

УДК 621.311

**Кисельов В.Б.,**  
д.т.н., професор АМУ,  
**Новіков В.Н.,**  
**Трач Б. В.,**  
НТУУ «КПІ»

### **МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ Й МАСШТАБОВАНOSTІ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

*У роботі розглядаються безпроводові сенсорні мережі, проводиться дослідження можливостей застосування протоколів динамічної маршрутизації для підвищення надійності безпроводових сенсорних мереж, надаються рекомендації з підвищення масштабованості БСМ.*

*Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, протоколи динамічної маршрутизації.*

**Киселев В.Б.,**  
д.т.н., професор АМУ  
**Новиков В.Н.,**  
**Трач Б. В.**  
НТУУ «КПІ»

### **МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И МАСШТАБИРУЕМОСТИ БЕЗПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

*В работе рассматриваются беспроводные сенсорные сети, проводится исследование возможностей применения протоколов динамической маршрутизации для повышения надежности беспроводных сенсорных сетей, даются рекомендации по повышению масштабируемости БСС.*

*Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, протоколы динамической маршрутизации.*

**Kiselev V.B.,**  
Prof. AMU  
**Novikov V.N.,**  
**Trach B. V.,**  
NTU "KPI"

### **METHODS OF INCREASING THE RELIABILITY AND SCALABILITY OF WIRELESS SENSOR NETWORKS**

*The paper reviews wireless sensor networks, provides analysis of applicability of dynamic routing protocols for improving reliability of wireless sensor networks, and provides guidelines for improving reliability of WSNs.*

*Keywords: wireless sensor networks, dynamic routing protocols.*

**Вступлення.** На даний момент безпроводные сенсорные сети является важным инструментом исследования физического мира. Их

важность связана с новыми возможностями использования, обусловленных такими характеристиками БСС, как отсутствие необходимости в кабельной инфраструктуре, миниатюрность узлов, низкое потребление электроэнергии, встроенный радиointерфейс, достаточно высокая вычислительная способность, сравнительно небольшая стоимость. Все это сделало возможным их широкое применение во многих сферах человеческой деятельности с целью автоматизации процессов сбора информации, мониторинга, контроля характеристик различных технических и природных объектов [1]. В то же время, важным для сенсорных сетей являются вопросы, связанные с энергопотреблением, которые обусловлены необходимостью автономного функционирования. Таким образом, возникает задача оптимизации использования имеющихся ресурсов. Кроме того, в беспроводных сенсорных сетях предъявляются требования по обеспечению определенной надежности функционирования, особенно в сферах, где отказ или задержка в доставке информации об определенном явлении может иметь критические последствия. Так, в сферах ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, медицинских приложениях надежность сети является чрезвычайно важной. Все эти аспекты затрудняют их архитектуру и часто требуют разработки специализированных решений.

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) - это распределенная система необслуживаемых миниатюрных электронных устройств (узлов сети), которые осуществляют сбор данных о параметрах внешней среды и передачу их на базовую станцию с помощью ретрансляции от узла к узлу с помощью беспроводной связи. Несколько узлов такой сети выступают в качестве шлюзов, выполняющих прием-передачу информации пользователям сенсорной сети

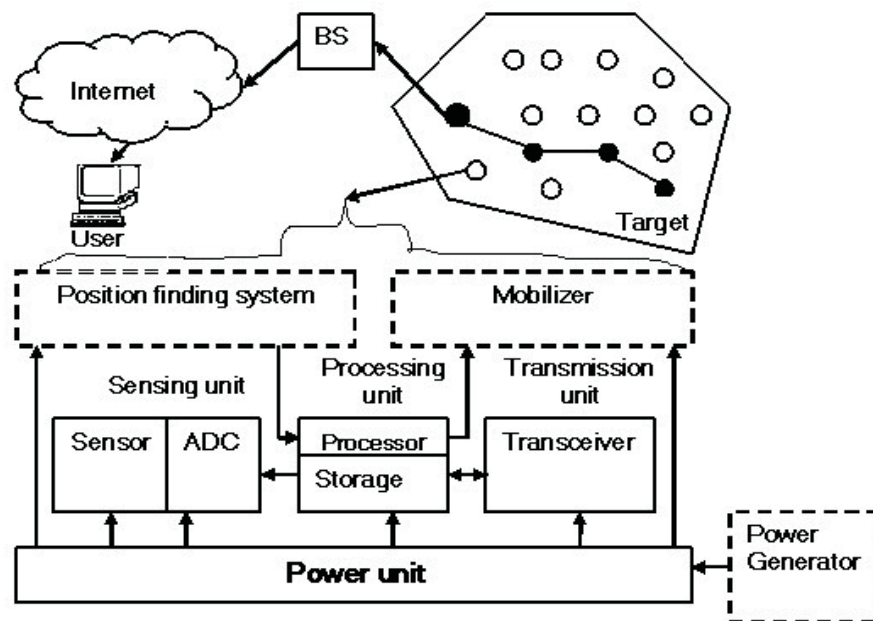


Рис. 1. Структура сенсорной сети

. Основу сети составляют ее узлы - сенсоры - имеющие возможность измерения физических параметров среды в соответствии с задачи, которая ставится перед сетью, например температуру, давление, и тому подобное. Кроме того, сенсор содержит микроконтроллер, память, радиопередатчик, автономный источник питания и иногда исполнительные механизмы. Возможна также передача управляющих воздействий от узлов сети к внешней среде. Сенсорные узлы могут закрепляться стационарно, а также иметь относительную мобильность, то есть произвольно перемещаться друг относительно друга в некотором пространстве, не нарушая при этом логической связанности сети. В последнем случае сенсорная сеть не имеет фиксированной постоянной топологии, и ее структура динамично меняется [2].

Кроме того, узлы имеют возможность местной обработки данных от датчиков, что позволяет принимать решение о необходимости передачи информации на шлюз, и определять подмножество информации, которая должна быть передана. Кроме функций сбора информации о физических явлениях, узлы выступают в качестве маршрутизаторов, обеспечивающих связность передачи информации от территориально удаленных сенсоров к узлам-шлюзам. При этом учитываются ограничения со стороны энергопотребления, вычислительных возможностей, пропускной способности радиоканалов. Эти аспекты могут ограничивать способность сети к масштабированию, требуя применения большего количества шлюзов для покрытия большей площади наблюдения [3]. В идеале беспроводная сенсорная сеть масштабируемая, отказоустойчивая, имеет малое энергопотребление, программно настраиваемая, быстро собирает данные, надежная и точная в долгосрочной перспективе, недорогая и не требует технического обслуживания.

Основные цели функционирования беспроводной сенсорной сети (БСС):

- Измерение значений физических величин;
- Регистрация возникновения явлений, вызывающих интерес и определить параметры зафиксированных событий;
- Классификация и отслеживания объектов;

Таким образом, важными требованиями к БСМ являются:

1. способность к масштабированию по площади и количества сенсоров;
2. надежность системы;
3. оптимальное размещение стационарных датчиков;
4. низкое энергопотребление;
5. самоорганизация;
6. совместная обработка сигналов;
7. способность работать по запросам.

Остальные данной статьи организована следующим образом. В разделе 2 содержится применения сенсорных сетей, в разделе 3 содержится общее

описание протокола PDR, в разделе 4 проводится анализ возможности повышения надежности и масштабируемости БСС, в разделе 5 - выводы.

## **2. Применение сенсорных сетей**

Беспроводные сенсорные сети могут применяться в большом количестве систем, характеризующихся различными требованиями. Так, сенсорные сети могут применяться в экологическом мониторинге, в домашних сетях типа "Умный дом", в зонах стихийных бедствий и тому подобное. Потенциально возможны следующие применения беспроводных сенсорных сетей [4]:

1. Военное применение:
  1. исследования военной обстановки;
  2. мониторинг государственных границ;
  3. слежения за подвижными объектами;
  4. наблюдение за полем боя.
2. Применение в зоне чрезвычайных ситуаций:
  1. измерения загрязнения атмосферы;
  2. датчики уровня воды / радиации;
3. Экологический мониторинг
  1. мониторинг состояния почвы и воды;
  2. исследования природных сред;
  3. наблюдения за биологическими и искусственными системами.
4. Автоматизация производственных процессов
  1. наблюдение за состоянием промышленных установок;
  2. сбор информации о прохождении производственного процесса.
5. Автомобильные сети
  1. сбор информации о подсистемах автомобиля;
  2. контроль за состоянием дорожного покрытия;
  3. предоставление важной информации водителю.

Возможны и другие приложения, например в медицине, метеорологии, агрономии, и тому подобное. Во многих из этих приложений является важным надежность сети.

## **3. Использование Persistent Dynamic Routing для увеличения надежности БСС**

Механизмы Persistent Dynamic Routing (постоянная динамическая маршрутизация) [5] позволяют сети осуществлять надежную передачу данных без потерь пакетов. В сочетании с механизмами динамического обнаружения маршрутов, которые позволяют определять лучший маршрут для доставки данных при процессе их передачи, PDR позволяет значительно повысить масштабируемость и эффективность потребления энергии беспроводной сенсорной сети.

Почти каждый из существующих протоколов организации ad-hoc

сетей предполагает определенный уровень статичности сети. Например, процесс выявления маршрутов в AODV предусматривает, что полный маршрут от источника до адресата полностью существовать хотя бы короткий промежуток времени. В пакете по протоколу Dynamic Source Routing (DSR) передается вся маршрутная информация, что предполагает существование этого маршрута течение всего времени передачи пакета.

В случаях со сравнительно статичной сетью с малым количеством топологических изменений, это предположение может быть как истинным, так и нет. Однако в очень динамичных средах это предположение о наличии надежной маршрутной информации не выполняется. Это объясняется тем, что из-за постоянных изменений в топологии в один отдельно взятый момент времени невозможно построить полный маршрут от источника к адресату. В этом случае алгоритмы маршрутизации AODV и DSR могут работать нестабильно, или откажут в функционировании [6]. Например, в сети с протоколом AODV, источник будет направлять в режиме flooding запросы маршрутной информации, но не будет получать ответы от адресата, что приведет к снижению эффективности работы сети из-за перегрузки служебными пакетами. Как следствие, передача данных не начнется из-за того, что не будет получено полной маршрутной информации. Даже в случае получения ответа от источника передача будет усложненной из-за перегрузки сети служебными пакетами. Влияние этих явлений возрастает с размером сети. Поскольку процесс выявления маршрутов является процессом типа flooding, эффективность сети значительно уменьшится. В случае применения протокола PDR, пакет не ожидает получения полной маршрутной информации. Вместо этого выполняется опрос информации из соседних узлов, и пакет маршрутизируется на основе этой информации.

PDR может значительно уменьшить затраты на доставку пакета в сетях с сильно динамичной структурой благодаря отсутствию лишних запросов и про активных обновлений маршрутов. Кроме того, выявление маршрутов в PDR не оказывает пути к узлам, которые размещены дальше, чем через один хоп от центра, уменьшает нагрузку на сеть. На практике flooding применяется только один раз в начале формирования сети. После этого выявление лучших маршрутов до адресата выполняется только в зоне прямой связи узла. Корректность маршрутной информации не гарантируется, однако это требование не является необходимым для доставки пакетов без потерь. Таким образом, протокол PDR является вероятностным, а не детерминированным алгоритмом. В случае сети со статическим структурой протокол PDR обеспечивает такую же эффективность, что и AODV, из-за значительного роста вероятности того, что маршрут исчисленный по локальным данным совпадет с реальным лучшим маршруту до адресата. В случае сети с частыми и большими топологическими изменениями, PDR обеспечивает доставку пакетов с

значительно меньшей задержкой и количеством служебного трафика.

#### **4. Методы увеличения емкости БСС для увеличения надежности сети**

Требования по масштабированию сети также ставят требования к надежности сети. Поскольку беспроводная сенсорная сеть спроектирована с требованием к самоорганизации и адаптации к среде эксплуатации, то при изменениях параметров среды выполняться передача большого количества пакетов управления. При росте скорости изменений в сети будет расти и количество пакетов, передаваемых и поэтому по достижении определенной скорости передачи и доли служебного трафика в сети произойдет снижение надежности передачи данных. В крупных сетях это явление наблюдается при менее динамичных изменениях. Таким образом, способность к масштабированию и надежность в беспроводных сенсорных сетях является конфликтующими параметрами, и увеличение одного из параметров приводит к уменьшению другого.

Как было показано в [7], среднее количество пакетов на один сеанс передачи фиксированного количества данных в сети возрастает в случае применения протокола AODV не пропорционально размеру сети, а экспоненциально. При дальнейшем росте сети, возможности по передаче данных будут исчерпаны, ведь общее количество пакетов для одной передачи данных будет фактически бесконечной. Это явление в значительной степени связано с ad hoc природою беспроводных сенсорных сетей. При росте сети увеличивается вероятность, что один из узлов на маршруте между источником и адресатом выйдет из строя, и появится необходимость выполнить обмен данными для исправления маршрутной информации. Таким образом, для повышения надежности сети необходимо уменьшить количество пакетов в одном сеансе передачи данных в больших беспроводных сенсорных сетях.

Один из способов увеличить масштабируемость сети, не снизив при этом ее надежность - это увеличение емкости сети, то есть количества данных, которая может быть передана в между узлами. Увеличение емкости даст сети возможность одновременно передавать большее количество пакетов при фиксированном размере сети. Один из способов повышения емкости - это увеличение производительности сети. Однако повышение производительности обычно увеличивает потребление энергии узлами, что недопустимо в большинстве сфер применения беспроводных сенсорных сетей. Таким образом, необходимо использовать альтернативные механизмы. К ним относятся использование большего количества шлюзов, повторное использование частот, агрегация данных [8]. Каждый из этих подходов увеличивает емкость сети, но имеет определенные недостатки.

*Использование нескольких шлюзов.* Обычно беспроводные сенсорные сети используют один узел-шлюз для агрегации данных от сенсоров и передачи их на обработку. При увеличении количества шлюзов уменьшается количество хопов, которые необходимо преодолеть пакетам, прежде чем они достигнут шлюза. Поскольку пакетам необходимо преодолевать меньше хопов, становится возможно передавать больше пакетов не увеличивая при этом общее количество хопов. В этом случае, шлюзы соединяются с основной сетью через систему связи с большей пропускной способностью. например Ethernet или 802.11.

*Повторное использование частот.* Использование нескольких каналов с перенастройкой рабочей частоты увеличивает надежность сети, уменьшая влияние интерференции и радиочастотного шума. Кроме того, перенастройки рабочей частоты или динамическое изменение канала может служить для передачи большего количества данных через радиоканал. Недостатком является потребление большего количества электроэнергии для одновременной работы на нескольких частотах. Например, узел сети должен будет содержать более сложную систему обнаружения маршрутов и восстановления канала, которые будут работать дольше, и потреблять больше энергии. Долгое время обнаружения маршрута также увеличит задержку передачи данных в сети. Кроме того, это увеличивает требования к памяти и микроконтроллера узла.

*Агрегация данных на узле.* При использовании этой методики, несколько пакетов с данными на узлах-маршрутизаторах объединяются в один, который передается по сети. Агрегация пакетов уменьшает количество пакетов, необходимо передавать в сети для передачи одинакового количества информации, уменьшает количество служебной информации при передаче по сети. Таким образом максимизируется производительность сети. При этом наблюдается рост задержки передачи пакетов.

**Выводы.** Сложное взаимодействие между требованиями по масштабируемости и надежности беспроводных сенсорных сетей требует решения задачи многокритериальной оптимизации, что отображается на архитектуре сети и выборе технологий. Это особенно важно для сфер применения БСС, где есть потребность в обработке большого количества данных в потоковом режиме, за высоких требований к емкости сети. Использование алгоритма маршрутизации Persistent Dynamic Routing позволяет преодолеть проблемы масштабирования, возникающих в условиях работы БСС в условиях динамических топологий. PDR значительно повышает вероятность доставки пакетов и уменьшает количество служебной информации, которую следует передавать при передаче пакета, повышая таким образом количество узлов в сети. Технологии повышения емкости сети, такие как использование нескольких

шлюзов, повторное использование частот, агрегирование данных на шлюзах дополнительно повышают способность БСС выполнять передачу больших объемов данных.

***Использованные источники информации (References):***

1. Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarabramaniam, and Erdal Cayirci: A Survey on sensor networks, IEEE Communications Magazine (2002).
2. Sarjoun S. Doumit, Dharma P. Agrawal: Self-Organizing and Energy-Efficient Network of Sensors, IEEE, pp. 1-6 (2002).
3. Abolhasan, M., Wysocki, T., Dutkiewicz, E., “A Review of Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks,” Ad Hoc Networks, Volume 2, Issue 1.
4. Chien-Chung Shen, Chavalit Srisathapornphat, Chaiporn Jaikaeo: Sensor Information Networking Architecture and Applications, IEEE Personal Communications, pp. 52-59 (August 2001).
5. Sokwoo Rhee, Sheng Liu: Techniques for Addressing Critical Requirements of Production-Grade Wireless Sensor Networks, SIcon/05 – Sensors for Industry Conference (8-10 February 2005)
6. Perkins, C. E., Royer, E. M., Das, S. R., “Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks,” IEEE Personal Communications, February 2001
7. Lee, S.J., et al, “Scalability study of the ad hoc on-demand distance vector routing protocol,” International Journal of Network Management, Volume 3, Issue 2, (2003) pp 97-114
8. Goldsmith, A. J., Wicker, S. B., “Design Challenges for Energy-Constrained Ad Hoc Wireless Networks,” IEEE Wireless Communications, August 2002.

*Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Дубко В.О.*