УДК 621.395

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ГОЛОВНОГО УЗЛА КЛАСТЕРА СЕНСОРНОЙ СЕТИ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

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

Развитие сетей связи сегодня и в ближайшем будущем будет характеризоваться широкомасштабным внедрением самоорганизующихся сетей. Центральную роль в этом играют всепроникающие сенсорные сети, для которых важнейшей задачей является выбор головного узла кластера. Существует достаточно много алгоритмов выбора головного узла для двумерного пространства. В то же время для трехмерного пространства задача построения эффективного алгоритма еще требует своего решения. В статье предложен новый алгоритм выбора головного узла кластера для трехмерного пространства, проведено его моделирование и доказана эффективность по сравнению с существующим базовым алгоритмом LEACH.

Ключевые слова: *всепроникающие сенсорные сети, алгоритм кластеризации, LEACH, покрытие сенсора.*

Введение. Концепция Интернета Вещей (IoT), предложенная ITU-T, определяет ключевое направление дальнейшего развития сетей связи [1, 2]. Всепроникающие сенсорные сети (USN) [3] являются базовой технологией для реализации Интернета Вещей. Для построения сетей USN используется, как правило, кластерная организация [4]. При этом увеличение длительности жизненного цикла и покрытия пространства представляют собой основные задачи исследований на протяжении последних десяти лет. Оба этих параметра, в первую очередь, зависят от алгоритма выбора головных узлов кластера.

Существует достаточно много алгоритмов выбора головного узла кластера для USN [5, 6], что обусловлено практически неограниченным числом приложений USN. Эти алгоритмы разработаны для условий размещения сенсорных узлов на плоскости (сенсорном поле). При размещении сенсорных узлов в трехмерном пространстве такие алгоритмы практически отсутствуют. Использование в трехмерном пространстве разработанных для плоскостных моделей алгоритмов выбора головного узла допустимо, но вряд ли эффективно из-за отсутствия учета параметра высоты расположения сенсорного узла.

В настоящее время в мире наблюдается значительный рост количества беспроводных телекоммуникационных устройств и в ближайшем будущем эта тенденция сохранится. Применение сетей USN в автоматизации производства, мониторинге окружающей среды, медицине и других областях обуславливает спрос на подобные устройства. Всепроникающие сенсорные сети имеют ряд принципиальных особенностей в своем построении, что связано, в первую очередь, с очень большим возможным числом сенсорных узлов даже на одном сенсорном поле. Сети USN строятся как самоорганизующиеся, и это определяет необходимость разработки специальных алгоритмов для их эффективного функционирования.

Существует множество алгоритмов для USN в двумерном пространстве. Одни рассчитаны на работу с одним головным узлом, другие делят сеть на кластеры, в которых выбирается свой головной узел, третьи являются одноуровневыми и передают информацию по цепочке к шлюзу через ближайший узел. Во всем этом разнообразии выделим ***базовый алгоритм*** **LEACH** (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [7], с которым сравнивают большинство новых разработанных алгоритмов.

Покрытием сенсорного узла называется область, для которой измеренный параметр достоверен. В свою очередь, покрытием сенсорной сети является сумма подобных областей. Обеспечение полного покрытия — важный фактор применения сенсорных сетей [8, 9]. Алгоритмы, разработанные для сенсорных сетей, функционирующих на плоскости, не учитывают, что на практике расположение датчиков на одной высоте не всегда возможно. Соответственно покрытие узла правильно считать не окружностью, как для двумерного пространства, а сферой. Именно такие USN, функционирующие в трехмерном пространстве, и являются предметом исследований, результаты которых приведены ниже. Известны алгоритмы выбора головного узла в трехмерном пространстве, имеющие своей целью увеличение жизненного цикла USN с помощью деления трехмерного пространства на пирамиды [10, 11].

В статье представлен новый алгоритм MCA (Maximum Coverage Algorithm) [12] — алгоритм максимального покрытия в течение длительного времени, учитывающий особенности практического применения сенсорных сетей. Основная цель создания предложенного алгоритма — достижение максимального покрытия в течение длительного цикла. Увеличение жизненного цикла USN как цель создания алгоритма представляется неточной, ибо возможно недопустимое уменьшение покрытия и, как следствие, невыполнение сенсорной сетью своих функций при весьма приемлемых показателях по длительности жизненного цикла, что и будет доказано ниже.

Модель сети. Многие алгоритмы выбора головных узлов подразумевают, что сенсоры обладают дальностью связи, превышающей размеры сенсорного поля. Соответственно любой узел может связаться с любым узлом. Низкое энергопотребление сенсоров накладывает ограничения на мощность передатчика, что непосредственно сказывается на

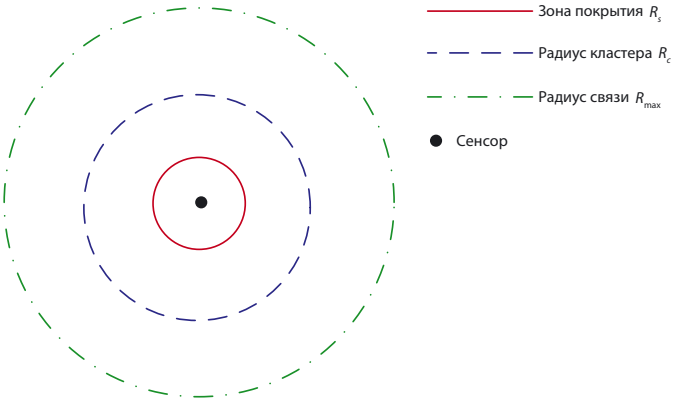

Рис. 1. **Сенсорное поле**

дальности связи, в то время как некоторые практические задачи требуют развертывания сенсорной сети значительных размеров.

Представленный алгоритм разрабатывался для гомогенных стационарных сенсорных сетей [13], в которых дальность связи узла $R_{\max}$ меньше размеров сенсорного поля, что позволяет увеличить возможности применения и реализации подобных сетей.

Сенсор обладает таким важным параметром, как радиус покрытия R_s. Это зона, в которой датчик измеряет требуемые параметры (рис. 1). В связи с тем, что узлы расположены случайным образом, радиусы покрытий соседних сенсоров могут пересекаться. Объем такого пересечения между узлами S_i и S_j зависит от расстояния между сенсорами d, получаемого путем оценки мощности сигнала (RSS — Received Signal Strength), и выражается формулой:

$$V_{S_i \cap S_j} = \frac{\pi}{12}(d + 4R_s)(2R_s - d)^2. \quad (1)$$

При инициализации сети каждый сенсор вычисляет оценку объема пересечения с множеством соседних датчиков U, представляющую собой сумму $V_{S_i \cap S_n}$, нормированную на произведение объема покрытия сенсора V_s и количества узлов N_i, с которыми имеет пересечение:

$$V_i = \frac{\sum_{n \in U} V_{S_i \cap S_n}}{N_i V_S}. \quad (2)$$

Ключевая задача для каждого сенсора — вычисление рейтинга W_i, отражающего его текущее состояние. В связи с тем, что сенсорная сеть гомогенна, начальная энергия E_s одинакова для всех узлов сети. Настраиваемый параметр k может принимать значения от 0 до 1:

$$W_i = \frac{E_i}{E_s}(1 - V_i k) + V_i k. \quad (3)$$

Алгоритм выбора головных узлов MCA. Жизненный цикл сети состоит из этапов формирования и передачи собранной информации шлюзу. Основной идеей алгоритма является последовательное построение сети путем опроса соседних узлов и получения от них информации о рейтинге W_i, зависящем от текущего остатка энергии E_i и оценки объема пересечения V_i.

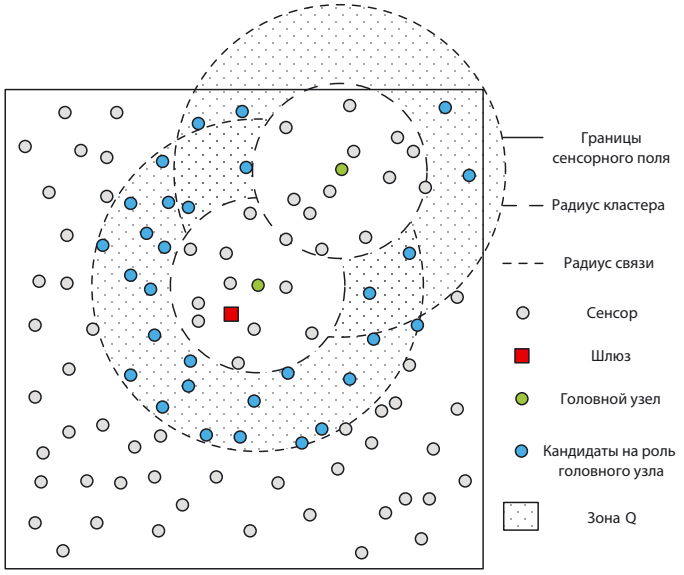

Рис. 2. **Последовательный выбор головного узла**

Сенсоры, рассматриваемые на роль головного узла, должны находиться в зоне Q, ограниченной радиусом связи сенсорного узла $R_{\max}$ и радиусом кластера R_c ($R_c < R_{\max}$). Среди них выбирается узел с максимальным рейтингом и он назначается головным узлом. Узлы, которые попали в радиус кластера, не смогут стать в этом раунде головными узлами и будут членами кластера (рис. 2). Таким образом, размеры кластеров по размеру сопоставимы друг с другом. Процесс повторяется до тех пор, пока не останется кандидатов на роль головного узла.

Отметим, что выбор делается из совокупности сенсоров, находящихся в зоне Q для всех головных узлов. Затем узлы, не являющиеся головными в текущем раунде, выбирают ближайший головной узел по минимальному расстоянию и становятся членами соответствующего кластера. Головные узлы формируют расписание для связи с подчиненными узлами. В промежутках между сеансами связи сенсорные узлы находятся в спящем режиме, что позволяет значительно снизить энергопотребление. На этом этапе формирование сети заканчивается.

Члены кластера собирают информацию и накапливают ее. Головные узлы получают данные от подчиненных узлов и передают их пользователю напрямую через шлюз или соседние головные узлы, которые находятся ближе к шлюзу. Поскольку формирование сети начинается от шлюза, и выбор головных узлов осуществляется последовательно, то каждый головной узел знает маршрут для передачи информации пользователю.

Моделирование. Сравнение алгоритмов MCA и LEACH производилось с использованием модели на языке C++. Затраты энергии на передачу и прием m бит рассчитывали по формулам:

$$E_{tx} = E_{elec} m + E_{amp} m d^2; \quad (4)$$

$$E_{rx} = E_{elec} m. \quad (5)$$

Начальные значения констант при моделировании [14] приведены в таблице.

Обозначение	Значение	Размерность
N	2000	шт
P	5	%
x	100	м
y	100	м
z	100	м
E_s	1	Дж
E_{elec}	50	нДж
E_{amp}	10	пДж/бит/м^2
m	640	бит
R_c	10	м
$R_{\max}$	30	м

Сенсоры располагаются в случайном порядке. Шлюз размещен в центральной зоне сенсорного поля. Предполагается, что он постоянно включен. Оба алгоритма работают с одинаковыми сенсорными полями. Все узлы

имеют одинаковые свойства и характеристики. Стоит отметить, что если расстояние от сенсорного до ближайшего головного узла превышает параметр R_{max}, то такой сенсорный узел выпадает из сенсорной сети в текущем раунде. В то же время он сможет участвовать в дальнейшей работе сети.

Результаты моделирования. Предлагаемый алгоритм ставит перед собой задачу реализации сенсорной сети, в которой размеры сенсорного поля превышают дальность связи сенсорных узлов, обеспечивающей максимальное покрытие в течение максимального времени. Основными параметрами для сравнения будет количество подключенных узлов в текущем раунде и процент покрытия.

Случайный выбор головных узлов приводит к созданию кластеров различных размеров. В результате между головными узлами могут получиться большие расстояния, и существует шанс, при котором некоторые сенсоры не смогут связаться ни с одним головным узлом из-за большого расстояния до них. Предложенный алгоритм выбора головного узла MCA позволяет создавать кластеры, сопоставимые по размеру (рис. 3), что позволит рядовым членам кластера всегда передать данные своему головному узлу.

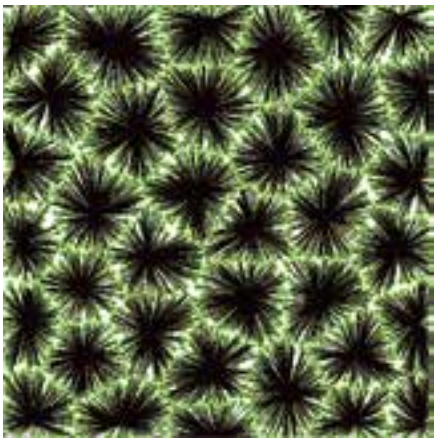

Рис. 3. **Кластеризация сенсорного поля**

На рис. 4 представлен график зависимости количества подключенных узлов (ось ординат) от текущего раунда (ось абсцисс) для предлагаемого алгоритма MCA и алгоритма LEACH. Подключенными узлами считаются узлы, участвующие в функционировании сенсорной сети в текущем раунде. Соответственно остальные узлы могут быть как за пределами дальности связи, так и исчерпавшими свою энергию. Из графика видно, что в случае с алгоритмом LEACH количество подключенных узлов колеблется. Для предлагаемого алгоритма MCA этот параметр стабилен и количество подключенных узлов уменьшается только за счет сенсорных узлов, исчерпавших свою энергию.

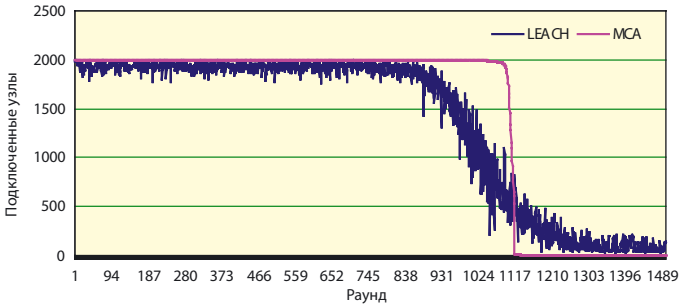

Рис. 4. **График количества подключенных к сети узлов**

Покрытие сенсорного поля для многих прикладных задач сенсорных сетей является важным параметром. Алгоритм LEACH не обеспечивает 100%-ное покрытие для подобного сенсорного поля, 90%-ное покрытие достигается в 19 циклах, 80- и 70%-ное обеспечиваются на протяжении 906 и 916 раундов, соответственно. Предлагаемый алгоритм MCA значительно превосходит эти результаты для 100 и 90% -го покрытия (рис. 5).

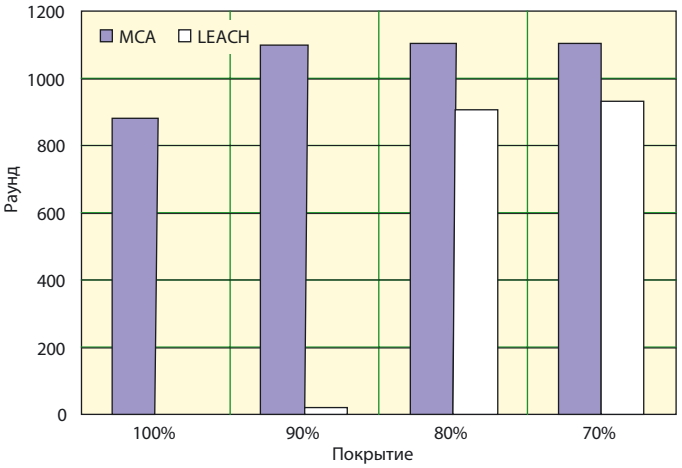

Рис. 5. **Покрытие сенсорного поля**

Заключение. Предложен новый алгоритм выбора головного узла кластера для сенсорной сети в трехмерном пространстве. Результаты моделирования показали, что для сенсорных полей значительных размеров, где размеры поля не позволяют любому сенсору связаться напрямую с любым другим сенсором, предложенный алгоритм значительно превосходит алгоритм LEACH в части полного покрытия сети.

В ходе дальнейших исследований планируется сравнить предложенный алгоритм с алгоритмом PEGASIS [15] и рядом других алгоритмов, провести моделирование и исследование результатов для больших сенсорных полей с небольшой концентрацией сенсоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Recommendation Y.2060. Overview of Internet of Things. ITU-T, Geneva.— June 2012.
2. **Кучерявый А. Е.** Интернет Вещей // Электросвязь.— 2013.— № 1.
3. **Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е.** Сети связи пост-NGN.— С. Петербург: БХВ, 2013.
4. **Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А.** Самоорганизующиеся сети.— С. Петербург: Любавич, 2011.
5. **Younis O., Fahmy S.** Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach / Proceedings, IEEE INFOCOM.— Hong Kong, China, 2004.
6. **Tang S.** An Analytical Traffic Flow Model for Cluster-Based Wireless Sensor Networks / In: 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing, 2006.
7. **Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H.** An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks // IEEE Transactions on Wireless Communications.— 2002.— 1 (4).
8. **Soro S., Heinzelman W.** B. Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks / Ad Hoc Networks, Elsevier.— 2009.— V. 7.

9. **Koucheryavy A., Salim A.** Cluster-based Perimeter-coverage Technique for Heterogeneous Wireless Sensor Networks / Proceedings, ICUMT 2009 International Conference IEEE on Ultra Modern Telecommunications.— Russian. Saint-Petersburg, 2009.
10. **Hooggar M., Mehrani M., Attarzadeh N., Azimifar M.** An Energy Efficient Three Dimensional Cjverage Method for Wireless Sensor Networks // Journal of Academic and Applied Studies.— March 2013.— V. 3 (3).
11. **Attarzadeh N., Mehrani M.** A New Thre Dimensinal Clustering Method for Wireless Sensor Networks // Global Journal of Computer Science and Technology.— April 2011.— Vol.11, issue 6, version 1.0.
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.
13. **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.
14. **Koucheryavy A., Salim A.** Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks / Proceedings. International Conference on Advanced Communication TechnologyICACT 2010. Phoenix Park, Korea.— 2010.
15. **Lindsey S., Raghavendra C. S.** PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems / Proceedings IEEE Aerospace Conference, Montana, USA.— 2002.— Vol. 3, Big Sky.

Получено 12.02.14

УДК 621.395

ОСОБЕННОСТИ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ БИОПОДОБНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

П. Н. Боронин, аспирант СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича; n3v3r0@gmail.com

Разработка алгоритмов маршрутизации и выбора головного узла в разнообразных самоорганизующихся сетях — одна из важнейших задач в настоящее время. Актуальнейшим направлением разработки алгоритмов маршрутизации и выбора головного узла для самоорганизующихся сетей является создание биоподобных алгоритмов. В статье анализируются существующие биоподобные алгоритмы, такие как алгоритмы поведения колонии муравьев и колонии пчел. Для самоорганизующихся беспроводных сетей предлагается использовать так называемые «полеты Леви».

Ключевые слова: *беспроводные самоорганизующиеся сети, биоподобные алгоритмы, роевой интеллект, энергетическая эффективность.*

Введение. Концепция Интернета Вещей [1] предполагает для реализации своих приложений преимущественное использование самоорганизующихся сетей [2]. Одной из наиболее сложных проблем при их создании является разработка алгоритмов маршрутизации информации и выбора головного узла при кластерной их организации. Практически неограниченное разнообразие приложений и чрезвычайно большое возможное число узлов в самоорганизующихся сетях не позволяют создать в настоящее время некий оптимальный алгоритм для решения задач маршрутизации и выбора головных узлов. Поэтому существует множество алгоритмов для всепроникающих сенсорных сетей, стационарных [3, 4] и мобильных [5, 6], сетей автомобильного транспорта [7] и т.д.

Одно из направлений решения указанных задач — создание биоподобных алгоритмов. В природе найдены некоторые закономерности, ставшие основой для разработки алгоритмов маршрутизации для беспроводных самоорганизующихся сетей связи. Так называемый роевой интеллект насчитывает больше десятка категорий таких природных закономерностей, как взаимодействия в колониях муравьев и пчел, закономерности роста деревьев, полета стай птиц и т.п. С их помощью работа самоорганизующейся сети становится адаптивной, устойчивой к отказам, ошибкам и энергетически эффективной.

Самоорганизующиеся беспроводные сети (Ad-Hoc Wireless Networks, AHWNs) [8] приобретают все большую популярность в различных сферах деятельности человека. Примерами могут служить целевые автомобильные сети VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) [9], сети M2M (Machine-to-Machine) [10] и т.д.

Принципы роевого интеллекта (Swarm Intelligence, SI) оказались достаточно полезными для решения проблем маршрутизации в самоорганизующихся сетях [11]. В основе эффекта роевого интеллекта лежит тесная взаимосвязь между представителями биологического вида и их социальной деятельностью, например поиск и сбор пищи, строительство жилья, защита собственности и т.п. Роевой интеллект является разделом области искусственного интеллекта (Artificial Intelligence, AI), состоящего из нескольких групп алгоритмов, в число которых входят, например, муравьиные оптимизационные алгоритмы (Ant Colony Optimization, ACO) [12], пчелиные оптимизационные алгоритмы (Artificial Bee Colony Algorithms) [13], светлячковые алгоритмы (Firefly Algorithms) [14].

В последнее время появились и новые виды закономерностей, основанные на так называемых «полетах Леви» (Lévy flights): алгоритм атак акул [15], алгоритмы блуждающих альбатросов, шмелей и оленей [16], алгоритм поиска питательных веществ бактериями типа *Escherichia coli* (кишечная палочка) [17]. Они будут использоваться для сетей AHWN уже в ближайшее время. Рассмотрим наиболее распространенные сегодня муравьиные и пчелиные алгоритмы.

Муравьиные алгоритмы. Одними из самых первых биоподобных адаптивных алгоритмов для самоорганизующих-