

УДК 004.051

Обзор публикаций, посвящённых самоорганизации беспроводных сенсорных сетей

Терентьев М.Н.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail: m-te@yandex.ru

Аннотация

Проанализированы публикации, посвящённые беспроводным сенсорным сетям (БСС), выявлены характерные особенности БСС, влияющие на их самоорганизацию, сформулированы показатели работы БСС, показана роль общих механизмов самоорганизации в алгоритмах и методах функционирования БСС, приведены принципы разработки самоорганизующихся систем применительно к БСС, рассмотрены протоколы, алгоритмы и методы работы БСС. Сделан вывод о невозможности создания полнофункциональной БСС с согласованными значениями показателей её работы без разработки единого метода функционирования БСС на основе принципов самоорганизации.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, самоорганизация, показатель работы, протокол, дискретный режим, множественный доступ к каналу, маршрутизация

1. Введение

Развитие теории и практики беспроводных сенсорных сетей (БСС) в последние 15-20 лет сопровождалось многочисленными публикациями, посвящёнными тем или иным аспектам их функционирования. Являясь распределённой системой, БСС достигает своих целей во многом вследствие самоорганизации. В связи с этим актуальна задача анализа разработанных протоколов, алгоритмов и методов функционирования БСС с точки зрения самоорганизации.

В работе рассмотрены публикации, посвящённые как самоорганизации, так и БСС. Рассмотренные протоколы, алгоритмы и методы работы БСС на канальном и сетевом уровнях стека протоколов проанализированы с точки зрения самоорганизации. На основе анализа публикаций сделан вывод о том, что метод функционирования БСС, согласующий значения показателей её работы, должен создаваться на основе принципов самоорганизации.

2. Беспроводные сенсорные сети

Беспроводные сенсорные сети (БСС, Wireless Sensor Network, WSN) являются подклассом беспроводных самоорганизующихся сетей (Wireless Ad Hoc Networks), характеризуемым следующими особенностями: 1) задачей БСС является выполнение измерений и передача их результатов потребителю информации, 2) узлы БСС могут быть подвижны и 3) ресурсы узлов существенно ограничены.

Роли узлов. Задача БСС определяет типичные роли узлов [1]. Узлы-измерители (или просто измерители) выполняют измерения при помощи своих датчиков, они служат источниками информации. Узел-шлюз (или просто «шлюз», gateway; в литературе также используются термины «сток», sink, и «базовая станция», base station) принимает результаты измерений и передаёт их потребителю информации. Шлюзов в сети может быть несколько [2]. Если вследствие больших географических размеров БСС, наличия помех и препятствий одни измерители и шлюзы не в состоянии обеспечить связность сети, в её состав вводят дополнительные узлы-маршрутизаторы (или просто маршрутизаторы). Также в сети могут находиться узлы-обработчики, выполняющие некоторую предварительную обработку результатов измерений. Некоторые узлы могут исполнять несколько ролей.

Указанное разделение узлов БСС по ролям имеет важное следствие: произвольные узлы в БСС друг с другом сообщениями не обмениваются. Потоки данных направлены от измерителей к шлюзам: измерители пересылают свои данные не произвольным узлам, а шлюзам, возможно, через маршрутизаторы и обработчики. В обратном направлении могут передаваться команды и иная директивная информация [3]. Других направлений потоков данных в БСС нет.

Подвижность узлов БСС может рассматриваться в трёх аспектах.

Пространственная подвижность определяется перемещением узлов в пространстве. При этом могут нарушаться существовавшие ранее маршруты передачи данных, но могут появиться и новые. Анализу различных моделей

пространственной подвижности (детерминированных, вероятностных, с различными ограничениями области, скорости, ускорения и т. п.) посвящены, например, работы [4; 5].

Временная подвижность связана с тем, что узлы вследствие перемещений могут покидать сеть, могут появляться новые узлы, для экономии энергии источника питания узлы могут переходить в режим сна, в котором выполнение их обычных функций не возможно [3; 6].

Функциональная подвижность определяется тем, что узлы при определённых условиях могут менять свою роль в сети. Например, узел-маршрутизатор, изначально добавленный в сеть для обеспечения связности, при необходимости может стать источником информации [7].

Ограниченность ресурсов. В промышленных БСС замена исчерпанного автономного источника питания сопряжена с дополнительными расходами, а зачастую невозможна, что ограничивает срок службы узла. Следствием этого является применение в составе узлов электронных компонентов с низким потреблением энергии [3]: микропроцессор невысокой производительности (типичный пример — Atmel ATmega128: 8-разрядный, тактовая частота до 16 МГц, ОЗУ 4 Кб), трансивер ограниченной мощности и невысокой скорости передачи данных (например, Texas Instruments CC2420 с мощностью передачи до 1 мВт и скоростью 250,000 бит/с). Применение электронных компонентов с подобными характеристиками позволяет увеличить срок службы узла, работающего до исчерпания заряда источника питания.

Показатели работы БСС. В качестве показателей работы БСС обычно рассматривают масштабируемость, долговечность, надёжность и скорость доставки сообщений.

Масштабируемость [6] означает обеспечение требуемого количества узлов в сети при линейном (в худшем случае) росте потребности в ресурсах (в данном случае критическими ресурсами являются радиоканал и источник питания). Масштабируемость может рассматриваться как интегральная мера качества взаимодействия различных протоколов и подходов. Значение этого критерия ограничивает количество узлов в БСС.

Долговечность [6] означает обеспечение заданного периода функционирования БСС. При этом на некоторых узлах могут происходить программные и/или аппаратные сбои, некоторое количество узлов может выйти из строя навсегда, но БСС в целом должна выполнять свои функции. Для достижения заданной долговечности приходится жертвовать другими характеристиками БСС: уменьшать мощность передатчика (следовательно, и связанное с мощностью передатчика расстояние связи между узлами), периодически переводить узлы в состояние сна и т. п.

Надёжность [3] означает способность БСС предоставлять потребителю информации результаты измерений датчиков узлов. Результаты измерений могут быть не доставлены вследствие высокой конкуренции узлов за доступ к радиоканалу, из-за перевода узлов в режим сна, из-за выхода узлов из строя, нарушения связности сети и т. п. Надёжность БСС может быть определена как

отношение количества успешно доставленных результатов измерений к общему количеству измерений.

Скорость доставки сообщений [6] может рассматриваться как показатель оптимальности маршрута и согласованности работы узлов — даже при выборе оптимального маршрута сообщение на передающем узле может ожидать включения приёмного узла. Значение скорости доставки может быть выражено как отношение фактической длительности пересылки сообщения по маршруту к длине кратчайшего допустимого с точки зрения текущей топологии маршрута.

Приведённый перечень показателей работы БСС противоречив, повышение значения одного из них влечёт снижение значений других показателей.

Дискретный режим работы БСС применяют для повышения долговечности [3; 8]. Он заключается в чередовании периодов активности узлов, характеризующихся полной функциональностью, и периодов сна, характеризующихся сниженным потреблением энергии. При длительности активного периода τ и полного цикла работы T выигрыш в долговечности составляет около T/τ [3]. Организация дискретного режима возможна в случае, когда потребитель результатов измерений не требует непрерывного выполнения измерений. В дискретном режиме обмен сообщениями между любой парой смежных узлов возможен только в периоды активности обоих узлов, что порождает необходимость согласования их работы [3].

Таким образом, характерными особенностями БСС являются: связь при помощи радиоканала; отсутствие инфраструктуры сети; подвижность узлов; ограниченность ресурсов узлов; направление потоков данных (основной поток

направлен от измерителей к шлюзу, вспомогательный — в обратном направлении). Показателями работы БСС являются масштабируемость, долговечность, надёжность и скорость доставки сообщений.

3. Разработка БСС как самоорганизующейся системы

Основатель синергетики Герман Хакен называет самоорганизующейся системой такую, которая «без специфического воздействия извне обретает какую-то пространственную, временную или функциональную структуру» [9]. Кратко перечислим механизмы самоорганизации и следующие из них принципы разработки самоорганизующихся систем.

Самоорганизация систем основывается [10] на обратной связи, недетерминированном поведении и взаимодействии компонентов.

Положительная обратная связь (ПОС) часто лежит в основе создания структур. ПОС отвечает за возбуждение системы и проявляется в усилении обнаруженного системой сигнала, вовлечении в его обработку большого числа компонентов нижнего уровня. Это может привести к неконтролируемому росту уровня сигнала и, следовательно, к перегрузке системы.

Отрицательная обратная связь (ООС) уравнивает ПОС и помогает стабилизировать структуру. Она отвечает за торможение системы. Стабилизация может проявляться в насыщении, исчерпании или соревновании процессов возбуждения и торможения. Торможение сокращает количество вовлечённых компонентов системы, уменьшает уровень сигнала.

Недетерминированность поведения образуется вследствие усиления случайных флуктуаций (выбор случайного направления, случайные ошибки, влияние помех, неучтённых факторов и т. п.). Недетерминированность часто имеет решающее значение, т. к. благодаря ей оказывается возможным нахождение новых решений. Случайные флуктуации выступают в роли зёрен [11], из которых при помощи ПОС вырастают структуры.

Взаимодействие компонентов определяет поведение, динамику системы. Оно может быть явным, когда компоненты непосредственно взаимодействуют друг с другом, и неявным, когда они взаимодействуют через окружающую среду (стигмергия, stigmergy).

Заметим, что организация дискретного режима БСС и согласование работы узлов в этом режиме является формой самоорганизации, т. к. при этом взаимодействие узлов обретает временную структуру.

При разработке самоорганизующихся систем руководствуются следующими принципами [12].

Разрабатывать правила локальных взаимодействий, достигающие глобальных целей. Вместо разработки глобальных свойств и поведения системы стремятся разработать взаимодействия на локальном уровне, из которых на глобальном уровне проявится необходимое поведение системы. Однако часто глобальное поведение системы не сводится к локальным взаимодействиям очевидным образом. В этом случае задача может быть разбита на подзадачи: информация собирается локально, обрабатывается, а затем происходит обмен

информацией с соседними узлами. Информация должна быть обработана так, чтобы нахождение решения в масштабе всей системы было возможно без знания полной картины системы. Значение данного принципа заключается в том, что отсутствие предписанных шаблонов поведения системы позволяет ей адаптироваться к ранее неизвестным ситуациям [13].

Не стремиться к совершенной координации, использовать неявную координацию. В системах с централизованным управлением часто стремятся полностью избежать конфликтов из-за ресурсов между компонентами. Но при высокой подвижности (пространственной, временной и т. п.) компонентов это приводит к неоправданно высоким затратам ресурсов на координацию. Решением является допущение конфликтов при условии, что они локальны, легко обнаруживаемы и разрешаемы. Примером такого подхода является применение схемы множественного доступа CSMA/CD, обнаруживающей коллизии в локальных проводных сетях [14].

Сократить использование информации о состоянии системы. Сетевое устройство может находиться в несконфигурированном или сконфигурированном состоянии. Разница между состояниями заключается в том, в сконфигурированном состоянии устройство владеет информацией о системе. Это может быть сетевой адрес, таблица маршрутизации и т. п. информация. Вследствие подвижности узлов сети подобная информация может утратить актуальность. Следовательно, высокая степень самоорганизации может быть достигнута только при отказе или значительном сокращении объёма подобной информации. Взамен использования

хранимой информации о системе узлов должна быть предоставлена возможность получения актуальной информации по запросу [12].

Разрабатывать протоколы, адаптирующиеся к изменениям. Узлы должны уметь реагировать на изменения в сети и в окружающей среде. Эти изменения могут быть вызваны подвижностью узлов, их выходом из строя, изменением доступного объёма ресурсов, получением новых инструкций со стороны пользователя. При отсутствии централизованного управления узлы должны сами обнаруживать такие изменения и реагировать на них должным образом. Можно выделить три уровня реагирования [12]: 1) возможность изменений может быть предусмотрена последовательностью действий алгоритма; 2) алгоритм может изменить свои параметры в ответ на обнаруженные изменения; 3) алгоритм может принять решение о необходимости использования другого, более уместного в сложившихся условиях алгоритма.

4. Алгоритмы и методы самоорганизации БСС

Задачей самоорганизации БСС на канальном уровне является обеспечение множественного доступа к каналу. В беспроводных сетях затухание сигнала по мере удаления от передатчика приводит к двум возможным проблемам, которые должны быть решены средствами самоорганизации.

На рис. 1 показаны три узла А, В и С и области приёма их сообщений. Узлы А и С не в состоянии обнаружить передачу друг друга, но на узле В при

одновременной передаче узлов А и С произойдёт коллизия. Эта проблема известна как «проблема скрытого узла» (hidden node) [14].

На рис. 2 показаны четыре узла А, В, С и D и области приёма их сообщений. Во время передачи узла В, адресованной узлу А, узел С принимает это сообщение и решая, что канал занят, не начинает свою передачу, адресованную узлу D. В результате сообщение, которое могло бы быть передано одновременно с работой узла В, будет доставлено позже. Эта проблема известна как «проблема незащищённого узла» (exposed node) [14].

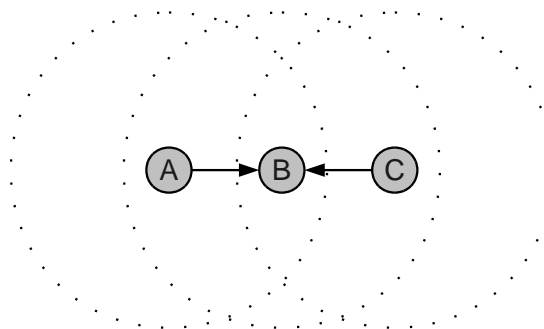


Рис. 1. Проблема скрытого узла.

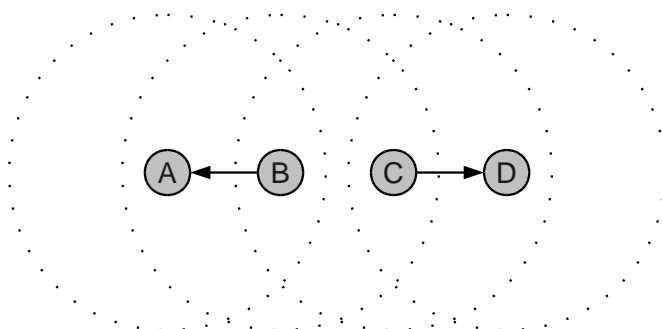


Рис. 2. Проблема незащищённого узла.

Для решения названных проблем был предложен протокол **МАСА** (Multiple Access with Collision Avoidance) [14; 15], предусматривающий перед передачей основного сообщения предварительный обмен короткими сообщениями

(рукопожатие, handshake) между отправителем и получателем. Соседние узлы, приняв эти сообщения, задерживают свои передачи (рис. 3).

Отправитель (узел А) сначала посылает получателю запрос на передачу RTS (Request To Send), содержащий длину основного сообщения. Получатель (узел В) отвечает разрешением на передачу CTS (Clear To Send), также содержащим длину сообщения с данными. После получения CTS отправитель передаёт сообщение с данными DATA. Факт отсутствия ошибок в принятом сообщении с данными может быть подтверждён приёмником при помощи короткого сообщения ACK (Acknowledgement).

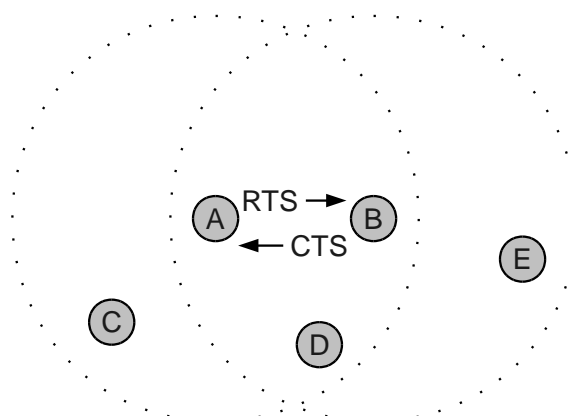


Рис. 3. Протокол МАСА.

Помимо поведения отправителя и получателя, протокол МАСА регулирует поведение узлов, принявших сообщения RTS и/или CTS. Узлы, принявшие RTS (на рис. 3 это С и D), находятся в окрестности отправителя, они должны задержать свои передачи, чтобы дать отправителю возможность принять CTS. Узлы, принявшие CTS (на рис. 3 это D и E), находятся в окрестности получателя, они должны

задержать свои передачи, чтобы дать получателю возможность принять пакет с данными.

Если коллизия всё-таки произошла, например, из-за одновременной отправки пакетов RTS несколькими передатчиками, эти узлы, не получив CTS, выжидают случайный интервала времени и повторяют процедуру с начала.

Для организации множественного доступа к каналу в дискретном режиме был предложен протокол **S-MAC** (Sensor MAC) [8]. S-MAC основан на идеях работы узлов по расписанию и предварительного согласования передачи данных при помощи пары сообщений RTS/CTS.

После включения узел некоторое установленное время ожидает приёма расписания работы от своих соседей. Если узел расписания работы не получил, он случайным образом создаёт собственное расписание и широковещательным сообщением SYNC информирует все окружающие узлы, что он перейдёт в сон через t секунд.

Если узел успел получить расписание работы соседа (сообщение SYNC с параметром t) до создания собственного, то он принимает его. Узел ожидает случайный интервал времени t_d , а затем ретранслирует расписание сообщением SYNC, сообщая, что он перейдёт в сон через $t - t_d$ секунд. Случайная задержка позволяет снизить вероятность коллизий в случае, если расписание было принято и другими узлами. Заметим, что принятие и ретрансляция чужого расписания являются проявлением ПОС.

Если узел получает расписание соседа после выбора и трансляции своего собственного, он принимает оба расписания. Это значит, что он будет просыпаться и по своему расписанию, и по расписанию соседа. Перед переходом в сон он транслирует собственное расписание. Синхронизация работы узлов обеспечивается тем, что в сообщениях SYNC момент перехода узла в сон t задаётся не абсолютным, а относительным значением.

Интервал работы узла состоит из двух частей. Первая предназначена для получения сообщений SYNC, вторая — для сообщений RTS/CTS. Каждая из этих частей разбита на большое количество интервалов, предназначенных для прослушивания несущей. Сообщения SYNC и RTS передаются передатчиками с предварительным прослушиванием несущей, т. е. только после того, как узел убедится в том, что канал свободен в течение целого интервала. Прослушивание несущей подразделяется на физическое (анализ уровня принимаемого сигнала трансивером в течение всего выбранного интервала) и виртуальное (проверка, закончились ли указанные в ранее принятых сообщениях RTS/CTS интервалы времени, зарезервированные для передачи сообщений). Если у некоторого узла появляются данные для передачи другому узлу, он во время активности второго узла выбирает случайным образом интервал прослушивания несущей и выполняет виртуальное и физическое прослушивание. Если обе проверки завершились успешно, узел начинает передачу RTS. Для сокращения расхода энергии узлы, приняв RTS или CTS, и поняв, что сообщение с данными (более длинное, чем RTS/CTS) адресовано не им, не просто хранят молчание, а переходят в состояние сна

(рис. 4). Время передачи последовательности сообщений RTS-CTS-DATA-ACK может выйти за границу периода активности, в этом случае отправитель и получатель перейдут в режим сна по окончании передачи.

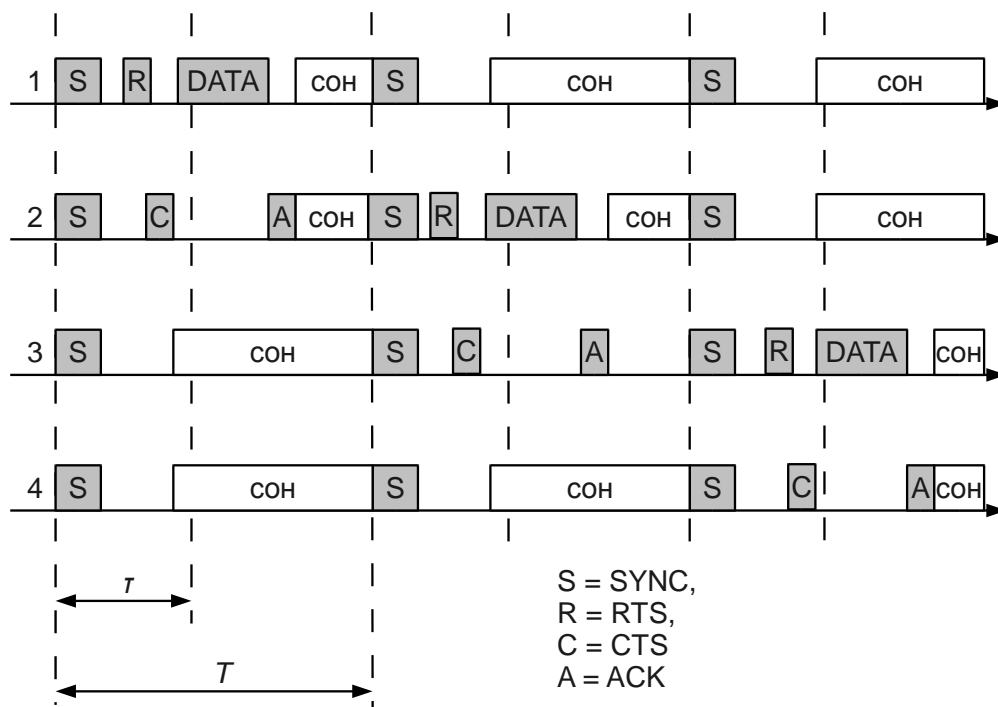


Рис. 4. S-MAC: передача сообщения по многошаговому маршруту.

Недостатком S-MAC является внесение достаточно больших задержек при передаче сообщений по многошаговым маршрутам — за один период активности сообщение проходит только один шаг маршрута (рис. 4). В работе [16] этот недостаток был частично устранён. Для этого по окончании передачи данных на всех участвующих в ней узлах, которые были об этом уведомлены при помощи RTS/CTS, добавляется дополнительный период активности, позволяющий передать сообщение на следующий в многошаговом маршруте узел. В работе [17] были предложены адаптивные периоды активности.

Другим известным протоколом MAC является **PCM** (Power-Control MAC) [18].

Его идея заключается в том, чтобы передавать сообщение с минимально возможной мощностью, что экономит энергию источника питания.

Передача сообщения начинается с обмена сообщениями RTS/CTS, передаваемыми узлами с использованием полной мощности передатчика p_{\max} . При передаче сообщения DATA мощность передатчика снижается до

$$P_{desired} = \frac{P_{\max}}{P_r} P_{thresh} c,$$

где p_r — мощность принятого CTS, p_{thresh} — минимально допустимая мощность успешно принимаемого сообщения, c — константа, $c \geq 1$. Для передачи АСК также используется мощность $P_{desired}$, см. рис. 5.

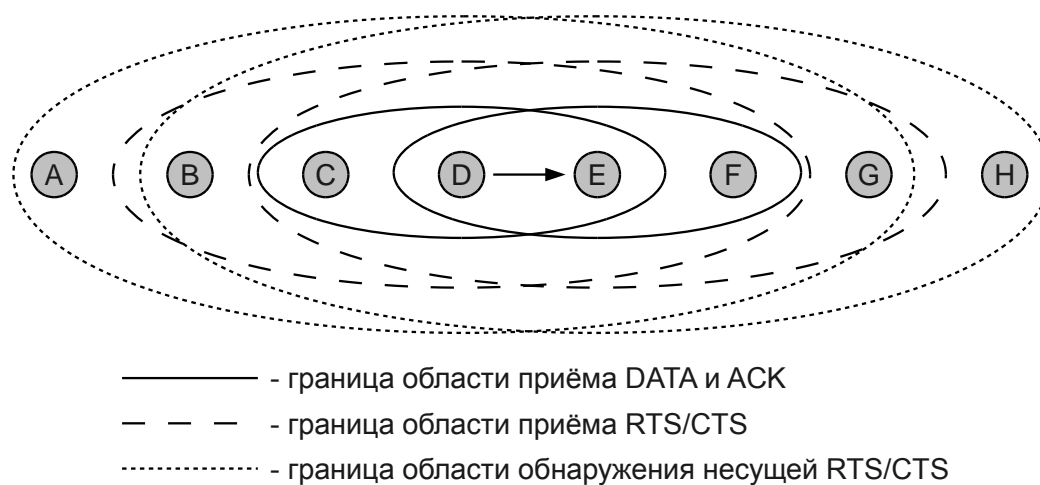


Рис. 5. PCM: передача сообщения от узла D узлу E.

Такой подход основан на двух предположениях: 1) затухание сигнала одинаково в обоих направлениях передачи и 2) уровень шумов в окрестности приёмника не превышает некоторого порога (заметим, что величина этого порога

определяется значением константы c). Эти предположения могут быть не верны, но во многих случаях допустимы.

Однако, т. к. мощность передачи DATA и АСК может быть снижена, другие узлы (на рис. 5 это А и Н) могут счесть канал свободным, начать передачу и вызвать коллизию. Во избежание этого в [18] предлагается периодически повышать мощность передачи до p_{\max} .

Предложенный в [19] протокол **SMACS** (Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks) предполагает наличие большого количества доступных частотных каналов. Однако расширение спектра, предусмотренное стандартом IEEE 802.15.4, значительно сокращает количество каналов. Так в диапазоне 2400 МГц существует 16 широкополосных каналов, которые могут использоваться для реализации SMACS. Каждой паре соседних узлов предлагается не только выбрать интервал в суперфрейме, но и частотный канал. Заметим, что создание расписания работы в SMACS выполняется однократно, а мобильные узлы рассматриваются только в качестве расширения (они начинают взаимодействовать с сетью после формирования структуры из стационарных узлов). Это делает SMACS мало применимым для БСС с подвижными узлами.

На основе некоторых идей SMACS построен протокол **SFSN** (Self-organizing Sensor Network) [20; 21], совмещающий протокол множественного доступа к каналу с алгоритмом самоорганизации. Работа БСС разбивается на последовательность эпох, состоящих из фазы самоорганизации и нескольких рабочих фаз. На фазе самоорганизации создаётся расписание работы узлов. Во время рабочих фаз БСС

работает по созданному расписанию. Длительность эпохи устанавливается при разработке сети в зависимости от подвижности узлов и других факторов и может колебаться в широких пределах. Фазы самоорганизации и рабочие фазы состоят из интервалов, разбитых на большое (до 1000) число микроинтервалов. При переходе к новому микроинтервалу узлы по известной им последовательности меняют частотный канал. Первым на фазе самоорганизации начинает работать узел-шлюз. Он передаёт приглашение на подключение к сети. Другие узлы, приняв приглашение, отвечают на него. При этом могут произойти коллизии, разрешаемые с помощью алгоритма CRA (Collision Resolution Algorithm) [22]. Узел, выбранный в результате работы CRA, получает право ответить на приглашение. После ответа каждый из узлов включает другого в свой набор соседей и запоминает номер интервала, который будет использован для связи с этим соседом на рабочих фазах. После этого вновь подключенный узел передаёт приглашение на подключение к сети. Перечисленные выше действия повторяются заданное количество раз, после чего фаза самоорганизации завершается.

На рабочих фазах узлы взаимодействуют друг с другом в порядке, обратном тому, в котором они были подключены к сети при самоорганизации. Например, первый подключенный к сети узел будет передавать сообщение шлюзу на рабочей фазе последним. Это позволяет агрегировать данные и сократить количество сообщений в сети. На рабочих фазах каждый узел уже имеет расписание работы, поэтому коллизии не возникают, а алгоритм CRA не применяется.

Недостатки SFSN: 1) хранение сетевой информации в течение рабочих фаз эпохи снижает способность сети обрабатывать перемещение узлов; 2) отсутствие распространения сетевой информации во время рабочих фаз может привести к несогласованной работе узлов вследствие отсутствия синхронизации; 3) нестандартная схема множественного доступа к каналу препятствует использованию промышленных реализаций стеков протоколов.

Из протоколов сетевого уровня простейшим является **заливка** (flooding) [2; 14]. Этот протокол ретранслирует пришедший пакет всем возможным получателям. Однако, если не принять специальных мер, сеть скоро будет заполнена копиями исходного пакета. К таким мерам относятся: присваивание пакету порядкового номера для того, чтобы узел только один раз передавал пакет с таким номером; задание времени жизни пакета (Time To Live, TTL) и уменьшение TTL на единицу при каждой ретрансляции, после обнуления поля TTL пакет уничтожается; и т. д. Заливка не использует информацию о топологии сети, поэтому маршрут доставки сообщения адресату в общем случае не будет оптимальным. В то же время, возможность работы при полном отсутствии информации о топологии сети является преимуществом заливки с точки зрения самоорганизации. Заливка более эффективна для передачи широковещательных сообщений, чем адресных. Надёжность заливки высока — если существует путь к адресату, он будет найден. Простота и надёжность заливки позволяют использовать её для реализации более сложных сетевых протоколов. Заметим, что ретрансляция исходного пакета всем возможным

адресатам является проявлением ПОС, а ограничение времени жизни пакета является проявлением ООС.

Протокол **AODV** (Ad hoc On-demand Distance Vector — маршрутизация по требованию по вектору расстояний в самоорганизующихся сетях) [14; 23; 24] адаптирован для работы в самоорганизующихся сетях с подвижными узлами. AODV устанавливает маршрут только тогда, когда он понадобился для передачи сообщения, т. е. является реактивным.

Пусть узлу А понадобилось передать данные узлу I (рис. 6). Узел А формирует запрос Route Request, указывая в нём свой адрес, адрес I и номер запроса. Для распространения этого запроса используется протокол заливки. Запрос постепенно распространяется по сети. В запросе указан уникальный номер, узлы, получившие его копию (например, узел С получит получит запрос дважды, от А и D), могут распознать этот факт и проигнорировать повторное получение запроса (торможение). Каждый узел запоминает, от кого он получил запрос. На каждом шаге передачи запроса увеличивается счётчик шагов.

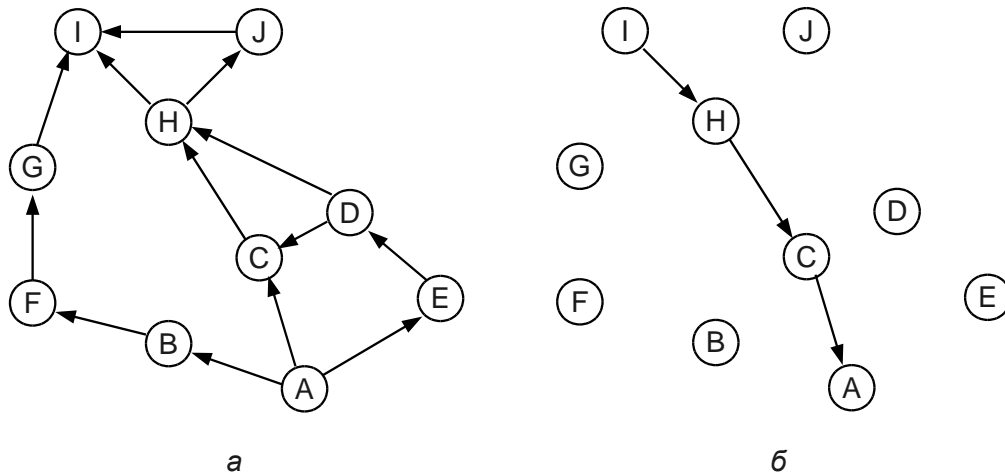


Рис. 6. Работа AODV, а - передача Route Request, б - передача Route Reply.

После достижения запросом цели, узла I, этот узел формирует ответ Route Reply и отправляет его назад, инициатору поиска маршрута. Ответ пересылается по тому же пути, по какому пришёл запрос. Получая ответ, узлы узнают, кому надо пересылать пакет, предназначенный для искомого адреса. В больших сетях для сокращения количества пакетов используется параметр TTL, ограничивающий время жизни пакета.

Поскольку узлы подвижны, некоторые маршруты могут быть со временем нарушены. Этот факт может быть обнаружен при отправке сообщения по существующему маршруту, или если некоторый узел не отвечает на периодически рассылаемые служебные сообщения Hello. При нарушении связи между узлами источнику активного маршрута отправляется сообщение Route Error, перечисляющее все узлы назначения, для которых нарушены маршруты. Если какие-либо из этих маршрутов ещё требуются, источник может выполнить их поиск заново.

На узлах хранится информация только об используемых маршрутах. Информация о неиспользуемых маршрутах удаляется. Это объясняется ограниченностью ресурсов (памяти) узла и тем, что обновление устаревшей информации может потребовать больше ресурсов, чем поиск маршрута заново.

Преимуществом AODV является использование актуальных маршрутов, недостатком — большое количество служебных сообщений Route Request и Route Reply при поиске маршрута, что сильнее всего заметно в сетях с относительно небольшим трафиком данных.

В протоколе **OLSR** (Optimized Link-state Routing) [25; 26] узлы используют широковещательные сообщения HELLO для обмена информацией о своих соседях. Сообщения HELLO отправляются узлами с интервалом HELLO_INTERVAL и не ретранслируются, поэтому узлам доступна информация только о своих одношаговых и двухшаговых соседях. Информация о своих соседях распространяется узлами при помощи сообщений TOPOLOGY_CONTROL, отправляемых с интервалом TC_INTERVAL. Эти сообщения ретранслируются по сети. Исходя из полученных сообщений HELLO и TOPOLOGY_CONTROL, узлы строят граф, представляющий сеть с их точки зрения. На основании этого графа может быть определён узел, которому надо переслать сообщение. Для сокращения трафика служебных сообщений в OLSR вводится понятие MPR-ретранслятора (MultiPoint Relay). Узел выбирают в качестве своих MPR-ретрансляторов соседние узлы так, чтобы каждый из его двухшаговых соседей оказался одношаговым соседом как минимум одного MPR. В сообщениях TOPOLOGY_CONTROL передаётся информация только об

узлах, выбравших текущий узел в качестве MPR-ретранслятора. Кроме того, широковещательное сообщение ретранслируется узлом только если он является MPR-ретранслятором отправителя.

Если от соседа не получено сообщений HELLO, информация о нём удаляется по истечении интервала NEIGHB_HOLD_TIME. Если о некотором соединении узел не получал информацию в течение TC_HOLD_TIME, информация об этом соединении удаляется.

Преимуществом OLSR является сокращение трафика при открытии маршрута, недостатком — необходимость периодической проверки соединений. Заметим, что высокая подвижность узлов (как пространственная, так и временная, характерная для дискретных БСС) является препятствием к использованию протокола OLSR.

Протокол **AODVv2** (AODV версии 2) [27], ранее известный как DYMO, наследует черты AODV при более высокой производительности. Повышение производительности достигается за счёт того, что в служебных сообщениях Route Request и Route Reply содержится информация не только об искомом маршруте, но и о маршрутах к промежуточным узлам. Это позволило совместить в AODVv2 свойства как реактивных, так и проактивных протоколов. К недостаткам AODVv2 можно отнести большую долю служебного трафика протокола при пересылке редких сообщений, а также увеличение длины сообщений Route Request и Route Reply.

Общей чертой протоколов AODV, OLSR и их многочисленных модификаций (например, [28]) является отсутствие ограничений на возможные связи между узлами, т. е. каждый узел может передать сообщение любому своему соседу.

Противоположный подход используется в протоколах **иерархической маршрутизации**. В этом случае на возможные связи между узлами накладываются серьёзные ограничения, которые можно рассматривать как проявление торможения. Например, при топологии «звезда» в сети имеется один координатор, а все остальные узлы могут взаимодействовать только с ним. Поэтому сообщения, адресованные не координатору, должны быть переданы сначала координатору, а затем координатор ретранслирует их узлу назначения. Необходимость взаимодействия двух даже близко расположенных узлов через координатор, конечно, является недостатком топологии «звезда». Но задачей БСС является сбор результатов измерений датчиков. Если обязанности шлюза возложены на координатор, то значимость отмеченного недостатка, как минимум, существенно сокращается.

Топология «звезда» ограничивает физические размеры сети, не позволяя узлам находиться вне пределов радиовидимости координатора. В отличие от неё древовидная топология предусматривает создание сложных, пространственно протяжённых структур взаимодействия. У каждого узла в дереве есть один «родитель» и несколько «потомков», с которыми узел может взаимодействовать (исключением является координатор, у которого нет родителей, взаимодействовать он может только со своими потомками). С другими узлами, пусть даже находящимися по соседству, узел не может взаимодействовать. Этот недостаток, с учётом назначения БСС, по названным ранее причинам не является существенным. Однако это обстоятельство является причиной возникновения другой проблемы —

количество сообщений нарастает по мере приближения к координатору. Решением данной проблемы может явиться агрегирование (обезличивание) данных. Маршрутизации сообщений в сетях древовидной топологии посвящено немало работ, например, [2; 3; 29; 30; 31].

5. Выводы

Анализ публикаций, посвящённых самоорганизации в БСС, позволяет сделать следующие выводы.

1. Основными целями исследований в области БСС являются: обеспечение масштабируемости, повышение надёжности доставки результатов измерений, обеспечение требуемой долговечности, согласование работы узлов (синхронизация), повышение скорости доставки сообщений, внутрисетевая обработка и агрегирование результатов.

2. БСС будет полностью функциональной только при достижении всех целей, достижение отдельных целей без учёта других не имеет смысла.

Например, требование повышения долговечности влечёт за собой необходимость организации дискретного режима. Для согласования работы узлов в дискретном режиме требуется синхронизация. Дискретный режим накладывает ограничения на применяемые протоколы маршрутизации. Синхронизация требует тесного взаимодействия с аппаратурой, потому должна тесно взаимодействовать с физическим и канальным уровнями стека протоколов. Выбор протокола

маршрутизации влияет на масштабируемость БСС. Большое количество узлов в сети приводит к более длинным маршрутам, что снижает долговечность БСС.

Наличие конкурирующих смыслов и целей является одной из характеристик самоорганизующихся систем [32; 33]. На этом основании может быть сделан третий вывод.

3. Согласование значений критериев (масштабируемость, надёжность, долговечность, скорость доставки сообщений) должно быть выполнено в рамках разработки метода самоорганизации БСС, устанавливающего правила локальных взаимодействий узлов, и в итоге обеспечивающем нужное поведение БСС в целом. Вместо разработки алгоритмов достижения отдельных целей должен разрабатываться комплексный метод функционирования, основанный на самоорганизации, и направленный на совместное достижение требуемых значений названных критериев.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ

в рамках научного проекта № 17-08-01641а.

Библиографический список

1. Karl H., Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks, Chichester, Wiley, 2005. 526.
2. Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Самоорганизация в древовидных персональных беспроводных сетях при наличии нескольких шлюзов //

- Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 1. С. 75–85.
3. Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Автоматизированное проектирование адаптивных дискретных беспроводных сенсорных сетей для космических систем. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 128 с.
 4. Bai F., Helmy A. A Survey of Mobility Models in Wireless Adhoc Networks // Wireless Ad Hoc and Sensor Networks. Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 1-29.
 5. Andréa G. Ribeiro, Rute Sofia. A Survey on Mobility Models for Wireless Networks, 2011, URL:
https://www.researchgate.net/publication/244478001_A_survey_on_mobility_models_for_wireless_networks
 6. Dressler F. Self-Organization in Sensor and Actor Networks. Chichester, Wiley, 2007, 386 p.
 7. Махорин А.О., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Постановка задачи оптимизации параметров процедуры смены роли узлов многошлюзовой беспроводной самоорганизующейся сети произвольной топологии в аэрокосмической системе // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 260-263.
 8. W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks // Proceedings of the IEEE Infocom, New York, 2002, vol. 3, pp. 1567-1576.

9. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам: Пер. с англ. - М.: Мир, 1991. - 240 с.
10. Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, Oxford University Press, USA, 1999, 320 p.
11. Turing A.M. The chemical basis of morphogenesis // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1952, vol. 237, no. 641, pp. 32-72.
12. Prehofer C., Bettstetter C. Self-organization in communication networks - principles and design paradigms // IEEE Communications Magazine, 2005, vol. 43, no. 7, pp. 78-85.
13. Gershenson C. Guiding the self-organization of random Boolean networks // Theory in Biosciences, 2012, vol. 131, no. 3, pp. 181-191.
14. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 960 с.
15. Karn P. MACA: a new channel access method for packet radio // In ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference. London, Ontario, Canada, 1990, pp. 134-140.
16. Ye W., Heidemann J., Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks // IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, vol. 12, no. 3, pp. 493-506.
17. Tijs van Dam, Koen Langendoen. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks // In Proceedings of the first international

- conference on Embedded networked sensor systems - SenSys '03. ACM Press, New York, Los Angeles, USA, 2003, pp. 171-180.
- 18.Jung E.-S., Vaidya N.H. A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks // Wireless Networks, 2005, vol. 11, no. 1-2, pp.55-66.
- 19.Sohrabi K., Gao J., Ailawadhi V., Pottie G. J. Protocols for self-organization of a wireless sensor network // IEEE Personal Communications, 2000, vol. 7, no. 5, pp.16-27.
- 20.Marinescu D.C., Yu C., Marinescu G. M. Scale-free, self-organizing very large sensor networks // Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, vol. 70, no. 5, pp. 612-622.
- 21.Marinescu D.C. Complex Systems and Clouds. A Self-Organization and Self-Management Perspective. Elsevier, 2017, 238 p.
- 22.Rom R., Sidi M. Multiple Access Protocols: Performance and Analysis, New York, Springer-Verlag, 1990, 172 p.
- 23.Perkins C.E., Royer. E.M. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. Proceedings // the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications. New Orleans, LA, February 1999, pp. 90-100.
- 24.Royer E.M., Perkins C.E. An Implementation Study of the AODV Routing Protocol // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Chicago, IL, USA, 2000, pp. 1003-1008.
- 25.Clausen T., Jacquet P. RFC 3626 - Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). URL: <http://www.rfc-editor.org/refs/ref3626.txt>

26. Кирьянов А., Сафонов А., Хоров Е. Методы исследования переходных характеристик протокола OLSR при включении/выключении узла связи // Труды 33-й конференции "Информационные технологии и системы (ИТиС)", Геленджик, 2010. С. 20-29.
27. Ad Hoc On-demand Distance Vector Version 2 (AODVv2) Routing. URL: <https://www.ietf.org/archive/id/draft-ietf-manet-aodvv2-16.txt>
28. Aravind M.C., Sangeetha C.P., Suriyakala C.D. Enhanced Dynamic MANET On-demand (En-DYMO) Routing Protocol for Mobile Adhoc Networks // IEEE 2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT), Thuckalay, India, 2015, pp. 544-549.
29. Gnawali O., Fonseca R., Jamieson K., Kazandjieva M., Moss D., Levis P. CTP: An Efficient, Robust, and Reliable Collection Tree Protocol for Wireless Sensor Networks // ACM Transactions on Sensor Networks, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 1-49.
30. Xie S., Wang Y. Construction of Tree Network with Limited Delivery Latency in Homogeneous Wireless Sensor Networks // Wireless Personal Communications, 2014, vol. 78, no. 1, pp. 231-214.
31. Gadallah Y., Elmorsy M., Ibrahim M.N., Ragai H. ECTP: Enhanced Collection Tree Protocol for Practical Wireless Sensor Network Applications // IEEE 2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2013), Sardinia, Italy, 2013, pp. 165-170.

32. Падалко С.Н. Определение тандемной модели как базовой формы представления многоуровневых математических моделей при проектировании аэрокосмической техники // Труды МАИ. 2013. №71. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=47069>
33. Di Marzo Serugendo Giovanna, Gleizes Marie-Pierre, Karageorgos Anthony. Self-Organization in Multi-agent Systems. Rapport de recherche IRIT/2005-18-R, Universite Paul Sabatier, Toulouse. URL: https://www.irit.fr/TFGSO/DOCS/TFG2/TFGIISO_LongReport.pdf