

## Раздел V. Телекоммуникации и информационная безопасность

УДК 621.372.88 (075)

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-234-246

А.Г. Сергушев

### АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

*Статья посвящена вопросу построения отказоустойчивых беспроводных сенсорных сетей систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС). Данный подход представляет наибольший интерес при построении СМИС на протяженных и рассредоточенных объектах, к которым относятся, в первую очередь, промышленные здания и сооружения. Ключевым свойством, определяющим отказоустойчивость сенсорной сети, является ее самоорганизация (способность образования группировки с любым узлом сети, находящимся в зоне действия антенны), позволяющая видоизменять конфигурацию сети. Особенно актуальным рассматриваемое свойство беспроводных сенсорных сетей является при построении СМИС потенциально опасных промышленных объектов, особо опасных, технически сложных и уникальных объектов, требования к надежности, информативности и оперативности обработки информации которых носят специальный характер. В статье ставится задача проектирования отказоустойчивой беспроводной сенсорной сети систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Определяются три взаимосвязанные проблемы, возникающие при проектировании беспроводной сенсорной сети СМИС: обеспечение возможности беспроводной сенсорной сети динамически приспосабливаться к особенностям работы при решении конкретной задачи в данный момент времени, обеспечение низкого энергопотребления узла при условии, что данный узел беспроводной сенсорной сети в произвольный момент времени может взять на себя функции маршрутизатора, обеспечение адаптации беспроводной сенсорной сети к увеличению объема передаваемого трафика, вследствие изменения потребности получения информации об объекте мониторинга или окружающей его среды. Кроме этого, беспроводная сенсорная сеть СМИС может содержать тысячи узлов и наиболее важным свойством сети, в целом, должно быть выполнение сетью своих функций даже при выходе из строя максимально возможного числа узлов (так называемая, критическая отказоустойчивость беспроводной сенсорной сети). Исходя из этого, в статье ставится задача разработки специальных архитектур беспроводной сенсорной сети и соответствующих им алгоритмов маршрутизации данных и управления узлами. Исследуются алгоритмы выбора центрального узла в сегменте отказоустойчивой беспроводной сенсорной сети, формирования доступа и связанности отказоустойчивой беспроводной сенсорной сети и построения таблицы маршрутизации отказоустойчивой беспроводной сенсорной сети. На основании проведенных исследований предложен вариант реализации алгоритма маршрутизации беспроводной сенсорной сети, обеспечивающий повышение ее отказоустойчивости.*

*Система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений; беспроводная сенсорная сеть; отказоустойчивая беспроводная сенсорная сеть; алгоритм маршрутизации.*

A.G. Sergushev

## ROUTING ALGORITHM FOR FAULT-TOLERANT WIRELESS SENSOR NETWORK

*The article is devoted to the construction of fault-tolerant wireless sensor networks of monitoring and control systems of engineering systems for buildings and structures (SMIS). This approach is of the greatest interest in the construction of SMIS on long and dispersed objects, which include, first of all, industrial buildings and structures. The key property that determines the fault tolerance of the sensor network is its self-organization (the ability to form a group with any network node located in the antenna area), which allows modifying the network configuration. The considered property of wireless sensor networks is particularly relevant in the construction of SMIS of potentially dangerous industrial facilities, especially dangerous, technically complex and unique objects, the requirements for reliability, information content and efficiency of information processing of which are of a special nature. The article sets the task of designing a fault-tolerant wireless sensor network of monitoring and control systems of engineering systems of buildings and structures. Identified three interrelated problems that arise when designing wireless sensor networks SMEs: enabling wireless sensor networks to dynamically adapt to the peculiarities of work in dealing with a specific task in a given time, ensuring low energy consumption of the node provided that the node wireless sensor network in arbitrary moment of time can take on the functions of a router, ensuring the adaptation of wireless sensor network to increase the traffic volume, due to the change in the need to obtain information about the monitoring object or its environment. In addition, the wireless sensor network SMIS can contain thousands of nodes and the most important property of the network, in General, should be the performance of network functions even when the maximum number of nodes (the so-called critical fault tolerance of the wireless sensor network). Based on this, the article aims to develop special architecture of wireless sensor network and corresponding algorithms of data routing and control nodes. The algorithms of selection of the Central node in the segment of fault-tolerant wireless sensor network, formation of access and connectivity of fault-tolerant wireless sensor network and construction of the routing table of fault-tolerant wireless sensor network are investigated. On the basis of the conducted researches the variant of realization of the routing algorithm of a wireless sensor network providing increase of its fault tolerance is offered.*

*Monitoring and control system of engineering systems of buildings and structures; wireless sensor network; fault-tolerant wireless sensor network; routing algorithm.*

### **Введение в проблему построения отказоустойчивой сенсорной сети.**

Одной из современных тенденций развития систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС) является их реализации на базе беспроводной сенсорной сети датчиков параметров объекта и окружающей его среды, а также исполнительных устройств. Данный подход представляет наибольший интерес при построении СМИС на протяженных и рассредоточенных объектах, к которым относятся, в первую очередь, промышленные здания и сооружения [1, 4, 8–10]. При этом наиболее важным свойством, определяющим отказоустойчивость беспроводной сенсорной сети, является самоорганизация (процесс автоматического построения беспроводной сенсорной сети относительно произвольного сочетания узлов сети, находящихся в зоне действия передатчиков друг друга). Особенно важным свойство самоорганизации беспроводных сенсорных сетей становится при построении СМИС потенциально опасных промышленных объектов, особо опасных, технически сложных и уникальных объектов, требования к надежности, информативности и оперативности обработки информации в которых носят особый характер [5].

Самоорганизующейся беспроводной сенсорной сетью называется такая сеть, не имеющая определенной архитектуры и заранее заданного распределения функций между узлами сети, количество узлов в которой является случайным во времени и может изменяться от некоторого минимального значения до некоторого максимального значения [1, 4–23]. Таблица маршрутизации между узлами в подобной сети случайна во времени и строится для решения конкретной задачи в данный момент времени [1, 8–23].

**Постановка задачи проектирования отказоустойчивой сети.** Исходя из практического опыта, можно сделать вывод о наличии трех взаимосвязанных проблем, возникающих при проектировании беспроводной сенсорной сети СМИС. Топология беспроводной сенсорной сети СМИС должна иметь возможность меняться в зависимости от энергопотребления, режима работы и работоспособности конкретного узла беспроводной сенсорной сети. Первая проблема, возникающая при проектировании сети, заключается в необходимости обеспечить возможность сети динамически приспосабливаться к особенностям работы при решении конкретной задачи в данный момент времени. Вторая проблема, возникающая при проектировании сети, заключается в обеспечении низкого энергопотребления узла при условии, что данный узел сети в произвольный момент времени может взять на себя функции маршрутизатора. Третья проблема, возникающая при проектировании сети, заключается в необходимости обеспечить адаптацию сети к увеличению объема передаваемого трафика, вследствие изменения потребности получения информации об объекте мониторинга или окружающей его среды.

Беспроводная сенсорная сеть СМИС может содержать тысячи сенсорных узлов и наиболее важным свойством сенсорной сети, в целом, должно быть выполнение сетью своих функций даже при выходе из строя максимально возможного числа узлов (так называемая, критическая отказоустойчивость беспроводной сенсорной сети). Исходя из этого, возникает задача разработки специальных архитектур беспроводной сенсорной сети и соответствующих им алгоритмов маршрутизации данных и управления узлами [1–23].

Сегментная организация беспроводной сенсорной сети считается наиболее подходящей для решения подобных задач, при условии выбора оптимальной архитектуры сегментированной беспроводной сенсорной сети и алгоритма маршрутизации данных, определяемого выбором центрального узла сегмента сети в случайный момент времени [1, 3, 6].

**Алгоритм выбора головного узла в сегменте отказоустойчивой сети.** Для разработки архитектуры беспроводной сенсорной сети и оптимального алгоритма выбора центрального узла сегмента сети построим диаграмму покрытия беспроводной сенсорной сети на основе аппроксимации выбранной в работах [2, 3] с учетом оптимизации энергопотребления.

Областью действия узла беспроводной сенсорной сети является такая область, в пределах которой данным узлом может быть принято любое сообщение от другого узла, находящего в ней [2, 3, 6, 7]. Группа узлов является родственной данному узлу в том случае, если они входят в область его действия [1–3, 6, 7].

На основе правила аппроксимации, предложенной в работах [2, 3] проведем условное разбиение зоны покрытия сегмента беспроводной сенсорной сети на некоторое конечное количество фрагментов, таким образом, чтобы каждый такой фрагмент максимально соответствовал только одному узлу беспроводной сенсорной сети [1, 2]. Подобное разбиение, как раз, будет максимально соответствовать аппроксимации, предложенной в работах [2, 3].

Полученные, таким образом, фрагменты разбиения зоны покрытия сегмента беспроводной сенсорной сети составляют конечный набор фрагментов в пространстве беспроводной сенсорной сети. Причем набор, составленный так, что каждый его элемент включает только один фрагмент.

В общем случае, топология беспроводной сенсорной сети при выбранном конечно наборе фрагментов разбиения сегментов может быть представлена в виде выпуклого  $n$ -угольника [2]. Исходя из данной аппроксимации производится оптимизация топологии беспроводной сенсорной сети относительно размещения ее узлов в кластерах на основе методологии, представленной в работах [1, 2].

Полученная, в результате, оптимизации по методике, изложенной в работах [1, 2], топология достаточна для построения архитектуры беспроводной сенсорной сети. Однако она не учитывает энергетическую балансировку узлов беспроводной сенсорной сети и, соответственно, их энергетическую эффективность.

Учет энергетической балансировки узлов беспроводной сенсорной сети проведем, в первом приближении, посредством введения в алгоритм выбора центрального узла сегмента беспроводной сенсорной сети математического ожидания количества узлов с установившимся уровнем заряда аккумуляторной батареи.

При этом, при разработке алгоритма выбора центрального узла беспроводной сенсорной сети применяются некоторые теоремы связности и покрытия, предложенные в работах [1, 2].

1. Допустим, что известен размер области действия узла и количество взаимосвязанных узлов. Область покрытия, аппроксимацией которой является выпуклый  $n$ -угольник, гарантирует взаимодействие заданного количества взаимосвязанных узлов, если достоверно известно, что данное количество узлов, расположенных в ней, и ее ширина не превосходят размер.

2. Допустим, что известен размер области действия узла, но количество взаимосвязанных узлов не более трех. Область покрытия, аппроксимацией которой является выпуклый  $n$ -угольник, гарантирует взаимодействие взаимосвязанных узлов, если достоверно известно, что пересечение аппроксимаций областей действия узлов не является пустым.

3. Допустим, что размер области действия узла известен с некоторой вероятностью и количество взаимосвязанных узлов не более трех. Область покрытия, аппроксимацией которой является выпуклый  $n$ -угольник, гарантирует взаимодействие взаимосвязанных узлов, если достоверно известно, что пересечение аппроксимаций областей действия узлов не является пустым в данный момент времени.

4. Допустим, что размер области действия узла известен с некоторой вероятностью и количество взаимосвязанных узлов известно с некоторой вероятностью. Область покрытия, аппроксимацией которой является выпуклый  $n$ -угольник, гарантирует взаимодействие взаимосвязанных узлов, если достоверно известно, что, хотя бы один, смежный фрагмент содержит пересечение аппроксимаций областей действия активных узлов.

В том случае, когда все узлы беспроводной сенсорной сети имеют одинаковые области действия и соответственно одинаковые размеры области действия узлов, тогда топология сети строится достаточно легко. Для построения топологии в этом случае в работах [1, 2] предлагается структура беспроводной сенсорной сети, разделенная на треугольники со стороны соответствующей размеру области действия узла сети, такие, что два смежных фрагмента пересекаются, сложенные по дуге. Алгоритм выбора головного узла отказоустойчивой сети при этом выглядит так.

**Шаг 1.** Поиск узла беспроводной сенсорной сети с максимальным энергетическим потенциалом.

**Шаг 2.** Поиск парных ему (см. шаг. 1) по энергетическому потенциалу узлов.

**Шаг 3.** Поиск узлов с энергетическим потенциалом из диапазона энергетических потенциалов узла, с максимальным энергетическим потенциалом.

**Шаг 4.** Ранжирование узлов относительно узла с максимальным энергетическим потенциалом.

**Шаг 5.** Расстановка методом попарной медианной фильтрации узлов относительно ранга по весовым коэффициентам.

**Шаг 6.** Составление таблицы ранжированного размещения головных узлов сегментов.

Моделирование беспроводной сенсорной сети с предложенным алгоритмом выбора головного узла в сравнении с известными алгоритмами проводилось в среде Network Simulator 3 (NS3). Моделирование проводилось на беспроводной сенсорной сети с заданным количеством узлов – 1000, при условии динамического сегментирования. Размещение узлов в пространстве, заданное координатами  $(x,y,z)$ , производилось случайным образом в соответствии с равномерным законом распределения.

Построение топологий беспроводной сенсорной сети при моделировании производилось двумя способами: равномерным и неравномерным. Неравномерное построение топологии беспроводной сенсорной сети при моделировании соответствует неравномерному закону распределения узлов в пространстве, когда какие-либо узлы беспроводной сенсорной сети группируются в определенной пространства, что, в свою очередь обеспечивает большую область покрытия в данной части пространства размещения узлов.

На рис. 1 представлены результаты моделирования в среде NS3 для предложенного алгоритма выбора центрального узла в сравнении с известными алгоритмами, а в таблице приведены параметры моделирования.

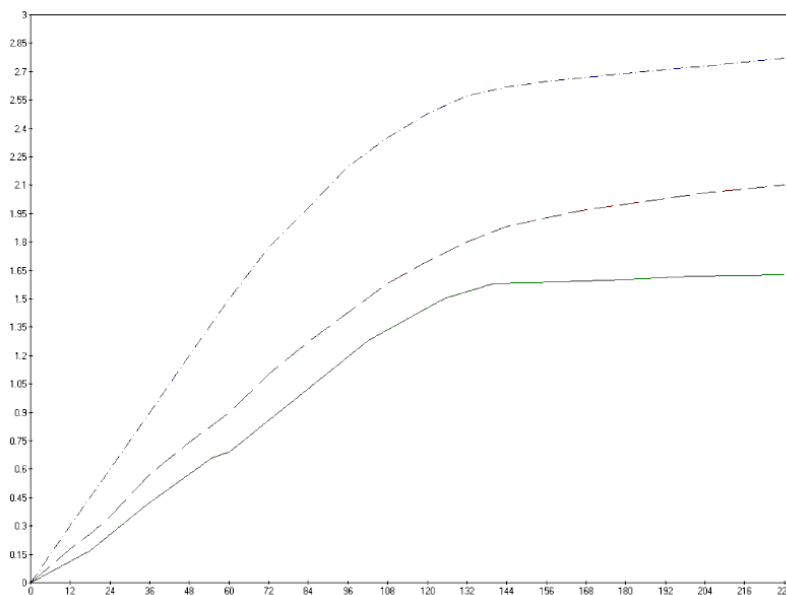


Рис. 1. Отображение процесса моделирования для разных алгоритмов выбора центрального узла

Таблица

## Параметры моделирования

№ п/п	Параметр	Обозначение
1	Базовая энергия узла	$E_B$
2	Эффективная энергия узла	$E_{EF}$
3	Коэффициент усиления	$G_B$
4	Мультисетевая постоянная	$G_{MP}$
5	Потери энергии на участках распространения	$N_E$
6	Порог энергии центрального узла	$E_{TH}$
7	Размер пакета	$K_N$
8	Скорость пакета	$V_K$
9	Широкополосная зона вещания	$RS_H$
9	Зона узла	$R$
9	Зона сегмента	$R_I$

Одним из самых известных механизмов, обеспечивающих функционирование беспроводных сенсорных сетей и выбор центральных узлов, является алгоритм LEACH [1]. Алгоритм LEACH предусматривает вероятностный выбор узла на роль центрального при запуске сети, а в процессе функционирования смену центрального узла на основе энергетических характеристик других узлов сети.

При этом в сегменте каждый узел генерирует случайное число в диапазоне от 0 до 1, узел имеет порог –  $Th(LEACH)$ , который соответствует предварительно определенному числу центральных узлов в сети. Если интегрированное случайное число меньше, чем порог, тогда узел может стать центральным. В противном случае данный узел остается только членом сегмента. Вычисление порога является ключевой задачей при реализации алгоритма LEACH и производится по известной формуле [1]:

$$Th(LEACH) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \cdot (r \cdot \text{mod} \frac{1}{p})}, & \text{if } n \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

В формуле (1)  $p$  – заданный процент центральных узлов среди всех узлов. Оптимальное значение  $p$  оценивается в 5 % от общего числа узлов. Текущий интервал функционирования беспроводной сенсорной сети определяется как  $r$ ,  $G$  – число узлов, которые не были выбраны головными за последние  $1/p$  интервалов. Данное уравнение определяет тот факт, что узел, который был центральным в последних интервалах функционирования беспроводной сенсорной сети, не имеет возможности совсем или имеет минимальную возможность стать центральным в данном интервале. В результате, такой выбор центрального узла способствует балансу энергетических потенциалов каждого из узлов беспроводной сенсорной сети. Кроме того, при выборе центрального узла другие узлы выбирают одного из членов сегмента для контроля за мощностью получаемого сигнала от центрального узла. Данное правило увеличивает длительность функционирования узлов и беспроводной сенсорной сети в целом, но не обеспечивает максимального покрытия в течение длительного времени. Кроме того, алгоритм LEACH не обеспечивает связанность сети при динамической маршрутизации.

Алгоритм осведомленности об остаточной энергии ERA [1] является развитием алгоритма LEACH и включает в анализ вопроса выбора центрального узла в сегменте и затраты на осуществление информационного обмена. Затраты на осуществление информационного обмена включают в себя остаточную энергию головного узла сегмента, затраты энергии на взаимодействие головного узла с базовой станци-

ей, затраты энергии на взаимодействие членов кластера с головным узлом. В этом состоит принципиальная разница с другими алгоритмами: алгоритм ERA использует ту же схему выбора головного узла, что и LEACH, но обеспечивает лучший выбор центрального узла за счет использования дополнительных параметров, определенных выше. Уравнения (2) помогают определять затраты сегмента беспроводной сенсорной сети при выборе того или иного узла в качестве центрального и найти центральный узел сегмента с максимальной остаточной энергоемкостью. В (2) множество  $S_c$  является множеством для центральных узлов, множество  $S_N$  является множеством для членов кластера беспроводной сенсорной сети.

$$\begin{cases} (E_{CH-res})_i = (E_{CH-rem})_i - (E_{toBS})_i, & i \in S_c; \\ (E_{nonCH-res})_j = (E_{nonCH-rem})_j - (E_{toBS})_{ji}, & j \in S_N, i \in S_c; \\ \max\{(E_{CH-res})_i + (E_{nonCH-res})_j | \forall i \in S_c\}, & j \in S_N. \end{cases} \quad (2)$$

В работе [2] был разработан новый алгоритм выбора центрального узла в сегменте для решения проблем покрытия – CHSC, который является распределенным алгоритмом и может быть использован для однородных беспроводных сенсорных сетей, где наиболее важным параметром является полное покрытие в течение достаточно длительного времени. Данный алгоритм основывается на периметрическом покрытии и выборе наилучшего кандидата на уровень центрального узла сегмента из всех узлов, входящих в рассматриваемую сеть. Однако алгоритм не учитывает энергетическую балансировку узлов сети и оптимизацию топологии по наименьшему пути передачи данных до центрального узла.

На рис. 2 изображена однородная сегментированная беспроводная сенсорная сеть, покрывающая полностью некую плоскость  $S$ . Как уже отмечалось выше, любой из обычных узлов (на рис. 2 изображен как член сегмента) может стать центральным, как, впрочем, и наоборот. Параметр  $R_{STL}$  в определенной степени вносит упорядоченность в структуру сегментированной беспроводной сенсорной сети. При этом любой узел в пределах своего сегмента обращается к центральному узлу напрямую, в то время как передача информации от центрального узла к координатору беспроводной сенсорной сети может быть и многошаговой.

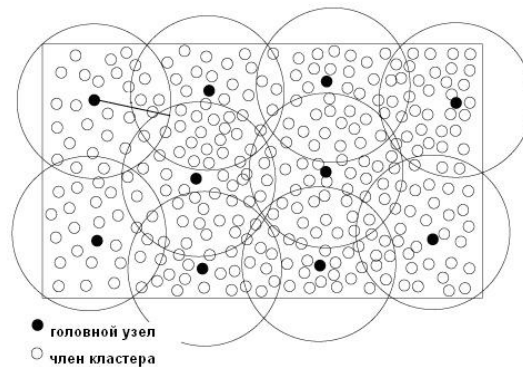


Рис. 2. Сегментация беспроводной сенсорной сети

Алгоритм вначале собирает информацию об остаточной энергии для всех узлов (если остаточная энергия  $i$ -го узла равна 0, то этот узел исключается из дальнейшего функционирования в сети). Информация об остаточной энергии рассылается каждым узлом в области, определяемой дальностью действия узла с беспроводной сенсорной сети. После получения информации от всех соседей каждый

узел выполняет алгоритм медианной фильтрации для проверки карты покрытия. Поскольку сеть стационарна и узлы находятся в фиксированном положении, соседние узлы обмениваются информацией о своем местоположении только один раз – при инициализации сети.

Перечень и значения параметров при моделировании являлись типовыми и применялись для оценки эффективности алгоритма выбора центрального узла.

Сравнительный анализ показывает существенное преимущество рассматриваемого алгоритма как над базовым алгоритмом LEACH, так и над алгоритмом CHSC. В сенсорной сети одной топологии при использовании базового алгоритма LEACH энергия в 300 Дж расходуется менее чем за  $2 \cdot 10^4$  с, в то время, как в предложенном алгоритме это время составляет около  $5 \cdot 10^4$  с.

Каждый из узлов на следующем цикле опроса беспроводной сенсорной сети может объявить себя новым центральным узлом в сегменте. Это происходит при условии, что за время опроса узел не получил никаких информационных сообщений от любых других узлов, объявивших себя центральными. При объявлении себя центральным узлом узел рассылает команду другим узлам, находящимся в пределах его зоны действия. Принятие решения об объявлении себя центральным узлом осуществляется на основе возможности обеспечения лучшего покрытия и наличия достаточной энергии. Команда центрального узла содержит информацию о местонахождении нового центрального узла сегмента. После получения сообщения от нового центрального узла сегмента все узлы беспроводной сенсорной сети в пределах зоны его покрытия исключают себя из процедуры постановки себя на роль центрального узла.

Каждый узел содержит таблицу всех центральных узлов, от которых он получил команду об объявлении себя центральным. Данная информация используется узлом для принятия решения о том, членом какого сегмента этот узел будет в данном цикле опроса сети. В случае возникновения коллизии, когда два узла с подходящими характеристиками объявляют себя центральными в пределах одной и той же области, центральный узел определяется по критерию наибольшей остаточной энергии.

Модифицированный алгоритм выбора центрального узла отказоустойчивой беспроводной сенсорной сети при этом выглядит так.

**Шаг 1.** Поиск узла с максимальным энергетическим потенциалом.

**Шаг 2.** Поиск парных ему (см. шаг. 1) по энергетическому потенциалу.

**Шаг 3.** Поиск узлов с энергетическим потенциалом из диапазона узла с максимальным энергетическим потенциалом.

**Шаг 4.** Ранжирование узлов относительно узла с максимальным энергетическим потенциалом.

**Шаг 5.** Расстановка методом попарной медианной фильтрации узлов относительно ранга по весовым коэффициентам.

**Шаг 6.** Составление таблицы ранжированного размещения центральных узлов сегментов.

**Шаг 7.** Если два узла объявлены центральными в сегменте, то производится запрос уровня остаточного заряда аккумуляторной батареи.

**Шаг 8.** Определение центрального узла по максимальному уровню остаточного заряда аккумуляторной батареи.

**Алгоритм формирования расписания доступа и связанности отказоустойчивой беспроводной сенсорной сети.** Процесс работы беспроводной сенсорной сети на основе заданного периода опроса состоит из следующих двух этапов, выполняющихся последовательно:



1 этап – координатор передает и устанавливает каждому оконечному узлу маршрут передачи сообщений на координатор через маршрутизаторы,

2 этап – координатора устанавливает режим работы каждого из узлов беспроводной сенсорной сети (интервал опроса, время и объем передаваемых данных, режим работы узла).

Если хотя бы один узел беспроводной сенсорной сети отказывает, то координатор меняет таблицу маршрутизации и режимы работы. Критерий остаточной энергии REC определяется для каждого узла по формуле, приведенной в работе [7].

Входными данными для алгоритма формирования расписания доступа и связанности отказоустойчивой беспроводной сенсорной сети являются: количественные параметры узлов, последовательный список узлов маршрута передачи сообщения от  $i$ -го оконечного узла через маршрутизаторы к координатору и структура сети, представленная в виде графа. В процессе работы алгоритм устанавливает запреты перехода по ребрам графа в зависимости, как от состояния радиоканала, так и от работоспособности узла и устойчивости маршрута через парный узел.

Алгоритм последовательно строит для  $i$ -го оконечного узла беспроводной сенсорной сети расписание работы, как самого узла, так и множества узлов, составляющих маршрут от узла  $i$ -го узла через маршрутизаторы к координатору. В процессе последовательного формирования расписаний для оконечных узлов сети алгоритм устанавливает запреты на передачу сообщений по ребрам графа в определенные моменты времени. Эти запреты устанавливаются для устранения конфликтов, возникающих в сети. Правила установки запретов при передаче  $i$ -м узлом сообщения узлу  $j$ -му в момент времени  $t$  и длительностью передачи  $\Delta T$  определяются так: установить запрет на передачу по всем ребрам, инцидентным  $j$ -му узлу; установить запрет на передачу по всем ребрам, инцидентным  $i$ -му узлу; установить запрет на передачу сообщений по всем исходящим ребрам узлов, смежных с  $j$ -м узлом; установить запрет на передачу сообщений по всем входящим ребрам узлов, смежных с  $i$ -м узлом.

В результате, на каждом шаге формирования расписаний работы узлов связанного маршрута строится такое расписание передачи данных через узлы беспроводной сенсорной сети данного маршрута, чтобы выполнялось условие по минимизации энергопотребления узлов маршрута:

$$\sum_{i=0}^N E_i,$$

где  $N$  – количество узлов беспроводной сенсорной сети,  $E_i$  – суммарная энергия, потребляемая  $i$ -м узлом за один период опроса. Энергопотребление  $i$ -го узла рассчитывается с учетом задержки времени доставки сообщения от узла к координатору.

Значение  $E_i$  определено по формуле:

$$E_i = U \cdot \sum_{j=0}^k I_{ij} \Delta_{ij},$$

где  $I_{ij}$  – потребляемый  $i$ -м узлом беспроводной сенсорной сети ток времени опроса сети  $t_j$ ,  $\Delta_{ij}$  – интервал времени нахождения  $i$ -го узла в состоянии, соответствующем дискретному моменту времени  $t_j$ ;  $U$  – напряжение питания узла беспроводной сенсорной сети.

Оконечный узел беспроводной сенсорной сети переходит в сон, если непрерывный интервал времени  $\Delta_{WR}$  в расписании работы узла между двумя его активными состояниями приема/передачи данных удовлетворяет условию:

$$\Delta_{WR} > \max(\Delta_{WU} + \Delta_{SP}, \Delta_{SR} + \Delta_{PS} + \Delta_{DF}), \quad (3)$$

где  $\Delta_{WU}$  – время передачи сообщения,  $\Delta_{SP}$  – время формирования передаваемого сообщения,  $\Delta_{SR}$  – время приема сообщения,  $\Delta_{PS}$  – время обработки принятого сообщения,  $\Delta_{WR}$  – время формирования подтверждения принятого сообщения.

Расписание работы узлов беспроводной сенсорной сети узлов, полученное с помощью данного алгоритма, зависит от дисциплины опроса оконечных узлов беспроводной сенсорной сети узлов, от последовательности формирования расписаний для маршрутов от оконечного узла беспроводной сенсорной сети к координатору и времени выбора головного узла сегмента.

Алгоритм учитывает отказы оконечных узлов сети, возникающие вследствие отказа их компонентов и вследствие разрядки их аккумуляторных батарей.

**Алгоритм построения таблицы маршрутизации отказоустойчивой сенсорной сети.** Каждый узел беспроводной сенсорной сети генерирует при опросе пакет данных, включающий в себя значения измеряемого им параметра. За цикл опроса все пакеты (от каждого из беспроводных сенсорных узлов) должны быть переданы координатору беспроводной сенсорной сети. Общее время опроса всей сети определяется как  $T_0 = (t_c + t_{\text{И}} + t_0 + t_{\text{П}}) \cdot N + t_M \cdot L$ , где  $t_c$  – время сканирования сети узлом,  $t_{\text{И}}$  – время измерения параметра одним узлом,  $t_0$  – время обработки результатов измерения микроконтроллером узла,  $t_{\text{П}}$  – время на передачу пакета узлом,  $N$  – количество узлов,  $t_M$  – время на маршрутизацию пакета от одного узла,  $L$  – количество маршрутизируемых узлов. Общее время опроса сети разбивается на базовые интервалы, которые определяют время опроса одного узла. При этом каждый узел за время своего базового интервала осуществляет 4 действия: 1) прием команды на измерение, 2) измерение параметра, 3) обработка результатов измерения, 4) передача данных. Процедура сбора данных сенсорной сети описывается конечным множеством событий опроса узлов сети

$$\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_N\},$$

где  $C_i$  – событие «опрос  $i$ -го узла» за время базового интервала опроса представляет собой конечный автомат, определяющий процедуру передачи сообщения от  $i$ -го узла к координатору сети на  $i$ -м шаге через маршрутизаторы соответствующие  $i$ -й трассе таблицы маршрутизации.

Основное требование к алгоритму маршрутизации заключается в его способности динамически менять топологию сети в зависимости от изменения условий решаемой задачи и условий внешней среды.

При динамическом построении таблицы маршрутизации отказоустойчивой сети можно выделить следующие базовые шаги:

**Шаг 1.** Поиск записи в таблице маршрутизации, соответствующей номеру текущего узла беспроводной сенсорной сети.

**Шаг 2.** Сканирование сети для обнаружения соседних с текущим узлом.

**Шаг 3.** Создание списка соседних с текущим узлом сети.

**Шаг 3.** Выбор первого номера из списка соседних с текущим узлом.

**Шаг 4.** Поиск выбранного номера узла в таблице маршрутизации.

**Шаг 5.** Если выбранного номера узла нет в таблице маршрутизации, то добавляем его в нее.

**Шаг 6.** Если выбранный номер узла есть в таблице маршрутизации, то пропускаем и переходим к следующему по списку номеру узла беспроводной сенсорной сети.

Передатчик радиотрансивера узла сенсорной сети имеет  $k$  дискретных перестраиваемых уровней выходного сигнала. При изменении уровня передачи, с одной стороны, меняется максимально возможное расстояние между узлами беспроводной сенсорной сети, с другой, снижается энергопотребление узла. При энергетической балансировке можно добиться заметного снижения энергопотребления и, как следствие, увеличения времени автономности. С этой

целью, в алгоритм вводят процедуру сканирования смежных относительно  $i$ -го узлов при динамическом построении таблицы маршрутизации при дискретном переборе  $k$  возможных уровней сигнала передатчика. Таким образом, чтобы общий расход энергии всеми узлами сети удовлетворял условию минимальности  $E \rightarrow \min$  для тока потребления соответствующего счетному уровню мощности из множества

$$p = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_k\},$$

где  $p_k$  – мощность соответствующего  $k$ -го уровня выходного сигнала передатчика, определяющая его минимальное потребление при условии наличия не менее 2 смежных маршрутных узлов. Динамическая таблица маршрутизации позволяет строить оптимальные трассы передачи данных узлами сенсорной сети на каждом шаге итераций при сборе данных координатором.

Алгоритм построения трассы передачи данных от  $i$ -го произвольному узлу по динамической таблице маршрутизации, приведен на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм построения трассы передачи данных от  $i$ -го узла произвольному узлу беспроводной сенсорной сети

**Заключение.** Таким образом, в результате проведенного исследования сформулирован подход к разработке алгоритма маршрутизации и предложен вариант реализации алгоритма маршрутизации в беспроводной сенсорной сети, обеспечивающий повышение ее отказоустойчивости по сравнению с известными алгоритмами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гольдштейн, Б.С., Кучерявый А.Е.* Сети связи пост-NGN. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 160 с.
2. *Салим А.А.Э.А.* Разработка алгоритмов выбора головного узла в кластерных беспроводных сенсорных сетях: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУТ, 2010. – 27 с.
3. *Прокопьев А.В.* Разработка и исследование моделей нагрузки в беспроводных сенсорных сетях: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУТ, 2012. – 19 с.
4. *Акимов Е.В.* Сравнение топологий беспроводных сенсорных сетей // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. - № 8. – 240 с.
5. *Михайлов, А., Молев Ф., Сергушев А., Ширманов А.* Сенсорная сеть – основа системы мониторинга состояния зданий // Первая миля. – 2013. – № 6. – С. 32-36.
6. *Мочалов В.А.* Разработка и исследование алгоритмов построения отказоустойчивых сенсорных сетей: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МТУСИ, 2011. – 21 с.
7. *Тараканов Е.В.* Агрегирование данных мультисенсоров в беспроводных сенсорных сетях: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Томск: НИ ТПУ, 2012. – 19 с.
8. *Ляхов А.И., Пустогаров И.А., Шпилев С.А.* Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности // Информационные процессы. 2008. – Т. 8, № 3. – С. 173-192.
9. *Трифонов С.В., Холодов Я.А.* Исследование и оптимизация работы беспроводной сенсорной сети на основе протокола ZigBee // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 855-869.
10. *Борисенко А.С.* Методы оптимизации для MESH сети в ZIGBEE // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 1. – С. 24-29.
11. *Vision and Challenges for realizing the Internet of Things.* European Commission. 2010.
12. *Megerian S., Koushanfar F., Potkonjak M., Srivastava M.B.* Worst and best-case coverage in sensor networks // IEEE Transactions on Mobile Computing. – Jan.-Feb. 2005. – Vol. 4, Issue 1.
13. *Ananda A., Mun Choon Chan, Wei Tsang Ooi.* Mobile Wireless and Sensor Networks Technology Applications and Future Directions. John Wiley & Sons; 2006.
14. *Akyildiz F., Pompili D., Melodia T.* Underwater acoustic sensor networks: research challenges // Ad Hoc Networks Journal, Elsevier. – May 2005. – Vol. 3, Issue 3.
15. *Akyildiz I.F., Vuran M.C., Akan O.B., Su W.* Wireless Sensor Networks: A Survey revisited // Computer Networks Journal. A Survey revisited. Computer Networks Journal. – 2005.
16. RFC4919. IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals. 2007.
17. *Bose P., Morin P., Stojmenovic I., Urrutia J.* Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks // Wireless Networks. – 2001. – Vol. 7, no. 6.
18. *Poikselka M., Mayer G.* The IMS: IP Multimedia Concepts and Services. – 3<sup>rd</sup> Edition. J. Wiley&Sons, 2009.
19. *Callaway E.H.* Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. – CRC Press, 2004.
20. *Crovella M.E., Bestavros A.* Self-Similarity in Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes // IEEE/ACM Transaction on Networking. – December 1997. – Vol. 5, No. 6.
21. *Kim B.-T.* Broadband convergence Network (BcN) for Ubiquitous Korea Vision. The 7th International Conference on Advanced Communication Technology ICACT'2005. Phoenix Park, Korea, February 21-23, 2005, Proceedings.
22. *Koucheryavy Y., Jakubiak J.* Research Challenges in Vehicular Ad hoc Networks // Proceedings, IEEE CCNC 2008, January 10-12, 2008. Las Vegas, USA.
23. *Garg V.* Wireless Communications and Networking. Morgan Kaufmann, 2006.

REFERENCES

1. *Gol'dshteyn, B.S., Kucheryavyy A.E.* Seti svyazi post-NGN [Post-NGN communication networks]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2014, 160 p.
2. *Salim A.A.E.A.* Razrabotka algoritmov vybora golovnoego uzla v klasternykh besprovodnykh sensorynykh setyakh: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of algorithms of choice of the head node in clustered wireless sensor networks: abstract. cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg: SPbGUT, 2010, 27 p.
3. *Prokop'ev A.V.* Razrabotka i issledovanie modeley nagruzki v besprovodnykh sensorynykh setyakh: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of load models in wireless sensor networks: abstract. cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg.: SPbGUT, 2012, 19 p.

4. *Akimov E.V.* Sravnenie topologiy besprovodnykh sensorykh setey [Comparison of topologies of wireless sensor networks], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of computer and information technologies], 2008, No. 8, 240 p.
5. *Mikhaylov, A., Molev F., Sergushev A., Shirmanov A.* Sensornaya set' – osnova sistemy monitoringa sostoyaniya zdaniy [Sensor network-the basis of the monitoring system of buildings], *Pervaya milya* [The first mile], 2013, No. 6, pp. 32-36.
6. *Mochalov V.A.* Razrabotka i issledovanie algoritmov postroeniya otkazoustoychivyykh sensorykh setey: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of algorithms for building fault-tolerant sensor networks: abstract. cand. of eng. sc. diss.]. Moscow: MTUSI, 2011, 21 p.
7. *Tarakanov E.V.* Agregirovanie dannykh mul'tisensorov v besprovodnykh sensorykh setyakh: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Aggregation of multi-sensor data in wireless sensor networks: abstract. cand. of eng. sc. diss.]. Tomsk: NI TPU, 2012, 19 p.
8. *Lyakhov A.I., Pustogarov I.A., Shpilev S.A.* Mnogokanal'nye mesh-seti: analiz podkhodov i otsenka proizvoditel'nosti [Multichannel mesh networks: analysis of approaches and performance evaluation], *Informatsionnye protsessy* [Information processes], 2008, Vol. 8, No. 3, pp. 173-192.
9. *Trifonova S.V., Kholodov Ya.A.* Issledovanie i optimizatsiya raboty besprovodnoy sensory seti na osnove protokola ZigBee [Research and optimization of wireless sensor network based on ZigBee Protocol], *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling], 2012, Vol. 4, No. 4, pp. 855-869.
10. *Borisenko A.S.* Metody optimizatsii dlya MESH seti v ZIGBEE [Optimization methods for MESH network in ZIGBEE], *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [East European journal of advanced technologies], 2013, No. 1, pp. 24-29.
11. Vision and Challenges for realizing the Internet of Things. European Commission. 2010.
12. *Megerian S., Koushanfar F., Potkonjak M., Srivastava M.B.* Worst and best-case coverage in sensor networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Jan.-Feb. 2005, Vol. 4, Issue 1.
13. *Ananda A., Mun Choon Chan, Wei Tsang Ooi.* Mobile Wireless and Sensor Networks Technology Applications and Future Directions. John Wiley & Sons; 2006.
14. *Akyildiz F., Pompili D., Melodia T.* Underwater acoustic sensor networks: research challenges, *Ad Hoc Networks Journal, Elsevier*. May 2005, Vol. 3, Issue 3.
15. *Akyildiz I.F., Vuran M.C., Akan O.B., Su W.* Wireless Sensor Networks: A Survey revisited, *Computer Networks Journal. A Survey revisited. Computer Networks Journal*, 2005.
16. RFC4919. IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals. 2007.
17. *Bose P., Morin P., Stojmenovic L., Urrutia J.* Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks, *Wireless Networks*, 2001, Vol. 7, no. 6.
18. *Poikselka M., Mayer G.* The IMS: IP Multimedia Concepts and Services. 3<sup>rd</sup> Edition. J. Wiley&Sons, 2009.
19. *Callaway E.H.* Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. CRC Press, 2004.
20. *Crovella M.E., Bestavros A.* Self-Similarity in Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes, *IEEE/ACM Transaction on Networking*, December 1997,– Vol. 5, No. 6.
21. *Kim B.-T.* Broadband convergence Network (BcN) for Ubiquitous Korea Vision. The 7th International Conference on Advanced Communication Technology ICACT'2005. Phoenix Park, Korea, February 21-23, 2005, Proceedings.
22. *Koucheryavy Y., Jakubiak J.* Research Challenges in Vehicular Ad hoc Networks, *Proceedings, IEEE CCNC 2008, January 10-12, 2008. Las Vegas, USA*.
23. *Garg V.* Wireless Communications and Networking. Morgan Kaufmann, 2006.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.М. Бородянский.

**Сергусhev Алексей Геннадьевич** – ОАО «Авангард»; e-mail: ags@pochta.ru; г. Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72; тел.: +78127400810; к.т.н.; начальник сектора беспроводных сенсорных сетей.

**Sergushev Alexey Gennadyevich** – JSC “Avangard”; e-mail: ags@pochta.ru; 72, Kondratievsky avenue, St. Petersburg, Russia; phone: +78127400810; cand. of eng. sc.; chief of the wireless sensor networks.