

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-294-301

УДК 004.7

Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети

Татьяна Михайловна Татарникова¹, Фараби Бимбетов², Елена Владимировна Горина³

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, Санкт-Петербург, 197002, Российская Федерация

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

³ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация

¹ tm-tatarn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6419-0072>

² fbimbetov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9740-7998>

³ elena_rez@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0908-7221>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена актуальная задача развития методов взаимодействия узлов в беспроводных сенсорных сетях, ориентированных на энергосбережение. Показано, что работа такой сети построена с учетом компромиссных механизмов, которые могут продлить срок службы сети при наличии маломощных сенсорных узлов. Сделан вывод о необходимости внедрения новых алгоритмов в работу беспроводных сенсорных сетей, для сокращения числа операций при вычислении маршрута, передачи данных или других операций без потери функциональности, что позволяет снизить расход энергии. Предложен алгоритм, который развивает идею кластеризации беспроводных сенсорных сетей с целью снижения энергопотребления сенсорными узлами с помощью передачи части функций на головные узлы кластеров. **Методы.** В отличие от известного алгоритма адаптивной кластеризации с низким потреблением энергии (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH), предложенный алгоритм основан на роевом интеллекте и позволяет в текущем раунде функционирования беспроводной сенсорной сети выбрать не только головные узлы кластеров, но и перспективные узлы, которые станут главами кластеров в последующих раундах. Если один цикл работы сети состоит из предопределенного количества раундов, то процедуру поиска глав кластеров можно выполнять не в начале каждого раунда, а только в начале каждого цикла функционирования сети. **Основные результаты.** Показано, что определение глав кластеров беспроводной сенсорной сети в результате снижает общий расход энергии и тем самым увеличивает продолжительность жизненного цикла сети. Обнаружено преимущество добавления алгоритма роя пчел в процедуру кластеризации сети по таким показателям как время гибели первого сенсорного узла, зависимости числа функционирующих узлов от времени функционирования сети и коэффициента доставки пакетов данных. **Практическая значимость.** Процедура кластеризации беспроводной сенсорной сети с добавлением алгоритма роя пчел для выбора глав кластеров может быть полезна при разворачивании работы сети в реальных приложениях.

Ключевые слова

беспроводная сенсорная сеть, энергоэффективность, кластеризация, глава кластера, сенсорный узел, алгоритм роя пчел, жизненный цикл

Ссылка для цитирования: Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., Горина Е.В. Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 2. С. 294–301. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-294-301

Algorithm for energy-efficient interaction of wireless sensor network nodes

Tatiana M. Tatarnikova¹, Farabi Bimbetov², Elena V. Gorina³

^{1,2} Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197002, Russian Federation

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

³ Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation

¹ tm-tatarn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6419-0072>

² fbimbetov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9740-7998>

³ elena_rez@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0908-7221>

Abstract

The actual problem of developing methods of interaction in wireless sensor networks focused on energy saving is discussed. It is shown that the operation of a wireless sensor network is built taking into account compromise mechanisms that make it possible to extend the life of the network in the presence of low-power sensor nodes on which the network is built. It is concluded that it is necessary to introduce new algorithms into the operation of wireless sensor networks, which make it possible to reduce the number of operations when calculating a route, transmitting data, or other operations without losing functionality, but contributing to a reduction in energy consumption. The paper proposes one of such algorithms that develops the idea of clustering wireless sensor networks in order to reduce the power consumption of sensor nodes by transferring some of the functions to the head nodes of the clusters. Unlike the well-known adaptive clustering algorithm with low energy consumption LEACH, the proposed algorithm is based on swarm intelligence and allows choosing not only the head nodes of clusters in the current round of functioning of the wireless sensor network, but also promising nodes that become heads of clusters in subsequent rounds. If we consider that one cycle of the wireless sensor network consists of a certain predetermined number of rounds, then the procedure for searching for cluster heads can be performed not at the beginning of each round, but only at the beginning of each cycle of the wireless sensor network. It is shown that the determination of the heads of wireless sensor network clusters in the future allows to reduce the total energy consumption and thereby increase the duration of the network life cycle. The advantage of adding the bee swarm algorithm to the wireless sensor network clustering procedure is demonstrated in terms of such indicators as the time of death of the first sensor node, the dependence of the number of functioning nodes on the network operation time and the data packet delivery coefficient. The wireless sensor network clustering procedure with the addition of the bee swarm algorithm to select cluster heads for the future can be useful when deploying a wireless sensor network in real applications.

Keywords

wireless sensor network, energy efficiency, clustering, cluster head, sensor node, bee swarm algorithm, life cycle

For citation: Tatarnikova T.M., Bimbetov F., Gorina E.V. Algorithm for energy-efficient interaction of wireless sensor network nodes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 294–301 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-294-301

Введение

Все популярные в настоящее время приложения, типа, мониторинга здоровья, охранного наблюдения, интеллектуального транспорта и другие, реализуются средствами беспроводной сенсорной сети (БСС) [1–3].

Главное ограничение сенсорных узлов (СУ), образующих беспроводную сеть — требование низкого энергопотребления.

СУ, как правило, содержат ограниченную по емкости батарею в качестве источника питания, и от их энергопотребления зависит срок службы БСС [4, 5], которая является вариативной характеристикой. Срок службы сети измеряется: числом функционирующих узлов, имеющих достаточно энергии для выполнения свойственных им операций; продолжительностью функционирования БСС до момента «гибели» первого СУ; коэффициентом доставки пакетов данных, представляющим собой отношение числа доставленных адресату пакетов данных к числу отправленных.

Таким образом, если протоколы традиционных сетей нацелены на достижение высоких показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS), то протоколы сенсорных сетей ориентированы в первую очередь на энергосбережение. Как правило, протоколы БСС имеют встроенные компромиссные механизмы,

которые дают возможность продления срока службы сети за счет более низкой пропускной способности или высокой задержки передачи измерений от СУ на базовую станцию [6].

Энергия сенсорных устройств расходуется на прием и передачу данных, их обработку, вычисление маршрута и т. д. [7]. Таким образом, выбор способа информационного взаимодействия — одна из актуальных научных задач при организации БСС. Требуются новые алгоритмы, позволяющие сократить число операций при вычислении маршрута, передачи данных или других операций без потери функциональности, но способствующих снижению расхода энергии. В настоящей работе предложен алгоритм, который позволяет развить идею кластеризации БСС с целью снижения энергопотребления СУ за счет передачи части функций на головные узлы кластеров [8].

Описание процесса кластеризации беспроводной сенсорной сети

В кластеризованной БСС глава кластера (головной узел) выполняет роль ретранслятора данных, полученных от СУ, принадлежащих этому кластеру. БСС строится как совокупность кластеров, на которые разбивается создаваемое ею сенсорное поле. Собранные

данные передаются главой кластера на базовую станцию, которая, в свою очередь, доставляет их в глобальное облако [9]. Такой иерархический принцип организации доставки данных, собранных сетью, позволяет покрыть сенсорным полем практически любой по размерам участок территории, в том числе с воздуха [10] (рис. 1).

В каждом раунде работы БСС последовательно выполняются следующие действия:

- выбор главы кластера — головного узла кластера, выполняющего функции ретранслятора измеренных данных от СУ на базовую станцию, включая агрегацию, отсеивание, форматирование данных, поступающих от множества СУ [11];
- формирование кластера вокруг главы кластера на основе мощности сигнала RSS (Received Signal Strength) в децибел-милливаттах, отправляемого главой кластера всем СУ. Мощность сигнала RSS позволяет измерить расстояние от СУ до головного узла кластера [12];
- передача данных: глава кластера широковещательной рассылкой доставляет своим СУ расписание отправки данных. Каждое сенсорное устройство передает данные в своем временном окне согласно методу множественного доступа с разделением по времени (Time Division Multiple Access, TDMA), что гарантирует отсутствие коллизий передачи данных [13];
- агрегация данных — процедура объединения данных, полученных от СУ. Если данные некорректны, то они отсеиваются. На базовую станцию данные передаются в требуемом для дальнейшей обработки формате [14];
- переход в спящий режим, который характеризуется сниженным потреблением энергии СУ, и наступает после периода активности, характеризующимся полной функциональностью БСС.

В практике организации работы БСС распространение получил алгоритм адаптивной кластеризации с низким потреблением энергии LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), основанный на поддержке баланса расхода энергии. Блок-схема алгоритма выбора главы кластера по алгоритму LEACH приведен на рис. 2.

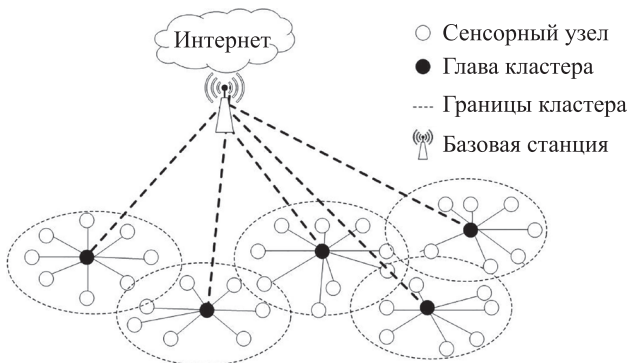


Рис. 1. Кластеризованная структура беспроводной сенсорной сети

Fig. 1. Clustered wireless sensor network structure

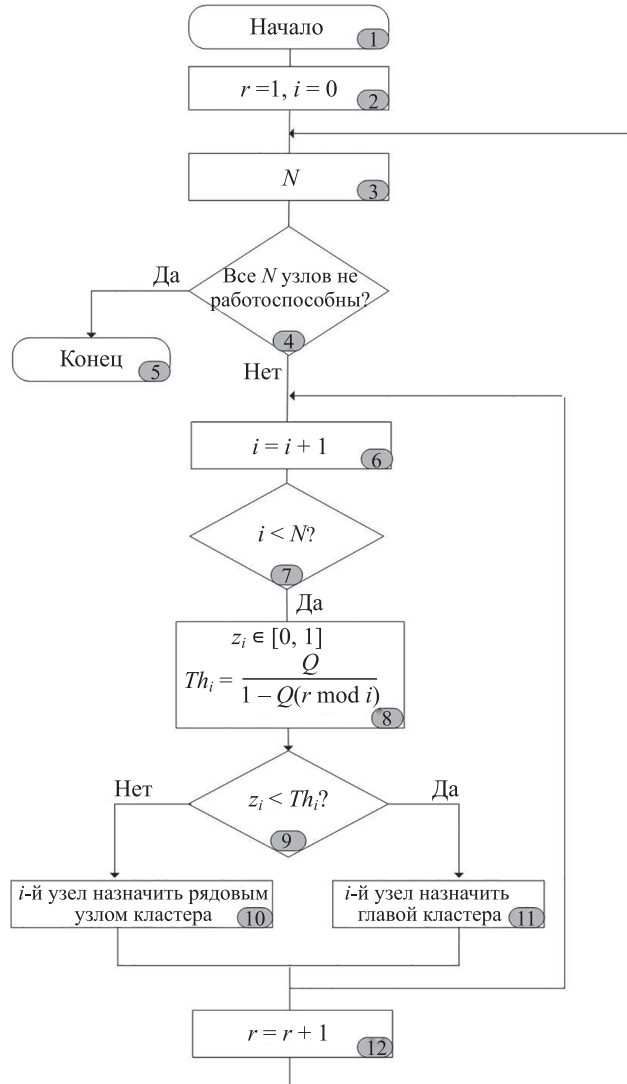


Рис. 2. Блок-схема алгоритма LEACH

Fig. 2. Block diagram of the LEACH algorithm

Выбор главы кластера по алгоритму LEACH осуществлен по случайному закону: независимо от других узлов. На каждом i -ом СУ генерируется случайное число $z_i \in [0, 1]$, где $i = 1, N$. Одновременно вычисляется пороговое значение Th_i согласно выражению, приведенному в блоке 8 (рис. 2), где Q — априорная вероятность допустимого количества кластеров на контролируемом БСС пространстве; i — порядковый номер СУ; r — номер текущего раунда.

Продолжительность одного цикла включает $1/Q$ раундов. В течение цикла одно и то же СУ не может быть выбрано главой кластера более одного раза. В новом цикле процедура выбора головных узлов кластера повторяется.

Описание предлагаемого алгоритма поиска главы кластера на основе роевого интеллекта

Предложено не в начале раунда, а в начале цикла определять главу кластера и близкие к нему СУ по метрике евклидова расстояния и уровню остаточной

энергии — потенциальные главы кластера, которые могут стать ими в следующих раундах сети. Таким образом, в отличие от алгоритма LEACH и его версий при таком подходе фаза выбора головного узла кластера не требуется по крайней мере в течение одного цикла, а СУ избавляются от части вычислений, связанных с выбором главы кластера.

Представленный алгоритм основан на роевом интеллекте. Роевой интеллект — набор алгоритмов, направленных на изучение и описание коллективного поведения децентрализованной самоорганизующейся системы, к числу которой относятся и БСС.

Системы роевого интеллекта состоят из множества отдельных элементов, которые взаимодействуют между собой и окружающей средой. Все элементы — простые агенты с небольшим набором выполняемых операций, в совокупности создающие единый роевой интеллект, способный решать задачи поисковой оптимизации. Каждое перемещение агента характеризуется определенным положением в исследуемой области, для которого вычисляется значение целевой функции, и на основе которого принимается решение об исследовании близлежащей области. Алгоритм имеет несколько преимуществ:

- возможность разделения на параллельные процессы;
- высокая скорость работы;
- нахождение значения целевой функции и близлежащие к ней значения.

В алгоритме агентами являются пчелы-разведчики и пчелы-фуражиры, которые перемещаются в выбранной области целевой функции. Основная цель пчелиной колонии — поиск нектара — оптимального значения целевой функции.

Сначала на поиски наибольшего скопления нектара отправляются несколько пчел-разведчиков, которые исследуют местность и выявляют наиболее медоносные участки. Затем пчелы-разведчики возвращаются в улей и сообщают пчелам-фуражирам, где необходимо провести сбор нектара. Пчелы-фуражиры, следуя за пчелой-разведчиком, прилетают не в одну точку, а распределяются в некоторой области, которая располагается недалеко от исходного места скопления нектара. Таким образом, пчелы-фуражиры могут найти и запомнить места наиболее и менее перспективные. В табл. 1

приведена адаптация терминов алгоритма роя пчел к задаче оптимизации.

Алгоритм состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Ввод исходных данных: число пчел-разведчиков X ; число лучших участков B ; число перспективных участков P ; радиус окрестности R , в которой пчела выполняет поиск; область исследования (координаты плоскости) или длина a и ширина b исследуемой области; значение шага передвижения для исследования плоскости Δ .

Шаг 2. Отправка пчел-разведчиков — случайный выбор X точек на исследуемой плоскости:

$$X = \text{random.uniform}(a, b).$$

Шаг 3. Оценка полученных значений целевой функции X точек и выбор лучших B и перспективных P участков.

Шаг 4. Случайный выбор l точек на лучших участках и p точек на перспективных участках ($l > p$). Окрестности каждой точки задаются координатами с радиусом R .

Шаг 5. Проверка на пересечение областей и вхождение выбранных точек каждого типа в окрестности друг друга. Для этого используется метрика евклидова расстояния: $d(x, y) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$, $d > R$ оно должно быть больше, чем заданное значение R для определения области, или границы окрестности по двум координатам.

Шаг 6. Исследование окрестностей каждой из l и p выбранных точек в поиске лучших и перспективных участков.

Шаг 7. Повтор шагов 2–6 до тех пор, пока не работает условие останова.

Оценка результатов

Работоспособность алгоритма роя пчел и оценка точности поиска лучших и перспективных участков проверена на известных математических функциях, результаты приведены в табл. 2.

Полученные результаты поиска участков свидетельствуют о способности алгоритма роя пчел решать оптимальные и субоптимальные задачи.

Проведем сравнение работы двух алгоритмов: LEACH и роя пчел. Для этого имитационную модель,

Таблица 1. Адаптация терминов алгоритма роя пчел к задаче оптимизации
Table 1. Adaptation of terms of the bee swarm algorithm to the optimization problem

Термины алгоритма роя пчел	Термины задачи оптимизации
Нектар	Экстремум целевой функции
Рой пчел	Массив всех координат исследуемой плоскости
Окрестность поиска нектара	Окрестность выбранной точки
Пчелы-разведчики	Выбранные случайным образом точки исследуемой плоскости
Лучшие участки	Точки, в которых значение целевой функции достигает экстремума
Перспективные участки	Точки, в которых значение целевой функции близко к значению лучших участков
Пчелы-фуражиры	Количество точек в окрестности лучших и перспективных участков

Таблица 2. Результаты поиска лучших и перспективных участков на тестовых функциях
 Table 2. Search results for the best and promising areas on test functions

Наименование функции	Математическая нотация функции	Результаты поиска	Значение погрешности	Время поиска, мкс
Синус	$f(x) = \frac{\sin(x)}{x}$		$2,7 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-7}$
Парабола	$f(x) = (x - 2)^2 - 2$		$5 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-7}$
Розенброка	$f(x, y) = (1 - x)^2 + 100(y - x^2)^2$		$4 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-7}$
Буга	$f(x, y) = (x + 2y - 7)^2 + (2x + y - 5)^2$		$4 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-7}$
Изома	$f(x, y) = -\cos(x)\cos(y) \times \exp(-((x - \pi)^2 + (y - \pi)^2))$		$2 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-7}$

- Перспективные участки
- Лучшие участки

рассмотренную в работе [15], дополним соответствующими процедурами.

Распределение сенсорных устройств в каждом новом цикле должно происходить случайно в пределах границ, заданных координатами сенсорного поля.

Выполним процесс моделирования при следующих исходных данных: $N = 100$; $Q = 5 \%$; $a = 100$ м, $b = 100$ м; средняя длина пакета данных $L = 32$ бита,

конкретное значение длины пакета разыгрывается методом Монте-Карло при заданной функции распределения $f(L_i, p_i)$ дискретной случайной величины L_i — длины i -го информационного пакета с вероятностью p_i , $i = 1, K$, где K — число возможных значений L ; энергия, расходуемая для сбора данных $E_a = 5$ нДж; остаточная энергия СУ $E = 0,5$ Дж; $R = 20$ м; радиус распространения сигнала $RSS = 2R$; продолжительность одно-

го раунда 1 с; скорость передачи данных 9600 бит/с; энергия генерации одного бита $E' = 10$ нДж; энергия передачи одного бита данных $E'' = 50$ нДж; расход энергии $E^{send}(L, d)$ для отправки L -битного сообщения на расстояние d оценивалось как $E^{send}(L, d) = E'L + E''Ld^2$; расход энергии $E^{receive}(L)$ для получения L -битного сообщения оценивалось как $E^{receive}(L) = E'L$; общий расход энергии головного узла кластера учитывает общее количество пакетов (отправленных и полученных)

$$E^{over}(L) = \sum_{i=1}^S E^{send}(L_i, d_i) + \sum_{j=1}^R E^{receive}(L_j).$$

На рис. 3 приведена гистограмма сравнения продолжительности функционирования БСС до первого погибшего СУ для трех случаев: некластеризованной БСС, кластеризованной БСС с поиском главы кластера по алгоритму LEACH и по алгоритму роя пчел. Результаты показали, что у некластеризованной БСС первый узел погиб в 167 раунде (около 3 мин работы сети); для кластеризованной БСС по алгоритму LEACH гибель произошла на 645 раунде (11 мин работы), а для БСС по алгоритму роя пчел — на 847 раунде (15 мин работы).

Приблизительно такой же баланс сохраняется, если увеличивать априорную вероятность допустимого количества кластеров.

На рис. 4, а показана потеря СУ с течением времени функционирования БСС. В целом кластеризованная БСС имеет более продолжительный жизненный цикл в сравнении с некластеризованной, а выбор главы кластера по алгоритму роя пчел позволяет экономить энергию и, соответственно, увеличивать продолжительность жизненного цикла сети. Отметим, что с увеличением числа СУ в кластере и числа раундов в цикле функционирования БСС экономия будет только расти.

На рис. 4, б демонстрируется изменение коэффициента доставки пакетов данных от СУ на головной узел кластера с течением времени функционирования БСС. Заметим, что коэффициент доставки в кластеризованной сети выше по сравнению с некластеризованной, а при выборе главы кластера по алгоритму роя пчел из-за полученной экономии энергии коэффициент доставки

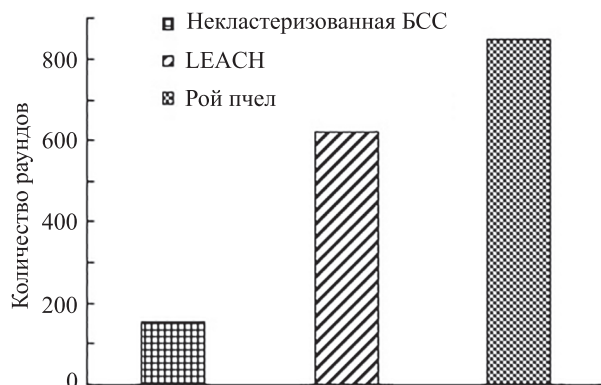


Рис. 3. Продолжительность функционирования БСС до первого погибшего сенсорного узла, раундов

Fig. 3. Duration of BSN functioning until the first dead sensory node, rounds

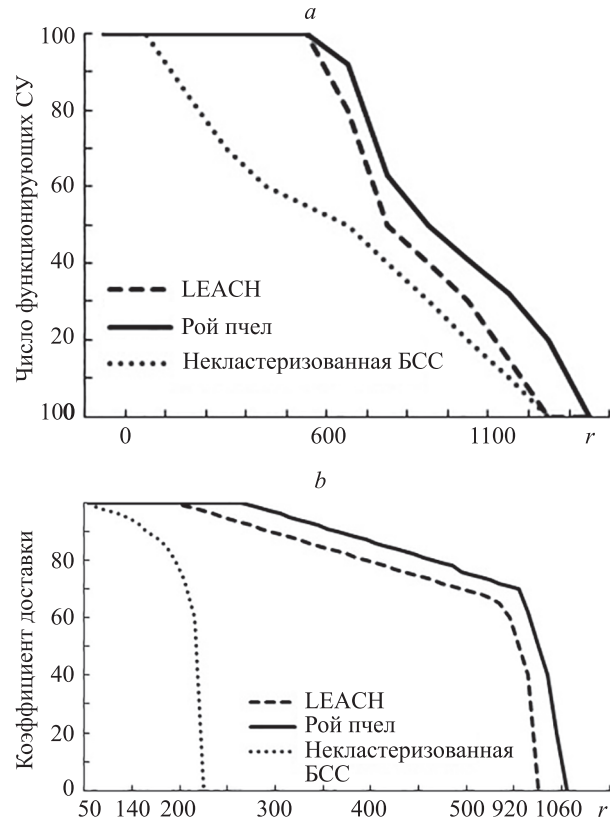


Рис. 4. Изменения числа действующих сенсорных узлов (а) и коэффициента доставки пакетов данных (б) с течением времени функционирования беспроводной сенсорной сети
Fig. 4. Changes in the number of active sensor nodes (a) and the coefficient of data packet delivery (b) over the time of operation of the wireless sensor

пакетов данных достигает такого же значения, что в дальнейшем при алгоритме LEACH.

Заключение

Выбор способа информационного взаимодействия является одной из актуальных научных задач при организации беспроводной сенсорной сети. В целях рационального расходования энергии при функционировании беспроводных сенсорных сетей требуются новые алгоритмы, позволяющие сократить число операций, требующих определенных затрат энергии для своего выполнения.

Предложено в начале процедуры кластеризации определять не только главу кластера, но и близкие к нему по значению целевой функции сенсорные узлы. Целевой функцией является уровень остаточной энергии и (или) метрика евклидова расстояния. В последующих раундах работы сети нет необходимости в определении главы кластера, а сенсорные узлы освобождаются от вычислений, связанных с этой процедурой.

Результаты имитационного моделирования показали преимущество добавления алгоритма роя пчел в процедуру кластеризации беспроводной сенсорной сети по таким показателям качества сети как время гибели первого сенсорного узла, числа функционирующих узлов, имеющих достаточно энергии для выполнения

свойственных им операций и коэффициента доставки пакетов данных.

Предложенный алгоритм роя пчел по выбору главы кластера можно рекомендовать при выборе способов

взаимодействия узлов на ранних стадиях проектирования беспроводной сенсорной сети.


Литература

- Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // *IEEE Internet of Things Journal*. 2014. V. 1. N 1. P. 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
- Wang C., Lin H., Jiang H. CANS: Towards congestion-adaptive and small stretch emergency navigation with wireless sensor networks // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2016. V. 15. N 5. P. 1077–1089. <https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2451639>
- Galinina O., Mikhaylov K., Andreev S., Turlikov A. Wireless sensor network based smart home system over BLE with energy harvesting capability // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2014. V. 8638. P. 419–432. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10353-2_37
- Krishnamurthy V. POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks // *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. 2005. P. 793–796. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2005.1416423>
- Lee P. *Internet of Things for Architects*. Packt Publishing, 2018. 524 p.
- Татарникова Т.М. Статистические методы исследования сетевого трафика // *Информационно-управляющие системы*. 2018. № 5(96). С. 35–43. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-35-43>
- Dias de Assunção M., da Silva Veith A., Buyya R. Distributed data stream processing and edge computing: A survey on resource elasticity and future directions // *Journal of Network and Computer Applications*. 2018. V. 103. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.12.001>
- Tran T.X., Hajisami A., Pandey P., Pompili D. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges // *IEEE Communications Magazine*. 2017. V. 55. N 4. P. 54–61. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600863>
- Ran G., Zhang H., Gong S. Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic // *Journal of Information and Computational Science*. 2010. N 7. N 3. P. 767–775.
- Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Redundant servicing of a flow of heterogeneous requests critical to the total waiting time during the multi-path passage of a sequence of info-communication nodes // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2020. V. 12563. P. 100–112. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66471-8_9
- Pahl C., Helmer S., Miori L., Sanin J., Lee B. A container-based edge cloud PaaS architecture based on raspberry Pi clusters // *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*. 2016. P. 117–124. <https://doi.org/10.1109/W-FiCloud.2016.36>
- Miori L., Sanin J., Helmer S. A platform for edge computing based on Raspberry Pi clusters // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2017. V. 10365. P. 153–159. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60795-5_16
- Basford P.J., Johnston S.J., Perkins C.S., Garnock-Jones T., Tso F.P., Pezaros D., Mullins R.D., Yoneki E., Singer J., Cox S.J. Performance analysis of single board computer clusters // *Future Generation Computer Systems*. 2020. V. 102. P. 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.07.040>
- Dziubenko I.N., Tatarnikova T.M. Algorithm for solving optimal sensor devices placement problem in areas with natural obstacles // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2018. P. 8604325. <https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604325>
- 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. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849>

References

- Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
- Wang C., Lin H., Jiang H. CANS: Towards congestion-adaptive and small stretch emergency navigation with wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, vol. 15, no. 5, pp. 1077–1089. <https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2451639>
- Galinina O., Mikhaylov K., Andreev S., Turlikov A. Wireless sensor network based smart home system over BLE with energy harvesting capability. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2014, vol. 8638, pp. 419–432. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10353-2_37
- Krishnamurthy V. POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks. *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2005, pp. 793–796. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2005.1416423>
- Lee P. *Internet of Things for Architects*. Packt Publishing, 2018, 524 p.
- Tatarnikova T.M. Statistical methods for studying network traffic. *Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy*, no. 5(96), pp. 35–43. (in Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-35-43>
- Dias de Assunção M., da Silva Veith A., Buyya R. Distributed data stream processing and edge computing: A survey on resource elasticity and future directions. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, vol. 103, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.12.001>
- Tran T.X., Hajisami A., Pandey P., Pompili D. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 54–61. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600863>
- Ran G., Zhang H., Gong S. Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic. *Journal of Information and Computational Science*, 2010, no. 7, no. 3, pp. 767–775.
- Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Redundant servicing of a flow of heterogeneous requests critical to the total waiting time during the multi-path passage of a sequence of info-communication nodes. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2020, vol. 12563, pp. 100–112. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66471-8_9
- Pahl C., Helmer S., Miori L., Sanin J., Lee B. A container-based edge cloud PaaS architecture based on raspberry Pi clusters. *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*, 2016, pp. 117–124. <https://doi.org/10.1109/W-FiCloud.2016.36>
- Miori L., Sanin J., Helmer S. A platform for edge computing based on Raspberry Pi clusters. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017, vol. 10365, pp. 153–159. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60795-5_16
- Basford P.J., Johnston S.J., Perkins C.S., Garnock-Jones T., Tso F.P., Pezaros D., Mullins R.D., Yoneki E., Singer J., Cox S.J. Performance analysis of single board computer clusters. *Future Generation Computer Systems*, 2020, vol. 102, pp. 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.07.040>
- Dziubenko I.N., Tatarnikova T.M. Algorithm for solving optimal sensor devices placement problem in areas with natural obstacles. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 8604325. <https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604325>
- Tatarnikova T.M., Dziubenko I.N. Methods of life cycle increase for the Internet of things. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 843–849 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849>


Авторы

Татарникова Татьяна Михайловна — доктор технических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, Санкт-Петербург, 197002, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация,  36715607400, <http://orcid.org/0000-0002-6419-0072>, tm-tatarn@yandex.ru

Бимбетов Фараби — аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197002, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9740-7998>, fbimbetov@gmail.com

Горина Елена Владимировна — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-0908-7221>, elena_rez@mail.ru

Authors

Tatiana M. Tatarnikova — D.Sc., Full Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197002, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation,  36715607400, <http://orcid.org/0000-0002-6419-0072>, tm-tatarn@yandex.ru

Farabi Bimbetov — PhD Student, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197002, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9740-7998>, fbimbetov@gmail.com

Elena V. Gorina — PhD, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0908-7221>, elena_rez@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 04.02.2022
Одобрена после рецензирования 14.02.2022
Принята к печати 17.03.2022*

*Received 04.02.2022
Approved after reviewing 14.02.2022
Accepted 17.03.2022*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»