

# Модель кластеризации беспроводной сенсорной сети

Т. М. Татарникова<sup>1</sup>, Н. С. Мокрецов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>tm-tatarn@yandex.ru

**Аннотация.** Обсуждается актуальная задача энергоэффективности беспроводной сенсорной сети. Приводятся особенности беспроводной сенсорной сети на уровне элементов сети, их взаимодействия и свойств самовосстановления сети. Показано, что кластеризация сенсорной сети является одним из эффективных способов уменьшения энергопотребления каждым устройством, и позволяет в целом увеличить жизненный цикл всей сети. Проведенное моделирование беспроводной сенсорной сети с прямой передачей данных до базовой станции и кластеризованной сети с передачей данных через головные узлы кластеров. Анализ результатов моделирования показал, что при отсутствии кластеризации, время жизни сети становится в 3 раза короче. Основная часть узлов, которые находятся дальше всех от базовой станции, умирают еще на раннем этапе. Связано это с тем, что энергия, которая требуется для прямой связи с базовой станцией, намного выше, чем для связи с ближайшим головным узлом. Также показано, что кластеризация помогает длительное время сохранить масштабность покрытия сети.

**Ключевые слова:** беспроводная сенсорная сеть; энергоэффективность; кластеризация; модель потребления энергии; время жизни

## I. ВВЕДЕНИЕ

Встраиваемые системы стали частью нашей повседневной жизни. Возник класс беспроводных сенсорных сетей (БСС) малой дальности. Такие сети имеют ряд отличительных особенностей. Устройства, входящие в эту сеть, имеют небольшие размеры и питаются в основном от батареек. Эти сети являются ad-hoc сетями, не имеющими постоянной структуры и меняющимся количеством устройств в сети [1].

Сегодня технология БСС, является единственной беспроводной технологией, с помощью которой можно решать задачи мониторинга и контроля, которые критичны к времени работы датчиков [2].

В связи с этим возникает ряд задач для создания и функционирования таких сетей, а именно задачи аутентификации устройств, добавления нового устройства в сеть, удаление устройства, безопасности передаваемых данных, задача нахождения оптимального маршрута для передачи данных и задачи продления времени автономной работы сети [3].

Одной из важнейших задач в создании БСС является оптимальное (эффективное) энергопотребление. Потребление энергии элементами БСС увеличивается, в то время как источники питания не могут обеспечить объем батареи в требуемом количестве. Данная проблема связана с ограниченной емкостью применяемых батарей и неразумными тратами

доступной энергии. Решением может быть два пути: либо увеличение мощности батареи, либо рациональное потребления имеющейся мощности батареи. Первый путь ограничен с точки зрения физических габаритов самих сенсорных датчиков, так же встает вопрос о безопасности эксплуатации аккумуляторов большой мощности. Второй путь не требует модернизации источников питания, но требует выявления причины и количества затрат энергии сенсорными узлами сети [4].

Одним из эффективных способов уменьшения энергопотребления каждым устройством является кластеризация БСС, и позволяет в целом увеличить жизненный цикл всей сети.

В работе рассматриваются беспроводные сети, для которых характерно сверхнизкое энергопотребление и большое количество устройств, которые обмениваются довольно небольшим количеством данных. Целью работы является исследование модели кластеризации БСС.

## A. Структура БСС

Беспроводная сенсорная сеть представляет собой набор миниатюрных вычислительно-коммуникационных устройств-сенсоров, датчиков или по-другому их еще называют мотами. Моты используются для сбора, первичной обработки и передачи сенсорных данных [5].

Узел сенсорной сети представляет собой плату, на которой находится процессор, флэш память, оперативная память, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, приемопередатчик, источник питания, датчики, например, температуры, давления, влажности, освещенности, вибрации и другие. Питание мота осуществляется от батареи небольшого размера. Как правило, батарея уже встроена в саму плату и, следовательно, замене не подлежит. В связи с этим на мотах необходимо выполнять только простые операции, чтобы не расходовать на этом этапе много энергии [3].

Для передачи сенсорных данных каждый узел оснащается антенной. Возможности обработки информации узлами ограничены, поскольку их вычислительные возможности невелики.

Элементы сенсорной сети являются автономными, поскольку каждый датчик имеет все необходимое для самостоятельной работы, без какого-либо управления извне. Поэтому главной особенностью, отличающей БСС от других инфокоммуникационных сетей, является свойство самовосстановления. Если некоторые моты деградируют (уровень остаточной энергии ниже требуемого для функционирования) или выходят из сети, то работа БСС не должна нарушаться – сеть будет

реконструирована, при этом будут учтены позиции деградированных мотов [4].

Также к достоинствам БСС относятся небольшие размеры мотов и как следствие их низкое потребление энергии, простое размещение мотов на больших территориях, в том числе инсталляция с самолета и, в том числе и в труднодоступных для человека местах, небольшая стоимость.

Для выполнения функций на каждый мот устанавливается своя операционная система. В настоящее время в большинстве сенсорных устройств используется операционная система TinyOS – управляемая событиями операционная система реального времени, которая работает в условиях ограниченных вычислительных мощностях. TinyOS разработана специально для использования в БСС, она позволяет устройствам автоматически устанавливать связи с соседями и формировать сенсорную сеть заданной топологии.

Основная обработка данных осуществляется на базовой станции, которая представляет собой мощное вычислительное устройство, обладающее большим объемом памяти, для всей аккумулированной информации, собранной мотами.

Модель сбора информации или алгоритма маршрутизации может быть реализована на одноранговой или иерархической структуре БСС.

В неиерархических сетях все узлы равны между собой, выполняют одинаковые функции. Передача в такой сети может быть, как непосредственно на базовую станцию, так и через соседний узел. В иерархических сетях уже есть подразделения на роли, а именно на головные узлы и обычные узлы.

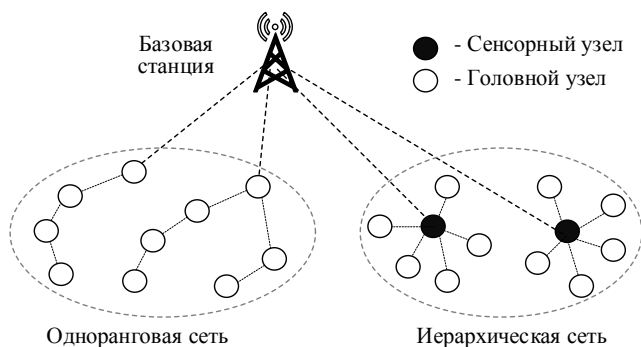


Рис. 1. Одноранговая и иерархическая БСС

### В. Кластеризация БСС

Кластеризация БСС позволяет увеличить масштабность покрытия сети, сводит к минимуму размер таблицы маршрутизации, которые хранятся на каждом узле, и позволяет сохранить пропускную способность канала, поскольку ограничивает область взаимодействия кластеров с другими узлами, что позволяет избежать избыточности в сети [6].

Кластеризация проводится в иерархических сетях. Разработано множество алгоритмов кластеризации, таких как LEACH, PEGASIS, TEEN и APTEEN. Как правило, все эти алгоритмы, имеют свои механизмы или свои правила выбора головного узла. Головные узлы осуществляют сбор скопившихся данных с узлов –

членов кластера, которые принадлежат этому головному, производят их агрегацию, фильтрацию, обработку данных и передачу информации на базовую станцию.

Как правило, выбор головного узла кластера выполняется случайным образом, что приводит к созданию кластеров различных размеров. В иерархических алгоритмах маршрутизации каждый из членов кластера имеет равную возможность стать головным узлом, головной узел задает расписание для членов кластера и собирает с них информацию согласно расписанию.

Таким образом, есть необходимость сравнить одноранговые БСС и иерархические кластеризованные БСС по количеству потребляемой энергии. С одной стороны, в одноранговой БСС для достижения большей энергоэффективности моты связываются не с каждым соседом, а только с тем, кто находится на достаточно близком расстоянии от него. И таким образом информация передается от одних мотов другим по цепочке, и так до базовой станции. С другой стороны, в иерархических кластерных БСС моты передают данные главе кластера, который выполняет основные функции обработки и передачи данных на базовую станцию, и тем самым, позволяет мотам сохранять энергию до следующего раунда, пока не будет выбран новый глава кластера.

В качестве алгоритма кластеризации рассмотрим алгоритм LEACH [7].

Работа протокола делится на раунды. Каждый раунд состоит из фазы настройки (Set-up phase) и фазы устойчивого состояния (Steady-state).

В фазе настройки каждый сенсорный узел генерирует случайное число  $z \in [0, 1]$  и вычисляет порог

$$Th = \begin{cases} \frac{P}{1 - p \left( r \bmod \frac{1}{p} \right)}, & G_i(t)=1 \\ 0, & G_i(t)=0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $p$  – предопределённый процент головных узлов: оптимальное количество головных узлов считается 5 % от всех устройств БСС;  $r$  – текущий раунд.

Если  $z \leq Th$ , то узел может быть головным в текущем раунде жизни сети. Вероятность выбора стать главой кластера основана на предположении, что все узлы начинают с одинакового уровня остаточной энергии.

Как только узлы выбрали себя в качестве головного узла кластера, они должны сообщить всем другим узлам в сети, что они выбрали эту роль для текущего раунда. С этой целью головные узлы передают широковещательное сообщение с использованием протокола MAC множественного доступа с прослушиванием несущей (CSMA). Остальные узлы определяют своего главу кластера текущего раунда исходя из расчета минимальной энергии для связи. Следовательно, выбор можно сделать, зная уровень принятого сигнала от узлов, откликнувшихся на широковещательное сообщение от головного узла.

В фазе устойчивого узлы отправляют свои данные головному узлу не более одного раза за раунд в течение выделенного им интервала передачи.

Продолжительность каждого интервала, в котором узел передает данные, является постоянной, поэтому время отправки данных зависит от количества узлов в кластере.

Узлы синхронизированы по времени и одновременно начинают фазу настройки. Чтобы уменьшить собственное рассеяние энергии и исключить возможность создания помех соседним кластерам, каждый узел использует управление мощностью для установки величины мощности передачи на основе уровня принятого сигнала. Кроме того, радиосвязь каждого узла отключается до тех пор, пока не будет выделено время передачи. Глава кластера должен быть активным, чтобы получать все данные от узлов в кластере.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Даже для сетей среднего размера с десятками узлов аналитически сложно в точности смоделировать взаимодействия между всеми узлами, как в реальных сетях.

В действительности, существуют много факторов, влияющих на работу сетей, начиная от различных препятствий на пути распространения сигнала, заканчивая погодными условиями, также влияющими на качество сигнала. Качество обслуживания при передаче данных зависит от хорошего отношения сигнал-шум (SNR), но передача сигнала с более высоким уровнем мощности потребляет большее количество энергии. Возникает вопрос, какие настройки передатчика являются наилучшими для достижения высокого качества работы, при минимальных затратах энергии. Получение такой точной модели можно только в реальных условиях. В том числе, нужно учитывать коэффициент ослабления радиосигнала, связанного с расстоянием между передатчиком и приемником.

Помимо прямой модели распространения сигнала, будем так же использовать, хорошо известную, двухлучевую модель распространения радиоволн. Предложенная модель, в основном, предназначена для применения на открытой местности, где узлы датчиков могут быть расположены на определённой высоте над землей, где почва будет выступать в роли отражателя сигнала. Данная энергетическая модель приведена в [8], где на ее основе разработан протокол маршрутизации. Модель применялась для оценки минимальной энергии, необходимой для успешной передачи данных по сети, в которой устройство тратит некоторое количество энергии, необходимое для работы электронной схемы и дополнительную энергию для усилителя передачи. На рис. 2 приведена эта энергетическая модель.



Рис. 2. Энергетическая модель

Таким образом, учитывая данные из [8] будем исходить из того, что требуемая мощность сигнала в свободном пространстве обратно пропорциональна квадрату расстояния между приемником и передатчиком. Другими словами, потеря мощности составляет  $d^2$ . Но, также использовалась двухлучевая модель распространения сигнала, где потеря мощности

составляет  $d^4$ . Регулировка мощности может использоваться для компенсации этих потерь путем соответствующей настройки усилителя мощности. Если расстояние меньше порогового значения  $d_0$ , используется модель свободного пространства –  $s$ , иначе используется модель многолучевого распространения –  $p$ . Таким образом, для передачи  $L$ -битного сообщения на расстояние  $d$  устройство расходует энергию

$$E_t(L, d) = \begin{cases} L \times E_e + L \times E_s \times d^2, & d < d_0; \\ L \times E_e + L \times E_p \times d^4, & d \geq d_0. \end{cases} \quad (2)$$

$$E_r(L) = L E_e, \quad (3)$$

где  $E_t$  – энергия, затрачиваемая на передачу,

$E_r$  – энергия, затрачиваемая на прием,

$E_e$  – энергия, затрачиваемая на работу схемы устройства,  $E_s$  и  $E_p$  – энергия, затрачиваемая на работу схемы усилителя,

$L$  – размер пакета,

$d$  – расстояние между приемником и передатчиком,

$d_0$  – значение порогового расстояния между приемником и передатчиком.

Сравним алгоритм кластеризации LEACH в иерархической сети и алгоритм прямой передачи (DT – direct transmission) одноранговой сети по следующим параметрам энергоэффективности [9]:

- срок службы – время от начала функционирования сенсорной сети до момента выхода из строя определенного количества, в % узлов;
- количество энергии, которая сеть расходует на жизнедеятельность;
- объем переданных данных, то есть количество информации принятой базовой станцией.

На рис. 3 приведены результаты работы алгоритма LEACH, где красным цветом окрашены головные узлы, синим цветом – рядовые узлы кластеров.

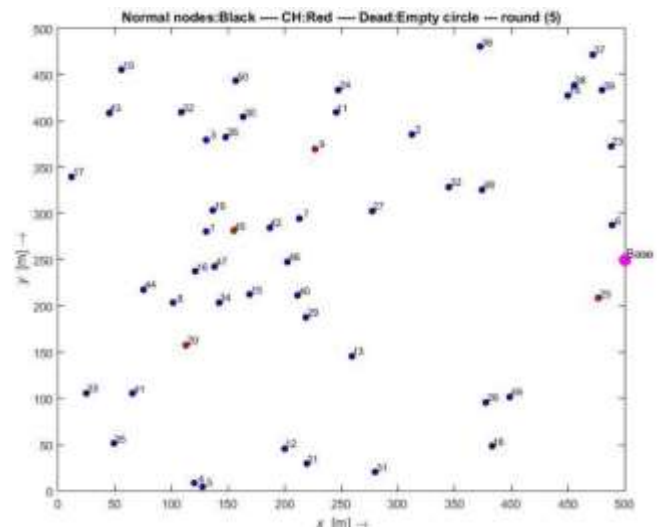


Рис. 3. БСС с алгоритмом кластеризации LEACH

В табл. I приведены исходные данные для моделирования БСС

ТАБЛИЦА I. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БСС

| Обозначение   | Значение | Размерность            |
|---|----------|------------------------|
| $N$ – число мотов на участке сенсорного поля              | 100      | Штук                   |
| $p$ – предопределенный % головных узлов                   | 5        | %                      |
| $(X, Y)$ – размеры сенсорного поля                        | 100×100  | м                      |
| $(x, y)$ – расположение базовой станции (Base)            | 100×150  | м                      |
| $E_e$ – энергия, затрачиваемая на работу схемы устройства | 70       | нДж                    |
| $E_s$ – постоянное усиление                               | 10       | пДж/бит/м <sup>2</sup> |
| $E_p$ – мультисетевая составляющая                        | 0,0013   | пДж/бит/м <sup>4</sup> |
| $L$ – размер пакета                                       | 4096     | Бит                    |
| Энергия сбора одного бита                                 | 5        | нДж                    |
| Потери на участках  | 87       | м                      |

На рис. 4 – рис. 6 приведены графики изменения параметров энергоэффективности во времени функционирования БСС.

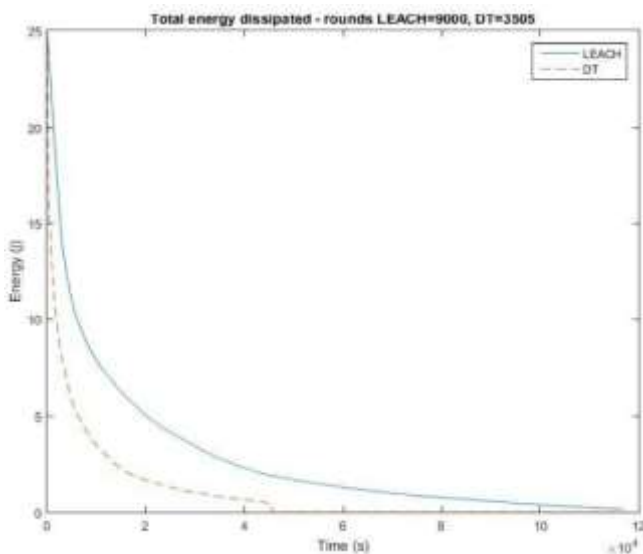


Рис. 4. Расход энергии в LEACH и в DT

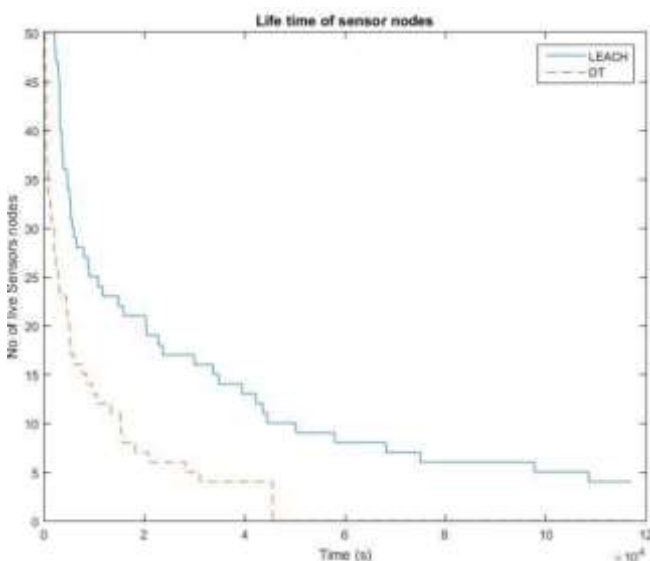


Рис. 5. Время жизни узлов

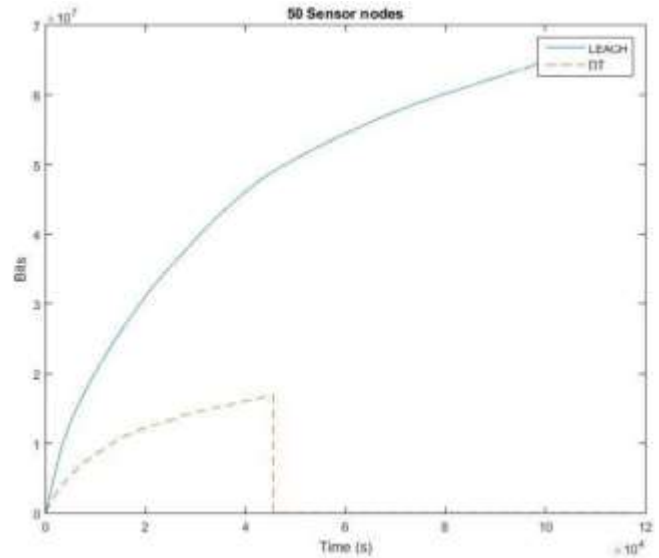


Рис. 6. Количество информации, переданной на БС

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования показал, что при отсутствии кластеризации – применения алгоритма прямой передачи, сеть деградирует почти в 3 раза быстрее, чем, если применять алгоритм кластеризации. Основная часть узлов, которые находятся дальше всех от базовой станции, умирают еще на раннем этапе. Связано это с тем, что энергия, которая требуется для прямой связи с базовой станцией, намного выше, чем для связи с ближайшим головным узлом. Кластеризация так же помогает длительное время сохранить масштабность покрытия сети, что дает возможность принимать больше актуальной информации с различных участков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dressler F. A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks // Computer Communications. 2008. V. 31. No. 13. P. 3018-3029. doi:10.1016/j.comcom.2008.02.001.
- [2] Kraeva E., Miklush V., Palkin I., Tatarnikova T., Kunturov A. Information support in environmental monitoring systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. P. 012015. doi: 10.1088/1755-1315/507/1/012015.
- [3] Ачилова И.И., Глушак Е.В. Исследование беспроводных сенсорных сетей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5-1. С. 11-17.
- [4] Татарникова Т.М., Дзюбенко И.Н. Методы увеличения жизненного цикла сети интернета вещей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 5. С. 843-849. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849.
- [5] Иванов В.Э., Левенец А.В., Чье Ен Уна. Проблемно-ориентированные сенсорные сети: практический подход. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 219 с.
- [6] Basford P.J., Johnston S.J., Perkins C.S., Garnock-Jones T., Tso F.P., Pezaros D., Cox S.J. Performance analysis of single board computer clusters // Future Generation Computer Systems. 2020. Vol. 102. P. 278-291. doi:10.1016/j.future.2019.07.040.
- [7] Ran G., Zhang H., Gong S. Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic // Journal Inf. Comput. Sci. 2010. No. 7. P. 767-775.
- [8] Heinzelman W.B., Chandrakasan A.P., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. Vol. 1. No. 4. P. 660-670. doi: 10.1109/TWC.2002.804190
- [9] Татарникова Т.М. Миклуш В.А., Рудых С.В. Оценка показателей качества обслуживания беспроводных сенсорных сетей // Информация и Космос. 2022. №4. С. 21-27.