

Сравнительный анализ алгоритмов кластеризации беспроводной сенсорной сети

Comparative analysis of clustering algorithms of a wireless sensor network

Татарникова / Tatarnikova T.

Татьяна Михайловна

(tm-tatarn@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП),

директор института информационных технологий и программирования.

г. Санкт-Петербург

Турнецкая / Turnetskaya E.

Елена Леонидовна

(turnetskaya@mail.ru)

кандидат технических наук.

ГУАП, доцент кафедры прикладной информатики. г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть – wireless sensor network; энергоэффективность – energy efficiency; алгоритм кластеризации – clustering algorithm; головной узел кластера – cluster head node; срок службы сети – network service life; объем переданных данных – amount of transmitted data.

Показана необходимость в развитии энергоэффективных методов кластеризации беспроводной сенсорной сети. Кластеризация позволяет организовать передачу данных по иерархическому принципу – ретрансляцию пакетов данных через головные узлы кластеров, на которые разбивается создаваемое сенсорное поле. Выполнено сравнение алгоритмов кластеризации LEACH, TEEN, DEEC и SEP по показателям срока службы и объема переданных данных на базовую станцию. Исследования, приведенные в работе, расширяют возможные варианты решения задачи кластеризации крупномасштабных беспроводных сенсорных сетей.

The need for the development of energy-efficient methods for clustering a wireless sensor network is shown. Clustering allows you to organize data transmission according to a hierarchical principle – retransmission of data packets through the head nodes of the clusters into which the created sensory field is divided. The clustering algorithms LEACH, TEEN, DEEC and SEP are compared in terms of service life and the amount of data transmitted to the base station. The studies presented in the paper expand the possible options for solving the problem of clustering large-scale wireless sensor networks.

Введение

Крупномасштабные беспроводные сенсорные сети (БСС) строятся по иерархическому принципу, обеспечивая, с одной стороны, покрытие сенсорным полем

больших географических районов и, с другой стороны, рациональное расходование энергии [1].

Подобные сети, как правило, строятся в виде совокупности кластеров. Сенсорные узлы (СУ) нижнего уровня сначала передают измерения (данные) головным узлам, вокруг которых СУ объединены в кластеры. Головной узел, в свою очередь, ретранслирует агрегированные данные в виде пакетов до ближайшей базовой станции (Base Station, BS). Базовая станция может выполнять функции маршрутизатора при значительной удаленности БСС от «облака» и функции шлюза при непосредственной близости БСС к «облаку». Количество кластеров теоретически не ограничено, что позволяет масштабировать размер БСС [2].

Время работы БСС без подзарядки зависит от расхода энергии сенсорными узлами. Расход энергии происходит во время передачи данных, их обработки, вычисления маршрута и т. д. [3]. Поэтому в последнее время предложены несколько новых алгоритмов кластеризации БСС. В статье выполнено сравнение современных алгоритмов кластеризации по показателям срока службы БСС и объема переданных данных на базовую станцию. Подобные исследования показывают возможные варианты решения задачи кластеризации крупномасштабных беспроводных сенсорных сетей и позволяют сделать рекомендации по выбору соответствующего алгоритма еще на этапе планирования БСС.

Характеристика существующих алгоритмов кластеризации БСС

На рис. 1 приведена иерархическая структура построения БСС. Выбор головных узлов БСС выполняется таким образом, чтобы обеспечить баланс расхода энергии. Количество головных узлов зависит

от размера беспроводной сенсорной сети и обычно не превышает 25% от общего числа СУ. Ближайшие к головному узлу сенсорные устройства образуют вокруг него кластер и далее головной узел задает расписание передачи данных для своих СУ [4].

Известны несколько алгоритмов кластеризации, такие как LEACH, PEGASIS, TEEN, SEP и DEEC. Объединяет их общее правило – каждая базовая станция имеет возможность стать головным узлом.

Алгоритм LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy) предусматривает вероятностный выбор головного узла на основе энергетических характеристик в каждом новом цикле функционирования сенсорной сети.

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 – предопределенный 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 начинаются с одинакового уровня остаточной энергии [4].

В соответствии с алгоритмом TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols) передача данных

головному узлу от СУ происходит, только если количество накопленных данных достигло определенного уровня. Головной узел посылает своим СУ так называемые «жесткий» и «мягкий» порог. В первом случае любое СУ отправляет данные на головной узел кластера, только если значение энергии СУ находится в заданных пределах, а во втором случае СУ отправляет данные на головной узел кластера только тогда, когда значение энергии изменилось как минимум на значение порога [5].

Алгоритм SEP разработан для гетерогенных БСС, предполагающих наличие СУ двух типов: с низким уровнем остаточной энергии E_0 и высоким уровнем остаточной энергии E_0^+ [5].

Алгоритм DEEC также разработан для гетерогенных БСС. Вероятность выбора головного узла оценивается как:

$$P_i = \frac{E_i(r)}{\bar{E}(r)} \quad (2)$$

где E_i – остаточная энергия i -го СУ

r – номер текущего раунда работы БСС

\bar{E} – средняя энергия БСС

R – общее количество раундов жизни БСС.

Особенности моделирования процесса кластеризации БСС

На рис. 2 приведена временная диаграмма жизненного цикла БСС, положенная в основу имитационного моделирования процесса ее кластеризации [6].

После назначения головных узлов остальные СУ начинают формироваться в кластеры на основе сигнала RSS (Received Signal Strength), получаемого

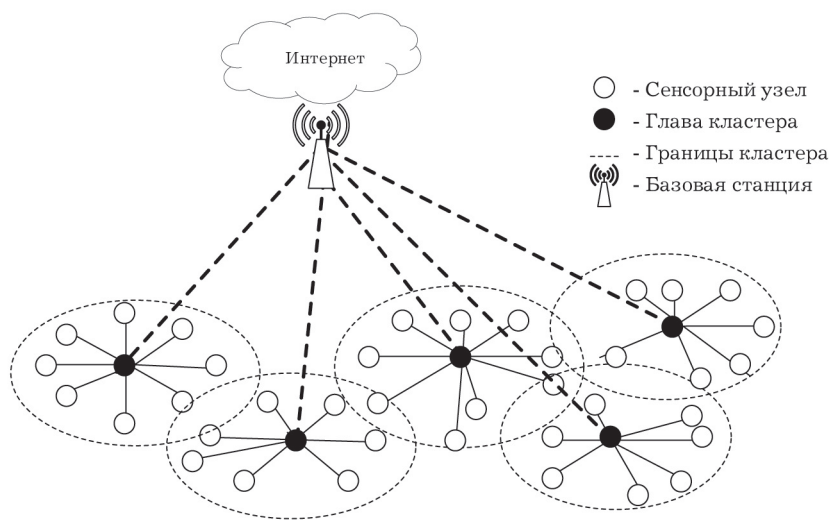


Рис. 1. Иерархическая структура беспроводной сенсорной сети

от головного узла. Мощность RSS является параметром, позволяющим измерить расстояние от СУ до головного узла согласно уравнению

$$P_d = P_0 - 10 \cdot n \cdot \lg(d/d_0), \quad (3)$$

где d – расстояние от устройства до головного узла, м;
 d_0 – расстояние от устройства до точки, на которой выполнялось измерение мощности сигнала устройства, м;

P_d – мощность сигнала головного узла, измеренная на расстоянии d от него, дБм;

P_0 – мощность сигнала головного узла, измеренная на единичном расстоянии от него, дБм;

n – коэффициент потерь мощности сигнала при распространении в среде, безразмерная величина (для воздуха $n=2$; увеличивается при наличии препятствий).

Уравнение (3) следует из формулы передачи Фрииса для распространения радиосигнала в свободном пространстве.

Головной узел каждого образованного кластера рассылает своим СУ сведения, необходимые для передачи данных. Сенсорные узлы передают имеющиеся (измеренные) данные на головной узел, после чего переходят в спящий режим до следующего временного цикла.

На рис. 3 приведена энергетическая модель СУ, согласно которой оценивается его уровень остаточной энергии в каждом новом раунде функционирования БСС [7]. Модель показывает расход энергии для

успешной передачи данных по сети – работы электронной схемы и усилителя передачи.

Будем исходить из следующих условий расстояния между СУ и головным узлом кластера:

– если расстояние d между СУ и головным узлом кластера меньше порогового значения d_0 , то используем модель свободного пространства – требуемая мощность сигнала E_s в свободном пространстве обратно пропорциональна квадрату расстояния между приемником и передатчиком (потеря мощности составляет d^2).

– если расстояние d между СУ и головным узлом кластера больше или равно порогового значения d_0 , то применяется регулировка мощности для компенсации потерь путем соответствующей настройки усилителя мощности, что соответствует двухлучевой модели распространения сигнала с потерей мощности d^4 .

Имитационная модель процесса кластеризации БСС реализована по технологии объектно-ориентированного программирования на платформе C++. Объекты модели соответствуют реальным объектам БСС: сенсорным и головным узлам, каналам, пакетам.

В основе реализации имитационной модели лежит схема событий и процессов: процесс реализует функционирование объекта, а события, сменяя друг друга, меняют состояние объекта. Каждое состояние характеризуется не только временем наступления, но и количественными характеристиками [8–10].

Основные объекты имитационной модели БСС приведены в таблице 1.

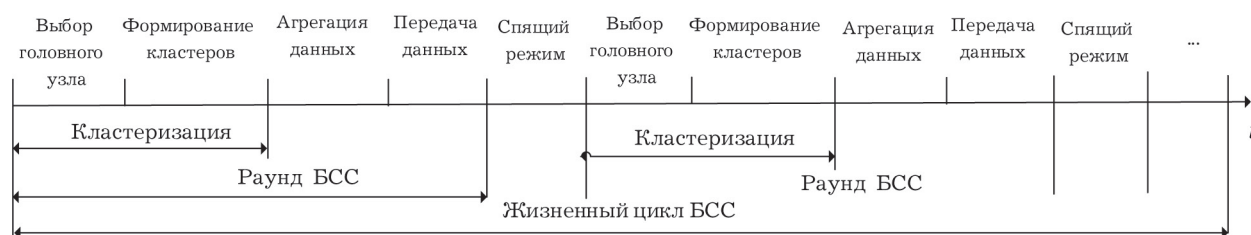


Рис. 2. Временная диаграмма жизненного цикла беспроводной сенсорной сети

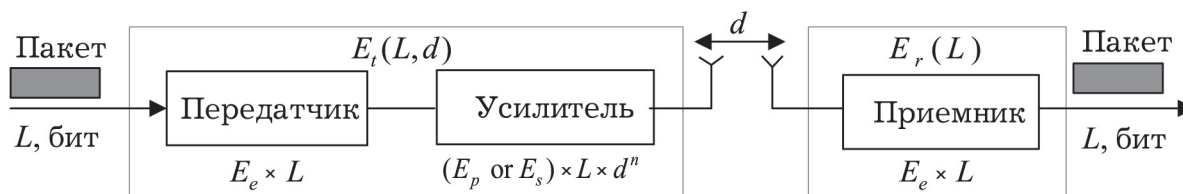


Рис. 3. Энергетическая модель узла БСС

Таблица 1

Объекты имитационной модели

Реальный объект	Процесс	Параметры процесса
Packet	– Генератор пакетов	– Интенсивность поступления пакетов – Функция распределения промежутков времени между поступлениями пакетов
Node	– Функция, имитирующая процесс передачи пакетов данных головному узлу кластера – Функция, имитирующая прием пакетов данных от головного узла кластера – Функция, задающая мобильность СУ	– Размеры сенсорного поля – Координаты расположения СУ в сенсорном поле – Энергия генерации одного бита – Энергия, необходимая для передачи одного бита – Энергия, необходимая для приема одного бита – Вероятность мобильности устройства
HeadNode	– Функция реализации протокола выбора головного узла – Функция реализации приема пакетов данных от всех СУ кластера	– Раунд взаимодействия головного узла с сенсорными устройствами – Энергия, расходуемая для сбора данных – Координаты расположения головного узла в сенсорном поле
Protocol	Функция, имитирующая доступ СУ к головному узлу кластера	– Матрица принадлежности всех СУ к определенному кластеру – Расписание передачи данных каждого кластера – Пропускная способность канала
BaseStation	Функция, имитирующая процесс обслуживания входящего потока данных на базовой станции	– Закон обслуживания поступающего потока пакетов данных – Флаг состояния – занято/свободно – Координаты расположения базовой станции
Реальный объект	Процесс	Параметры процесса
TimeModel	Искусственное (модельное) время	Алгоритмы продвижения модельного времени по схеме процессов и по схеме событий

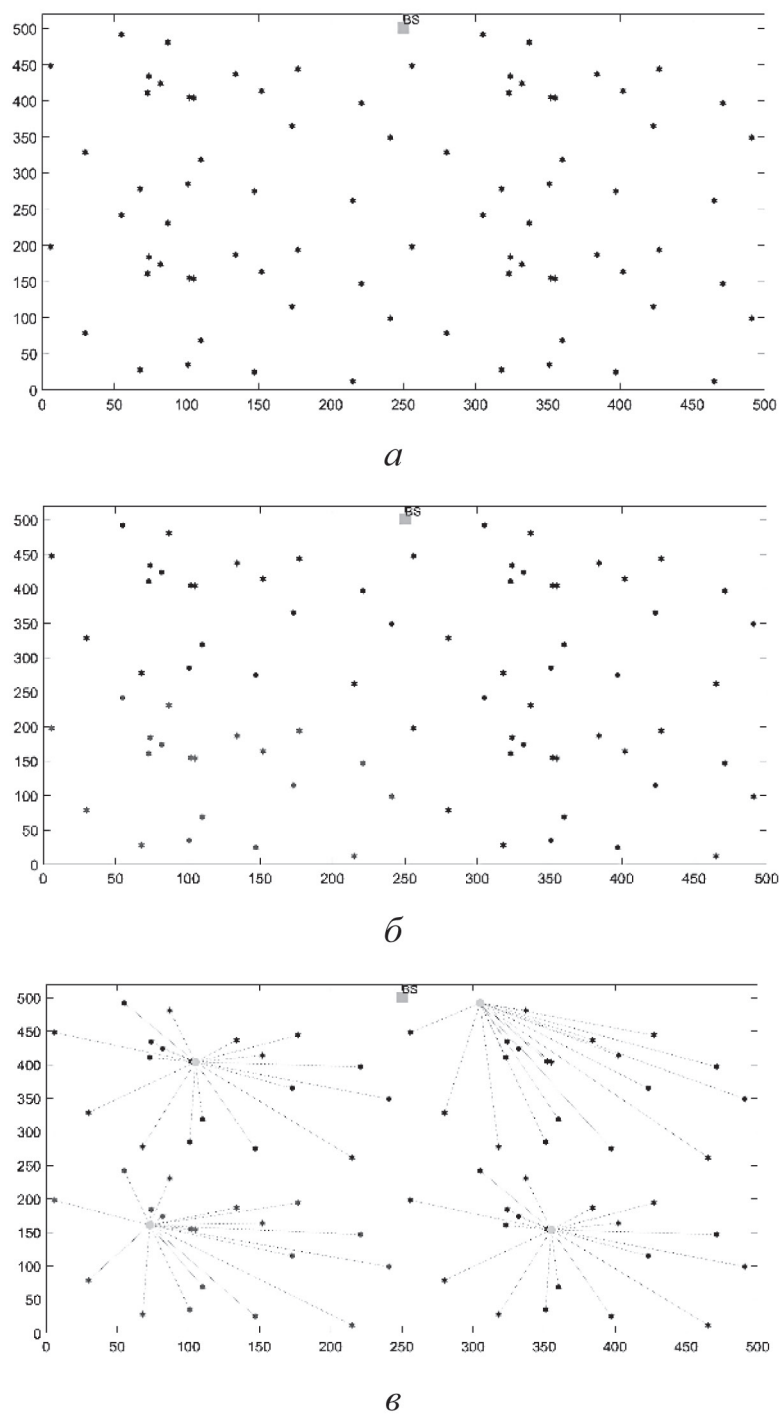


Рис. 4. Этапы выбора головных узлов кластеров БСС: а – инициализация СУ; б – формирование кластеров; в – выбор головных узлов кластеров

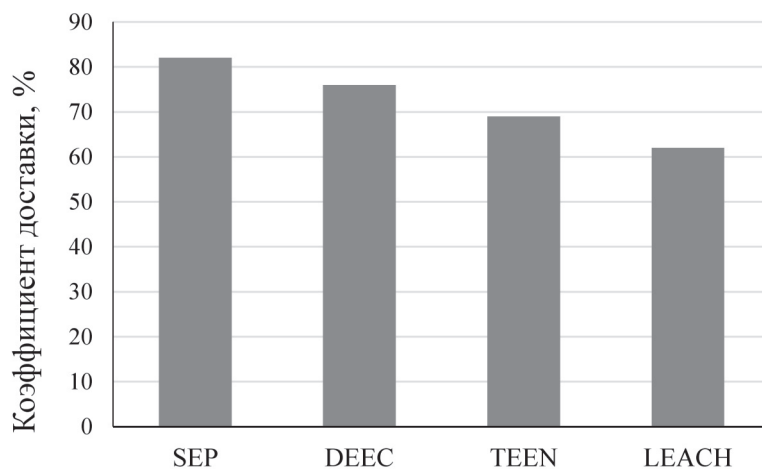


Рис. 5. Значение коэффициента доставки пакетов данных для разных алгоритмов кластеризации

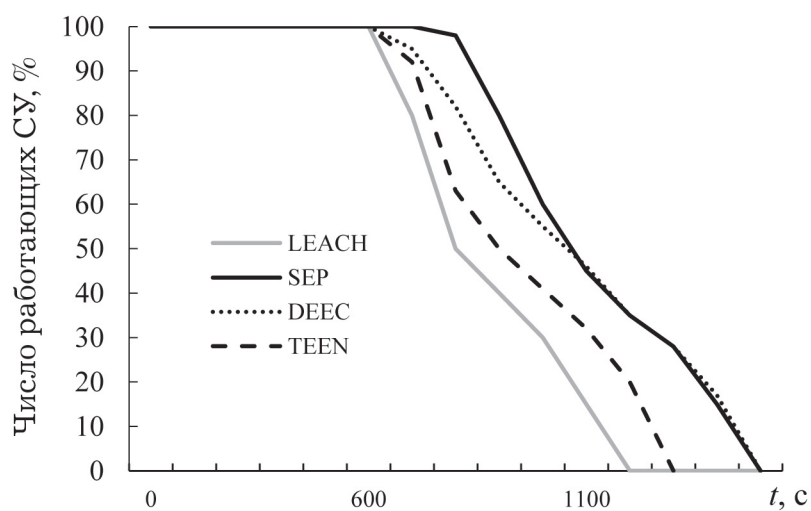


Рис. 6. Зависимость количества СУ от времени функционирования БСС

Анализ результатов

Сравним алгоритмы кластеризации по следующим параметрам энергоэффективности:

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

Моделирование выполнялось при следующих исходных данных:

- количество СУ – 200;
- предопределенный процент головных узлов – 5%;
- число функционирующих СУ, определяющих срок службы БСС – 60%;
- размер сенсорного поля – 100×100 м;
- средняя длина пакета данных – 32 бита,
- энергия, расходуемая для сбора данных – 5 нДж;
- энергия генерации одного бита – 10 нДж;
- энергия передачи одного бита данных – 50 нДж;
- остаточная энергия сенсорного узла – 0,5 Дж;
- пороговое значение расстояния до головного узла – 40 м;
- продолжительность одного раунда – 1 с;
- пропускная способность канала – 9600 бит/с.

На рис. 4 приведены этапы выбора головных узлов кластеров БСС.

На рис. 5 приведено сравнение алгоритмов кластеризации: LEACH, SEP, TEEN и DEEC по показателю коэффициента доставки пакетов данных. Значения сняты на предыдущем раунде работы БСС по алгоритму LEACH до ее полной гибели – на 1100 раунде.

Анализ рис. 5 и рис. 6 показывает, что в целом время жизни БСС, в которой выбор головных узлов выполняется по алгоритмам DEEC и SEP, больше в сравнении с другими рассмотренными алгоритмами кластеризации LEACH и TEEN. То же самое относится и к значению коэффициента доставки данных – когда срок службы БСС, кластеризованной по алгоритму LEACH, истекает, то БСС с кластеризацией по алгоритмам TEEN, DEEC и SEP продолжает получать данные на базовую станцию, причем по алгоритму SEP коэффициент доставки остается выше 50%.

Заключение

Показана необходимость в развитии энергоэффективных алгоритмов кластеризации беспроводной сенсорной сети. Кластеризация позволяет организовать передачу данных по иерархическому принципу: сенсорный узел – головной узел кластера – базовая станция, что характеризуется доказанной энергоэффективностью в сравнении с непосредственной передачей данных от сенсорного узла на базовую станцию. Алгоритм кластеризации предпо-

лагает выбор головного узла и формирование самого кластера. При этом учитывается как расположение узлов, так и уровень их остаточной энергии.

Сравнение алгоритмов кластеризации показало превосходство БСС, кластеризованных по алгоритмам DEEC и SEP по показателям срока службы и объема переданных данных на базовую станцию.

Исследования, приведенные в работе, расширяют возможные варианты решения задачи кластеризации крупномасштабных беспроводных сенсорных сетей.

Литература

1. Кучерявый, А. Е. Сети связи 2030 / А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2018. – № 11. – С. 52–56.
2. Study of data transfer in a heterogeneous Lora-satellite network for the internet of remote things / I. Lysogor, L. Voskov, A. Rolich, S. Efremov // Sensors. – 2019. – Vol. 19, No. 15. – P. 3384.
3. Doo-Soon Park. Fault Tolerance and Energy Consumption Scheme of a Wireless Sensor Network / Academic Editor : H.-Y. Jeong // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2013. – Vol. 2013. – 7 p.
4. Ran, G. Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic / G. Ran, H. Zhang, S. Gong // Journal of Information & Computational Science. – 2010. – No. 7. – P. 767–775.
5. Татарникова, Т. М. Методы увеличения жизненного цикла сети интернета вещей / Т.М. Татарникова, И.Н. Дзюбенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 5. – С. 843–849.
6. Performance analysis of single board computer clusters / P.J. Basford, S.J. Johnston, C.S. Perkins [et al.] // Future Generation Computer Systems. – 2020. – Vol. 102. – P. 278–291.
7. Heinzelman, W. B. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks / W.B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, H. Balakrishnan // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2002. – Vol. 1, No. 4. – P. 660–670.
8. Кутузов, О. И. Из практики применения метода Монте-Карло / О.И. Кутузов, Т.М. Татарникова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 3. – С. 65–70.
9. Татарникова, Т. М. Статистические методы исследования сетевого трафика / Т.М. Татарникова // Информационно-управляющие системы. – 2018. – № 5 (96). – С. 35–43.
10. Dziubenko, I. N. Algorithm for Solving Optimal Sensor Devices Placement Problem in Areas with Natural Obstacles / I.N. Dziubenko, T.M. Tatarnikova // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2018. – P. 1–5.