресации MULE, однако, в данном случае движение робота связано с внутренними параметрами сети и задачами конкретного приложения, генерирующего трафик. Робот является частью системы и уже сама система управляет его мобильностью. В частности, в статье приводятся результаты эксперимента по управлению скоростью робота для оптимизации сбора данных.

Оценка производительности систем с мобильными узлами промежуточной буферизации показывает, что зачастую эффективнее перемещать сам узел сбора данных (сток) [13,14]. В этом случае можно находить компромисс между энергопотреблением и возникающими задержками, в зависимости от задач конкретного приложения. В первой статье предлагается модель целочисленного линейного программирования для определения положений нескольких мобильных стоков и маршрутов от сенсоров к ним. Время разбивается на интервалы фиксированной продолжительности. В начале каждого интервала собирается информация об остаточной энергии сенсоров, решается задача целочисленного линейного программирования для определения новых положений стоков. Следует отметить, что в данной модели не накладывается никаких ограничений на движение стоков, что может привести к большим задержкам при передаче данных.

Все результаты, описанные выше, не содержат четких количественных оценок преимуществ, получаемых при использовании управляемой мобильности в беспроводных сенсорных сетях. Настоящая статья направлена на устранение данного недостатка. В последующих разделах также будут рассмотрены различные условия, при которых целесообразно применять мобильность стоков.

2. Модель управляемой мобильности стоков

Возьмем за основу универсальную модель энергетической балансировки, описанную в [15]. Рассмотрим беспроводную сеть, состоящую из n автономных узлов. Заметим, что под узлом мы будем понимать маршрутизатор, считая, что конечные элементы имеют на порядок большее время автономной работы. Пусть i -й узел сети имеет некоторый начальный запас энергии E_i ($1 \leq i \leq n$).

продолжительного нахождения стока в зоне охвата приемопередатчиков сенсорных узлов.

Задача, связанная с адаптацией сети к движению стоков, описана в [10]. Авторы рассматривают ситуацию, когда шаблон движения стока заранее известен (например, ситуация движения грузов на конвейере). В данном случае можно использовать эту информацию для передачи данных либо перестроения таблиц маршрутизации в определенные моменты времени, когда узел сбора с большой вероятностью находится в зоне покрытия приёмопередатчика. Аппаратное решение для динамических стоков представлено в [11]. Описана технология вывода сенсоров из спящего режима при приближении координатора, а также исследуется необходимая дальность передачи для гарантированного сбора данных при заданной скорости движения шлюза, характере трафика в сети, времени, требуемом для передачи одного пакета и необходимом количестве сенсоров, с которых собираются данные.

Впервые сбор данных в сенсорной сети с использованием управляемых мобильных узлов был представлен в статье [12]. В ней описывается решение с автономным мобильным элементом буферизации (роботом), который посещает статически размещенные сенсоры, собирает с них данные и доставляет их к стоку. Эта идея аналогична ранее описанной концепции с агентами переадресации MULE, однако, в данном случае движение робота связано с внутренними параметрами сети и задачами конкретного приложения, генерирующего трафик. Робот является частью системы и уже сама система управляет его мобильностью. В частности, в статье приводятся результаты эксперимента по управлению скоростью робота для оптимизации сбора данных.

Оценка производительности систем с мобильными узлами промежуточной буферизации показывает, что зачастую эффективнее перемещать сам узел сбора данных (сток) [13,14]. В этом случае можно находить компромисс между энергопотреблением и возникающими задержками, в зависимости от задач конкретного приложения. В первой статье предлагается модель целочисленного линейного программирования для определения положений нескольких мобильных стоков и маршрутов от сенсоров к ним. Время разбивается на интервалы фиксированной продолжительности. В начале каждого интервала собирается информация об остаточной энергии сенсоров, решается задача целочисленного линейного программирования для определения новых положений стоков. Следует отметить, что в данной модели не накладывается никаких ограничений на движение стоков, что может привести к большим задержкам при передаче данных.

Все результаты, описанные выше, не содержат четких количественных оценок преимуществ, получаемых при использовании управляемой мобильности в беспроводных сенсорных сетях. Настоящая статья направлена на устранение данного недостатка. В последующих разделах также будут рассмотрены различные условия, при которых целесообразно применять мобильность стоков.

2. Модель управляемой мобильности стоков

Возьмем за основу универсальную модель энергетической балансировки, описанную в [15]. Рассмотрим беспроводную сеть, состоящую из n автономных узлов. Заметим, что под узлом мы будем понимать маршрутизатор, считая, что конечные элементы имеют на порядок большее время автономной работы. 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 множество $\{p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_n^{(k)}\}$, представляющее собой k -ю схему энергопотребления сети.

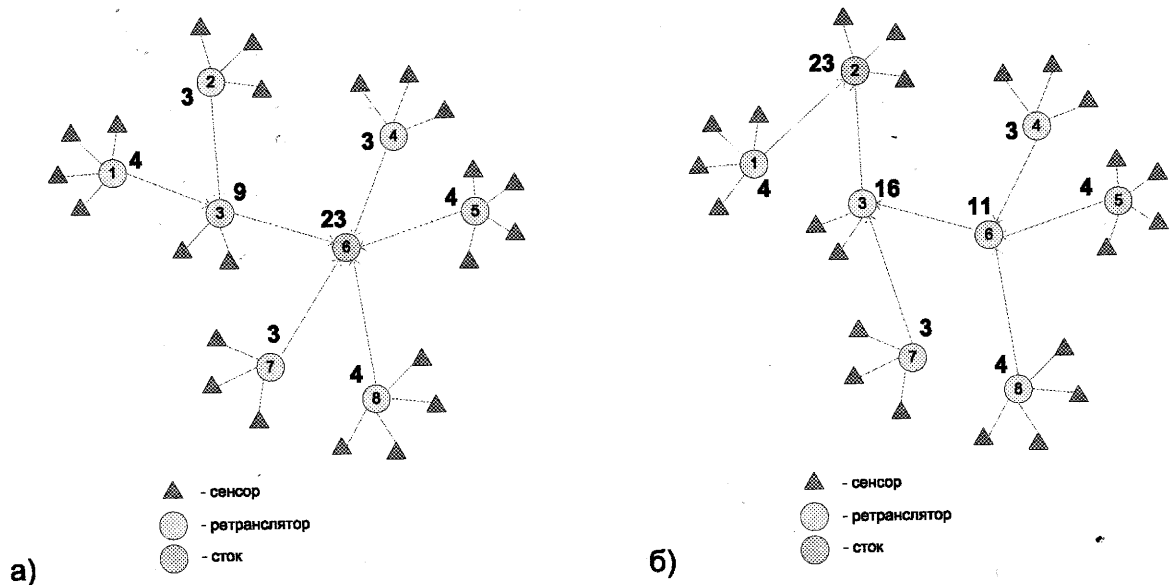


Рис. 2. Примеры схем энергопотребления БСС

На рис. 2 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 на порядок сложнее, для моделирования будет использована методика, рассмотренная в [14]). Запись схемы, представленной на рис. 2 а, будет иметь вид: {4, 3, 9, 3, 4, 23, 3, 4}. Схема для той же самой сети с другим местоположением стока (рис. 2 б) будет иметь вид: {4, 23, 16, 3, 4, 11, 3, 4}.

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, как правило, сопряжена с дополнительными накладными расходами внутри сети. Обозначим через e_i^{j-k} дополнительную энергию, затрачиваемую i -м узлом при переходе от схеме 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 ($q \leq m$, $1 \leq \pi(q) \leq m$) 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:

$$\text{Максимизировать } T = \sum_{k=1}^m t_k \tag{1}$$

при следующих ограничениях:

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

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

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

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

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

$$u_j - u_k + m \cdot x_{jk} < m, \quad (7)$$

где u_k – признак использования k -й схемы (посещения k -й позиции):

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

T в выражении (1) представляет собой общее время автономной работы сети, складывающееся из суммарной продолжительности действия всех энергетических схем. Ограничение (2) гарантирует работу каждого узла в рамках его начального запаса энергии.

Ограничения (3)-(6) аналогичны тем, которые авторы используют в [14] для построения маршрута. Для этого создаются виртуальные позиции стока 0 (начальная точка) и $m+1$ (конечная 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 $m+1$). Ограничением (6) выравниваются входящий и исходящий потоки каждой вершины.

Ограничение (7) служит для предотвращения образования изолированных циклов, не связанных с основным маршрутом. Вспомогательные переменные u_i ($1 \leq i \leq m$) служат для присвоения посещенным вершинам индекса в соответствии с порядком движения стока через них: если $x_{jk}=1$, то $u_j < u_k$. Таким образом, становится невозможным повторное посещение одной и той же вершины графа.

Очевидно, что задача (1) является в общем виде NP-сложной и не может быть решена за допустимое время для большого количества m . Другим ограничением данной модели является то, что она не учитывает динамических изменений условий функционирования сети, которые могут приводить к изменению величин p_i^k . Поэтому на практике рационально использовать эвристические алгоритмы, дающие приближительное решение исходной задачи. Последние, однако, являются темой отдельного исследования и не будут рассмотрены в данной статье.

3. Моделирование

Получим количественные оценки преимуществ использования управляемой мобильности на основе модели, описанной в предыдущем разделе для небольших значений m . В качестве исходной точки для сравнения возьмем сценарий стационарной сети. 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 распре-

деления от 0 до L. К каждому ретранслятору подключено одинаковое количество дочерних оконечных устройств, генерирующих суммарный поток $\lambda=0,2$ кадра/с, размер каждого пакета равен 100 байт. Возможные позиции стока организованы в виде решетки 5x5.

Протокол маршрутизации предполагает построение древовидной топологии, при этом для каждого узла родитель выбирается последовательным анализом следующих величин:

1. Количество промежуточных маршрутизаторов (хопов) до стока.
2. Количество уже подключенных узлов.
3. Расстояние до родителя.

Пример сети показан на рис. 4а. Квадратами обозначены возможные положения стока.

Параметры потребляемой мощности в различных режимах возьмем из спецификации одного из доступных беспроводных модулей [2]. Все используемые константы сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры, используемые при моделировании

Параметр	Обозначение	Значение
Размер области, м	L	300 м
Количество позиций стока	m	25 (решетка 5x5)
Начальная энергия ретранслятора, Дж	E_i	10000
Средняя мощность при передаче кадра, мВт	P_{tx}	43
Потребляемая мощность при приеме данных, мВт	P_{rx}	57
Потребляемая мощность в режиме сна, мВт	P_s	0,003
Потребляемая мощность в режиме ожидания, мВт	P_{idle}	0,1
Среднее время передачи кадра размером 100 байт с последующим приемом подтверждения, мс	t_{frame}	6,8
Суммарный поток пакетов, генерируемый оконечными устройствами для каждого ретранслятора (кадров/с)	λ	0,2

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

$$\Delta t = \frac{t_m - t_s}{t_s} \cdot 100\%, \quad (8)$$

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 Δt . На наш взгляд, в предыдущих исследованиях [13-14] этому вопросу не было уделено достаточного внимания. Для начала возьмем сеть из 100 узлов и смоделируем 100 различных случайных их размещений в двумерной области размером LxL. Радиус действия приемопередатчика R возьмем постоянным и равным 50 м.

Результат моделирования показан на рис. 3. На гистограмме виден достаточно сильный разброс результатов. Несмотря на то, что в подавляющем боль-

шинстве 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 Δt чуть более 10 %. Есть и отклонения в другую сторону – при некоторых размещениях узлов достигается почти трехкратное увеличение продолжительности работы за счет мобильного стока. Среднее значение Δt 81 %, среднеквадратическое отклонение – 31 %.

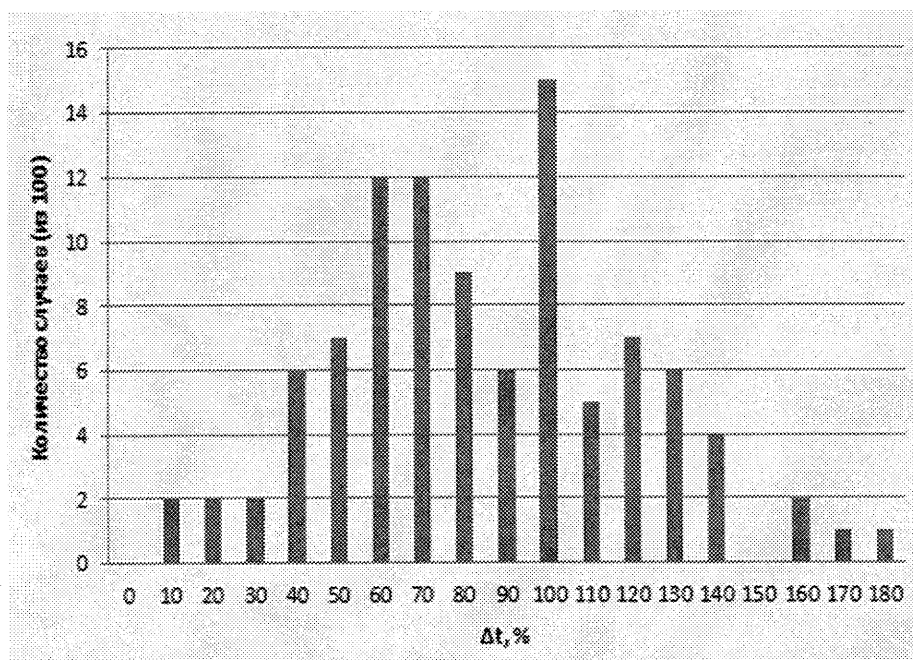


Рис. 3. Распределение Δt

Возьмем три случайных расположения элементов сети и в каждом случае рассмотрим зависимость Δt от радиуса покрытия приемопередатчика. Пример образуемой сетевой топологии при минимальном и максимальном радиусе показаны на рис 4а и 4б соответственно. Очевидно, что при большой зоне охвата приемопередатчиков независимо от положения стока все узлы будут подключаться непосредственно к нему и, следовательно, иметь одинаковую потребляемую мощность.

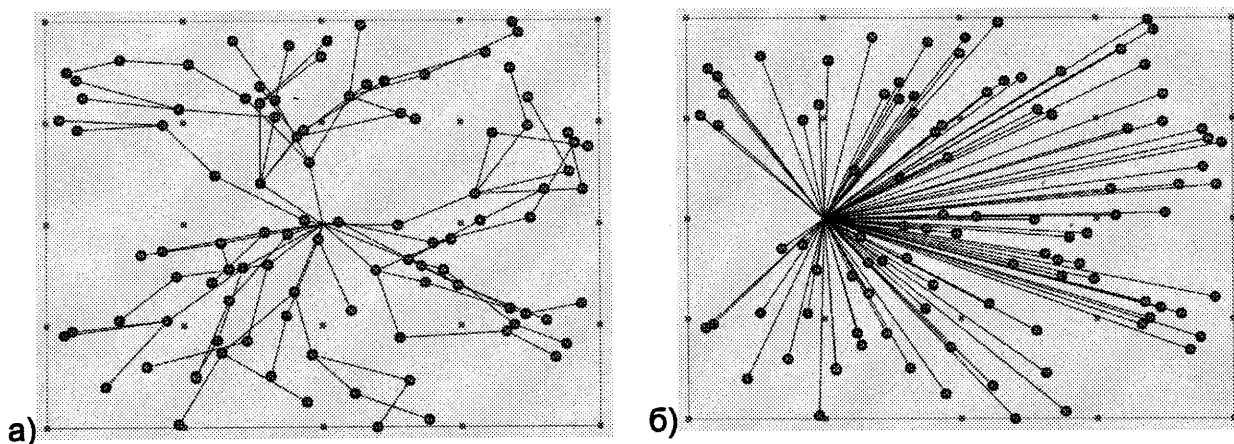


Рис. 4. Топология сети при $R=60\text{м}$ (а) и $R=250\text{м}$ (б)

В то же время при небольших зонах покрытия каждого узла связей количество промежуточных ретрансляторов будет больше и соответственно будет больше возможностей осуществлять энергетическую балансировку.

Результаты моделирования приведены на рис. 5. 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 приращение времени жизни сети за счет энергетической балансировки максимально. Есть и несколько локальных максимумов, что лишний раз подчеркивает то, что в каждом конкретном сценарии применение управляемой мобильности приносит разный результат.

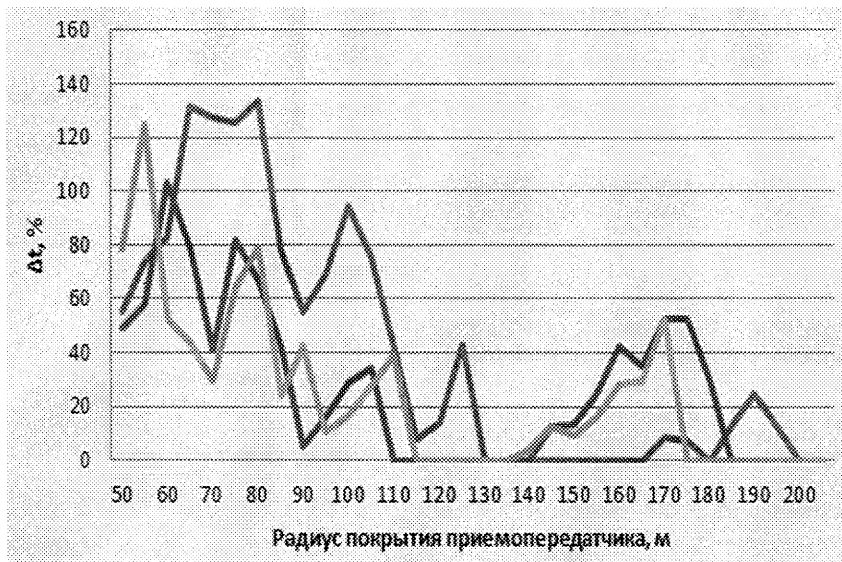


Рис. 5. Зависимость Δt от радиуса действия приемопередатчика

Радиус действия приемопередатчика определяет выстраиваемую сетевую топологию. Из этого можно сделать вывод, 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.

На рис. 6 показана полученная в ходе моделирования зависимость Δt от количества узлов сети и потребляемой мощности в режиме ожидания P_{idle} (на графике $P_{idle1} = 0,01$ мВт, $P_{idle2} = 0,6$ мВт, $P_{idle3} = 10$ мВт).

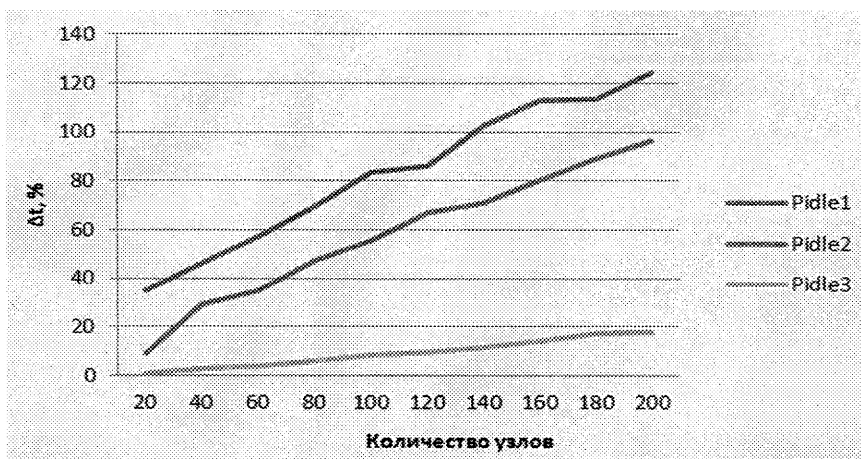


Рис. 6. Зависимость Δt от количества узлов сети

Для каждого числа узлов и значения P_{idle} выбиралось среднее значение Δt 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 показателем, определяющим их применимость на практике. На сегодняшний день можно отметить большое количество 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 друг относительно 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 др.

Литература

1. Karl H, Willig A. *Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks*. – John Wiley & Sons: Chichester, 2005.
2. Описание модулей JN5148 от 03.08.2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.jennic.com/support/datasheets/> (дата обращения 04.2012).
3. Zhang H., Shen H. Balancing Energy Consumption to Maximize Network Lifetime in Data-Gathering Sensor Networks. // *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Oct. 2009, vol. 20, № 10, pp. 1526-1539.
4. Chatzigiannakis I., Nikolettseas S., Spirakis P. An efficient communication strategy for ad-hoc mobile networks, / *Proceedings of the Twentieth Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, PODC 2001, Newport, RI (August 26–29, 2001)*, pp. 320–332.
5. Shah R.C., Roy S., Jain S. Brunette W. Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. / *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, SNPA 2003, Anchorage, AK (May 11, 2003)*, pp. 30–41.

6. Hu X., Liu Y., Lee M.J., Saadawi T.N., A novel route update design for wireless sensor networks. // ACM Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(1), pp. 18–26.
7. Hwang K., In J., Yun Y., Eom D., Dynamic sink oriented tree algorithm for efficient target tracking of multiple mobile sink users in wide sensor fields. / Proceedings of the 60th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2004-Fall, vol. 7, Los Angeles, CA (September 26–29, 2004), pp. 4607–4610.
8. Mhatre V.P., Rosenberg C., Kofman D., Mazumdar R., Shroff N. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint, // IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(1), pp. 4–15.
9. Tong L., Zhao Q., Adireddy S., Sensor networks with mobile agents. / Proceedings of the IEEE Military Communication Conference, MILCOM 2003, vol. 1, Boston, MA (October 13–16, 2003), pp. 705–710.
10. Baruah P., Uргаonkar R., Krishnamachari B. Learning enforced time domain routing to mobile sinks in wireless sensor fields. / Proceeding of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN 2004, Tampa FL (November 16–18, 2004), pp. 525–532.
11. Chakrabarti A., Sabharwal A., Aazhang B. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks. / Proceedings of the Second International Workshop on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2003, LNCS 2634, Palo Alto CA (April 22–23, 2003), pp. 129–145.
12. Kansal A., Somasundara A.A., Jea D.D., Srivastava M.B., Estrin D. Intelligent fluid infrastructure for embedded networks. / Proceedings of the 2nd ACM/SIGMOBILE International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobySys 2004, Boston, MA (June 6–9, 2004), pp. 111–124.
13. Wang Z.M., Basagni S., Melachrinoudis E., Petrioli C. Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime. / Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island, Hawaii, 2005, p. 287.
14. Basagni S., Carosi A., Melachrinoudis E., Petrioli C., Wang Z.M. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. // Wirel. Netw., 2008, vol. 14, № 6, pp. 831–858.
15. Ефремов С.Г. Применение энергетической балансировки в беспроводных сенсорных сетях. / Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ 2012 г. – М.: МИЭМ, 2012. – С. 78-79.

Сведения об авторах

Ефремов Сергей Геннадьевич – аспирант Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ)

Efremov Sergey Gennadievich – postgraduate student, Moscow institute of electronics and mathematics of National research university «The Higher School of Economy», e-mail: voskov@narod.ru

Восков Леонид Сергеевич – к.т.н., профессор МАТИ и МИЭМ НИУ ВШЭ

Voskov Leonid Sergeevich – candidate of sciences, professor, MATI and Moscow institute of electronics and mathematics of National research university «The Higher School of Economy», e-mail: voskov@narod.ru