

УДК 621.396

М.А. Смольников<sup>1</sup>, Ю.А. Скудняков<sup>2</sup>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АГРЕГАЦИИ ДАННЫХ В МОБИЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

*Проводится сравнение традиционных алгоритмов сетевой маршрутизации с алгоритмом, выполняющим перенаправление сообщений с учетом их содержимого. Исследуется влияние расположения источника данных и получателя на энергозатраты, задержки и надежность передачи данных. Доказывается, что подобная маршрутизация может увеличить эффективность работы сенсорных сетей в широком диапазоне условий.*

### Введение

Сенсорные сети обладают рядом отличий от традиционных сетей передачи данных, устройства которых не имеют надежного источника питания и постоянно передают небольшие объемы данных от множества точек, распределенных географически, к единственному серверу. В связи с этим применение стандартных схем маршрутизации в сенсорных сетях является недостаточно эффективным.

Мобильная беспроводная сенсорная сеть – это сеть, состоящая из множества недорогих узлов, каждый из которых имеет собственный микропроцессор, набор датчиков и сетевой интерфейс. Устройства максимально автономны и могут работать без вмешательства оператора. Область применения беспроводных сенсорных сетей достаточно широка: начиная от простого отслеживания транспорта и заканчивая мониторингом окружающей среды. Основа аппаратной части – недорогие процессоры, обладающие малой производительностью (например, базирующиеся на ядре AVR).

В настоящее время уже существуют как проприетарные, так и свободно распространяемые программные решения для осуществления сбора и обработки сигналов, поступающих с подключенных к микроконтроллеру сенсоров, однако коммуникация между устройствами до сих пор ведется преимущественно с использованием стандартных сетевых протоколов (например, IEEE802.11).

Разработка новых решений для сбора данных с сенсорной сети часто базируется на архитектуре MANET (MobileAd-HocNetwork) – беспроводной децентрализованной самоорганизующейся сети. Каждое устройство сети может независимо передвигаться и, как следствие, создавать и разрывать соединения с соседями. Кроме того, к устройствам предъявляется требование возможности функционирования в качестве роутера. В настоящее время на базе этой технологии реализовано множество известных проектов, например SARTRE [1], компанией Volvo разработана система автопилота для автомобилей, движущихся в колонне. Сети для коммуникации транспортных средств тем не менее имеют определенную специфику (повышенные требования к безопасности и отказоустойчивости), поэтому их чаще выделяют в отдельный подвид – VANET [2].

Особенностью же мобильных сенсорных сетей (МСС), в частности сетей, которые измеряют характеристики окружающей среды (например, барометрические, сейсмические, температурные и др.), является то, что с большой вероятностью показания соседних датчиков, а следовательно, и данных, которые они передают, будут одинаковы или похожи друг на друга. Второй ключевой особенностью МСС следует назвать передачу данных только в одном направлении: от множества источников к одному приемнику. Третья важная деталь: собственно сенсоры могут находиться в таких местах, где обслуживание их человеком может быть затруднено или вовсе невозможно. Несмотря на то что классическая MANET способна работать в обозначенных условиях, ее эффективность может быть увеличена за счет агрегации данных и отсутствия поддержки коммуникации с произвольным узлом.

На рис. 1 изображены потоки данных в обычной сети Ad-Нос (слева) и сети с применением агрегации (справа). Красным цветом выделены узлы – источники данных, синим цветом – получатель, а черным – промежуточные узлы, выполняющие роль маршрутизаторов. Стрелками обозначены потоки данных, цвет стрелок условно показывает различия в значении регистрируемого параметра. За счет применения агрегирующей функции на ретрансляторах изображенной сети существует возможность уменьшить число передач с 8 до 5.

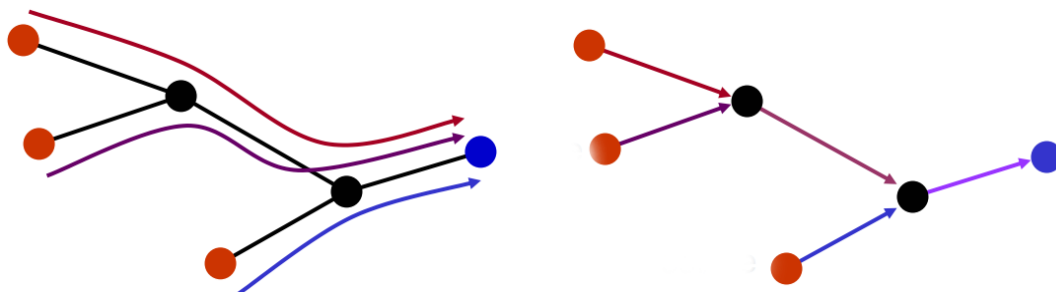


Рис. 1. Сравнение потоков данных в обычной сети Ad-Нос и сети с применением агрегации

Агрегация данных – это процесс комбинирования данных из множества источников, который может быть реализован множеством способов. Простейшим способом является удаление повторяющихся данных, агрегация может быть представлена функцией (например, поиска минимального, максимального или среднего значения) с количеством аргументов более одного. Для целей моделирования сделано допущение: функция-агрегатор будет выдавать один пакет данных при любом количестве входных аргументов.

#### Алгоритм маршрутизации с использованием агрегации данных в мобильных сенсорных сетях

В простейшем случае процесс агрегации может быть рассмотрен как широкое вещание наоборот: вместо того чтобы отправлять один пакет от источника множеству получателей, множество передатчиков отправляет один и тот же пакет данных приемнику. Допустим, есть  $k$  источников, обозначенных от  $S_1$  до  $S_n$ , а также приемник, представленный как  $D$ . Пусть граф сети  $G = (V, E)$  состоит из узлов  $V$ , связанных между собой ребрами  $E$ . Нахождение оптимального числа передач, требуемых для достижения данными получателя, сводится к решению задачи Штейнера [3]. Однако стоит отметить, что существующие алгоритмы решения этой задачи не обладают высокой эффективностью. Так, алгоритм Крускала [4], считающийся одним из оптимальных средств решения задачи, требует выполнения перечня достаточно сложных операций. Наиболее затратные из них – сортировка ребер и представление связей в виде системы непересекающихся множеств. Время работы алгоритма Крускала зависит от числа ребер и может быть определено как  $O(E \cdot \log E)$ . Возвращаясь к основным требованиям, предъявляемым к сети (необходимость самоорганизации и использование низкопроизводительных компонентов), следует отметить, что процесс нахождения маршрутов на больших сетях может занимать длительное время.

Рассмотрим три основных вида генерации деревьев агрегации данных:

*ленивая* – агрегацию выполняет только ближайший к источнику узел, а прочие просто отправляют данные прямо к источнику;

*быстрая* – каждый источник стремится отправить данные по наиболее короткому пути;

*жадная*, – напротив, нацелена на достижение максимальной агрегации: только наиболее близкий к серверу источник имеет прямую связь с ним, остальные присоединяются к самым близким узлам.

Для поиска оптимальной схемы рассмотрим следующие показатели:

– энергозатраты. Полагая, что операция агрегации «дешевле», чем операция передачи данных, число передач может быть уменьшено с целью снижения энергопотребления;

– задержки. Очевидно, что при использовании агрегации, перед тем как произвести отправку данных далее, необходимо сначала дождаться информации от всех узлов, а затем вы-

полнить над ней определенные действия. Следовательно, время доставки пакетов серверу будет значительно увеличено;

– робастность. Подключение новых узлов к существующей сети с агрегацией – значительно более простая операция, так как не всегда требует пересчета сети целиком.

Рассчитаем эффективность алгоритма маршрутизации с использованием агрегации данных в сравнении с простой маршрутизацией. Пусть  $d_i$  – наиболее короткое расстояние от источника  $S_i$  до потребителя данных на графе. Для каждой передачи число перенаправлений, требуемых для оптимального классического адресного протокола, в этом случае можно найти как сумму расстояний между перенаправляющими узлами:

$$N_A = d_1 + d_2 + \dots + d_{n-1} + d_n = \sum_{i=1}^n d_i.$$

В алгоритме, использующем агрегацию данных, число передач  $N_D$  всегда будет меньшим либо равным  $N_A$ . Диаметр  $X$  набора вершин  $S$  на графе  $G$  – наиболее длинный из попарно кратчайших путей между всеми вершинами. Если диаметр  $X$  больше либо равен единице, то общее число передач, требуемое для оптимального протокола, будет удовлетворять условию неравенства

$$\begin{cases} N_D \leq (n-1)X + \min(d_i), \\ N_D \geq \min(d_i) + (n-1). \end{cases}$$

Верхняя граница в этом случае определяется исходя из того, что наибольшее число ребер в графе с  $(n-1)$  отправителями (оставшаяся вершина является получателем данных) не может быть больше произведения диаметра  $X$  на число передающих вершин плюс расстояние от источника до ближайшей передающей вершины. Нижняя граница – частный случай дерева Штейнера для  $X=1$ , когда все узлы передают данные непосредственно агрегатору.

Как следствие, если  $X < \min(d_i)$ , то и  $N_D < N_A$ . Значит, протокол маршрутизации, использующий агрегацию, будет работать эффективнее, чем обычное перенаправление данных:

$$N_D < (n-1)X + \min(d_i) < n\min(d_i) \Rightarrow N_D < \text{sum}(d_i) = N_A.$$

Относительную эффективность можно определить следующим образом:

$$E = \frac{(N_A - N_D)}{N_A}.$$

Раскрыв значения  $N_A$  и  $N_D$ , получим границы значения эффективности как диапазон от 0 до 1:

$$\begin{cases} E \geq 1 - \frac{((n-1)X + \min(d_i))}{\text{sum}(d_i)}, \\ E \leq 1 - \frac{(\min(d_i) + n - 1)}{\text{sum}(d_i)}. \end{cases}$$

Расположив все узлы на равном удалении от получателя:  $\min(d_i) = \max(d_i) = d$ , имеем

$$1 - \frac{(n-1)X + d}{nd} \leq E \leq 1 - \frac{d + n - 1}{nd}.$$

Если предположить, что значения  $X$  и  $n$  неизменны и значительно меньше, чем  $d$ , то при увеличении количества перенаправлений  $d$  эффективность будет зависеть от общего числа узлов:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} E = 1 - 1/n.$$

Очевидно, что в случае, если дистанция между сервером и остальными узлами достаточно велика и сами узлы образуют между собой кластер, протокол с поддержкой агрегации дает большой прирост эффективности: 50 % при двух узлах в сети и 90 % при 10 узлах.

Для экспериментального подтверждения полученных результатов построена модель, в которой на плоскости случайным образом размещены передатчики. В модели учитываются два фактора: радиус, внутри которого произошло событие (расстояние, в рамках которого все датчики будут регистрировать и передавать одинаковое значение какой-либо величины), и радиус действия радиомодуля узлов. Моделирование проводится в приложении Omnet++, число узлов 100 (99 узлов и 1 сервер). Выбрана предустановленная модель в приложении симуляции модели Ad-Нос, модифицированная дополнительным условием: если в узел-маршрутизатор приходят два пакета одинаковых данных, следует отправить только один пакет данных на сервер.

Число перенаправлений в моделируемой сети с использованием агрегации зависит от двух параметров: радиуса связи между узлами и радиуса регистрации события (рис. 2).

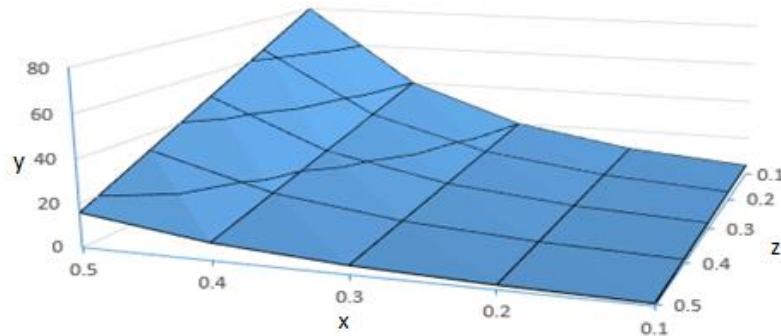


Рис. 2. Зависимость числа перенаправлений одного пакета данных от радиуса связи узлов (ось X) и размера события (ось Z)

Для сравнения эффективности сети, использующей агрегацию, с традиционной сетью Ad-Нос, информация об одинаковых событиях одного и того же размера передана через обе сети (рис. 3). Измерено число перенаправлений (вертикальная ось) в зависимости от размера события (горизонтальная ось).

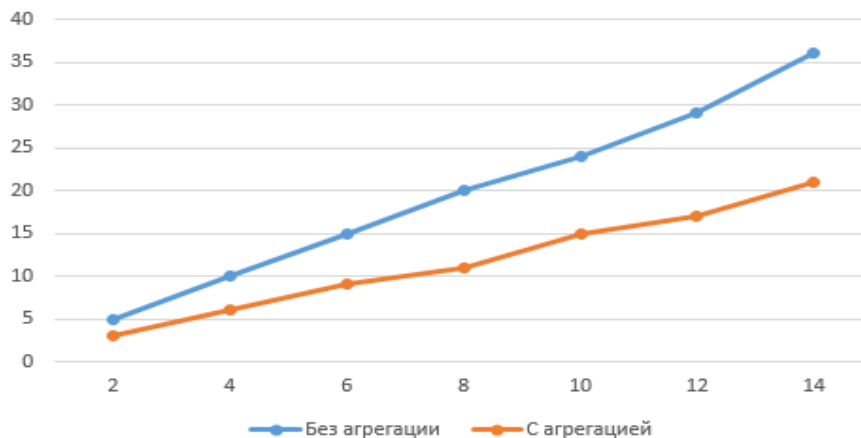


Рис. 3. Сравнение числа перенаправлений в схеме маршрутизации без агрегации и с агрегацией данных

Результаты сравнения показали, что в определенных условиях, когда одно и то же событие регистрируется значительным числом датчиков, т. е. радиус связи значительно меньше, чем радиус события, число перенаправлений может быть достаточно малым (см. рис. 2). В то же время при отсутствии агрегации такой параметр, как радиус события, не влияет на уменьшение числа передач и будет максимальным для данной дальности связи (см. рис. 3).

Принимая также во внимание, что увеличение дальности связи влечет за собой экспоненциальный рост потребляемой мощности (возможно использование направленных антенн, уменьшающих данный эффект) и каждая передача данных требует значительных затрат энергии как передающего, так и принимающего узлов, максимальная агрегация данных с целью уменьшения объема передачи и времени на согласование связи, требующая лишь вычислительной мощности микроконтроллера, при достаточной эффективности может значительно продлить время работы, разгрузить частоту, на которой происходит передача, а следовательно, увеличить максимальную плотность сети.

Кроме рассмотренных методов агрегации стоит обратить внимание на алгоритмы сжатия данных, однако это направление требует дальнейших исследований, так как для использования более эффективных алгоритмов необходимо больше процессорного времени, что вызовет увеличение энергопотребления каждым перенаправляющим узлом.

### Заключение

В работе осуществлен анализ существующих МСС с точки зрения их назначения, функциональных возможностей, практической реализации, достоинств и недостатков. На основе результатов проведенного исследования предложен алгоритм оптимизации маршрутизации в МСС с агрегацией данных, использование которого дает возможность сократить объем передаваемой информации при сохранении надежности связей в сетях. Применение разработанного алгоритма оптимизации маршрутизации позволяет сенсорной сети функционировать с наименьшими энергозатратами по сравнению с существующими сетями.

### Список литературы

1. Chapman & Hall CRC Computer and Information science series Distributed Sensor Networks S. Sitharma Iyengar and Richard R. Brooks [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access : [http:// bit.ly/29c3Gw6](http://bit.ly/29c3Gw6). – Date of access : 24.05.2016.
2. Галкин, П.В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей / П.В. Галкин // ScienceRise. – 2014. – № 2. – С. 20–22.
3. Восков, Л.С. Повышение качества обслуживания в беспроводных стационарных сенсорных сетях с автономными источниками питания / Л.С. Восков, М.М. Комаров // Качество. Инновации. Образование. – 2012. – № 1. – С. 80–88.
4. Dynamic Source Routing in Ad-Hoc Wireless Networking / D.B. Johnson [et al.]. – Pittsburgh : Mobile Computing, 1996. – 25 p.

Поступила 12.10.2016

<sup>1</sup>Белорусский национальный  
технический университет,  
Минск, пр. Независимости, 65  
e-mail: me@esight.ru

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники,  
Минск, П. Бровки, 6  
e-mail: juri\_alex@tut.by

**M.A. Smolnikov, Y.A. Skudnyakov**

**THE USE OF DATA AGGREGATION IN MOBILE SENSOR NETWORKS**

In the article the comparison of traditional routing algorithms with content based routing algorithms is performed. Investigation of source and sink locations influence on energy consumption, delays and data transfer reliability is made as well. It is proved, that this kind of routing may increase the efficiency of sensor networks operating in a large range of conditions.