

УДК 621.391

В. Ю. Юркин<sup>1</sup>, Т. И. Мохсени<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)<sup>2</sup>Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН

## Иерархические подходы к самоорганизации в беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетях на основе хаотических радиоимпульсов

В работе рассматривается задача самоорганизации в беспроводных сенсорных сетях и предлагаются два алгоритма для её решения. Приводятся результаты имитационного моделирования обоих алгоритмов. Оценивается время самоорганизации сети при использовании узкополосных и сверхширокополосных сигналов в рамках стандартов IEEE 802.15.4 и IEEE 802.15.4a.

**Ключевые слова:** самоорганизация, беспроводные сенсорные сети, множественный доступ с разделением по времени.

### Введение

Изначально самоорганизацией называли природные явления, в которых наблюдалось самопроизвольное возникновение определённых структур. Для изучения процессов самоорганизации было выделено междисциплинарное направление научных исследований, задачей которого является изучение природных явлений и процессов на основе принципов самоорганизации систем. Подробно эти исследования были описаны основателем данного направления Германом Хакеном в его работе [1]. Со временем понятие самоорганизации стало расширяться и теперь применяется к явлениям, наблюдаемым не только в живой природе, физике и химии, но и в социальной сфере, в экономике, в математике и информатике, в кибернетике и даже в лингвистике.

Довольно подробно вопросы самоорганизации рассматриваются в коллективной монографии [2]. В частности, в ней проводится чёткое разделение процессов самоорганизации в естественных и технических системах. Авторами вводятся понятия «естественной» и «искусственной» самоорганизации и отмечается, что правила естественной самоорганизации, которая протекает в «естественных системах», определяются соответствующими законами природы. Правила же искусственной самоорганизации, которая протекает в разрабатываемых технических системах, задаёт «разработчик системы».

В данной статье рассматривается искусственная самоорганизация применительно к беспроводным сенсорным сетям. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) — самоконфигурируемая беспроводная сеть, состоящая из распределённых в пространстве малогабаритных интеллектуальных приёмопередатчиков, оснащённых набором сенсоров (датчиков). Такие сети предназначены для решения задач мониторинга. Типичными областями применения БСС являются: мониторинг окружающей среды и объектов животного мира, структурный и сейсмический мониторинг, промышленный и коммерческий мониторинг. Наличие радиомодуля в беспроводном сенсорном устройстве (БСУ) позволяет использовать БСС в приложениях, в которых невозможно или нецелесообразно использовать датчики с кабельными линиями связи. Особенностью беспроводных сенсорных сетей является способность к межузловой ретрансляции данных. Это позволяет передавать информацию на значительное расстояние при малой мощности передатчиков. Способность к ретрансляции сообщений даёт возможность организовывать сети различной топологии (топологии типа «линия», «шина», «кольцо» и т.д.), что радикально отличает БСС от других беспроводных сетей, большинство из которых использует только топологию «звезда». В качестве примера сетей с топологией «звезда» можно привести компьютерные Wi-Fi сети или сети сотовой связи.

Возможность конструировать сети различной топологии из одних и тех же БСУ позволяет адаптироваться БСС к решению конкретной задачи, связанной с передачей данных. Например, для сетей, в которых необходима высокая надёжность доставки данных, можно использовать ячеистую топологию, так как в ней существуют различные пути между устройством отправителем и устройством получателем. Поэтому при выходе из строя одного из промежуточных узлов сообщение всё равно дойдёт до получателя, но уже по другому пути. В случае если от сети требуется быстрая доставка данных, то предпочтительно использование топологии типа «линия», так как в такой структуре данные доставляются адресату с минимальным количеством ретрансляций.

Итак, самоорганизацией в БСС будем называть процесс самостоятельного образования, настройки и поддержания работы беспроводной сети, которая способна регулировать свои параметры и менять логику работы в ответ на изменение внешних факторов, таких как её загрузка, изменение структуры из-за выхода из строя узлов, из-за уменьшения энергии источников питания, из-за наличия ошибки при передаче/приёме сообщений через эфир и др. А целью самоорганизации в БСС является создание полностью автономной сети, которая после развертывания может функционировать без вмешательства оператора.

В данной работе рассматривается задача автоматической организации БСС при заранее неизвестном пространственном расположении беспроводных сенсорных устройств. Эта задача решается с помощью использования алгоритмов самоорганизации.

При разработке алгоритмов самоорганизации необходимо учитывать несколько аспектов:

- поддержку работоспособности различного количества устройств в сети (масштабируемость);
- организацию сети с минимальными энергозатратами (энергосбережение);
- ограниченность возможностей БСУ (ограниченность вычислительных способностей, малые объёмы памяти и т.д.).

К настоящему времени разработано более 100 различных алгоритмов самоорганизации в БСС [3], которые можно условно разбить на группы [4].

- Создание кластеров [5]. Данный подход заключается в том, что группа из нескольких узлов сети объединяется в кластер. Из узлов этой группы выбирается глава кластера. Все узлы кластера собирают информацию и передают её главе кластера, затем глава кластера обрабатывает полученную информацию и передаёт её на узел сбора данных.

- Создание цепочек связей [6]. Из множества сенсорных устройств строятся цепочки к одному узлу, который впоследствии передаёт собираемые данные на узел сбора данных.

- Создание древовидной структуры [7]. Данный подход напоминает предыдущий. Отличие заключается в том, что строятся не цепочки, а дерево связей, в корне которого находится узел сбора данных.

- Географические подходы [8]. В географических подходах используется знание о местоположении узлов, полученное, например, с помощью установленных на устройства модулей определения местоположения GPS/Глонасс. Используя эти данные, узлы могут организовываться в соответствующую структуру.

- Подход, использующий разнородность узлов сети [9]. Предполагается наличие в сети разнотипных узлов. Узлы одного типа занимаются только сбором данных, а узлы другого типа занимаются исключительно распространением собранных данных по сети. При этом узлы организуются в группы, а группы собираются в группы ещё большего размера. Таким образом, в сети образуется иерархическая групповая структура.

В настоящей статье предлагаются два иерархических алгоритма самоорганизации, учитывающие ограниченные возможности БСУ.

## Иерархические алгоритмы самоорганизации в БСС

Основное функциональное назначение сенсорных сетей — регистрация, обработка и передача данных в точку сбора. Так как сеть состоит из узлов с ограниченными дальностями

действия приёмопередатчиков, то непосредственная связь между источниками информации и точкой сбора может отсутствовать. В этом случае возможна передача данных с использованием ретрансляции, то есть данные перемещаются последовательно от дальних узлов сети к центральному узлу. Центральным узлом называется узел, подключенный к персональному компьютеру (ПК) и играющий роль точки сбора данных с сенсорных узлов. Структура такого рода сетей схожа с топологией типа «дерево», где «листьями» являются все сенсорные узлы, собирающие информацию о среде, а «корнем» — узел сбора данных. Алгоритмы, обеспечивающие организацию таких сетей, относятся к классу иерархических, так как формирующаяся сеть представляет собой иерархическую структуру типа «дерево».

В данной работе предлагаются два иерархических алгоритма самоорганизации (детерминированный и вероятностный), строящих топологию сети типа «дерево». Задача вероятностного и детерминированного алгоритмов заключается в определении узлами сети своих соседей (узлов, расположенных в пределах радиовидимости) и прокладке маршрутов до центрального узла.

Для корректной постановки задачи синтеза алгоритмов самоорганизации БСС необходимо сформулировать условия их функционирования: радиус действия приёмопередатчиков должен обеспечивать связность сети; каждый приёмопередатчик должен иметь свой уникальный сетевой номер; известно общее число узлов сети; приёмопередатчики стационарны или медленно перемещаются в пространстве. Также важным является допущение симметричности каналов связи между узлами.

Предлагаемые алгоритмы самоорганизации основываются на алгоритме *AODV* (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*) [7]. Алгоритм *AODV* был разработан для беспроводных сетей, состоящих из мобильных узлов, но также может применяться и для сетей со стационарными узлами. Маршрутизация данных в алгоритме осуществляется с помощью таблиц маршрутизации, которые каждый узел формирует самостоятельно в ходе процесса самоконфигурации беспроводной сети. Особенностью алгоритма является установление маршрутов между узлами по запросу на передачу данных. Для каждого объекта в сети таблицы маршрутизации содержат информацию о следующем узле на пути к узлу получателю, временные метки и служебную информацию. Маршруты поддерживаются только в том случае, если они действительно используются. Во избежание заикливания и для подтверждения того, что маршрут действительно свежий, используются порядковые номера. «Свежим» маршрут называется, если он был проложен относительно недавно и ещё не потерял свою актуальность. *AODV* использует следующие типы пакетов:

- Приветственные сообщения.
- Запрос о маршруте связи (*route request — RREQ*).
- Ответ о маршруте связи (*route reply — RREP*).
- Ошибка маршрута связи (*route error — RERR*).

Когда на узле появляется пакет данных для передачи, а путь до адресата не известен, инициируется широковещательная передача сообщений *RREQ* всем «соседям». Маршруты, по которым следовал запрос, фиксируются на промежуточных узлах. Сообщения *RREQ* будут размножены через сеть во всех направлениях, пока не достигнут адресата или узла с достаточно свежим маршрутом, после чего по обратному пути от получателя к отправителю высылается сообщение типа *RREP*, устанавливающее на промежуточных узлах путь для последующей передачи пакетов данных.

Рассмотрим беспроводную сверхширокополосную сенсорную сеть, в которой все узлы стационарны и используется один центральный узел, на котором аккумулируются все показания датчиков. Данные в такой сети передаются дискретными сообщениями (отсутствуют потоки данных) и не требуется 100% надёжность их доставки. Приоритетом является продолжительность времени автономной работы сети. Обычно это время составляет от нескольких месяцев до нескольких лет. Задача энергосбережения может решаться разными способами. Например, за счёт уменьшения времени работы датчиков и соответствующего увеличения периода их «сна». В спящем режиме устройства потребляют в 100–1000 раз

меньше энергии, чем в рабочем состоянии. Можно уменьшать нагрузку на сеть за счёт распределения функций между узлами. Одни узлы занимаются исключительно сбором данных, другие узлы их обработкой, третьи пересылкой обработанных данных. Также одним из способов уменьшения энергопотребления сети является сокращение объёма пересылаемой служебной информации между узлами. Объём и количество пакетов со служебной информацией определяется алгоритмом работы сети, то есть алгоритм должен задействовать минимум служебной информации. При этом он должен быть достаточно простым и учитывать крайне ограниченные вычислительные ресурсы приёмопередатчика.

Так как мы рассматриваем беспроводную сенсорную сеть, использующую сверхширокополосные (СШП) сигналы, то алгоритм самоорганизации должен учитывать особенности этих сигналов и характеристики применяемых СШП-приёмопередатчиков. Особенностью СШП-систем связи является сравнительно небольшой радиус действия (10–30 м) и потенциально высокая скорость передачи данных (1–100 Мбит/с). Таким образом, скорость обработки служебной информации согласно алгоритму самоорганизации сети должна быть достаточно высокой, чтобы не ограничиваться физической скоростью передачи данных между узлами. Длительная обработка служебной информации на каждом узле приведёт к уменьшению эффективной скорости передачи данных по каналу связи. А снижение эффективной скорости уменьшит изначальное преимущество в скорости СШП-систем связи по сравнению с узкополосными системами, применяемыми в беспроводных сенсорных сетях.

Исходя из специфики рассматриваемой беспроводной сенсорной сети, необходимо разработать алгоритм самоорганизации сети, учитывающий все описанные выше особенности.

## Вероятностный алгоритм самоорганизации

Наиболее подходящим алгоритмом самоорганизации для рассматриваемой сети является алгоритм *AODV*. Но применение его в чистом виде было бы не целесообразным, так как он ориентирован на использование в сетях с наличием мобильных узлов, а в рассматриваемой сети узлы стационарны.

В связи с этим некоторые механизмы работы *AODV* необходимо изменить и сократить размеры служебных пакетов. Например, нет необходимости использовать информацию о «свежести» пути, так как пути, установленные один раз, впоследствии не меняются. Изменение может произойти только в случае, если у одного из устройств разрядился источник питания, между узлами появилось непроницаемое для радиоволн препятствие или узел вышел из строя. Определять разрыв канала связи в этом случае можно по отсутствию ответного пакета на запрос, направленный к заданному узлу. Таким образом, мы не просто уменьшаем размер служебных пакетов, а убираем целый тип пакетов, именуемый в *AODV-RERR*, таким образом существенно уменьшая объём передаваемой по сети информации.

Помимо сокращения объёма служебной информации предлагается использование другого механизма определения пути между узлами. В алгоритме *AODV* маршрут прокладывается между любыми двумя устройствами сети. В данном алгоритме самоорганизации маршрут прокладывается между центральным узлом и всеми остальными узлами сети. Центральный узел является точкой сбора данных, все остальные узлы могут быть как ретрансляторами, так и оконечными устройствами с подключенными сенсорными модулями. Возможен вариант, когда устройство одновременно выполняет функции и ретранслятора, и оконечного устройства.

Центральный узел запускает процесс организации сети путём отправки в эфир специального широкополосного пакета инициализации. По сути, пакет инициализации является приглашением к присоединению узла к сети. Узлы, получившие такой пакет, ретранслируют его далее в эфир только в случае, если ранее не получали его от другого узла. За счёт такого подхода уменьшается излишняя нагрузка на сеть. Получая пакеты инициализации, узлы создают и хранят у себя в памяти таблицу маршрутизации, в которой записаны идентификационный номер сети, сетевой адрес центрального узла и сетевой адрес родительско-

го (по отношению к «дереву» связей) узла сети. Родительским по отношению к рассматриваемому узлу называется узел, который стоит в сетевой иерархии на 1 ступень ближе к центральному и логически с ним связан. В случае если пакет инициализации получен непосредственно от центрального узла, то в таблице маршрутизации адрес родительского узла совпадает с адресом центрального узла. Если пакет инициализации был получен от ретранслятора, то адрес родительского узла совпадает с адресом этого ретранслятора.

После получения пакета инициализации узел выжидает некоторое время и отправляет пакет подтверждения подключения к сети. Промежуточным адресатом этого пакета выставляется идентификационный номер родительского узла, а конечным – идентификационный номер центрального узла. Все узлы, получающие пакет подтверждения подключения к сети, ретранслируют его своему родительскому узлу. Таким образом, все пакеты подтверждения будут переданы на центральный узел. Центральный узел, получая пакет подтверждения, обрабатывает его и регистрирует новый подключенный узел. Когда идентификационный номер узла, отправившего пакет подтверждения, зарегистрирован на центральном узле, то этот узел считается проинициализированным.

Процесс инициализации узлов ограничен по времени. По истечении этого времени центральный узел строит топологию сети на основании полученных данных из пакетов подтверждения. Процесс самоорганизации беспроводной сети завершён.

В результате работы алгоритма самоорганизации строится топология сети типа «дерево», корнем которого является центральный узел. При этом передача данных от удаленных узлов на точку сбора осуществляется путем ретрансляции соответствующих пакетов промежуточными (родительскими) узлами.

В предложенном алгоритме самоорганизации возможны ситуации, когда в один и тот же промежуток времени разные узлы совершают обмен сообщениями. Для предотвращения коллизий пакетов используется алгоритм множественного доступа, аналогичный 1 - настойчивому *CSMA* (множественный доступ с контролем несущей – *carrier sense multiple access*) протоколу. Когда узел готов к передаче данных, он прослушивает канал в течение времени  $\tau$ , чтобы определить, не передаёт ли данные кто-либо другой. Если канал свободен в течение времени  $\tau$ , то узел продлевает время прослушивания канала на случайный интервал времени  $\theta$ . Причём  $\theta = k \cdot T$ , где  $k = 0..10$ ,  $T$  – длительность пакета инициализации. Если в течение времени  $\tau + \theta$  канал свободен, то узел передаёт данные. В случае занятости канала узел ждёт, когда он освободится.

В связи с использованием в алгоритме самоорганизации вероятностного доступа к каналу связи, вследствие чего возможно формирование различной топологии сети, алгоритм был назван вероятностным.

## Детерминированный алгоритм самоорганизации

Помимо вероятностного алгоритма в статье предлагается детерминированный алгоритм. Основное различие между вероятностным и детерминированным алгоритмами находится на уровне доступа к каналу связи и связано с механизмом устранения коллизий. В детерминированном подходе используется механизм последовательного опроса центральным узлом остальных узлов сети с целью определения их локальных соседей.

Процесс организации сети, также как и в вероятностном алгоритме, начинается с широковещательной посылки центральным узлом специального широковещательного пакета инициализации. При этом этот пакет не ретранслируется далее, а каждый узел, получив его, отправляет пакет подтверждения на центральный узел. Таким образом, центральный узел сначала регистрирует свои соседние узлы. Зарегистрированные на данном этапе узлы относятся к узлам 1-го круга. Затем центральный узел посылает специальный пакет-запрос идентификационных номеров соседей, адресованный к одному из зарегистрированных соседей 1-го круга. Узел 1-го круга, получив такой запрос, формирует широковещательный пакет инициализации и посылает его в эфир. Все узлы, получившие широковещательный запрос, отвечают на него пакетом подтверждения. Таким образом, узел 1-го круга узнаёт

идентификационные номера своих соседних узлов, принадлежащих 2-му кругу, и передаёт эту информацию на центральный узел.

Центральный узел, получив информацию о соседях узла 1-го круга, повторяет запрос соседей следующего узла 1-го круга. Следующий опрашиваемый узел 1-го круга повторяет процедуру, описанную выше.

Затем центральный узел, опросив все узлы 1-го круга, повторяет процедуру опроса с обнаруженными узлами 2-го уровня. Эта процедура продолжается до тех пор, пока не будут опрошены все обнаруженные узлы на предмет наличия у них соседних не опрошенных узлов. Процесс самоорганизации сети считается завершённым, когда не останется ни одного не опрошенного узла.

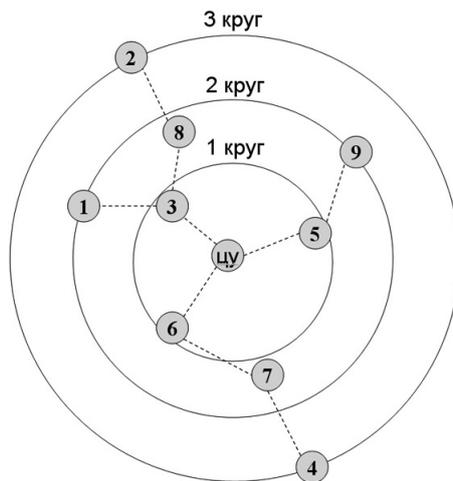


Рис. 1. Пример беспроводной сенсорной сети

Процесс последовательного опроса узлов можно описать на примере. На рис. 1 показана беспроводная сенсорная сеть, кружками обозначены БСУ, а пунктирными линиями – связи между ними. Центральный узел, послав широковещательный пакет инициализации, получает пакеты подтверждения о подключении к сети от узлов 3, 5 и 6. Это узлы 1-го круга – непосредственные соседи центрального узла. Затем центральный узел посылает запрос на установление идентификационных номеров соседей узла с номером 3. Узел 3 формирует и посылает в эфир широковещательный пакет инициализации и получает ответ от узлов 1 и 8. Информацию об обнаруженных соседях узел 3 передаёт на точку сбора. Действуя аналогично, центральный узел опрашивает узлы 5 и 6. Опросив все узлы 1 круга, на центральном узле фиксируются все узлы 2-го круга. В рассматриваемом примере это узлы 1, 7, 8, 9. Далее центральный узел опрашивает каждый из этих узлов и определяет, что только у узлов 7 и 8 есть соседи, принадлежащие к 3-му кругу. Опросив узлы 2 и 4, центральный узел заканчивает процесс самоорганизации, так как больше не опрошенных узлов в сети нет. Собрав необходимую информацию о связях между узлами, центральный узел может построить топологию организованной сети (рис. 2).

Так как в детерминированном алгоритме опрос всех узлов сети происходит последовательно, то коллизии пакетов могут появиться только на стадии отправки узлами пакета подтверждения подключения к сети. Для предотвращения коллизий в детерминированном алгоритме предлагается использовать метод на базе алгоритма несинхронной системы обмена данными *R-ALOHA* [10]. Каждый приёмопередатчик посылает пакет только в определённый временной промежуток времени (временной слот). Номер временного слота соответствует идентификационному номеру узла, отправляющего пакет. Из-за связи между временным слотом и номером устройства появляется ряд ограничений на применимость предлагаемого алгоритма. Необходимо, чтобы все узлы сети обладали уникальными идентификационными номерами, и также необходимо знание максимального идентификационного номера узла, входящего в организующуюся сеть.

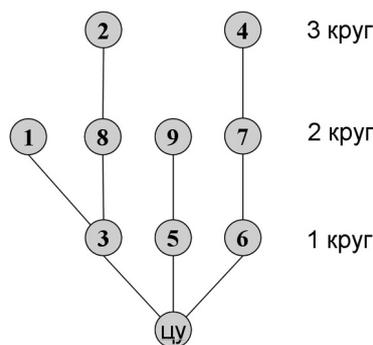


Рис. 2. Иерархическая структура связей между узлами беспроводной сенсорной сети

## Моделирование

Для анализа функционирования беспроводной сенсорной сети была создана имитационная модель, описывающая работу сети на канальном и сетевом уровнях. На канальном уровне моделируется доступ к каналу связи, передача и приём пакетов, обрабатываются коллизии. На сетевом уровне в модели формируются, анализируются и обрабатываются различные типы сетевых пакетов. В отдельном программном модуле задаётся общая логика работы устройств сети. Такая структура модели позволяет изменять логику работы устройств сети и следить за поведением сети в целом.

Целью моделирования являлось выяснение работоспособности предложенных алгоритмов и определение специфики их применения. В виде критерия качества было выбрано время самоорганизации сети, равное времени, за которое центральный узел получит информацию обо всех узлах, входящих в организуемую сеть (идентификационные номера узлов, данные о связях между узлами сети и другую дополнительную информацию). По полученной информации ПК сможет определить топологию всей сети. Отметим, что знание топологии сети не является обязательным требованием к самоорганизующимся сетям. Ниже приведены условия и результаты моделирования соответствующих алгоритмов.

### *Вероятностный алгоритм самоорганизации*

На площади  $S = M \times M$  квадратных метров случайным образом располагается  $N$  узлов сети с радиусом действия  $R$ , причём  $\pi R^2 \ll S$ .

В качестве исходных данных при моделировании задавались: длительность пакетов  $T_p$ , время обработки пакета  $T_o$ , время прослушивания эфира  $T_e$ , время обработки пакетов подтверждения  $T_r$ .

При моделировании изменялся параметр *RandWaitPeriod* — максимально возможное количество временных слотов, на которое задерживается отправка сигнала в эфир в случае, если до этого в эфире не было обнаружено других сигналов. Длительность одного временного слота равна времени отправки пакета и обработки его на принимающем узле. Каждый узел случайным образом выбирает номер временного слота из интервала  $[0, \text{RandWaitPeriod}]$ . При проведении каждого испытания расположение узлов изменялось случайным образом.

Перед выполнением моделирования один из узлов назначается точкой сбора. Далее с помощью вероятностного алгоритма самоорганизации моделируется процесс инициализации и самоорганизации сети. В результате моделирования организуется сеть с определёнными связями между узлами, то есть с помощью ПК вычисляется топология сети.

Было проведено 4 эксперимента по 20 испытаний. Параметры проведения имитационного моделирования следующие. Площадь разброса узлов сети  $S = 100 \times 100$  м<sup>2</sup>. Число узлов сети  $N = 100$ . Радиус действия  $R = 20$  м. При моделировании за основу были взяты характеристики сверхширокополосного прямохаотического приёмопередатчика ППС-40 [11]. Физическая скорость передачи данных — 2,5 Мбит/с. Длительность пакетов — 60 мкс.

Время обработки пакета на узле – 20 мкс. Фиксированное время прослушивания эфира – 120 мкс. Время, через которое отправляются пакеты подтверждения о присоединении узла к сети, – 12 000 мкс. В первом, втором, третьем и четвёртом экспериментах значение *RandWaitPeriod* принимало значения 100, 150, 200 и 250 соответственно.

Результаты проведённых экспериментов представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

### Результаты моделирования сети с помощью вероятностного алгоритма

RandWaitPeriod	Среднее кол-во проинициализированных узлов (из 100)	Среднее время инициализации в мкс	Усреднённое значение максимального кол-ва прыжков
100	86,7	245160	7,95
150	90,9	356692	8,05
200	92,95	485024	8,5
250	93,95	550015	8,15

### *Детерминированный алгоритм самоорганизации*

Как и в вероятностном алгоритме, в детерминированном подходе узлы располагаются случайным образом. При этом узлы сети присоединяются к центральному узлу последовательно. Первыми информацию о себе и своих связях сообщают узлы, расположенные в непосредственной близости от центрального узла. Затем опрашиваются узлы, расположенные в пределах одной ретрансляции от центрального узла. Потом центральный узел запрашивает информацию от узлов, расположенных на расстоянии двух ретрансляций от него, и т.д. Процесс продолжается до тех пор, пока все узлы не сообщат на центральный узел необходимую ему информацию для определения топологии сети.

Эксперименты, аналогичные описанным выше, также были проведены с помощью детерминированного алгоритма. Но в детерминированном алгоритме отсутствуют случайные задержки. Следовательно, реализации экспериментов не будут отличаться друг от друга. Поэтому был проведён один эксперимент из 20 испытаний. Результаты проведённого эксперимента представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

### Результаты моделирования сети с помощью детерминированного алгоритма

RandWaitPeriod	Среднее кол-во проинициализированных узлов (из 100)	Среднее время инициализации в мкс	Усреднённое значение максимального кол-ва прыжков
-	100	1438300	6,85

Результаты одного из испытаний детерминированного алгоритма можно видеть на рис. 3 и 4. На рис. 3 показано поле размером  $100 \times 100 \text{ м}^2$ , на котором расположены узлы, изображённые точками с подписанными идентификационными номерами. Линиями изображены связи между соседними узлами. На рис. 4 показан результат построения дерева связей, соединяющего все узлы с базовой станцией.

Из сравнения табл. 1 и табл. 2 видно, что в вероятностном алгоритме количество проинициализированных узлов меньше и составляет 95 %, а в детерминированном равно 100 %. При этом значительно различается время инициализации узлов. Среднее время инициализации в детерминированном алгоритме составляет 1,44 секунды, в то время как при использовании вероятностного алгоритма оно составляет менее 0,5 секунды.

В стандарте *IEEE 802.15.4 (ZigBee)* для беспроводных персональных сетей максимальная физическая скорость передачи данных в сенсорных сетях равна 250 Кбит/с на частоте 2,4 ГГц. То есть все узкополосные приёмопередатчики, совместимые с этим стандартом,

имеют скорость передачи в 10 раз меньше, чем сверхширокополосные приёмопередатчики на основе хаотических радиоимпульсов (физическая скорость передачи данных ППС–40–2,5 Мбит/с). Это означает, что время самоорганизации сети *ZigBee* будет на порядок больше, чем СШП-сети с хаотической несущей.

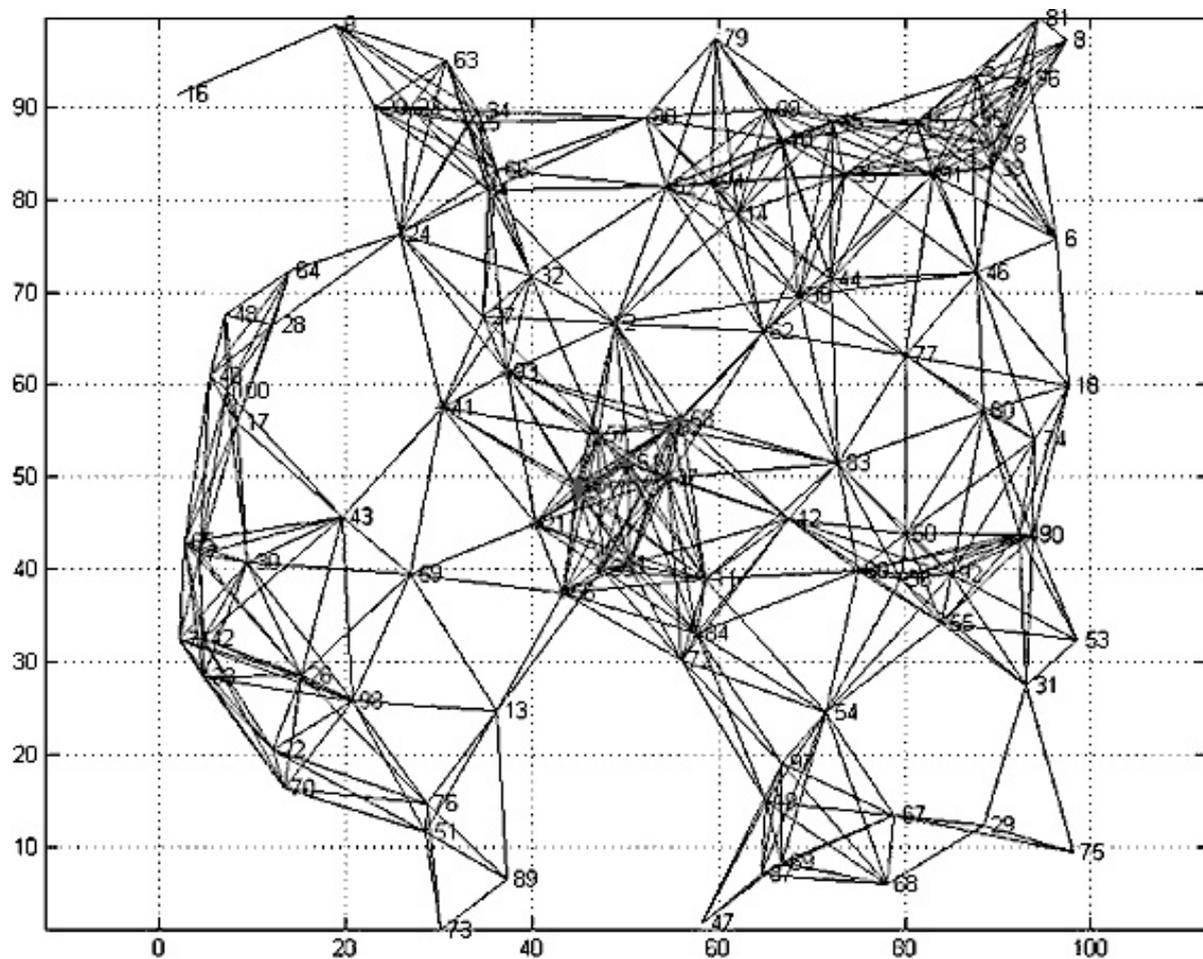


Рис. 3. Топология сети. Линиями показаны связи между узлами, находящимися в прямой радиовидимости друг друга

Анализ результатов моделирования процесса самоорганизации с использованием двух алгоритмов показал, что детерминированный алгоритм подходит для приложений, в которых важна инициализация всех БСУ сети. Вероятностный алгоритм подходит для задач, в которых не критична 100-процентная инициализация узлов сети, и важно обеспечить минимальное время развёртывания сети.

### Зависимость времени самоорганизации БСС от ширины полосы несущего сигнала

Пусть СШП-приёмопередатчик имеет радиус действия 30 м, а узкополосный 100 м. Тогда для покрытия одной и той же площади сенсорной сетью из устройств *ZigBee* и СШП сенсорной сетью из сенсорных приёмопередатчиков последних потребуется больше. Для приложений, в которых требуется разместить большое количество сенсорных устройств на небольшой площади, то есть для «плотных» сенсорных сетей, предпочтительным будет использование приёмопередатчиков на базе СШП-сигналов с хаотической несущей. Преимущество такого подхода заключается в более надёжной доставке пакетов за счёт устранения коллизий между узлами, попавшими в радиус действия передающего устройства. Если узкополосный *ZigBee* приёмопередатчик может установить связь с аналогичным

приёмопередатчиком на расстоянии до 100 метров без ретрансляций, то для СШП-сетей потребуется 2 ретрансляции.

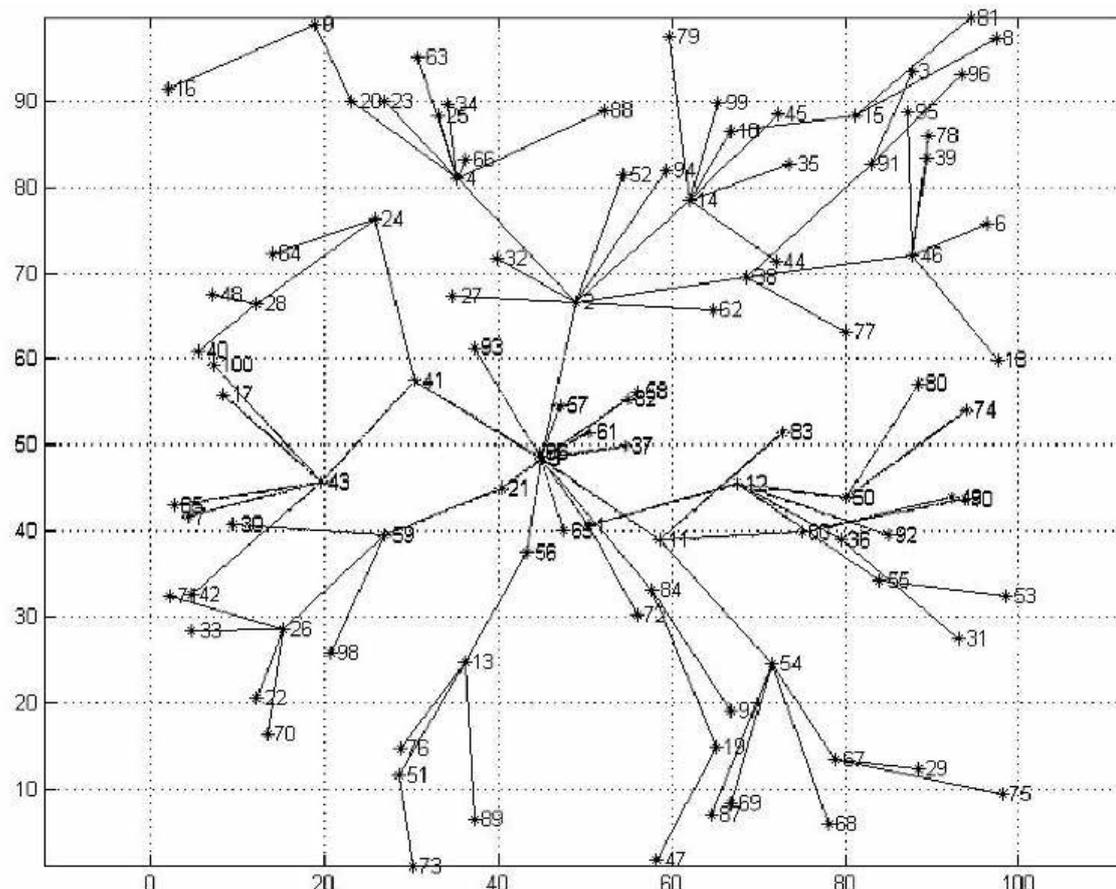


Рис. 4. Дерево связей, построенное в результате работы детерминированного алгоритма

Но согласно теореме Шеннона максимальная скорость передачи данных в канале связи прямо пропорциональна ширине полосы пропускания канала. Из этого следует, что СШП-системы связи имеют потенциально большую скорость, чем узкополосные системы. Следовательно, задержка на ретрансляции может быть скомпенсирована за счёт высокой скорости передачи данных.

Оценим время доставки сообщения в *ZigBee* сети без ретрансляций и в СШП-сети на базе прямохаотических приёмопередатчиков. Для передачи сообщения длиной 17 байт на скорости 250 Кбит/с *ZigBee* устройству понадобится  $\sim 550$  мкс. Для передачи того же сообщения в СШП-сети, работающей на скорости 2,5 Мбит/с с двумя ретрансляциями и учётом времени обработки на каждом ретрансляторе, понадобится  $\sim 200$  мкс (время обработки  $\sim 20$  мкс). Из приведённых оценок видно, что время доставки в СШП-сетях в 2 раза меньше, чем в узкополосных сетях *ZigBee*. Таким образом, высокая скорость в СШП прямохаотических системах связи не только компенсирует время, затрачиваемое на ретрансляцию пакетов, но и даёт в конечном счёте преимущество перед узкополосными системами связи, выражаемое в более быстрой доставке данных до получателя.

Из описанных выше алгоритмов самоорганизации для «плотных» сетей удобно использовать вероятностный алгоритм самоорганизации, так как его время самоорганизации почти в 3 раза меньше, чем у детерминированного алгоритма. Кроме того, время самоорганизации в вероятностном алгоритме можно уменьшить используя знания о плотности сети и в зависимости от этого подобрать параметр *RandWaitPeriod*. В случае если требуется надёжная доставка данных, то рекомендуется использование детерминированного алгоритма, так как он лишён главного недостатка вероятностного подхода, а именно наличия коллизий.

## Заключение

В статье рассмотрена задача самоорганизации в БСС. Предложены и исследованы детерминированный и вероятностный алгоритмы самоорганизации для ее решения в беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетях на основе хаотических сигналов. По сравнению с алгоритмом *AODV*, в предложенных подходах уменьшены объёмы передаваемой служебной информации. Следствием этого является более низкие энергозатраты при самоконфигурации сети (увеличение времени автономной работы сети), снижение требований к аппаратному обеспечению БСУ (возможность реализации на микроконтроллере с ограниченными вычислительными способностями) и уменьшение времени организации сети.

Проведён сравнительный анализ среднего времени самоорганизации сети для каждого алгоритма, на основе результатов которого предложены возможные варианты их применения. Показано, что использование системы с СШП-сигналами даёт преимущества в скорости по сравнению с узкополосными сигналами для задачи самоорганизации в плотных сенсорных сетях.

## Литература

1. *Хакен Г.* Синергетика. — М.: Мир, 1980.
2. От моделей поведения к искусственному интеллекту / под ред. В. Г. Редько — М.: КомКнига, 2006. — 456 с.
3. *Mills K.L.* A brief survey of self-organization in wireless sensor networks // *Wireless Communications and Mobile Computing*. — 2007. — V. 7, N 7. — P. 823–834.
4. *Dressler F.* A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks // *Computer Communications*. — 2008. — V. 31, N 13. — P. 3018–3029.
5. *Handy M.J., Haase M., Timmermann D.* Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic Cluster-Heads selection // *Proc. 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*. — 2002. — P. 368–372.
6. *Lindsey S., Raghavendra C.S.* Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems // *Proc. of the IEEE*. — 2002. — P. 924–935.
7. *Perkins C.E., Belding-Royer E.M., Das S.* Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing // *IETF RFC*. — 2003.
8. *Xu Y., Heidemann J., Estrin D.* Geography-informed energy conservation for ad hoc routing // *Proc. of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*. — 2001. — P. 70–84.
9. *Subramanian L., Katz R.H.* An architecture for building self-configurable systems // *Proc. Mobile Ad Hoc Network Comput. Workshop*. — 2000. — P. 63–73.
10. *Abramson N.* The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications // *Proc. 1970 Fall Joint Computer Conf., AFIPS Press*, – 1970. — V. 37. — P. 281–285.
11. *Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Юркин В.Ю.* Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети на основе хаотических радиоимпульсов // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. — 2009. — Т. 17, № 4. — С. 90–104.

Поступила в редакцию 09.02.2011.