

И.С. Восков, С.Г. Ефремов

К ВОПРОСУ О ВРЕМЕНИ АВТОНОМНОЙ РАБОТЫ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

В статье рассматриваются беспроводные автономные сети датчиков. При использовании данных сетей на практике в первую очередь возникает вопрос о том, как долго они будут работать от батарей и что именно считать моментом выхода сети из строя. Описываются основные факторы, влияющие на потребляемую мощность отдельных узлов и сети в целом, приводятся методы расчета ключевых показателей. Объясняется возникающая в ряде случаев проблема энергетического дисбаланса, рассматриваются методы ее решения.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети; время автономной работы; энергоэффективность; энергетическая балансировка

Введение

Сенсорные сети (БСС) [1] представляют собой частный случай беспроводных ситуационных (ad-hoc) сетей, то есть сетей без устойчивой инфраструктуры, в которых в самом общем случае обмен данными может происходить между любыми соседними элементами. Как и во всех современных беспроводных сетях, каждый узел представляет собой электронное устройство, построенное на базе связки процессора и модуля беспроводной передачи данных. Из всех приводимых в литературе характеристик данного класса сетей следует выделить ряд ключевых, определяющих в конечном счете их специфику и области их применения на практике.

Прежде всего сенсорные сети состоят из автономных, небольших по размерам элементов, сильно ограниченных в ресурсах. Последнее касается вычислительной мощности микропроцессора (типовая рабочая частота от 8 до 32 МГц), объема памяти (от 8 Кбайт до нескольких Мбайт), пропускной способности канала связи (от 32 до 256 Кбит/с). Однако главным ограничением является емкость батарей, от которых работают узлы. Эта емкость конечна и обычно не пополняется в процессе функционирования сети. Как следствие, в определенный момент каждый узел сети оказывается неработоспособным.

В первом разделе статьи рассматриваются факторы, влияющие на потребляемую мощность отдельного элемента сенсорной сети, и, следовательно, время его автономной работы (также называемое временем жизни). Сеть в целом, однако, должна быть устойчивой к

I. S. Voskov, S. G. Efremov

ON THE LIFETIME OF SENSOR NETWORKS

The paper focuses on the issue of lifetime of wireless sensor networks, which consist of multiple autonomous battery-powered devices. The main problem that developers have to face when applying these networks to solve real-world tasks is to predict and calculate their lifetime in advance. We show the main factors that influence power consumption of individual nodes and give an overview of possible definitions of the whole network lifetime. Often wireless sensor networks have uneven distribution of power consumption - in this paper the main approaches to energy balancing are presented.

Keywords: wireless touch networks; time of independent work; power efficiency; power balancing

отказу отдельных ее элементов. Поэтому во втором разделе приводится описание различных показателей времени автономной работы всей сети.

Другой отличительной особенностью сенсорных сетей является то, что они главным образом предназначены 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 узлы маршрутизации, находящиеся рядом со стоком(-ами), проходит на порядок больший объем данных.

Современные 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. Данное соотношение показано в табл. 1 для типового электронного модуля JN5148[2], состоящего из микроконтроллера и приемопередатчика.

Из таблицы очевидно, что чем больше данных проходит через узел беспроводной сети, тем больше его потребляемая мощность. Как следствие, в сети возникает проблема дисбаланса энергопотребления [3] (рис. 1), приводящая к тому что автономные элементы, расположенные рядом с центральным узлом (узлами) сбора данных (на рис.1 обозначены номерами 1,4 и 6), рань-

Таблица 1. Потребляемая мощность беспроводного модуля JN5148 в различных режимах работы

Режим работы устройства	Потребляемая мощность, мВт	Обозначение
Передача	51	P_{tx}
Прием	57	P_{rx}
Обработка данных	18	P_a
Режим сна	0,03	P_s

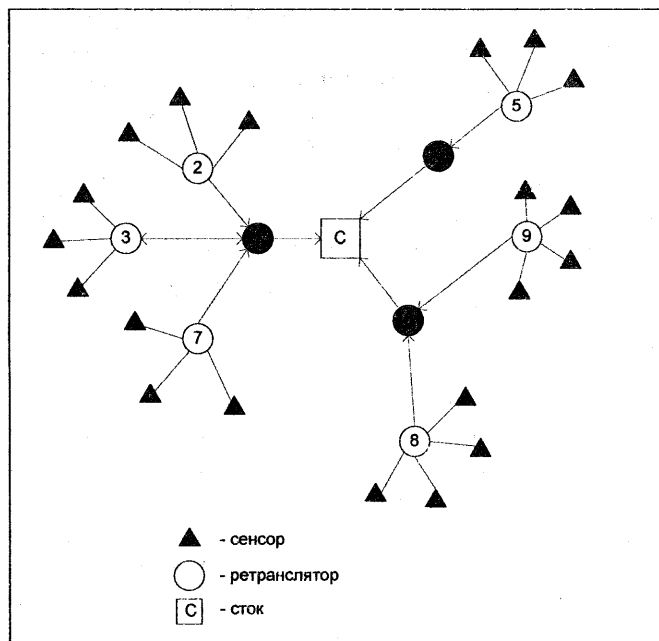


Рис. 1. Типовая структура сенсорной сети

ше других выходят из строя из-за разряда собственных аккумуляторов.

Однако следует сделать одно очень важное уточнение, которое часто упускается из виду. Как видно из табл.1, разница потребляемой мощности в режимах приема и передачи очень незначительна. На практике внешняя среда, контролируемая датчиками, не является детерминированной, поэтому зачастую все узлы маршрутизации постоянно находятся в активном режиме с включенным приемопередатчиком для того, чтобы обеспечить оперативность реакции на возникающие экстренные ситуации. В таком случае разницы в потребляемой мощности не возникает, так как все узлы тратят в единицу времени одинаковый объем энергии, почти не зависящий от проходящего через них трафика. Методы решения проблемы энергетического дисбаланса рассматриваются в третьем разделе статьи.

1. Время автономной работы отдельных узлов сети

В целом понятно, что узел беспроводной сети сбора данных можно считать работающим, пока он может безошибочно считывать показания с датчиков, производить

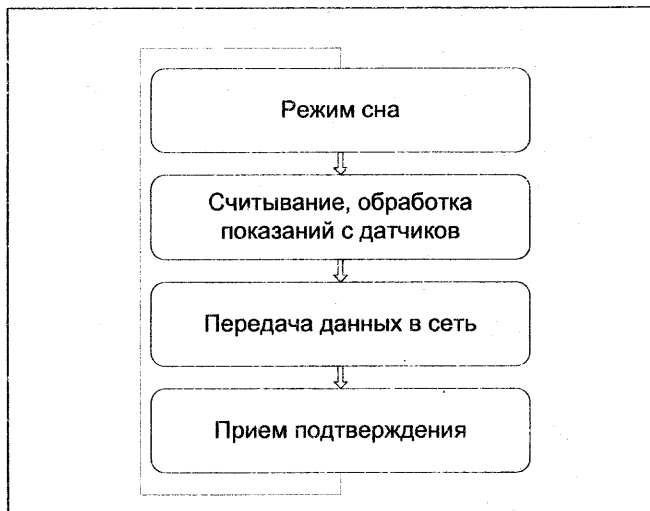


Рис. 2. Цикл работы оконечного устройства сенсорной сети

необходимые вычисления и передавать данные в сеть. При разработке и установке сети важно заранее оценить приблизительное время работы каждого узла до момента, когда будет необходима замена его батарей. Для этого важно понимать, какие факторы влияют на продолжительность времени его автономной работы.

Из рисунка 1 видно, что в сенсорной сети есть три типа узлов – оконечные устройства, маршрутизаторы (ретрансляторы) и стоки. Стоки не представляют интерес с точки зрения времени автономной работы: как уже было отмечено, обычно они подключены к постоянным источникам питания. Рассмотрим более подробно один из методов расчета времени жизни оконечных устройств и ретрансляторов.

1.1. Время жизни оконечного устройства

Оконечное устройство предназначено для считывания показаний с собственных датчиков и передачи их в сеть. Главным его отличием от ретранслятора является отсутствие возможности сквозной передачи через себя данных от других устройств. Оно работает по циклической схеме, представленной на рис. 2.

Учитывая показатели, приведенные в таблице 1, понятно, что частота считывания показаний с датчиков является одним из ключевых параметров, определяющих время жизни оконечного устройства, так как

именно она определяет, сколько времени узел будет находиться в режиме низкого энергопотребления. Данная частота в свою очередь зависит от типа параметра, измеряемого датчиком, и требований приложения. Например, для температурного датчика частота опроса может быть очень небольшой (до 1 Гц), так как температура в обычных условиях не может резко меняться. В то же время датчик телемедицины, считывающий критически важные показатели жизнедеятельности человека, имеет на порядок большую частоту опроса – до нескольких десятков Герц. Рассмотрим формулу расчета времени жизни оконечного узла, учитывающую его работу в различных режимах:

$$t_{oy} = \frac{E_0 t_{\text{ц}}}{P_f t_f + P_a t_a + P_s (t_{\text{ц}} - t_{\text{tx}} - t_a)}, \quad (1)$$

где

E_0 – начальный запас энергии устройства [Дж];

$t_{\text{ц}}$ – продолжительность одного цикла работы устройства [с];

P_f – средняя мощность в процессе передачи данных и последующего приема подтверждения [Вт];

t_f – время, затрачиваемое на передачу данных и прием подтверждения [с];

P_a – потребляемая мощность в режиме обработки данных (считывания показаний) [Вт];

t_a – суммарное время, затрачиваемое на считывание показаний с датчиков, их обработку и подготовку к передаче [с];

P_s – потребляемая мощность в режиме сна [Вт];

В формуле (1) величины E_0 , P_a , P_s являются постоянными и определяются особенностями конкретной аппаратной реализации устройства. Время t_a зависит как от характеристик используемого процессора, датчиков, так и от программной реализации алгоритма обработки данных.

Время t_f и также мощность P_f зависят от используемого стандарта беспроводной передачи, размера передаваемых данных, а также вероятности ошибок при передаче. Рассмотрим последнюю зависимость более подробно.

На практике передача по беспроводному каналу всегда сопряжена с возможными потерями как при передаче кадра с полезной нагрузкой, так и при отправке подтверждения. В результате устройство вынуждено инициировать одну или несколько повторных передач, задерживающих переход в спящий режим.

Введем дополнительный параметр p_e – вероятность ошибки при передаче. Если считать, что вероятность ошибки на $(n+1)$ -й передаче не зависит от количества предыдущих передач n , получим, что вероятность того, что передача пройдет за один раз, будет равна

$(1-p_e)$, за два раза – $p_e(1-p_e)$, за n – $p_e^{(n-1)}(1-p_e)$. Учитывая, что максимальное количество передач как правило всегда программно ограничено некоторым значением N , получим формулу для среднего времени, затрачиваемого на передачу кадра:

$$t_f = t_{\text{tx}} \left[(1-p_e) \sum_{i=1}^{N-1} i \cdot p_e^{i-1} + N \cdot p_e^{(N-1)} \right] \quad (2)$$

где

t_{tx} – время передачи данных с подтверждением без учета повторных передач.

N – максимальное количество передач, $N=1,2,3...$

Параметр p_e зависит как от внешних по отношению к сети факторов (отношение сигнал/шум и др.), так в ряде случаев и от внутренних особенностей построения сети. Например, при случайном доступе к общей среде передачи, вероятность возникновения ошибки будет зависеть от количества узлов, находящихся в зоне охвата приемопередатчика, от интенсивности потоков данных на каждом из них. Более подробно данная взаимосвязь описывается в статье [4].

1.2. Время жизни маршрутизатора

При работе сети по алгоритму асинхронного доступа к среде передачи CSMA/CA [5] маршрутизаторы вынуждены большую часть времени прослушивать эфир, чтобы принимать сообщения от своих соседей. Поэтому они быстрее расходуют имеющуюся у них энергию, являясь, таким образом, слабыми звеньями сети при использовании автономного питания.

Рассмотрим модель ретранслятора с точки зрения входящих и исходящих потоков данных. Для простоты не будем учитывать служебные пакеты, генерируемые самим ретранслятором для создания и поддержания таблиц маршрутизации. Также будем считать, что все пакеты имеют только один адрес назначения (отсутствует широковещательный трафик multicast или broadcast). В этом случае задача маршрутизатора состоит лишь в трансляции входящих пакетов в неизменном виде (считаем, что изменение метрик, промежуточных адресов в служебной части кадра не влияет на его размер), а также генерации кадров подтверждения для каждого входящего пакета.

Пусть на вход маршрутизатора поступают n входных потоков данных. Интенсивность i -го потока обозначим через λ_i . Заметим, что в i -м потоке приходят кадры одинаковой длины L_i . Тогда на выходе будут продублированы входные потоки, а также добавлены кадры подтверждения, отправляемые обратно для каждого поступившего пакета.

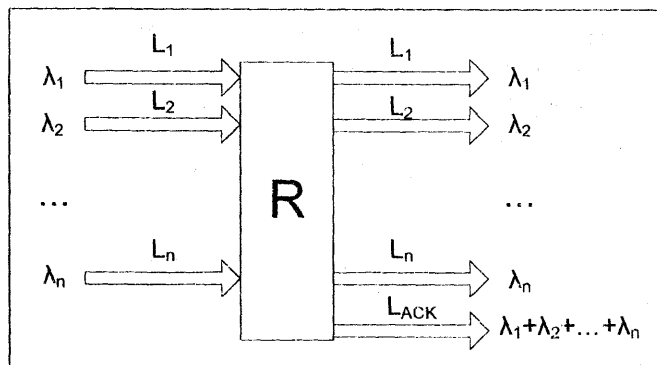


Рис. 3. Модель ретранслятора беспроводной цифровой сети с подтверждением передачи данных

Доля времени, затрачиваемого на прием всех кадров, будет равна:

$$k_{rx} = \sum_{i=1}^n t_i \lambda_i,$$

где t_i – время, затрачиваемое на прием одного пакета, зависящее от его длины L_i ;

λ_i – интенсивность пакетов i -го потока.

Доля времени, затрачиваемого на передачу всех кадров вместе с отправкой подтверждений, будет равна:

$$k_{tx} = \sum_{i=1}^n t_i \lambda_i + t_{ACK} \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

где t_{ACK} – время, необходимое для отправки подтверждения для каждого входящего кадра, [с]. Оно, как правило, не зависит от размера входящего пакета.

Будем рассматривать случай, когда $k_{rx} + k_{tx} < 1$, то есть ретранслятор успевает вовремя обрабатывать входные потоки данных. Тогда время его жизни будет равно:

$$t_m = \frac{E_0}{P_{tx} k_{tx} + P_{rx} k_{rx} + (1 - k_{tx} - k_{rx}) P_{idle}} \quad (3)$$

Ключевым параметром, который существенно влияет на время жизни маршрутизатора, является P_{idle} . Его значение определяется алгоритмами и протоколами работы беспроводной сети. Если требования к задержкам передачи данных позволяют переводить маршрутизаторы в режим пониженного энергопотребления, то P_{idle} будет близок к потребляемой мощности в режиме сна P_s (см. табл. 1). В противном случае он будет равен P_{rx} и, как следствие, время автономной работы ретранслятора будет на несколько порядков меньше.

Следует отметить, что приведенные методы расчета времени автономной работы конечных устройств и ретрансляторов не учитывают эффекта восстановления аккумуляторов [6] при переходе в режим с ма-

лой потребляемой мощностью, а также ряда опциональных возможностей цифровых беспроводных сетей, например, использования алгоритма обнаружения скрытых терминалов RTS/CTS.

Тем не менее, адекватность моделей была успешно проверена в ряде экспериментов [7], в которых были показаны приемлемые результаты с учетом ряда сделанных допущений и сложности определения точной емкости батарей: отклонение практических данных от теоретических не превысило 5%, что позволяет использовать формулы (1), (3) для приблизительной оценки продолжительности автономной работы отдельных устройств сенсорной сети.

2. Показатели времени автономной работы сети

В общем случае время жизни сети складывается из того, как долго работают отдельные ее элементы. Однако учитывая различные требования конкретных приложений, а также то, что в сети часто заложена избыточность, могут использоваться разные показатели времени жизни всей сети.

2.1. Показатель, основанный на количестве работающих узлов

Общее обозначение данного показателя T_k^n – время, пока по меньшей мере k из n узлов сети работают. В общем виде он имеет серьезный недостаток, так как не различает типы узлов. В частности в большинстве распределенных сетей имеется ряд ключевых ретранслирующих узлов, обычно расположенных в центре, выход из строя которых автоматически приводит к неработоспособности сети. Поэтому в ряде работ [8] при анализе времени жизни сети выделяются m критических элементов, которые все время должны быть активными. Например, они могут быть головными узлами локальных кластеров [9]. Для остальных узлов применяется метрика T_k^{n-m} .

Часто исследователями применяется частный случай показателя T_k^n , в котором $k=n$. В таком случае сеть считается работоспособной, только пока все ее узлы работают, или:

$$T_n^n = \min_{i \in V} T_i,$$

где

V – множество узлов сети

T_i – время жизни i -го узла

Показатели, основанные на размере зоны покрытия сети

Использование данных показателей обусловлено назначением сенсорных сетей – наблюдением за некоторыми параметрами в определенной области. Есть два подхода к определению показателей данной группы. Согласно первому подходу сеть считается работающей пока α процен-

тов от целевой области покрыто хотя бы одним сенсорным узлом (α -покрытие) [10]. Второй подход, направленный на обеспечение избыточности, требует, чтобы каждая точка целевой области была покрыта по крайней мере k узлами (k -покрытие) [11].

Показатели, основанные на связности графа сети

Так как сенсорная сеть представляет собой распределенную систему сбора данных, то помимо непосредственного считывания информации с датчиков, важно доставить ее до точки или точек назначения. При передаче данные проходят через ряд промежуточных ретрансляторов, которые должны быть в активном состоянии. Поэтому при использовании данной группы показателей сеть считается работоспособной до тех пор, пока существует маршруты доставки событий от всех оконечных устройств (или от определенной доли оконечных устройств) до стока [12].

Показатель, основанный на задержках передачи данных

На наш взгляд этот показатель наиболее приближен к практике использования систем сбора данных, так как именно он определяет качество работы таких систем. Наиболее полное определение показателя содержится в статье [13], расширим его еще дальше так, чтобы оно включало в себя и другие, ранее описанные группы показателей.

Пусть в среде, мониторинг которой осуществляется с помощью сенсорной сети, время от времени возникают некоторые события, которые нужно фиксировать. Обозначим множество возможных событий через $E = \{e_1, \dots, e_n\}$. В качестве событий могут рассматриваться как некоторые внешние явления, например, срабатывание тревожного датчика, изменение температуры, так и внутренние детерминированные события, например отправка регулярных сообщений о состоянии отдельных устройств.

Пусть также имеется набор точек или зон, в которых могут возникать указанные выше события:

$$P = \{p_1^{E_1}, \dots, p_m^{E_m}\}, \text{ где } E_i \subset E, i \in [1..m]$$

Таким образом, для каждой точки (зоны) p_i определен набор событий E_i , который может возникать в ней. Заметим, что при такой постановке задачи обеспечивается учет показателей, основанных на зоне покрытия сети.

Введем показатель качества работы сети для каждой зоны покрытия k ($k \in [1..m]$) в момент времени t . Для этого рассмотрим некоторый интервал времени $(t - \Delta t, t)$. Пусть $N_k(t)$ – общее количество событий, возникших в зоне k в данный интервал времени, а $L_k(t)$ – количество событий из общего числа $N_k(t)$, доставленных до стока за допустимое время. Допустимое время может задаваться как в целом для области k , так и для каждого типа события, возникающего в ней. Значение параметра Δt выбира-

ется исходя из интенсивности событий в конкретной зоне и требований приложения по обеспечению качества обслуживания.

Тогда показателем качества работы сети в зоне k в момент времени t будет:

$$\psi_k(t) = \begin{cases} \frac{L_k(t)}{N_k(t)}, & \text{если } N \neq 0 \\ 1, & \text{если } N = 0 \end{cases}$$

Пусть c_k – пограничное значение показателя ψ_k , ниже которого сеть считается неработоспособной.

Тогда одним из возможным определений времени автономной работы сети будет такое максимальное время τ_1 :

$$\forall t < \tau_1, \forall k \in [1..m]: \psi_k(t) \geq c_k \quad (4)$$

Однако данное определение не учитывает одного важного свойства сенсорных сетей – способности к самовосстановлению. Учет данной возможности будет описан в следующем разделе.

Показатель времени жизни самовосстанавливающихся сетей

Продолжим описание сети, начатое в предыдущем разделе. Представим некоторый теоретический график изменения показателя $\psi_k(t)$ (рис. 4). Из рисунка видно, что в некоторые моменты времени, определяемые выходом из строя отдельных устройств, значение показателя опускается ниже допустимой границы, однако после перестройки сети вновь входит в допустимый интервал.

Зададим через T множество точек во времени, в которых ψ_k переходит через границу c_k сверху вниз и обратно:

$$T = \{t_i: (\psi_k(t - \varepsilon) \geq c_k \cap \psi_k(t) < c_k) \cup (\psi_k(t - \varepsilon) < c_k \cap \psi_k(t) \geq c_k)\}, \\ t_i < t_{i+1}, i \in N, \varepsilon \rightarrow 0$$

Пусть максимальное время восстановления сети после сбоев ограничено некоторой величиной $t_{\max}$. Тогда моментом времени, после которого сеть выходит из строя для зоны k , можно считать t_{ek} , где

$$e_k = \begin{cases} \min \left(\begin{array}{l} i \in [0, |T| - 2]: \\ \psi_k(t_i) < c_k \cap t_{i+1} - t_i > t_{\max} \end{array} \right), & \text{если такое } i \text{ существует} \\ |T| - 1 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Время жизни сети в целом будет равно:

$$\tau_2 = \min_{k \in [1..m]} t_{ek} \quad (5)$$

2.2. Комплексные показатели

Дитрих и Дресслер [13] предложили комплексный показатель времени жизни сети, объединяющий все три базовые группы показателей, а также добавляющий ряд особенностей. В частности, авторами было предложено выделить отдельное состояние сети – полужункциональное, то есть состояние, при котором сеть все еще считается работоспособной, но имеет худшие показате-

тели качества обслуживания (задержки передачи данных и др.) из-за выхода из строя отдельных ее элементов, чем в полностью рабочем состоянии.

3. Энергетическая балансировка сети

Как было показано выше, в типовой сети сбора данных узлы выходят из строя неодновременно. Эксперименты показали [14], что часто после истощения батарей первого по счету элемента часть узлов сети имеет более 90% начальной энергии. Для выравнивания потребляемой мощности всех узлов сети используют различные методы энергетической балансировки. Приведем краткое описание основных методов.

Метод построения гетерогенной сети предполагает использование ряда возможностей:

1. Разная емкость батарей в зависимости от положения устройств в структуре сети и выполняемых ими функций. В этом случае ключевые ретранслирующие устройства могут снабжаться большими по емкости аккумуляторами. Данный подход является самым простым, но одновременно приводит к низкой масштабируемости сети и ее плохой адаптации к смене условий функционирования. Также необходимость разработки различных конструктивных решений под разные элементы приводит к увеличению стоимости конечных систем.
2. Разная плотность размещения узлов сети в зависимости от предполагаемой интенсивности трафика в конкретной зоне. Данное решение направлено на обеспечение избыточности в структуре сети и дублирование функций отдельных узлов. Так при выходе из строя очередного маршрутизатора его функции будут переложены на соседний элемент, до этого момента никак не используемый.

К программным методам относят использование протоколов маршрутизации, основанных на метрике остаточной энергии узлов [15], чередование дальней и ближней передачи [16], позиционирование узлов [18].

Перспективным методом балансировки считается использование мобильности отдельных компонентов сети [14, 17]. Один из подходов данной группы предполагает замену статических ретрансляторов мобильными узлами промежуточной буферизации, которые перемещаются от узла к узлу и собирают с них данные, после чего движутся к стоку и передают на него всю собранную информацию. Другой подход предполагает мобильность самого стока(-ов). Последнее решение является более перспективным, поскольку не приводит к резкому увеличению задержек передачи полезных данных на узел сбора данных.

Для более подробного знакомства с деталями реализации каждого из методов, их преимуществами и не-

достатками, читатель отсылается к указанной литературе.

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. Анализ литературы показал, что у авторов нет единого подхода к определению того, что именно считать временем автономной работы распределенной сети. Поэтому в данной статье были суммированы основные определения, а также ключевые моменты, которые необходимо учитывать при разработке систем сбора данных на основе БСС.

С точки зрения отдельных устройств сети существует ряд возможностей увеличения длительности их автономной работы. Для оконечных устройств важно максимизировать время их нахождения в режиме низкого энергопотребления. Это можно сделать как оптимизацией вычислений, алгоритмов, так и простым увеличением интервала между последовательными выходами из режима сна.

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.

С точки зрения сети в целом возникает задача выравнивания потребляемой мощности ее элементов, чтобы они выходили из строя почти одновременно. Это позволяет снизить затраты на обслуживание сети за счет увеличения интервалов замены батарей. Для этого применяют различные методы энергетической балансировки. Среди наиболее перспективных следует отметить использование усовершенствованных алгоритмов маршрутизации и применение мобильности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Karl H, Willig A. Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks, ISBN 0-470-09510-5. John Wiley & Sons: Chichester, 2005.
2. Описание модулей JN5148 от 03.08.2011 [Электронный ресурс] // URL: <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," Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions, vol.20, no.10, pp.1526-1539, Oct. 2009.
4. M. Goyal, D. Rohm, W. Xie, S. H. Hosseini, K. S. Trivedi, Y. Bashir, and A. Divjak. 2011. A stochastic model for beaconless IEEE 802.15.4 MAC operation. Comput. Commun. 34, 12 (August 2011), 1460-1474.
 5. T. Sun, L.-J. Chen, C.-C. Han, G. Yang, and M. Gerla, "Measuring effective capacity of IEEE 802.15.4 beaconless mode," in Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '06), vol. 1, pp. 493-498, Las Vegas, Nev, USA, April 2006.
 6. Rakhmatov, D. 2009. Battery voltage modeling for portable systems. ACM Trans. Des. Autom. Elect. Syst., 14, 2, Article 29 (March 2009).
 7. Комаров М.М., Ефремов С.Г., Восков Л.С. «Разработка системы активного беспроводного сбора данных в интралогистике» (номер государственной регистрации НИОКР 01200961253).
 8. Hellman K., Andcolagrosso M. 2006. Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. J. Interconn. Netw. 7, 1, 91-99.
 9. Soro S., Andheinzelman W. B. 2005. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS).
 10. Wu K., Gao Y., Li F., Andxiao Y. 2005. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks. Mob. Netw. Appl. 10, 6, 837-852.
 11. Mo W, Qiao D, Andwang Z. 2005. Mostly-sleeping wireless sensor networks: connectivity, k-coverage, and alpha-lifetime. In Proceedings of the 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing.
 12. Carbutar B., Grama A., Vitek J., Carbutar O. 2006. Redundancy and coverage detection in sensor networks. ACM Trans. Sen. Netw. 2, 1, 94-128.
 13. Dietrich, I. and Dressler, F. 2009. On the lifetime of wireless sensor networks. ACM Trans. Sen. Netw. 5, 1, Article 5 (January 2009).
 14. S. Basagni, A. Carosi, E. Melachrinoudis, C. Petrioli, and Z.M. Wang. 2008. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. Wirel. Netw. 14, 6 (December 2008), 831-858.
 15. Chen Y, Nasser N. Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks. In Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks (QShine '06). ACM, New York, NY, USA.
 16. H. Zhang, H. Shen. 2009. Balancing Energy Consumption to Maximize Network Lifetime in Data-Gathering Sensor Networks. IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst. 20, 10 (October 2009), 1526-1539.
 17. Wang W, Srinivasan V, Andchua K.-C. 2005. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In Proceedings of the 11th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), 270-283.
 18. Комаров М.М., Восков Л.С. Позиционирование датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения // Датчики и системы. 2012. №1. С. 34-38.

Восков Леонид Сергеевич,
к.т.н., профессор каф. ВСУС МИЭМ;
E-mail: voskov@narod.ru

Ефремов Сергей Геннадьевич,
аспирант каф. ВСУС МИЭМ;
E-mail: efremov-sg@narod.ru