

Удк 621.395

АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

П.А. Абакумов, аспирант СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; pvl.abakumov@gmail.com

А.Е. Кучерявый, заведующий кафедрой СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, д.т.н.; akouch@mail.ru

Рассмотрены проблемы, связанные с реализацией мобильных беспроводных сенсорных сетей, предложен новый алгоритм кластеризации сетей подобного класса в трехмерном пространстве, проведено его моделирование и сравнение с алгоритмом LEACH-M.

Ключевые слова: мобильные беспроводные сенсорные сети, кластеризация, LEACH-M, летающие сенсорные сети, энергоэффективность.

Введение. За последние 15 лет появился класс сетей нового типа, состоящих из миниатюрных беспроводных устройств. Эти устройства называются сенсорами и состоят, как правило, из элемента питания, процессора, модуля беспроводного обмена данными с небольшим энергопотреблением и блока, позволяющего реализовать такие функции, как измерение необходимых параметров или управление [1, 2]. Характерными чертами подобных сетей являются самоорганизация [3, 4], энергоэффективность и максимальное покрытие сенсорного поля. Изначально алгоритмы организаторы сенсорных сетей предполагали стационарное расположение сенсорных узлов: положение узла не менялось на протяжении всего жизненного цикла сети [5, 6]. По мере развития сенсорных сетей сфера их применения значительно расширилась. Появились даже летающие сенсорные сети, состоящие из наземных и летающих сегментов [7].

С созданием беспроводных сенсорных сетей в условиях воздействия внешних факторов приходилось решать новые задачи, поскольку сенсорный узел мог менять свои координаты, двигаясь относительно предыдущего местоположе-

ния. К таким приложениям относится, например, измерение параметров загрязнения воздуха, где узлы могут менять свое местоположение под действием ветра, или измерение параметров в толще воды под влиянием течения.

Сегодня появился новый класс всепроникающих сенсорных сетей — летающие сенсорные сети (рис. 2). Их отличительная особенность — наличие нескольких сенсорных полей, данные с которых собираются с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Траектория полетов и методы сбора информации являются предметами современных исследований. Предложенный алгоритм облегчает эту задачу, так как создаваемые кластеры статичны и выбор головного узла кластера учитывает его расположение внутри кластера.

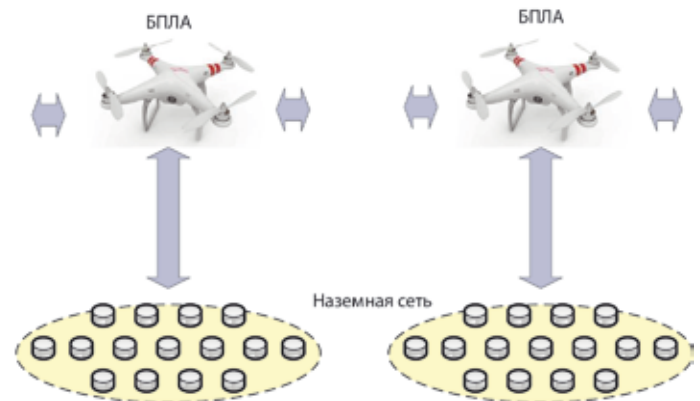


Рис. 2. Летающая сенсорная сеть с одним БПЛА

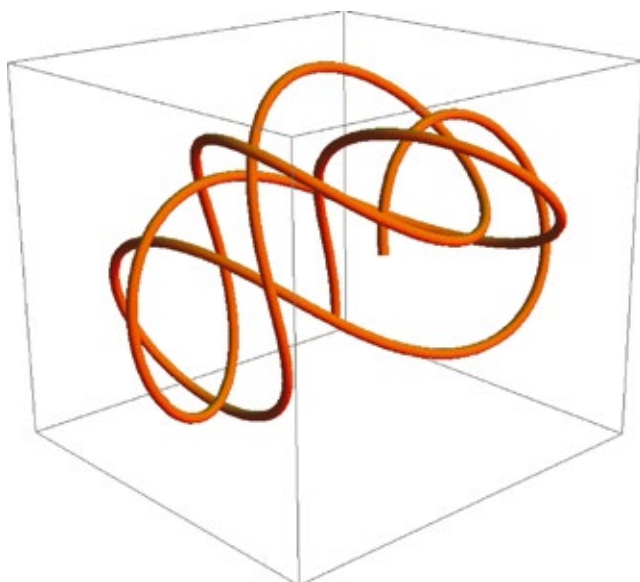


Рис. 1. Движение сенсорного узла

При реализации алгоритма организации мобильной сенсорной сети возникают дополнительные проблемы, которых не было у сетей со стационарным расположением узлов, и их нельзя не учитывать [8, 9]. Выделим главные из них.

1. При начальном размещении узлов и их последующем движении в течение всего жизненного цикла сенсорной сети могут возникнуть ситуации, когда в одной из областей, где необходимо измерять параметры, не будет ни одного узла, или узла с достаточным запасом энергии для отправки данных на базовую станцию (БС). В большинстве случаев невозможно или нецелесообразно менять узел или его элемент питания. При этом образуются «мертвые кластеры», и появляются дыры в покрытии сети.

2. Как правило, в подобных алгоритмах применяется кластерная организация, позволяющая добиться снижения энергозатрат. Головные узлы кластеров агрегируют данные и передают их оператору напрямую или используя головные узлы соседних кластеров (при невозможности прямой

связи). Может возникнуть ситуация, когда данные невозможно передать, поскольку соседний кластер «мертв».

3. Мобильность позволяет сенсорным узлам менять текущий кластер (рис. 1). Энергозатраты на передачу данных зависят в том числе и от расстояния. Информацию рациональнее передавать расположенному ближе головному узлу.

Существует множество алгоритмов организации стационарных сенсорных сетей. Некоторые из этих них не могут быть использованы в условиях мобильности сенсорных узлов, другие могут, но без значительного успеха.

Ниже предложен новый алгоритм кластеризации беспроводной сенсорной сети SCA (Static Cluster Algorithm), позволяющий обеспечить рациональное покрытие сети при максимальном жизненном цикле и учитывающий условия мобильности сенсорных узлов. Алгоритм предполагает работу с гомогенной мобильной беспроводной сенсорной сетью со случайным расположением узлов при наличии БС, являющейся шлюзом между сенсорной сетью и оператором.

Модель сети. Кластерная организация сети подразумевает две роли, которые могут играть сенсорные узлы — головной узел и член кластера. Гомогенная сенсорная сеть состоит из узлов с одинаковыми характеристиками, каждый узел может принимать на себя любую из ролей. Головной узел кластера занимается приемом данных от членов кластера, их агрегацией и передачей далее на БС, составлением расписания связи с членами кластера. Предложенный в статье алгоритм ориентирован на сенсорные сети, функционирующие в трехмерном пространстве [10–12], хотя с успехом может быть использован и для плоскостных сенсорных полей.

Жизненный цикл сенсорной сети разбит на раунды. В каждом раунде головной узел принимает информацию от членов кластера, передает агрегированную информацию шлюзу и при необходимости передает функции головного узла другому члену кластера с подходящими параметрами (рис. 3). Два узла могут обмениваться информацией, если расстояние между ними не превышает максимального радиуса связи. В противном случае этот узел не будет участвовать в текущем раунде, но, если дистанция сократится, он сможет участвовать в следующих раундах. Сенсор считается «мертвым», если запас его энергии иссяк. Кластер считается «мертвым», если в нем нет живого узла.

Каждый узел сети снабжен системой определения координат: это может быть одна из систем глобального позиционирования, или система вычисления координат относительно нескольких БС. Закон движения узлов в пространстве обеспечивает расчет направления движения в трех

плоскостях (dx_n, dy_n, dz_n) , скорости движения V_n , координат (x_n, y_n, z_n) , где номер раунда n , подчиняется приведенным ниже формулам:

— направление

$$(dx_n, dy_n, dz_n) = (dx_{n-1}k_1 + rand_x k_2, dy_{n-1}k_1 + rand_y k_2, dz_{n-1}k_1 + rand_z k_2); \quad (1)$$

— скорость

$$V_n = V_{n-1}k_1 + rand_v k_2; \quad (2)$$

— координаты

$$(x_n, y_n, z_n) = (x_{n-1} + V_n dx_n, y_{n-1} + V_n dy_n, z_{n-1} + V_n dz_n). \quad (3)$$

Коэффициенты k_1 и k_2 позволяют менять плавность движения, учитывая характер движения в предыдущем раунде, $rand$ — случайное число.

Алгоритм кластеризации. Одна из основных особенностей алгоритма — фиксированное расположение и размер кластеров. В процессе инициализации сети, происходящей один раз в самом начале работы, определяются координаты и размер кластеров сети. Каждый узел узнает координаты центров кластеров и их порядковый номер от БС, которая передает их широкопередаточными пакетами. Затем каждый сенсор, зная свое местоположение, определяет свой рейтинг Rtg , представляющий собой расстояние до ближайшего центра кластера, и вычисляет номер своего кластера. Головным узлом кластера становится узел, ближе всего расположенный к центральной точке кластера, но имеющий достаточный запас энергии. Остальные узлы, находящиеся в этом кластере, становятся его членами и передают данные своему головному узлу один раз за раунд, который, агрегируя данные, передает их дальше через шлюз оператору (рис. 4).

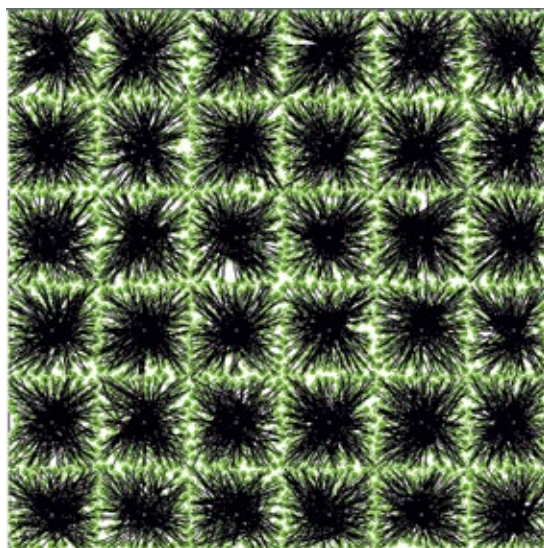


Рис. 4. Проекция кластеризации сенсорного поля на плоскость XY

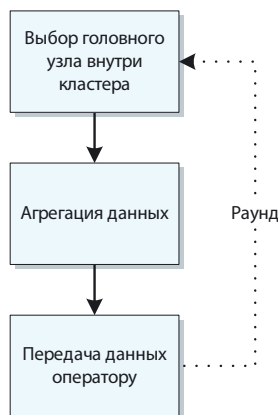


Рис. 3. Раунд

Связь между узлами беспроводной мобильной сенсорной сети строится на основе TDMA-подхода, каждый головной узел составляет расписание для своего кластера, резервирует слоты в расписании для подключения новых узлов, перешедших из одного кластера в другой. Алгоритм может обеспечивать передачу данных от головного узла к БС через головные узлы соседних кластеров, зная расположение всех кластеров в сети, в случае если расстояние до БС превышает

ет дальность радиосвязи узла. Для этого в TDMA расписании резервируются дополнительные слоты.

Член кластера отправляет головному узлу сообщение, состоящее из: адресов кластера и отправителя, данных, текущего рейтинга Rtg . Головной узел отправляет ответ, подтверждающий получение. В ответе указаны адреса кластера и получателя, а также текущий рейтинг Rtg_h , если $Rtg_h \leq Rtg$. В противном случае роль головного узла передается собеседнику. Если энергия узла E меньше пороговой E_{min} , то рейтинг становится максимальным, что препятствует назначению его головным узлом:

$$\begin{cases} Rtg = d, E > E_{min}; \\ Rtg = 0xFFFF; E \leq E_{min}. \end{cases} \quad (4)$$

Головным узлом назначается сенсор с необходимым запасом энергии, расположенный максимально близко к центру кластера. Частое переназначение головного узла связано с дополнительными затратами энергии на передачу служебной информации, в том числе TDMA расписания.

Сенсорные узлы могут двигаться как внутри кластера, так и между ними. Переход из одного кластера в другой сенсорный узел определяет по своим координатам. При перемещении между кластерами сенсор дожидается слота в расписании кластера, зарезервированного для новых членов, и отправляет данные. Головной узел выделяет слот в своем расписании для нового узла. При отсутствии сообщения в соответствующем TDMA-слоте головной узел освобождает слот.

Моделирование. Для сравнения результатов выбран алгоритм LEACH-M, который обладает всеми преимуществами базового LEACH, но может применяться и для беспроводных мобильных сенсорных сетей. Моделирование и вывод результатов проводились с использованием языка программирования C++ и библиотеки MFC.

Расход энергии на передачу и прием сообщений:

$$E_{tx} = E_{elec}m + E_{amp}md^2; \quad (5)$$

$$E_{rx} = (E_{elec} + E_{ag})m \text{ (для головного узла);} \quad (6)$$

$$E_{rx} = E_{elec}m \text{ (для члена кластера).} \quad (7)$$

Начальные параметры моделирования приведены в таблице.

| Обозначение | Значение | Размерность | Комментарий |
|-------------|----------|------------------------|------------------------------|
| N | 4000 | К | Количество узлов |
| P | 5 | % | Параметр для LEACH-M |
| x | 100 | м | Длина сенсорного поля |
| y | 100 | м | Ширина сенсорного поля |
| z | 100 | м | Высота сенсорного поля |
| E_s | 1 | Дж | Начальная энергия узла |
| E_{elec} | 50 | нДж | Затраты на прием |
| E_{amp} | 10 | пДж/бит/м ² | Усиление |
| m | 80/40 | бит | Длина сообщения |
| E_{ag} | 5 | нДж | Затраты на агрегацию |
| R_{max} | 30 | м | Максимальная дальность связи |

Длина сообщения может составлять 80 бит для случая с переходом роли головного узла и 40 бит — при подтверждении сообщения. Также учтен расход энергии на формирование TDMA расписания и составление таблицы маршрутизации для передачи данных через головные узлы соседних кластеров.

Сенсорное поле представляет собой куб и разбивается на кластеры с расстоянием между центрами — 17 м, количество кластеров для предлагаемого алгоритма — 216. Для алгоритма LEACH-M оптимальный параметра $P = 5\%$, при 4000 узлах среднее количество кластеров — 200, параметры k_1 и k_2 равны 0,9 и 0,1, соответственно, что обеспечивает сглаживание движения сенсоров.

Результаты моделирования. Поскольку выбор головных узлов носит случайный характер, то размеры кластеров при использовании алгоритма LEACH-M могут быть различными. Предлагаемый алгоритм образует кластеры сопоставимых размеров, выбор головного узла зависит от расстояния до центра кластера, что уменьшает дистанцию между членами кластера и головным узлом, снижает энергозатраты на передачу данных. Еще одно достоинство алгоритма — простая маршрутизация сообщений между соседними головными узлами в направлении БС.

Основными оценочными параметрами работы алгоритмов являются общее время жизни сенсорной сети, количество «живых» узлов в каждом раунде, покрытие и сумма остаточной энергии всех узлов сети. Сравнение параметров работы алгоритмов приведено на рис. 5. По оси абсцисс обозначен текущий раунд, по оси ординат — количество узлов в сети.

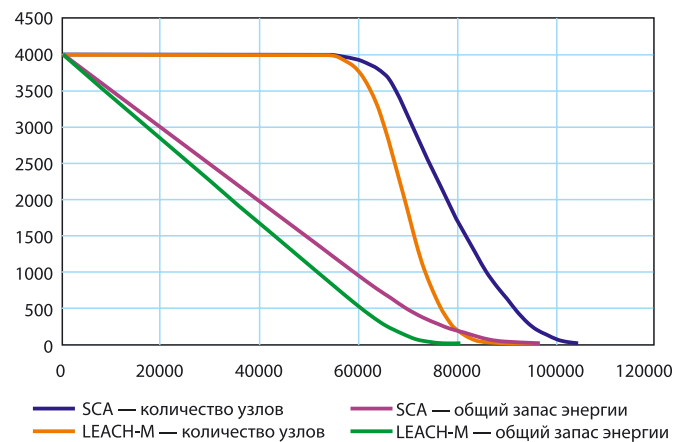


Рис. 5. График зависимости количества «живых» узлов и общей энергии узлов сети от номера раунда для алгоритмов SCA и LEACH-M

Результаты моделирования показали, что при использовании алгоритма SCA увеличивается срок жизни сенсорной сети и возрастает эффективность расхода запасов энергии узлов, что видно из сравнения параметра «общий запас энергии». В связи с тем, что при моделировании ограничивалась дальность связи сенсорных узлов и не все узлы могут быть связаны в каждом раунде, покрытие при использовании алгоритма LEACH-M достигает 100% лишь в редких случаях. Для оценки будем считать, что покрытие в текущем раунде не может быть больше минимума за все предыдущее время работы сенсорной сети.

Результаты сравнения покрытий для алгоритмов приведены на рис. 6.

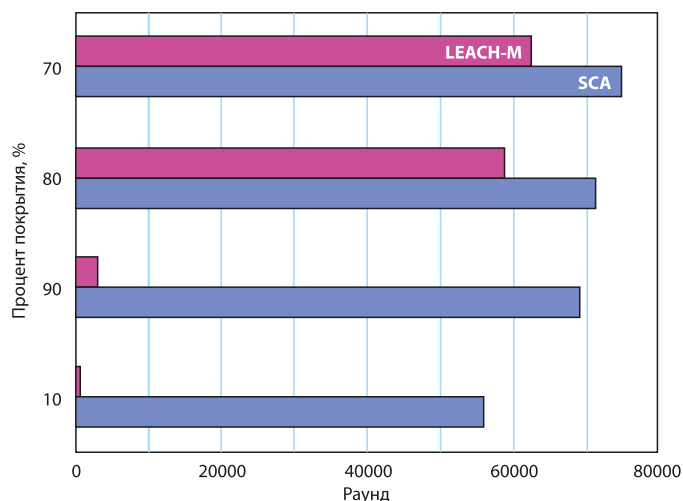


Рис. 6. Сравнение покрытия для алгоритмов SCA и LEACH-M

При работе с алгоритмом SCA головные узлы выбираются ближе к центру заранее определенного кластера. Это упрощает расчет траектории полета и сбор информации при использовании летающих сенсорных сетей, в которых сбор информации может осуществляться летательными аппаратами.

Заключение. Преимуществами нового алгоритма кластеризации беспроводной мобильной сенсорной сети алгоритма можно считать увеличение срока жизни сенсорной сети, простоту маршрутизации данных между кластерами, высокую долю вероятности расположения головного узла в центральной зоне кластера.

В будущем планируется исследовать алгоритм разделения сенсорного поля на кластеры и разработать такой подход к работе сети, при котором расположенные близко друг к другу сенсорные узлы смогут пропускать раунды передачи информации и при этом экономить энергию.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта N15-07-09431a «Разработка принципов построения и методов самоорганизации для летающих сенсорных сетей».

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. — М.: ФГУП ЦНИИС, 2008.
2. Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А. От e-России к u-России: тенденции развития электросвязи // Электросвязь. — 2005. — № 5.
3. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. — СПб.: Любавич, 2011.
4. Кучерявый А.Е. Самоорганизующиеся сети и новые услуги // Электросвязь. — 2009. — № 1.
5. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks/ Proceedings 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Wailea Maui, Hawaii, USA. — Jan. 2000.
6. Koucheryavy A., Salim A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2009. Phoenix Park, Korea. — 2009.
7. Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А. От e-России к u-России: тенденции развития электросвязи // Электросвязь. — 2005. — № 5.
8. Kim D.S., Chung Y.J. Self-organization routing protocol supporting mobile nodes for wireless sensor network / Proceedings. First International MultiSymposium on Computer and Computational Sciences, Hangzhou, China. — June 2006.
9. Koucheryavy A., Salim A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2010. Phoenix Park, Korea. — 2010.
10. Attarzadeh N., Mehrani M. A New Three Dimensional Clustering Method for Wireless Sensor Networks // Global Journal of Computer Science and Technology. — April 2011. — V.11, issue 6, version 1.0.
11. Абакумов П.А. Алгоритм выбора головного узла кластера сенсорной сети в трехмерном пространстве // Электросвязь. — 2014. — № 4.
12. Abakumov P., Koucheryavy A. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2014. Phoenix Park, Korea. — 2014.

Получено 15.05.15

Рецензии

Быховский М.А., Дотолев В.Г., Лашкевич А.В., Носов В.И., Рихтер С.Г., Соколкин Г.И., Тарасов С.С.

Основы частотного планирования сетей телевизионного вещания. — М.: Горячая линия — Телеком, 2015. — 305 с.

Книга написана как учебное пособие для вузов, занимающихся подготовкой специалистов в области телекоммуникаций. Она охватывает важнейшие аспекты частотного планирования наземных сетей цифрового ТВ-вещания (ЦНТВ), которые ранее в учебной литературе не освещались.

Рассмотрение ключевых вопросов частотного планирования предваряет материал по основам передачи и приема цифровых сигналов, кодированию источника видео- и звукового сигнала, а также обзор систем ЦНТВ стандартов

DVB-T, DVB-T2 и DVB-H. Содержание этих вводных, общетеоретических разделов, обобщающих обширный круг публикаций, можно считать исчерпывающим и адекватным современным требованиям, предъявляемым к учебной литературе.

Значительная часть книги посвящена вопросам частотного планирования сетей ЦНТВ, эффективности использования РЧС в многочастотных и одночастотных сетях ТВ-вещания. Впервые изложены вопросы частотного планирования одночастотных сетей ЦНТВ. Особый интерес представляет описание пакета программ для частотного планирования сетей цифрового вещания, процедур и примеров его применения для решения практических задач частотного планирования.

Данный пакет программ может использоваться в проектных организациях и в государственных частотных органах, осуществляющих выделение частотных

каналов. Важным также представляется изложенный в книге метод частотного планирования сетей ЦНТВ, который позволяет добавлять в уже сложившуюся сеть новые передающие станции, не нарушая условий их электромагнитной совместимости с сетью.

Структура и содержание учебного пособия охватывает все основные вопросы, связанные с частотным планированием сетей ЦНТВ, методический материал излагается ясным и лаконичным языком.

Книга представляет интерес не только как учебное пособие для студентов. Она будет также полезна специалистам, занимающимся проектированием сетей ЦНТВ и анализом их электромагнитной совместимости.

Заведующий кафедрой телевидения им. С.И. Катаева, д.т.н., профессор
В.Н. Безруков