

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Л.И. Худоногова, С.В. Муравьев

*В беспроводных сенсорных сетях узлы подвержены отказам. В результате анализа выявлено, что существующие подходы к обеспечению отказоустойчивости либо не учитывают вопросы перегрузки сети и сохранения энергии, либо требуют дополнительных затрат на реализацию. Создание отказоустойчивого энергоэффективного алгоритма передачи с приоритетами, управляющего распределением нагрузки в сети, является актуальной задачей. Предложено выражение для расчета максимально возможного числа отказавших узлов.*

*Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, отказоустойчивость, кластерная топология, передача данных с приоритетами.*

### ВВЕДЕНИЕ

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) представляет собой распределенную самоорганизующуюся систему, состоящую из большого числа сенсорных узлов, которые осуществляют сбор данных об окружающей среде или объекте исследования и передают их на центральный узел. Благодаря таким преимуществам как сравнительно невысокая стоимость, миниатюрность узлов, низкое энергопотребление и отсутствие необходимости в регулярном техобслуживании, БСС находят все более широкое применение. Основными сферами использования БСС являются:

- экологический мониторинг;
- мониторинг состояния конструкций, зданий и сооружений;
- биологический и медицинский мониторинг;
- автоматизация систем безопасности (пожарной, сейсмической и др.) и жизнеобеспечения («Умный дом» и др.);
- диагностика промышленного оборудования;
- наблюдение за военными объектами;
- контроль транспортных потоков.

С развитием технологий БСС все большее внимание стало уделяться обеспечению целостности и достоверности передаваемых данных. В связи с этим одной из важнейших задач, возникающих перед разработчиками, стало создание отказоустойчивой сети. Узлы в БСС подвержены отказам вследствие разрядки элемента питания, поломки оборудования или нежелательных воздействий окружающей среды. Под отказоустойчивостью понимается возможность сети эффективно выполнять определенные для нее функции при наличии неисправных узлов. Сенсорная

сеть обладает способностью к ретрансляции сообщений по цепочке от одного узла к другому, что позволяет в случае выхода из строя одного из узлов организовать передачу через соседние узлы.

Проблема обеспечения отказоустойчивости активно исследовалась [1–5], в результате чего было найдено множество решений, позволяющих сохранять работоспособность сети при возникновении отказов. Целью данной работы является анализ существующих подходов к решению проблемы отказоустойчивости сети и оценка возможности создания отказоустойчивого протокола передачи данных с учетом их приоритета.

### ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ АЛГОРИТМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БСС

Одной из наиболее эффективных и масштабируемых топологий для БСС считается древовидная кластерная топология, где все множество узлов разделено на кластеры, каждый из которых имеет главу кластера (ГК) для обработки данных и принятия решений. Узлы не взаимодействуют друг с другом, а обмениваются сообщениями только с ГК. ГК может отправлять сообщения центральному узлу (ЦУ) и всем узлам-потомкам в своем кластере. Рассматриваемые далее в данной статье алгоритмы реализуются в сети с кластерной топологией и относятся к *централизованным*.

Степень отказоустойчивости существующих алгоритмов оценивается с точки зрения влияния отказов на такие показатели работы сети, как скорость доставки сообщений ЦУ, количество доставленных и потерянных сообщений, общие энергопотери при передаче, время жизни узлов. Рассмотрим основные

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

подходы, используемые в настоящее время для достижения отказоустойчивости БСС.

В работе [1] представлен алгоритм EFDR для выявления отказов. Алгоритм использует классификацию узлов в зависимости от причины отказа. Авторы выявляют пять компонентов узла, подверженных отказам: элемент питания, сенсор, передатчик, приемник и микроконтроллер. Если все компоненты узла работают в обычном режиме, узел относится к «исправным» узлам. Если был зарегистрирован отказ сенсора, узел переходит в категорию «транспортный». При отказе приемника или передатчика узел получает статус «крайний» или «тупиковый» соответственно. При отказе микроконтроллера или батареи узел считается «неисправным». Узел сам регистрирует отказы элемента питания и приемника, а остальные типы отказов выявляются соседями узла. При возникновении отказов ГК присваивает узлам соответствующие статусы. Предложен также энергоэффективный протокол маршрутизации для нахождения кратчайшего пути передачи сообщений от узла-источника к ЦУ через все доступные «исправные» и «транспортные» узлы.

В работе [2] предложено решение проблемы отказоустойчивости с помощью обеспечения альтернативных путей передачи данных от сенсорного узла к ЦУ. Предложенный алгоритм запускается на стадии планирования топологии сети, перед стадиями развертывания и функционирования. Предлагается ввести в сеть дополнительные узлы, предназначенные не для измерения, а только для передачи данных с других узлов. Таким образом, будет гарантировано, что для каждого узла существует  $k$  непересекающихся между собой путей до ЦУ, длина которых не превышает значения максимально возможной длины пути, заданного заранее. Предложены два алгоритма: Counting-Path позволяет для каждого узла рассчитать количество путей до ЦУ и найти  $k$  таких путей, а GRASP-ARP определяет минимальное число дополнительных узлов, которые нужно добавить в структуру сети для гарантии отказоустойчивости.

В статье [3] представлен алгоритм DFDR, обеспечивающий сохранение работоспособности сети при выходе из строя глав кластеров. Энергосбережение достигается за счет того, что при формировании кластеров узлы выбирают, к какому ГК присоединиться, на основании метрики, включающей в себя три параметра: расстояние от узла до ГК, оцениваемое по уровню мощности сигнала;

расстояние от ГК до ЦУ; количество оставшейся энергии ГК, которое передается узлу вместе с сообщением от ГК. Выбирая наименьшие расстояния и ГК с наибольшей оставшейся энергией, узел передает данные по пути, наименее затратному с точки зрения потребления энергии. При отказе ГК узлы из данного кластера могут вновь присоединиться к ГК из другого кластера на основании той же метрики. При этом те узлы, в зоне действия которых нет ни одного ГК, передают сообщения через другие сенсорные узлы, которые выступают в качестве ретранслятора для доставки сообщений до ГК.

Большинство из предложенных подходов обладает следующими недостатками: отказоустойчивые алгоритмы потребляют много энергии на выявление отказов и устранение их влияния, либо требуют дополнительных аппаратных и программных ресурсов, либо могут привести к возникновению перегрузки в сети.

### ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЙ ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ПРИОРИТЕТАМИ

Протокол передачи данных *Pritrans* [6] позволяет решить проблему перегрузки сети посредством назначения приоритетов передаваемым пакетам данных и первоочередной доставки пакетов с более высоким приоритетом. Экспериментальная апробация предложенного алгоритма демонстрирует хорошую пропускную способность сети при высокой скорости доставки пакетов с наиболее важной информацией.

Процесс передачи сообщений от узла к ЦУ состоит из следующих шагов:

1. Узлы-потомки отправляют ГК сообщения с измеренной информацией.

2. На каждом ГК запускается алгоритм нахождения отношения консенсуса, и в соответствии с полученным итоговым ранжированием ГК назначает приоритеты узлам. ГК также рассчитывает интервал ожидания передачи пакетов данных для каждого узла, используемый для контроля нагрузки каналов передачи данных ЦУ. Чем важнее информация, переданная узлом, тем меньший интервал ожидания ему назначается.

3. ГК отправляет пакеты, содержащие назначенные приоритеты и значение интервала ожидания, обратно узлам-потомкам.

4. В соответствии с их местом в итоговом ранжировании, узлы по очереди передают пакеты данных ЦУ.

Данный алгоритм не адаптирован к возникновению отказов, которые неизбежно бу-

дуг происходит при работе БСС. Сеть может быть признана надежной, только если ее работоспособность не снижается существенно из-за появления неисправных узлов. Первым шагом к обеспечению отказоустойчивости является определение числа узлов, которые могут выйти из строя, не нарушая работоспособности сети.

Предположим, что на некотором уровне сенсорной сети существует  $h$  узлов-предков (ГК), каждый из которых получает данные с  $n_i$  узлов-потомков. Обозначим за  $k$  число отказавших узлов. Узел считается отказавшим, если ЦУ не получает сообщений от этого узла в течение некоторого промежутка времени. Следовательно, число отброшенных пакетов может рассматриваться как число отказавших узлов. Тогда выражение из [6], устанавливающее связь между общим числом узлов и числом отброшенных пакетов, можно использовать для определения числа отказавших узлов. Таким образом, относительная несогласованность приоритетов при отказе  $k$  из  $n$  узлов выражается формулой (1):

$$\theta(n, k) = 1 - \frac{(n-k)(n-k-1)}{n(n-1)}, \quad (1)$$

где  $n$  – число узлов в сети,  $k$  – число отказавших узлов. Задаваясь значением параметра  $\theta(n, k)$ , можно определить число  $k$  при известном значении  $n$ . Например, при  $n = 300$  и принятой  $\theta(n, k) = 0,4$ , без последствий для работоспособности сети из строя могут выйти 70 узлов.

## ВЫВОД

В работе проведен анализ существующих подходов к обеспечению отказоустойчивости беспроводной сенсорной сети при возникновении отказов. Предложено модифицировать протокол передачи данных с приоритетами *Pritrans* с целью сделать его устойчивым к отказам. Представлено выражение для

расчета числа узлов, которые могут выйти из строя без серьезных последствий для работоспособности сети.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Banerjee, I. Effective fault detection and routing scheme for wireless sensor networks [Text] / I. Banerjee, P. Chanak, H. Rahaman, T. Samanta // Computers & Electrical Engineering. – Feb. 2014. – Vol. 40, issue 2. – P. 291–306.
2. Sitanayah, L. A fault-tolerant relay placement algorithm for ensuring  $k$  vertex-disjoint shortest paths in wireless sensor networks [Text] / L. Sitanayah, K. N. Brown, C. J. Sreenan // Ad Hoc Networks. – Dec. 2014. – Vol. 23. – P. 145–162.
3. Azharuddin, Md. Energy efficient fault tolerant clustering and routing algorithms for wireless sensor networks [Text] / Md. Azharuddin, P. Kuila, P. K. Jana // Computers & Electrical Engineering. – Jan. 2015 – Vol. 41. – P. 177–190.
4. Qiu, M. Informer homed routing fault tolerance mechanism for wireless sensor networks [Text] / M. Qiu, Zh. Ming, J. Li, J. Liu, G. Quan, Y. Zhu // Journal of Systems Architecture. – April-May 2013. – Vol. 59, issues 4–5. – P. 260–270.
5. Hsieh, H. C. A new solution for the Byzantine agreement problem [Text] / H. C. Hsieh, M. L. Chiang // Journal of Parallel and Distributed Computing. – Oct. 2011. – Vol. 71, issue 10. – P. 1261–1277.
6. Muravyov, S. Consensus rankings in prioritized converge-cast scheme for wireless sensor network [Text] / S. Muravyov, S. Tao, M. C. Chan, E. Tarakanov // Ad Hoc Networks. – Jan. 2015. – Vol. 24, part A. – P. 160–171.

**Худоногова Л.И.** – ассистент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Томского политехнического университета, тел. (3822) 41-75-27, e-mail: [likhud@tpu.ru](mailto:likhud@tpu.ru).

**Муравьев С.В.** – д.т.н., проф. кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Томского политехнического университета, тел. (3822) 41-75-27, e-mail: [muravyov@tpu.ru](mailto:muravyov@tpu.ru).