

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ГОЛОВНОГО УЗЛА НА ПАРАМЕТРЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БСС ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ УЗЛОВ ПО ТЕРРИТОРИИ

Л. Б. Бузюков<sup>1</sup>, Д. В. Окунева<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: darina\_okuneva@mail.ru

## **Аннотация**

**Предмет исследования.** В статье проводится сравнительный анализ алгоритмов выбора головного узла для беспроводных сенсорных сетей с различным распределением узлов по территории. **Метод.** Сравнение проводится по результатам моделирования в Mathcad. В качестве параметров для сравнения используются доступность сети и время доставки сообщений. В качестве базовых алгоритмов выбора головного узла рассматриваются алгоритмы LEACH, PEGASYS и TEEN. **Основные результаты.** В результате проведенного анализа выявлено, что алгоритм выбора головного узла при неравномерном распределении узлов по территории должен выбираться, исходя из целевого назначения сети и типа обслуживаемого трафика. **Практическая значимость.** В статье рассматриваются модели беспроводных сенсорных сетей с неравномерным распределением узлов по территории, что существенно расширяет зону исследований беспроводных сенсорных сетей и ставит новые научные задачи.

## **Ключевые слова**

Беспроводная самоорганизующаяся сеть, сенсорный узел, головной узел, алгоритм выбора головного узла, параметры функционирования беспроводной сенсорной сети, качество обслуживания.

## **Информация о статье**

УДК 621.394/396

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 04.07.16, принята к печати 26.08.16.

**Ссылка для цитирования:** Бузюков Л. Б., Окунева Д. В. Анализ влияния алгоритмов выбора головного узла на параметры функционирования БСС при различном распределении узлов по территории // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 3. С. 40–48.

# ANALYSIS OF CLUSTER HEAD SELECTION ALGORITHMS FOR OPERATING PARAMETERS WSN AT DIFFERENT PARTS DISTRIBUTION IN THE TERRITORY

L. Buziukov<sup>1</sup>, D. Okuneva<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\* Corresponding author: darina\_okuneva@mail.ru

**Abstract—Research subject.** This article discusses the existing cluster head selection algorithms for wireless sensor networks with different kinds of distribution on territory. **Method.** A comparative analysis is carried out on the results of the simulation in Mathcad. As the parameters used in the comparison network availability and delivery time for messages. As a basic cluster head selection algorithms considered LEACH, PEGASYS and TEEN. **Core results.** The analysis revealed that the cluster head selection algorithm for non-uniform distribution of nodes on the territory to be selected based on the purpose served by the network and the type of traffic. **Practical relevance.** The article deals with the model of wireless sensor network nodes with an non-uniform distribution of the territory, which greatly expands the area of wireless sensor networks research and poses new scientific challenges.

**Keywords**—Wireless self-organizing network, sensor node, the head node, cluster head selection algorithms, the wireless sensor network performance, quality of service.

## Article info

Article in Russian.

Received 04.07.16, accepted 26.08.16.

**For citation:** Buziukov L., Okuneva D.: Analysis of cluster head selection algorithms for operating parameters WSN at different parts distribution in the territory // Telecom IT. 2016. Vol. 4. Iss. 3. pp. 40–48 (in Russian).

## Введение

Скорость и качество передачи информации в настоящее время играют огромную роль. Кроме того остро стоит проблема передачи информации и обеспечения новых сервисов в таких отдаленных уголках планеты, где по тем или иным причинам невозможно развернуть сеть связи общего пользования.

В конце XX века на смену проводным сетям пришли беспроводные технологии (мобильные сети), а начало XXI века ознаменовалось стремительным развитием Интернета Вещей, технологии, которая подразумевает объединение физических и информационных объектов в одну сеть. В связи с этим, в прогнозах дальнейшего развития сетей связи речь идет о десятках триллионов сетевых устройств [1].

Одним из направлений развития Интернета Вещей (IoT) является построение всепроникающих сенсорных сетей, основой которых являются самоорганизующиеся беспроводные сети [2].

Беспроводные всепроникающие сенсорные сети (БСС) представляют собой самоорганизующиеся сети, состоящие из множества беспроводных сенсорных узлов, распределенных в пространстве и предназначенных для мониторинга и управления характеристиками окружающей среды или объектами, расположенными в ней [3]. Пространство, которое покрывается сенсорной сетью, называют сенсорным полем. Беспроводные сенсорные узлы представляют собой миниатюрные устройства с ограниченными ресурсами: зарядом батареи, объемом памяти, вычислительными возможностями и т. д. Однако, объединение большого числа этих элементов в сеть за счет эффекта роевого интеллекта [4] обеспечивает возможность получения реальной картины происходящих событий и процессов в рамках этого сенсорного поля.

Кластерная организация является эффективной и масштабируемой для функционирования БСС, но лишь при условии рационального выбора головного узла в кластерной сети конкретный момент времени [5]. Кроме того, говоря о функционировании БСС, следует учитывать, что сеть может быть образована некоторым множеством узлов, каждый из которых находится в зоне доступности хотя бы одного узла из этого множества, и каждый из узлов имеет возможность отправки данных узлу назначения, которым может быть шлюз или любой другой узел сети [3].

Свойства сети зависят от характеристик узлов и их взаимного расположения. В общем случае, в гетерогенной сети все или часть узлов сети могут быть подвижными, иметь различные скоростные характеристики, стандарты связи физического и канального уровней. Свойства сети зависят от многих факторов, таких как характеристики зоны (области) обслуживания, распределения узлов на плоскости или в пространстве, их параметров и других.

Широкое разнообразие реализаций и областей применения беспроводных самоорганизующихся сетей приводит к необходимости анализа их свойств и определения методов оценки основных параметров.

Целью данной работы является выявление основных параметров функционирования беспроводной сенсорной сети и их зависимость от алгоритма выбора головного узла сенсорной сети при различной плотности сенсорных узлов на плоскости.

### **Алгоритмы выбора головного узла сети**

Безусловно, работы по исследованию и разработке алгоритмов выбора головного узла ведутся по всему миру.

К настоящему моменту разработано достаточно много алгоритмов выбора головного узла кластера в БСС. Следует отметить, что оптимальный алгоритм выбора головного узла для любой сенсорной сети вряд ли будет когда-либо разработан в связи с чрезвычайно большим числом приложений сенсорных сетей, а также разнообразием расположения узлов этих сетей в  $n$ -мерном пространстве [6].

Тем не менее, анализ алгоритмов выбора головного узла позволяет провести их классификацию.

В первую очередь алгоритмы выбора головного узла в БСС подразделяются на централизованные и децентрализованные. Централизованные алгоритмы выбора головного узла подразумевают наличие вычислительных возможностей в некоем управляющем элементе сети, не связанных с жестким ограничением по потребляемой энергии. Децентрализованные алгоритмы выбора головного узла предполагают, что процедура назначения головного узла происходит в рамках самого сенсорного поля без централизованного вмешательства. При этом выдвигаются весьма жесткие требования по сложности самой процедуры, которая не должна требовать более или менее заметных затрат ограниченных энергетических ресурсов всепроникающей сенсорной сети. Примером централизованного алгоритма выбора головного узла может служить алгоритм выбора головного узла CHS с использованием диаграмм Вороного, разработанный в нашем Университете [7]. Его преимущество по сравнению с наиболее известным децентрализованным алгоритмом выбора головного узла – LEACH (по результатам моделирования в системе C#.NET), заключается в увеличении энергетической эффективности и обеспечении лучшего покрытия БСС, что обеспечивает более длительный жизненный цикл сети [8].

Аналогичные исследования были проведены Н. А. Аль-Кадами. В работе [8] проведена оценка и проанализированы алгоритмы маршрутизации и самоорганизации для беспроводных сенсорных сетей со стационарными узлами на плоскости. В качестве параметров функционирования БСС рассматривались длительность стабильного функционирования сенсорной сети, остаточная энергия, длительность периодов времени до гибели первого и последнего сенсорных узлов. Сравнение алгоритмов производилось для гомогенной и гетерогенной сетей.

Как видно из вышеизложенного исследуемые модели БСС рассматриваются с точки зрения обеспечения максимального жизненного цикла БСС и энергетической эффективности ее узлов для равномерного распределения узлов на плоскости.

На практике распределение узлов на плоскости может быть и неравномерным, на рисунке представлены различные варианты рассеивания сенсорных узлов на плоскости.

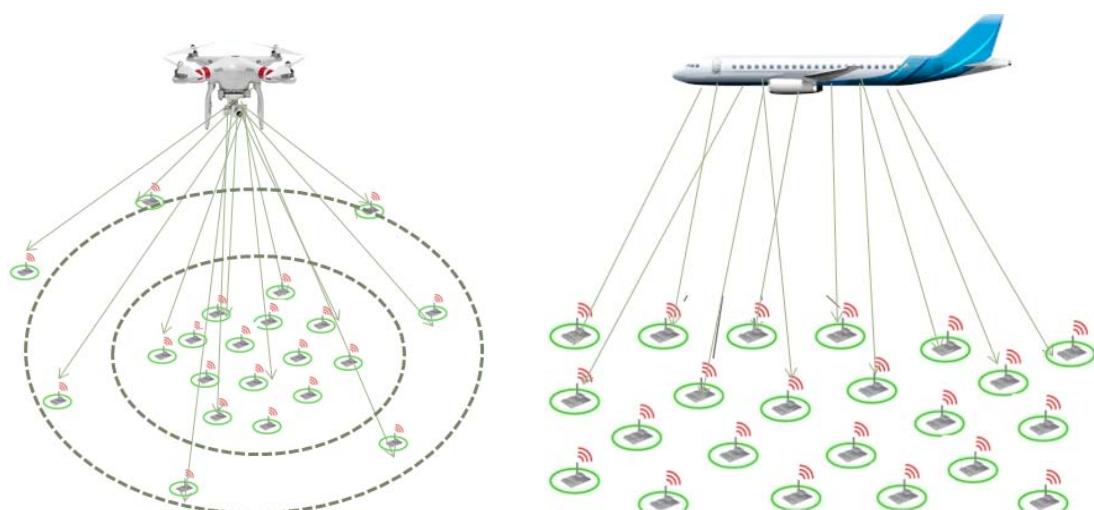


Рисунок. Варианты рассеивания сенсорных узлов на плоскости

В этом случае интерес вызывает анализ алгоритмов выбора головного узла при различной плотности сенсорных узлов и его влияние на параметры функционирования сети, такие как доступность и время доставки сообщений.

Мы будем рассматривать децентрализованные алгоритмы выбора головного узла, т. к. необходимо определить влияние данных алгоритмов на параметры функционирования самого сенсорного поля, образующего БСС, без влияния извне.

Как уже говорилось ранее, базовая идея алгоритма LEACH состоит в следующем: сенсорные узлы могут быть случайным образом выбраны как головные на основе предыдущей информации об их функционировании, т. е. узел, который был головным в последних интервалах функционирования сенсорной сети, не имеет шансов вовсе или имеет минимальные шансы снова стать головным в рассматриваемом интервале функционирования.

После того как кластер сформирован, головной узел широкополосным способом рассыпает расписание передачи и запрашивает своих членов кластера о передаче данных на основе известного TDMA подхода. В последующих фазах головной узел является ответственным за агрегирование данных и передачу их на шлюз и в сеть связи общего пользования. Весь сбор данных локализуется в кластере. После определенного времени нахождения в стабильной фазе, сеть снова переходит в стадию формирования. При этом следует отметить, что стадия формирования существенно короче, чем стабильная. В связи с этим LEACH имеет достаточно короткий заголовок.

LEACH является очень эффективным алгоритмом с точки зрения энергетической эффективности сети в целом, но в то же время LEACH не дает гарантий по выбору «хорошего» сенсорного узла в качестве головного узла кластера. Поскольку в алгоритме LEACH нет предположения о текущем энергетическом состоянии сенсорного узла, то в качестве головного может быть выбран давно не избираемый член кластера с неудовлетворительными энергетическими характеристиками. [3]

Алгоритм PEGASIS (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*) – эффективная по мощности система сбора информации от сенсоров – не имеет прямого отношения к кластерной организации беспроводных сенсорных сетей.

Алгоритм PEGASIS предусматривает основанный на LEACH алгоритм организации сенсорных узлов в последовательную цепочку и периодическое обновление первого узла в цепочке так же, как это предусмотрено в кластерных БСС. В алгоритме PEGASIS цепочка формируется таким образом, чтобы сенсорные узлы взаимодействовали только с ближайшими и только один из узлов являлся бы передающим информацию на базовую станцию в каждом из интервалов функционирования сенсорной сети. Построение цепочки позволяет минимизировать расстояние, на которое передается информация, а ротация первого сенсора в цепочке увеличивает длительность функционирования отдельных сенсорных узлов. Такой подход позволяет для беспроводных сенсорных сетей снизить общее энергопотребление и увеличить длительность функционирования БСС в целом.

Алгоритм PEGASIS лучше алгоритма LEACH на 100–200 % в отношении гибели 1, 25, 50 и 100 % узлов сенсорной сети и топологий. Однако цепочки алгоритма PEGASIS создают дополнительные задержки при передаче информации.

Кроме того, динамическое изменение топологии в алгоритме PEGASIS требует, чтобы каждый сенсорный узел знал об энергетических возможностях своих ближайших соседних узлов для вычисления маршрута передачи данных. Последнее существенно усложняет заголовок и помимо этого приводит к проблемам при функционировании сенсорной сети в условиях большой нагрузки. Для снижения задержки был предложен иерархический алгоритм PEGASIS [9]. В этом алгоритме в качестве целевой функции для минимизации задержек используется «энергия x метрика задержки». Алгоритм используется CDMA для кодирования сигналов и пространственное разделение сенсорных узлов. Алгоритм строится в виде иерархического дерева, причем каждый выбранный узел какого-либо уровня передает данные на узел верхнего уровня иерархии. Этот метод позволяет уменьшить задержки сигналов до значений задержки сигналов до значений  $0 (\lg N)$ , где  $N$  – число узлов [3].

Алгоритм TEEN (*Thersholt-sensitive Energy Efficient Protocols*). Работа данного алгоритма строится следующим образом: при образовании нового кластера головной узел рассыпает узлам сети значения атрибутов так называемого «жесткого» и «мягкого» порога. При достижении атрибутом узла абсолютного значения «жесткого» порога узел передает данные, значение «жесткого» порога при этом сохраняется в памяти узла. «Мягкий» порог позволяет передавать информацию от узла к головному узлу кластера, если это значение изменилось на какую-то величину.

Каждый раз при новом раунде, т.е. изменении кластера атрибуты «жесткого» и «мягкого» порогов передаются заново, и в зависимости от целевой функции сетей эти атрибуты можно контролировать и изменять [10].

Отметим, что выбор вышеописанных протоколов для анализа обусловлен тем, что они являются базовыми алгоритмами выбора головного узла, являющимися основой позднее разработанных алгоритмов и с точки зрения обеспечения таких параметров функционирования БСС как доступность и время доставки данных не рассматривались.

### **Сравнительный анализ алгоритмов выбора головного узла БСС**

Для проведения анализа алгоритма выбора головного узла рассмотрим следующие параметры:

- доступность сети;
- время доставки сообщений.

Данные критерии выбраны не случайно, они характеризуют потенциальные возможности сети по обслуживанию трафика различного рода услуг: под доступностью понимается возможность оказания сетью услуги в целом, время доставки сообщений так же определяет возможности сети по предоставлению той или иной услуги.

На наш взгляд, алгоритмы выбора головного узла и алгоритмы маршрутизации все-таки разные понятия. Алгоритм выбора головного узла определяет головной узел в раунде функционирования кластера БСС, исходя из особенностей функционирования, а передача данных непосредственно организуется алгоритма маршрутизации.

Если рассматривать выбранные алгоритмы с точки зрения обеспечения наибольшей доступности сети при равномерном распределении, то логично

предположить, что алгоритм PEGASIS является наиболее подходящим алгоритмом выбора головного узла по сравнению с LEACH, т. к. узлы «знают» энергетический потенциал соседних узлов, что позволяет строить цепочки и минимизировать расстояние для передачи данных. Проблемы с временем доставки в PEGASIS решаются путем использования иерархической модели данного алгоритма. С другой стороны алгоритм LEACH имеет более короткий заголовок, а, следовательно, меньшую задержку в передаче данных, но за счет отсутствия информации о «хорошем» узле для выбора его в качестве головного доступность имеет показатели хуже, чем в PEGASIS.

Существенным недостатком алгоритм TEEN, по сравнению с остальными рассматриваемыми алгоритмами, с точки зрения доступности является то, что если узел сети ни разу не достиг порогового значения, то узлы не устанавливают связи друг с другом, кластер не функционирует и даже, если все узлы умирают, об этом нет никакой информации. Этот алгоритм совершенно не подходит для передачи регулярной информации, при этом обеспечивая практически моментальную доставку для критически важных приложений. Существенным достоинством, на наш взгляд является возможность контроля значений атрибутов для установления пороговых значений.

При нормальном распределении узлов на плоскости вопрос кластеризации достаточно спорен. Это вызвано неравномерностью распределения и соответственно разными расстояниями между узлами. В центре зоны рассеивания плотность узлов больше, расстояния между узлами меньше, нетрудно предположить, что формирование кластера займет меньше времени, и время доставки сообщений за счет расстояния между узлами будет существенно меньше. В этом случае алгоритм выбора головного узла будет зависеть от требований по обслуживанию передаваемого трафика. Но при увеличении радиуса рассеивания расстояние между узлами будет увеличиваться, причем неравномерно, соответственно доступность кластера, как и его формирование, видится проблематичным. Недостатком LEACH является увеличение времени формирования кластера, по сравнению с временем стабильности, PEGASIS возможно обеспечит более высокие показатели доступности, но при этом время доставки существенно увеличится за счет увеличения расстояния между узлами и количеством цепочек.

При нормальном распределении может быть целесообразным применение алгоритма TEEN, т. к. как уже отмечалось ранее, имеется возможность задания значений атрибутов пороговых значений, в рамках которых можно регулировать формирование кластеров БСС.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что благодаря возможности контроля и настраивания атрибутов пороговых значений алгоритм TEEN является наиболее подходящим с точки зрения обеспечения доступности сети и времени доставки сообщений.

## Заключение

В данной статье был проведен сравнительный анализ существующих базовых алгоритмов выбора головного узла сенсорной сети. В результате анализа было выявлено, что:

- представленные ранее алгоритмы не рассматривались с точки зрения обеспечения параметров функционирования БСС, таких как время доставки сообщений и доступность;
- топология сети оказывает существенное влияние на параметры функционирования БСС;
- алгоритмы выбора головного узла и алгоритмы маршрутизации являются разными понятиями;
- различное распределение сенсорных узлов на плоскости безусловно влияет на параметры функционирования БСС;
- при рассмотрении наиболее эффективного алгоритма выбора головного узла необходимо учитывать целевое назначение сети и вид обслуживаемого трафика;
- параметры функционирования БСС, такие как доступность и время доставки сообщений необходимо рассматривать как параметры качества обслуживания БСС.

В заключении хочется сказать, что задача исследования зависимости параметров функционирования и обеспечения качества обслуживания БСС, является очень актуальной на сегодняшний день. Раньше основной моделью сенсорной сети являлась модель с равномерным распределением сенсорных узлов на плоскости. Мы постарались показать, что в реальной жизни характер распределения носит неравномерный характер, что существенно расширяет зону исследований БСС и ставит новые научные задачи.

## Литература

1. Гольдштейн Б. С., Кучерявыи А. Е. Сети связи пост-NGN. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 160 с. ISBN. 978-5-9775-0900-8.
2. Кучерявыи А. Е. Интернет Вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
3. Кучерявыи А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявыи Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011. 312 с. ISBN 978-5-86983-318-1.
4. Waldner J.-B. Nanocomputers and Swarm Intelligence. John Wiley & Sons, 2008. 288 р. ISBN 978-1-84821-009-7.
5. Богданов И. А., Парамонов А. И., Кучерявыи А. Е. Характеристики жизненного цикла мобильной сенсорной сети при различных потоках ложных событий // Электросвязь. 2013. № 1. С. 32–33.
6. Кучерявыи А. Е., Окунева Д. В. Анализ алгоритмов выбора головного узла во всепроникающих сенсорных сетях // 68-я Научно техническая конференция, посвященная Дню Радио. 2013.
7. Салим А., Кучерявыи А. Е. Диаграммы Вороного для беспроводных сенсорных сетей // 64-я Научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио. 2009.
8. Салим А. Разработка алгоритмов выбора головного узла в кластерных беспроводных сетях. Автореферат. СПбГУТ. 2010. 34 с.
9. Lindsey S., Raghavendra C. S. PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems // IEEE Aerospace Conference. 2002. Vol. 3. pp. 1–7.
10. Manjeshwar A., Agrawal D. P. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks // International Parallel & Distributed Processing Symposium. 2001. pp. 1–7.

## References

1. Goldstein, B. S., Koucheryavy, A. E. Post-NGN Communication Networks. SPb.: BHV-Peterburg, 2013. 160 p. ISBN 978-5-9775-0900-8.

2. Koucheryavy, A. E. Internet of Things // Electrosvyaz'. 2013. No. 1. pp. 21–24.
3. Koucheryavy, A. E., Prokopiev, A. V., Koucheryavy, Y. A. Self-Organizing Networks. SPb.: Lyubavich, 2011. 312 p. ISBN 978-5-86983-318-1.
4. Waldner, J.-B. Nanocomputers and Swarm Intelligence. John Wiley & Sons. 2008. 288 p. ISBN 978-1-84821-009-7.
5. Bogdanov, I. A., Paramonov, A. I., Koucheryavy, A. E. The Mobile Sensor Network Life-Time According to Different Spurious Flows // Electrosvyaz'. 2013. No. 1. pp. 32–33.
6. Koucheryavy, A. E., Okuneva, D. V. Analysis of Headend Selection Algorithms in Pervasive Sensor Networks // 68 Science and Technology Conference dedicated to the Day of radio. 2013.
7. Salim, A., Koucheryavy, A. E. Voronoi Diagrams for Wireless Sensor Networks // 64 Science and Technology Conference dedicated to the Day of radio. 2009.
8. Salim, A. Development of Headend Selection Algorithms in Clustering Sensor Networks. Synopsis. SPbSUT. 2010. 34 p.
9. Lindsey, S., Raghavendra, C. S. PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems // IEEE Aerospace Conference. 2002. Vol. 3. pp. 1–7.
10. Manjeshwar, A., Agrawal, D. P. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks // International Parallel & Distributed Processing Symposium. 2001. pp. 1–7.

**Бузюков Лев Борисович**

– кандидат технических наук, профессор, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, [levbuz@mail.ru](mailto:levbuz@mail.ru)

**Окунева Дарина Владимировна**

– аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, [darina\\_okuneva@mail.ru](mailto:darina_okuneva@mail.ru)

**Buziukov Lev**

– Ph.D., professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, [levbuz@mail.ru](mailto:levbuz@mail.ru)

**Okuneva Darina**

– postgraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, [darina\\_okuneva@mail.ru](mailto:darina_okuneva@mail.ru)