

Раздел III. Процессы управления, автоматизация и математическое моделирование

УДК 621.372.88 (075)

А.Г. Сергушев

ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ СЕНСОРНАЯ СЕТЬ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлена идеология и архитектура отказоустойчивой сенсорной сети для систем безопасности потенциально опасных промышленных объектов. Рассматриваются требования, выдвигаемые к отказоустойчивой сенсорной сети. На основе требований делается вывод о том, что построить отказоустойчивую сеть можно только на основе свойства самоорганизации сенсорной сети. Рассматриваются и сравниваются различные топологии беспроводных сенсорных сетей. Выбирается топология самоорганизующейся сенсорной сети и ставится задача построения такой сети. Рассматриваются в соответствии с требованиями стандарта IEEE 802.15.4 топологии беспроводных сенсорных сетей «звезда», «кластерное дерево» и «ячеистая архитектура». Рассматриваемые архитектуры исследуются на предмет их отказоустойчивости при выходе из строя, как минимум, одного из узлов сети. Обоснован выбор оптимальной отказоустойчивой архитектуры сенсорной сети. Представлены результаты построения топологии отказоустойчивой беспроводной сенсорной сети. Выбрана оптимальная топология. Основной задачей, при этом, является разработка соответствующего ей алгоритма маршрутизации беспроводной сенсорной сети. Представлены подходы к разработке алгоритма маршрутизации беспроводной сенсорной сети. Результаты исследования использованы при реализации специализированного программного обеспечения построения беспроводной сенсорной сети для систем безопасности потенциально опасных промышленных объектов.

Сенсорные сети; беспроводные сенсорные сети; широкополосные сенсорные сети; энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия; отказоустойчивая сенсорная сеть.

A.G. Sergushev

FAILURE-SAFE TOUCH NETWORK FOR SECURITY SYSTEMS OF POTENTIALLY DANGEROUS INDUSTRIAL FACILITIES

The ideology and architecture of a failure-safe touch network for security systems of potentially dangerous industrial facilities is presented in article. The demands made to a failure-safe touch network are considered. On the basis of requirements the conclusion that it is possible to construct a failure-safe network only on the basis of property of self-organization of a touch network is drawn. Various topology of wireless touch networks is considered and compared. The topology of the self-organizing touch network gets out and the task of creation of such network is set. Are considered according to requirements of the IEEE standard of 802.15.4 topology of the wireless touch networks "stars", "cluster tree" and "cellular architecture". The considered architecture it is investigated regarding their fault tolerance at failure of, at least, one of network knots. The choice of optimum failure-safe architecture of a touch network is reasonable. Results of creation of topology of a failure-safe wireless touch network are presented. The optimum topology is chosen. The

main objective, thus, is development of the algorithm of routing of a wireless touch network corresponding to it. Approaches to development of algorithm of routing of a wireless touch network are presented. Results of research are used at implementation of the specialized software of creation of a wireless touch network for security systems of potentially dangerous industrial facilities.

Sensor networks; wireless sensor networks; broadband sensor networks; low-power wide-area network; failure-safe sensor network.

Цель статьи. Согласно требованиям ГОСТ Р 22.1.12-2005 системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС) подлежат обязательной установке на потенциально опасных промышленных объектах (ПОО), особо опасных, технически сложных и уникальных объектах.

СМИС ПОО является структурированной системой, построенной на базе программно-аппаратных средств и предназначенной для осуществления на ПОО автоматического мониторинга систем инженерно-технического обеспечения, состояния основания, строительных конструкций зданий и сооружений, технологических процессов, сооружений инженерной защиты и передачи в режиме реального времени информации об угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций по каналам связи. Мониторинг инженерных систем ПОО подразумевает сбор и обработку данных о параметрах процессов, протекающих в инженерных системах зданий и сооружений ПОО, и состоянии окружающей их среды.

Характерной особенностью применения СМИС ПОО является необходимость ее использования на протяженных и рассредоточенных объектах, таким образом, чтобы обеспечить охват здания или сооружения в целом. Реализация этого требования в полной мере возможна только при построении СИМС ПОО на базе беспроводной сенсорной сети датчиков параметров объекта и окружающей его среды.

Беспроводная сенсорная сеть является новым классом беспроводных сетей передачи информации и состоит из множества распределенных в пространстве устройств, обладающих набором сенсоров (или других источников информации), микроконтроллером и радиочастотным приемопередатчиком для связи на короткие расстояния [1].

Основными особенностями беспроводных сенсорных сетей являются самоорганизация, масштабируемость, низкое энергопотребление, адаптивность к изменениям в условиях эксплуатации, надежность, высокое качество передачи информации [1–4]. При этом ключевым требованием при построении беспроводной сенсорной сети СМИС ПОО является обеспечение отказоустойчивости сенсорной сети объекта.

В должной мере, реализация выдвинутого выше требования была заложена при разработке стандарта беспроводных персональных сетей IEEE 802.15.4 [1, 3, 12]. Беспроводная сенсорная сеть, построенная по стандарту IEEE 802.15.4, отвечает следующим требованиям: сеть должна быть надежной, легкой в развертывании, с простым протоколом и низким электропотреблением, позволяющим работать длительное время устройствам с аккумуляторным источником питания, сеть должна быть самоорганизующейся [12]. Наиболее важным требованием, определяющим наряду с надежностью отказоустойчивость сенсорной сети, является самоорганизация, позволяющая видоизменять конфигурацию сети.

Таким образом, отказоустойчивость беспроводной сенсорной сети обеспечивается свойством ее самоорганизации. На основании анализа современных публикаций и практического опыта автора можно сделать вывод о том, что свойство самоорганизации сенсорной сети не обеспечивается не в одной из известных архитектур сетей этого класса [1–7, 10–20].

Описание решаемой задачи. Самоорганизующейся сенсорной сетью называется сеть, в которой число узлов является случайной во времени величиной и может изменяться от 0 до некоторого значения N_{\max} . Взаимосвязи между узлами в такой

сети также случайны во времени и образуются для достижения сетью какой-либо цели или для передачи информации в сеть связи общего пользования или в иные сети. Самоорганизующаяся сенсорная сеть, как и все сети связи и передачи данных, состоит из сетей доступа и транзитной сети (рис. 1) [1, 3-6, 10-19].

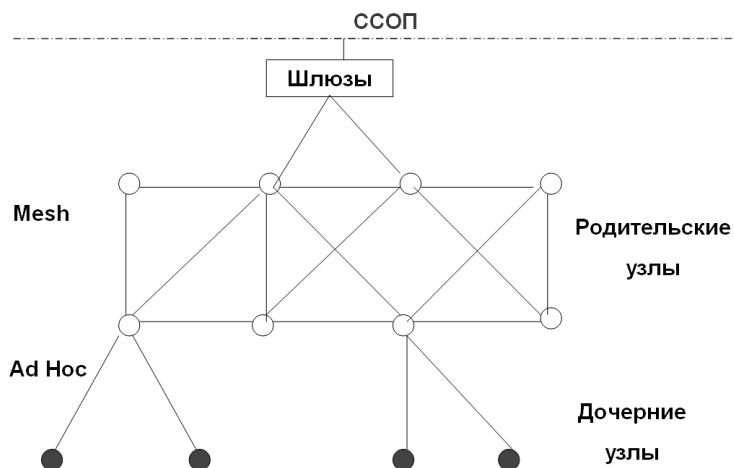


Рис. 1. Архитектура самоорганизующейся сенсорной сети, где ССОП – сеть связи общего пользования

Сеть доступа называется Ad Hoc (целевая сеть), а транзитная сеть – mesh (ячеистая). Узлы сети Ad Hoc не имеют функций маршрутизации и могут осуществлять взаимосвязь лишь с ближайшими узлами [1, 3, 12]. В связи с этим достаточно часто узлы Ad Hoc называют дочерними. Последнее, в силу самоорганизации сети, вовсе не означает, что дочерний узел строго привязан к какому-либо родительскому узлу. В процессе жизненного цикла сети дочерний узел может быть привязан к любому наиболее близко расположенному родительскому узлу, а при определенных условиях – и сам может превратиться на время или навсегда в родительский узел, например, в однородных беспроводных сенсорных сетях [1, 3, 12]. Узлы mesh имеют встроенные функции маршрутизации и могут поддерживать установление соединения не только к ближайшему узлу, но и ко многим другим. Такой сетевой режим называется multi-hop (многошаговое соединение) в отличие от соединений для дочерних узлов сети Ad Hoc, ограниченных в установлении соединения одним шагом (one-hop) [1, 3, 9, 12]. Mesh-узлы достаточно часто называют родительскими узлами, что подчеркивает транзитную функцию такой сети. Узлы самоорганизующейся сети могут совмещать родительские и дочерние функции. Таким образом, сенсорная сеть представляет собой сравнительно большое множество беспроводных сенсоров, распределенных в некоторой области с достаточно высокой плотностью. В области покрытия радиосигнала каждого из сенсоров должен находиться как минимум еще один сенсор, в этом случае сенсор будет называться соседним. Чем больше «соседей» у каждого из сенсоров, тем более высокой точностью и надежностью обладает сенсорная сеть – очевидно, что отдельный сенсор имеет ограниченную область восприятия, вычислительную мощность, память и питание. Технологии радиодоступа, применяемые в сенсорах и основанные на стандарте IEEE 802.15.4, позволяют передавать данные на расстояние до нескольких десятков метров [1, 3, 12].

Естественно, что чем выше количество соседних сенсоров у каждого из сенсоров, тем более высокой точностью и надежностью обладает сенсорная сеть – в связи с этим предполагается, что в некотором пространстве, где построена сенсорная сеть,

сенсоры будут распределены с достаточно высокой плотностью и, соответственно, в большом количестве [1, 3]. Эта сеть, как правило, имеет присоединение к сети связи общего пользования для передачи полученных данных. Присоединение производится посредством некоторого шлюза, который может также реализовывать функции защиты. При том, что шлюз обычно не является сенсором, а представляет собой более стабильный сетевой узел (с точки зрения источника питания и ресурсов). Данные могут передаваться как для обработки на серверы, так и прямо заинтересованным пользователям. Очевидно, что сенсорная сеть, состоящая из большого количества сенсоров, должна быть структурирована, так как большой объем передаваемой информации может снизить надежность тех узлов, которые находятся в непосредственной близости к шлюзу – постоянная передача транзитных данных может привести к выходу из строя источника питания, а большой объем трафика – переполнить буферы приема [1].

Таким образом, свойство самоорганизации сети определяется ее топологией и архитектурой [1, 3].

Сети стандарта IEEE 802.15.4 [12] поддерживают три типа архитектур построения: звезда, кластерное дерево и каждый-с-каждым (ячеистая) (рис. 2).

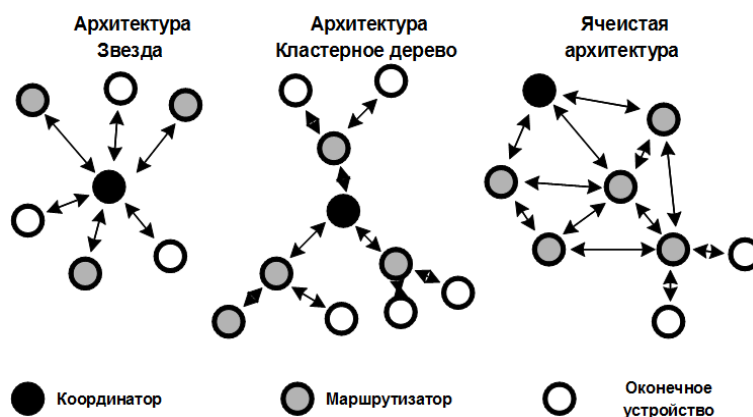


Рис. 2. Архитектуры беспроводных сенсорных сетей, построенных на базе стандарта IEEE 802.15.4

В архитектуре звезда связь устанавливается между устройствами и единым центральным контроллером, называемым координатором. Устройства, как правило, имеют ряд сопутствующих применений и являются либо узлом начала передачи, либо узлом назначения для сеансов связи в сети. В сети с архитектурой дерева передача данных и сообщений управления через сеть осуществляется с использованием иерархической стратегии выбора маршрута и может производиться под централизованным управлением, для чего на физическом уровне требуется использовать периодические сигналы маяков от координаторов IEEE 802.15.4. Ячеистые сети используют одноранговые связи, маршрутизация в таких сетях является децентрализованным, распределенным по сети процессом.

Топология беспроводной сенсорной сети определяется набором направлений передачи радиосигналов от одного беспроводного сенсора к другому в рамках выбранной архитектуры сети [1, 3].

Топология беспроводной сенсорной сети звезда соответствует схеме опроса «координатор – оконечное устройство» [1, 3]. Схема построения сети жестко задана – в центре звезды находится координатор, оконечные устройства (узлы беспроводной сенсорной сети) располагаются по лучам звезды (рис. 3). Сеансы связи при этом

устанавливаются только между координатором и оконечным устройством (беспроводным сенсором). Направления передачи между координатором и оконечным устройством строго заданы, обмен данными между оконечными устройствами невозможен, маршрутизация как таковая отсутствует. Недостаток использования топологии сети со строго заданными направлениями передачи данных, без маршрутизации, заключается в зависимости всей сети от надежности одного элемента – координатора и невозможности передачи данных оконечным узлом в случае ухудшения качества радиосвязи в заданном направлении.

Топология беспроводной сенсорной сети кластерное дерево соответствует схеме опроса «координатор – дерево узлов сети» (рис. 4) [1, 3]. В такой сенсорной сети используется статическая маршрутизация, данные передаются по схеме «вышестоящий узел – нижестоящий узел» по ветвям дерева. При этом интервал опроса сети должен быть заранее определен относительно ее топологии. Недостаток использования топологии сети со статической маршрутизацией и заранее определенным периодом опроса заключается в невозможности изменения направления передачи данных в сети при выходе из строя маршрутизатора одной из ветвей кластерного дерева и, как следствие, отключение нижестоящих узлов всей ветки или ее части (рис. 5).

Топология беспроводной сенсорной сети ячеистая архитектура соответствует схеме опроса «координатор – произвольный маршрутизатор сети» (рис. 6) [1, 3]. В такой сенсорной сети каждый узел сенсорной сети может передавать данных по нескольким направлениям и используется динамическая маршрутизация – данные координатору от оконечного узла могут передаваться через разные маршрутизаторы в зависимости от качества радиосвязи между отдельными узлами сети.

По результатам анализа топологий беспроводных сенсорных сетей можно сделать вывод о том, что единственной топологией сенсорной сети, обладающей в полной мере свойством самоорганизации, является ячеистая архитектура [1, 3]. Только такая топология сети позволяет обеспечить отказоустойчивость беспроводной сенсорной сети СМИС ПОО.

Сравнительный анализ топологий беспроводных сенсорных сетей [1–7,10–20] показывает, что топологическая целостность и гарантированное качество обслуживание узлов сети потенциально достижимы только у двух топологий – звезда и ячеистая архитектура. При этом топология звезда позволяет получить гарантированное время опроса узлов сети, а ячеистая архитектура – высокую живучесть беспроводной сенсорной сети [1, 3, 4–8, 11–20].

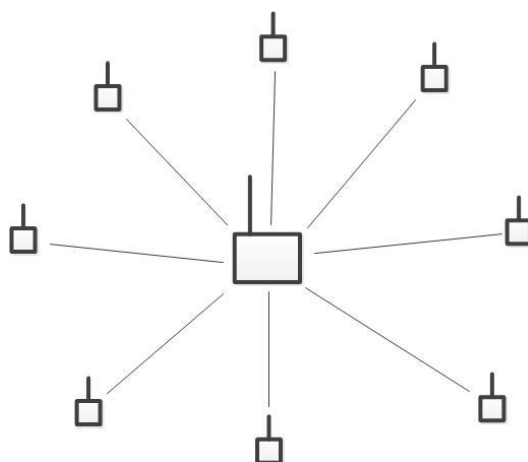


Рис. 3. Топология беспроводной сенсорной сети звезда

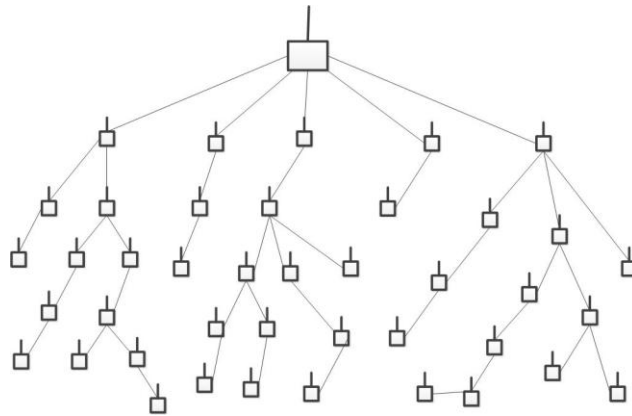


Рис. 4. Топология беспроводной сенсорной сети кластерное дерево

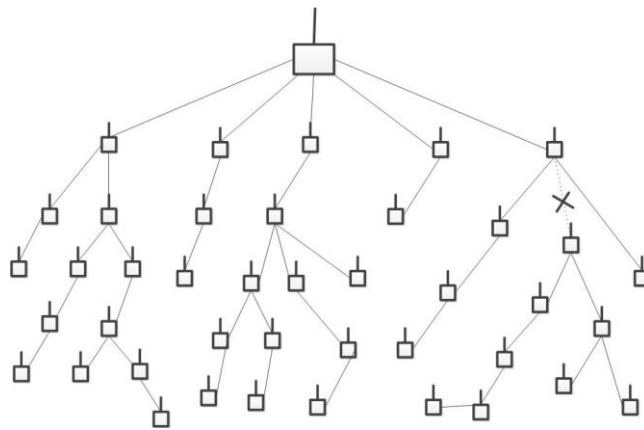


Рис. 5. Разрыв связи ветки в сети с топологией кластерное дерево

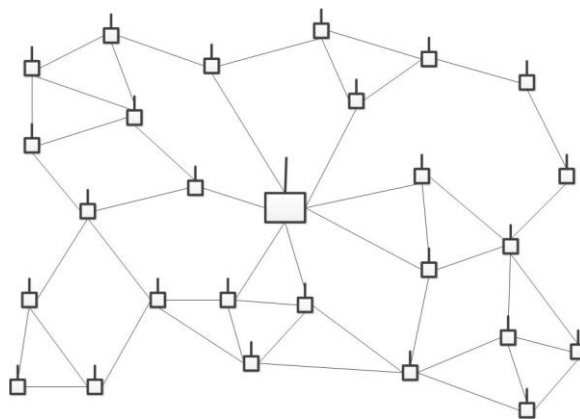


Рис. 6. Топология беспроводной сенсорной сети ячеистая архитектура

Исходя из проведенного анализа ясно, что для построения целостной и надежной сенсорной сети требуется построить сеть с адаптивной топологией.

Метод решения задачи. Беспроводная сенсорная сеть с ячеистой архитектурой может быть условно представлена связанным неориентированным графом вида [7, 8]: $G := (V, E)$, где $V = \{v_1, v_2, v_3 \dots v_n\}$ – непустое множество вершин графа G – узлов беспроводной сенсорной сети, $E = \{e_1, e_2, e_3 \dots e_m\}$ – непустое множество ребер графа G – направлений между узлами беспроводной сенсорной сети, между которыми возможна или невозможна радиосвязь.

При отсутствии связи между парой узлов беспроводной сенсорной сети, представленной ориентированным графом, ребро между ними отсутствует, при наличии связи ребро характеризуется расстоянием радиосвязи между узлами сети, определяющим условия радиосвязи. Полный ориентированный граф, описывающий многосвязанную беспроводную сенсорную сеть СМИС ПООО, представлен на рис. 7.

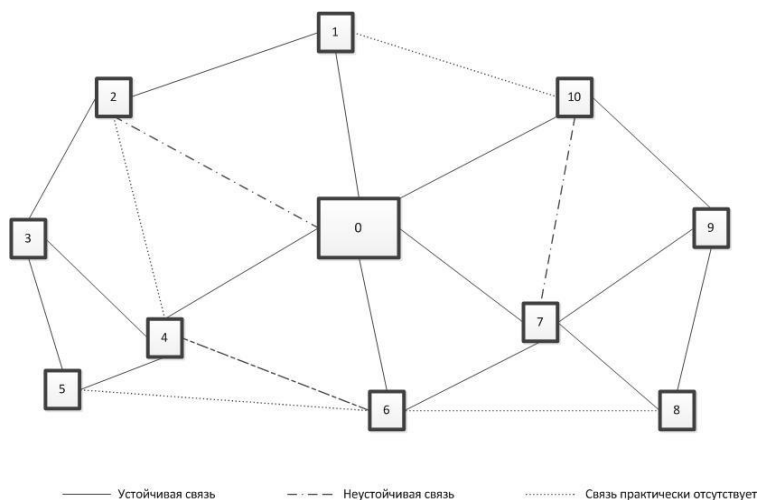


Рис. 7. Полный ориентированный граф, описывающий многосвязанную беспроводную сенсорную сеть СМИС ПОО

Процесс адаптации топологии сети, описываемой подобным полным ориентированным графом, реализуется алгоритмом формирования расписания доступа и отказоустойчивости сенсорной сети в контексте алгоритма выбора головного узла кластеров сети [2].

В работе [2] был разработан новый алгоритм выбора головного узла в кластере для решения проблем покрытия – CHSC (Cluster Head Selection for Coverage), который является распределенным кластерным алгоритмом и может быть использован для однородных сенсорных сетей, где наиболее важным параметром является полное покрытие в течение достаточно длительного времени. Предложенный алгоритм основывается на периметрическом покрытии и выборе наилучшего кандидата на уровень головного узла кластера из всех сенсорных узлов, входящих в рассматриваемую сеть. Однако не учитывает адаптацию топологии до головного узла на основе энергетической балансировки и динамической оптимизации топологии по кратчайшему пути передачи данных до головного узла. Исходя из этих положений, был разработан модифицированный алгоритм CHSC.

Каждый из сенсорных узлов на следующем цикле опроса беспроводной сенсорной сети может объявить себя новым головным узлом в кластере. Это происходит при условии, что за время опроса сенсорный узел не получил никаких информационных сообщений от любых других узлов, объявивших себя головными. При объявлении себя головным узлом сенсорный узел рассылает команду другим сенсорным узлам, находящимся в пределах его зоны охвата. Принятие решения об объявлении себя головным

узлом осуществляется на основе возможности обеспечения лучшего покрытия и наличия достаточной энергии $E(s_i) > E_{\text{тн}}$. Команда головного узла содержит информацию о местонахождении нового головного узла кластера. После получения сообщения от нового головного узла кластера все беспроводные сенсорные узлы в пределах зоны его покрытия исключают себя из процедуры постановки себя на роль головного узла.

Каждый беспроводный сенсорный узел содержит таблицу всех головных узлов, от которых он получил команду об объявлении себя головным, на доступном для данного узла расстоянии. Эта информация используется беспроводным сенсорным узлом для принятия решения о том, членом какого кластерного узла этот узел будет в данном цикле опроса беспроводной сенсорной сети. В случае возникновения коллизии, когда два сенсорных узла с подходящими характеристиками объявляют себя головными в пределах одной и той же зоны, головной узел определяется по критерию наибольшей остаточной энергии.

Модифицированный алгоритм выбора головного узла отказоустойчивой сенсорной 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 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 главных кластерных узлов.

Шаг 7. Если два узла объявлены головными в кластере, то производится запрос уровня остаточного заряда аккумуляторной батареи.

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

Входными данными для алгоритма формирования расписания доступа и связанности отказоустойчивой сети являются количество и номера транзитных узлов, количество и номера оконечных узлов, количество и топология выбранных координатором маршрутов по сегментам, последовательный список узлов маршрута передачи сообщения от i -го оконечного узла через маршрутизаторы к координатору. В процессе работы алгоритм устанавливает запреты перехода по ребрам в зависимости как от состояния радиоканала между узлами, так и от работоспособности узла и устойчивости маршрута через рассматриваемый парный узел.

В результате, на каждом шаге формирования расписаний работы узлов связанного маршрута строится такое расписание передачи данных через узлы данного маршрута, чтобы выполнялось условие по минимизации энергопотребления узлов маршрута: $\sum_{i=0}^N E_i$, где N – количество узлов сенсорной сети, E_i – суммарная энергия, потребляемая i -м узлом беспроводной сенсорной сети 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:

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

где I_{ij} – потребляемый i -м узлом беспроводной сенсорной сети ток времени опроса сети t_j , Δ_{ij} – интервал времени нахождения i -го узла в состоянии, соответствующем дискретному моменту времени t_j ; U – напряжение питания узла беспроводной сенсорной сети. Процесс моделирования для разных алгоритмов выбора головного узла представлен на рис. 8.

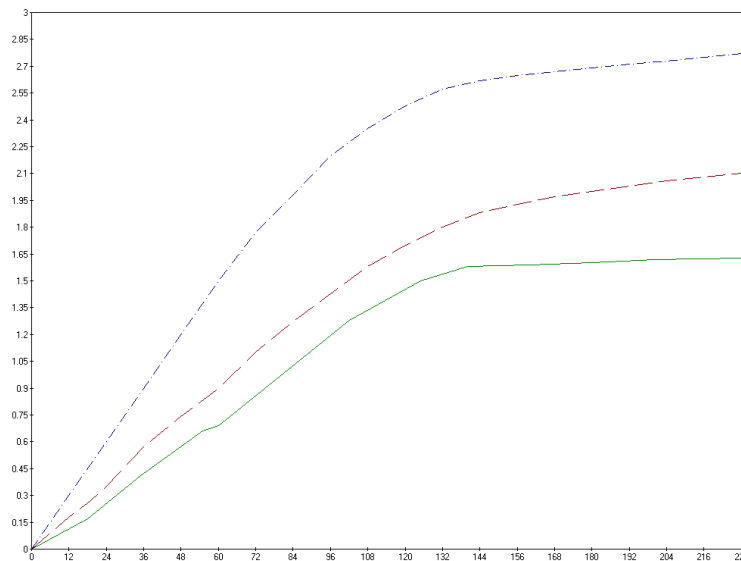


Рис. 8. Отображение процесса моделирования для разных алгоритмов выбора головного узла

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

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

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

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

Каждый из потенциальных маршрутов характеризуется разным путем передачи данных. После анализа графа, описывающего сеть, выбирается кратчайший маршрут передачи данных от узла до координатора в i -м сегменте сети и динамически строится таблица маршрутизации.

В процессе работы беспроводной сенсорной сети вид ее графа может видоизменяться, поэтому каждый узел сети должен непрерывно производить анализ топологии сети и выполнять перестройку своего сегмента таблицы маршрутизации. Динамическое изменение всей таблицы маршрутизации производится только в случае критического изменения топологии сенсорной сети с целью минимизации передаваемого в сети трафика.

Решение поставленной задачи. Построение отказоустойчивой сети производится в приложении meshKGF программного обеспечения «Безопасность СК».

Размещение узлов беспроводной сенсорной сети производится произвольно в привязке к карте ПОО, в зависимости от мест необходимого размещения сенсоров параметров СМИС ПОО и окружающей среды, определяемых перечнем контролируемых параметров объекта и окружающей его среды (рис. 9). Далее на карте объекта производится радиальное соединение узлов беспроводной сенсорной сети с координатором. После чего строится схема прямого соединения узлов с координатором (рис. 10), относительно которой затем строится топология mesh сети объекта (рис. 11). Исходя из чего, затем строится отказоустойчивая сенсорная сеть СМИС ПОО.

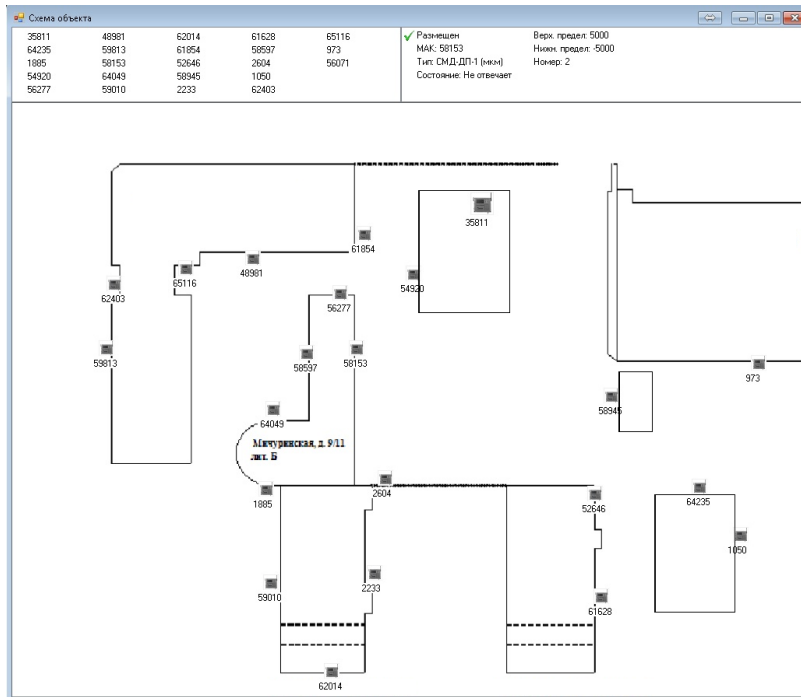


Рис. 9. Размещение датчиков на карте объекта

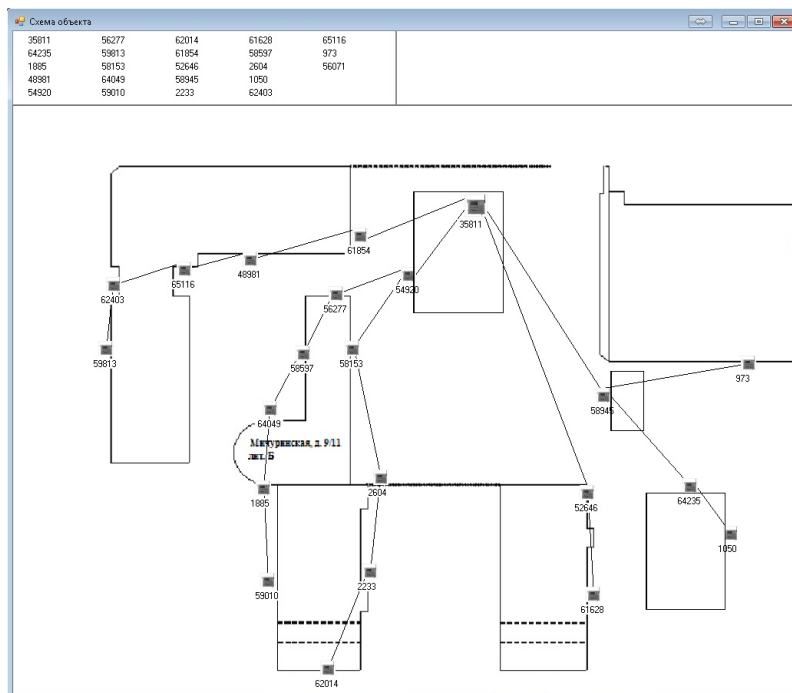


Рис. 10. Схема прямого соединения узлов беспроводной сенсорной сети

Анализ полученных результатов. Построенная, таким образом, беспроводная сенсорная сеть СМИС ПОО позволяет получить самоорганизующуюся сенсорную сеть с коэффициентом надежности не ниже 0,95 по сравнению с другими топологиями сети (рис. 11).

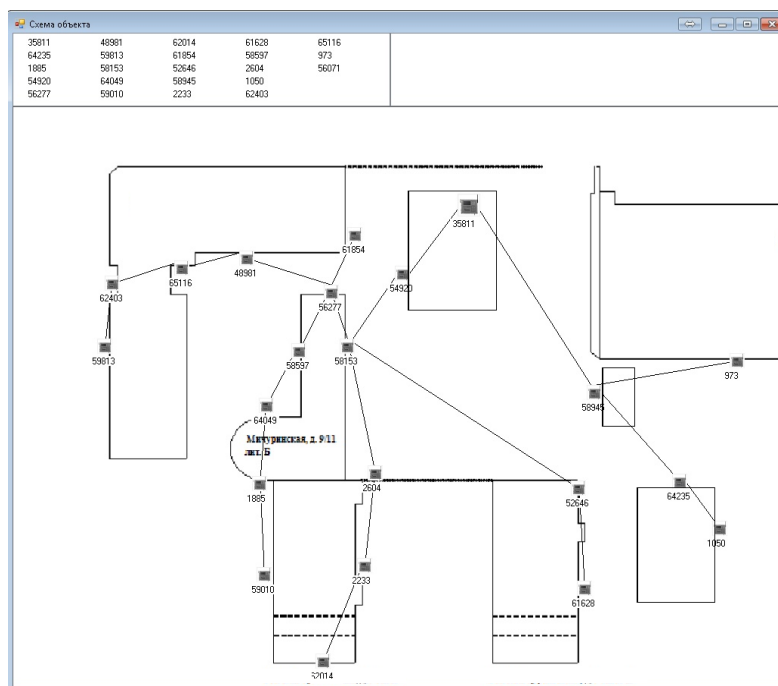


Рис. 11. Топология беспроводной сенсорной сети СМИС ПОО

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. дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУТ, 2010. – 27 с.
3. Прокотьев А.В. Разработка и исследование моделей нагрузки в беспроводных сенсорных сетях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУТ, 2012. – 19 с.
4. Акимов Е.В. Сравнение топологий беспроводных сенсорных сетей // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – № 8. – С. 240.
5. Михайлов А., Молев Ф., Сергушев А., Ширманов А. Сенсорная сеть – основа системы мониторинга состояния зданий // Первая миля. – 2013. – № 6. – С. 32-36.
6. Владимиров В.А., Михайлов А.Н., Молев Ф.В., Сергушев А.Г. Системы мониторинга деформаций и контроля загазованности на основе технологий сенсорных сетей // Электроника: НТБ. – 2013. – Спецвыпуск № 128. – С. 56-70.
7. Жевак А.В. Моделирование и оптимизация сбора данных в беспроводной сенсорной сети на основе фиксированного расписания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 16 с.
8. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей // Труды МАИ. – 2010. – Вып. № 40. – 13 с.
9. Недев М.Д. Синхронизация времени в сенсорных сетях // Программные системы: теория и приложения. – 2011. – С. 71-83.
10. Кучерявый А.Е. Сенсорные сети как перспективное направление развития телекоммуникаций // Материалы 59-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГУТ им. Бонч-Бруевича, 22-26 января, 2007.

11. Молчанов Д.А. Самоорганизующиеся сети и проблемы их построения // Электросвязь. – 2006. – № 6. – С. 20-22.
12. IEEE 802.15.4-2003 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
13. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A survey on sensor networks // Communications Magazine, IEEE. - 2002. - Vol.40.
14. Akyildiz I.F. Key Wireless Networking Technologies in the Next Decade // NEW2AN 2006, St. Petersburg, Russia, June 2006. Keynote Speech.
15. Akyildiz I.F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges // Ad Hoc Networks Journal, Elsevier. - May 2005. – Vol. 3, Issue 3.
16. Akyildiz I.F., Vuran M.C., Akan O.B., Su W. Wireless Sensor Networks: A Survey revisited // Computer Networks Journal. 2005.
17. Akyildiz I.F. Key Wireless Networks Technologies in the Next Decade // WWIC 2005 Keynote Speech, Xanthi, Greece. May 2005.
18. Akyildiz I.F., Wang X., Wang W. Wireless mesh networks: a survey // Computer Networks and ISDN Systems. - March 2005. - Vol. 47, No. 4.
19. Hossain E., Leung K. Wireless Mesh Networks Architectures and Protocols // Springer. 2007.
20. Koucheryavy A., Prokopyev A. Quality of Service (QoS) classes for Ubiquitous Sensor Networks // The 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2009). IEEE Proceedings. February 2009 Korea.

REFERENCES

1. Gol'dshteyn B.S., Kucheryavy A.E. Seti svyazi post-NGN [Connection network post-NGN]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2014, 160 p.
2. Salim A.A.E.A. Razrabotka algoritmov vybora golovnogo uzla v klasternykh besprovodnykh sensorynykh setyakh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of algorithms for the selection of the head node in clustered wireless sensor networks: Autoabstract. Cand. of eng. sc. diss.]. St. Petersburg: SPbGUT, 2010, 27 p.
3. Prokop'ev A.V. Razrabotka i issledovanie modeley nagruzki v besprovodnykh sensorynykh setyakh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Research and development of load models in wireless sensor networks. Autoabstract. Cand. of eng. sc. diss.]. – St. Petersburg: SPbGUT, 2012, 19 p.
4. Akimov E.V. Sravnenie topologiy besprovodnykh sensorynykh setey [Comparison of topologies of wireless sensor networks], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies], 2008, No. 8, pp. 240.
5. Mikhaylov A., Molev F., Sergushev A., Shirmanov A. Sensornaya set' – osnova sistemy monitoringa sostoyaniya zdaniy [Sensor network – based monitoring systems of condition of buildings], *Pervaya milya* [Last Mile], 2013, No. 6, pp. 32-36.
6. Vladimirov V.A., Mikhaylov A.N., Molev F.V., Sergushev A.G. Sistemy monitoringa deformatsiy i kontrolya zagazovannosti na osnove tekhnologiy sensorynykh setey [The deformation monitoring system and gas contamination control technologies-based sensor networks] *Elektronika: NTB* [Electronics: Science, Technology, Business], 2013, No. 128, pp. 56-70.
7. Zhevak A.V. Modelirovanie i optimizatsiya sbora dannykh v besprovodnoy sensorynoy seti na osnove fiksirovannogo raspisaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Modeling and optimization of data collection in wireless sensor networks based on a fixed schedule. autoabstract. Cand. of eng. sc. diss.]. Ufa: UGATU, 2008, 16 p.
8. Akimov E.V., Kuznetsov M.N. Veroyatnostnye matematicheskie modeli dlya otsenki nadezhnosti besprovodnykh sensorynykh setey [Probabilistic mathematical models for the evaluation of soundness of wireless sensor networks], *Trudy MAI* [Trudy MAI], 2010, Issue No. 40, 13 p.
9. Nedev M.D. Sinkhronizatsiya vremeni v sensorynykh setyakh [Time synchronization in sensor networks], *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Program Systems: Theory and Applications], 2011, pp. 71-83.
10. Kucheryavy A.E. Sensornye seti kak perspektivnoe napravlenie razvitiya telekommunikatsiy [Sensor networks as a promising area of telecommunications development], *Materialy 59-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorskogo professorsko-prepodavatel'skogo sostava SPbGUT im. Bonch-Bruevicha, 22-26 yanvarya, 2007* [Materials of 59-th scientific-technical conference of the professors of the faculty of the Bonch-Bruevich, 22-26 January, 2007].

11. Molchanov D.A. Samoorganizuyushchiesya seti i problemy ikh postroeniya [Self-organizing networks and problems of their construction], *Elektrosvyaz'* [Electrosvyaz], 2006, No. 6, pp. 20-22.
12. IEEE 802.15.4-2003 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
13. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayirci E. A survey on sensor networks, *Communications Magazine, IEEE*, 2002, Vol. 40.
14. Akyildiz I.F. Key Wireless Networking Technologies in the Next Decade, *NEW2AN 2006, St. Petersburg, Russia, June 2006. Keynote Speech*.
15. Akyildiz I.F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges, *Ad Hoc Networks Journal, Elsevier*, May 2005, Vol. 3, Issue 3.
16. Akyildiz I.F., Vuran M.C., Akan O.B., Su W. Wireless Sensor Networks: A Survey revisited, *Computer Networks Journal*. 2005.
17. Akyildiz I.F. Key Wireless Networks Technologies in the Next Decade, *WWIC 2005 Keynote Speech, Xanthi, Greece. May 2005*.
18. Akyildiz I.F., Wang X., Wang W. Wireless mesh networks: a survey, *Computer Networks and ISDN Systems*, March 2005, Vol. 47, No. 4.
19. Hossain E., Leung K. *Wireless Mesh Networks Architectures and Protocols*, Springer. 2007.
20. Koucheryavy A., Prokopenko A. Quality of Service (QoS) classes for Ubiquitous Sensor Networks, *The 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2009). IEEE Proceedings. February 2009 Korea*.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.П. Милешко.

Сергусhev Алексей Геннадьевич – ОАО «Авангард»; e-mail: ags@pochta.ru; 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72; тел.: 88125439076; к.т.н.; начальник сектора «Широкополосных сенсорных сетей».

Sergushev Alexey Gennadievich – JSC “Avangard”; e-mail: ags@pochta.ru; 72, Kondrat'evskiy pr., Saint-Petersburg, 195271, Russia; phone: +78125439076; cand. of eng. sc.; chief of sector of broadband sensor networks.

УДК 543.9+621.3.082.73+57.083.3

В.Ю. Вишневецкий, Т.П. Строчан

ПОСТРОЕНИЕ БИОСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ БИОСЕНСОРА

Обозначены основные задачи и требования проведения экологического мониторинга для экспресс методов обработки проб водных объектов. Из проведенного анализа и характеристик техники такого уровня выделен кластер биосенсорных систем (БСС). Разработана общая структурная схема БСС, наглядно отражающая особенности и взаимодействия блоков всей структуры конструкции. На основе математической модели, полученной из соотношения Заурберера, связывающего резонанс датчика относительно изменения его массы, строится компьютерная имитационная модель пьезокварцевого биосенсора. Исходя из полученных результатов моделирования, проведены обзор различной конфигурации биосенсоров и оценка отклики по трем элементам: хлору, кадмию и цинку. Рассмотрены способы построения биосенсорной системы и ее основные параметры, такие как подача пробы и конфигурация биосенсорного моста. Определены взаимодействия сенсоров в системе, а также возможность детектирование ряда загрязнителей одним элементом. Предложены варианты обработки полученных данных, а так же способы их отображения в зависимости от количества биосенсоров. Построена диаграмма откликов БСС, состоящей из двух биосенсоров для хлора, кадмия и цинка. В полученной имитационной модели биосенсорной системы реализовано отображение всего спектра значений по каждому элементу. При увеличении количества определяемых веществ и увеличении сенсоров на n штук, отображаются