

Д. Е. Демидов, Н. В. Будылина

ПОВЫШЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

D. E. Demidov, N. V. Budyldina

IMPROVING LIFETIME OF WIRELESS SENSOR NETWORKS USING FUZZY LOGIC

Аннотация. Рассмотрен эффективный метод кластеризации в беспроводной сенсорной сети с использованием нечеткой логики на базе таких входных переменных, как качество принимаемого сигнала, концентрация узлов, остаточная энергия и центральность узла. Данный метод также сочетает в себе преимущества иерархии адаптивной кластеризации с низким энергопотреблением (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH). Представлена структура моделируемой беспроводной сенсорной сети и аппарата нечеткой логики. Проведено сравнение предлагаемого метода с протоколами кластеризации LEACH и LEACH-FL. Моделирование беспроводной сенсорной сети и контроллера нечеткой логики проводилось в программной среде Matlab. Для сравнения с протоколами LEACH и LEACH-FL использовалась сеть размерностью 100×100 с выбранными 20 узлами. В результате моделирования и сравнения было выявлено, что предложенный алгоритм кластеризации обладает более высокой скоростью и низким энергопотреблением и, следовательно, позволяет увеличить время жизни беспроводной сенсорной сети. Данный метод кластеризации может быть использован в любых беспроводных сенсорных сетях, независимо от сферы их применения.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, кластеризация, головной кластер, нечеткая логика, время жизни.

Abstract. The article considers efficient method of clustering in a wireless sensor network using fuzzy logic based on input variables such as the quality of the received signal, node concentration, remaining energy and node centrality. This method also combines the advantages of Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH). The structure of simulated wireless sensor network and fuzzy logic apparatus is presented. A comparison of the proposed method with the clustering protocols LEACH and LEACH-FL had been made. Modeling of Wireless sensor network and fuzzy logic controller was carried out in Matlab software environment. For comparison with the protocols of LEACH and LEACH-FL used the network dimensions of 100×100 with the 20 selected nodes. As a result of modeling and comparison it was revealed that the proposed clustering algorithm has a higher speed and low power consumption and, therefore, allows to increase the lifetime of the wireless sensor network. This clustering method can be used in any wireless sensor networks, regardless of their scope.

Key words: wireless sensor network, clustering, cluster head, fuzzy logic, lifetime.

В последние годы улучшение цифровой электроники, технологии строения полупроводников и беспроводной связи привело к развитию инструментария с малыми габаритами, низкой стоимостью и высокой мощностью с возможностью передачи данных, вычисления и отслеживания. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) состоит из сотен или даже тысяч сенсорных датчиков, которые используют радиочастоты для выполнения задач отслеживания [1–5]. БСС состоят из большого числа сенсорных узлов (мотов) и базовой станции (БС). Сенсорные узлы собирают данные и передают их базовой станции, используя радиопередатчик. Сенсорные узлы обладают ограниченной мощностью и вычислительной способностью. БСС могут применяться в военных, биомедицинских и экологических отраслях.

Положение узлов не нужно предварительно рассчитывать. Это позволяет случайным образом располагать их в труднодоступных местностях или использовать для операций по оказанию помощи, которые требуют быстрого реагирования. С другой стороны, это означает, что сетевые протоколы и алгоритмы работы мотов должны обладать возможностью самоорганизации. Еще одной уникальной особенностью сенсорных сетей является совместная работа отдельных узлов. Моты

оснащены процессором. Поэтому вместо передачи исходных данных они могут их обрабатывать, выполняя простые вычисления и передавать далее только необходимые и частично обработанные данные. Описанные выше особенности обеспечивают широкий спектр применения сенсорных сетей. Такие сети можно применять в здравоохранении, для военных нужд и безопасности. Например, физиологические данные о пациенте могут контролироваться удаленно врачом. Это удобно как для пациента, так и для врача, позволяя понять его текущее состояние. Сенсорные сети могут быть использованы для выявления инородных химических агентов в воздухе и воде. Они могут помочь определить тип, концентрацию и расположение загрязнителей. В сущности, сенсорные сети позволяют лучше понять окружающую среду.

Однако БСС имеют ряд проблем в связи с их особенностями. Одной из таких проблем является ограниченное электроснабжение узлов. В большинстве случаев электроснабжение не восполняется. Таким образом, в БСС должны использоваться методы снижения энергопотребления узлов [1–3].

Данные, воспринимаемые сенсорными узлами, должны быть переданы станции для обработки и принятия решения. Эта станция называется базовой станцией или приемником.

Если каждый узел посылает данные напрямую приемнику, то расходуется много энергии. Поскольку значения, считанные узлами, расположенными рядом, немного различаются, существует вероятность избыточности отправленных данных.

Как упоминалось ранее, для отправления данных приемнику расходуется много энергии. В результате головные узлы сталкиваются с проблемой быстрого падения энергии. Как только головной узел отключается – часть сети или вся сеть перестает выполнять свои функции. Данная проблема решается двумя способами:

- 1) головные узлы оборудуются сменным, перезаряжаемым источником питания;
- 2) постоянная замена головного узла с целью снижения распределяемого энергопотребления сети [2].

В случае постоянной замены головного узла все узлы сети являются однородными. Каждый узел выбирает ближайший головной узел, в чем и заключается образование кластера.

В случае использования иерархии адаптивной кластеризации с низким энергопотреблением (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) два периода времени повторяются постепенно до тех пор, пока сеть не перестанет работать, которые можно определить как стадию формирования кластера и стадию стабильности [3].

Выбор головных узлов в LEACH осуществляется случайно, при этом каждый узел решает стать головным и сообщает об этом другим узлам. В предложенном методе головной узел выбирается на основании нескольких параметров и нечеткой системы. При данном методе случайного выбора не учитываются другие параметры, такие как остаточная энергия и расположение узлов. В этом случае создаваемые кластеры не всегда являются наилучшими. Например, если выбранный головной узел имеет низкий уровень энергии, то по истечении времени он может перейти в пассивное состояние, при этом остальные узлы должны потратить свою энергию для передачи данных этому головному узлу. Тем не менее LEACH обеспечивает равномерное распределение энергии от головных узлов и имеет высокую производительность.

С целью преодоления недостатков протокола LEACH в предложенном методе используется нечеткая система с соответствующими входными данными. Входными данными, рассматриваемыми в нечеткой системе, являются количество соседей, центральность, остаточная энергия, частота сигналов, полученных от соседей, и количество циклов, при которых узел не был головным. Эти параметры не так тесно связаны и могут легко работать с такими неоднородными характеристиками с помощью нечеткой логики. Кроме того, нечеткая система не требует сложных вычислений, поэтому она подходит для БСС.

На рис. 1 представлена стандартная архитектура БСС [4].

Узлы посылают данные соответствующему головному узлу, который осуществляет их сжатие и передает базовой станции. Организация БСС происходит на основании следующих принципов:

- базовая станция стационарна, располагается далеко от датчиков;
- все узлы в сети однородны и имеют ограниченную энергию;
- используется симметричное распределение узлов;
- базовая станция осуществляет выбор головного узла;
- узлы обладают малой подвижностью или не обладают вовсе.

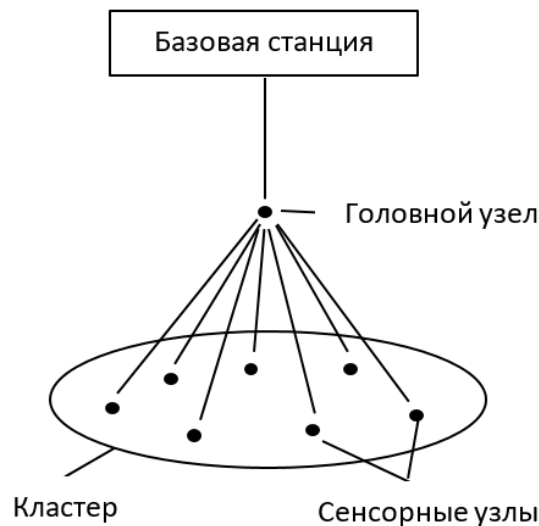


Рис. 1. Архитектура БСС

Принцип работы LEACH делится на раунды, и каждый раунд состоит из фазы формирования кластера и фазы передачи данных. В фазе формирования кластера осуществляется выбор головных узлов. Каждый сенсорный узел n генерирует случайное число от 0 до 1. Если это число меньше, чем $T(n)$, то сенсорный узел n может стать головным:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \cdot (r \bmod \frac{1}{p})}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (1)$$

где p – процент головных узлов среди всех сенсорных узлов; r – текущий раунд; G – набор узлов, которые не были выбраны в качестве головных за последние $1/p$ раундов.

Оптимальное количество головных узлов оценивается в 5 % от общего числа сенсорных узлов. После выбора головных узлов, эти узлы осуществляют широковещательную рассылку сообщений остальным сенсорным узлам, которые затем выбирают головной узел на основании уровня принятого сигнала. Несмотря на то, что протокол LEACH способен увеличить время жизни сети, он имеет два существенных недостатка:

- 1) существует вероятность того, что может быть выбрано много головных узлов либо выбор головного узла не произойдет вовсе;
- 2) большинство головных узлов может быть расположено в определенной области, следовательно, они не выбираются распределенным образом.

В алгоритме, предложенном I. Gupta, нечеткая логика используется для нахождения головных узлов. Выбор головных узлов осуществляется на основании трех нечетких переменных – энергия узла, концентрация узла и его центральность. При таком подходе базовая станция в первую очередь собирает необходимую информацию со всех узлов, а затем выбирает головной узел в соответствии с нечеткими правилами. В данном случае в течение каждого раунда выбирается только один головной узел, в то время как для балансировки энергии и улучшения времени жизни сети требуется больше головных узлов [5].

Позднее J. Kim представил алгоритм CHEF, в котором выбор головных узлов также основан на нечеткой логике. Различие заключается в том, что в каждом раунде локально осуществляется выбор более одного головного узла. Набор нечетких переменных включает энергию узлов, а также их локальные расстояния. Также в алгоритме для каждого сенсора генерируется случайное число, и если оно меньше предустановленного порога, то определяется вероятность выбора конкретного узла. Таким образом, может быть несколько специализированных узлов, вероятность выбора которых снижается в случайном порядке [6].

D. De предложил метод, который использует нечеткий подход к выбору головного узла. Данный метод является централизованным, и сеть осведомлена о координатах узлов. Решение о выборе

узла в качестве головного выполняется приемником. Этот метод основан на трех переменных – остаточная энергия узла, концентрация узла и центральность – и принимает решение о назначении узла головным [7].

Heinzelman ввел так называемый метод LEACH-FL. Для выбора головного узла в методе используется нечеткая система с тремя входными величинами – заряд батареи, интенсивность узла и расстояние от приемника [8].

Эти методы являются централизованными, поэтому не подходят для сред, требующих обработки в реальном масштабе времени. Также много энергии расходуется узлами для передачи данных приемнику. При данных методах доступны координаты сети, поэтому узлы должны быть оснащены дополнительным аппаратным обеспечением, таким как система глобального позиционирования (Global Positioning System, GPS), которую невозможно использовать во всех средах.

С другой стороны, можно более эффективно использовать входные данные для нечеткой системы, чем в представленных методах, где имеет место распределенный способ, при котором каждый узел самостоятельно принимает решение, становится ему головным или нет. Данный метод работает во всех средах и поэтому нет необходимости в определении координат узлов. Этот метод, при котором выбираются подходящие входные данные для нечеткой системы, более эффективен, чем рассмотренные ранее, и при его применении будут созданы лучшие кластеры.

Нечеткая логика (Fuzzy Logic, FL) близка к логике человеческой мысли, которая значительно менее строгая, чем компьютерные вычисления. Нечеткая логика предлагает несколько уникальных функций, которые делают ее особенно хорошей альтернативой для многих проблем управления. Она по своей сути надежна, так как не требует точных входных значений и может быть запрограммирована на безопасный отказ [9].

Нечеткие множества описываются диапазоном реальных значений, по которым сопоставляется множество, называемое доменом, и функция принадлежности. Функция принадлежности назначает истинные (четкие) значения между 0 и 1 в каждой точке домена нечеткого множества. В зависимости от формы функции принадлежности могут применяться различные типы нечетких множеств, например, треугольные, бета, гауссовы, сигмовидные и т.д. Трапециевидные и треугольные функции принадлежности подходят для работы в режиме реального времени, потому что они не производят сложных вычислений, а также обладают достаточной точностью.

Нечеткая система состоит из трех частей: фаззификатора (*fuzzifier*), механизма логического вывода (*inference engine*) и дефаззификатора (*defuzzifier*). На рис. 2 представлены компоненты нечеткой системы, используемой в предлагаемом методе.

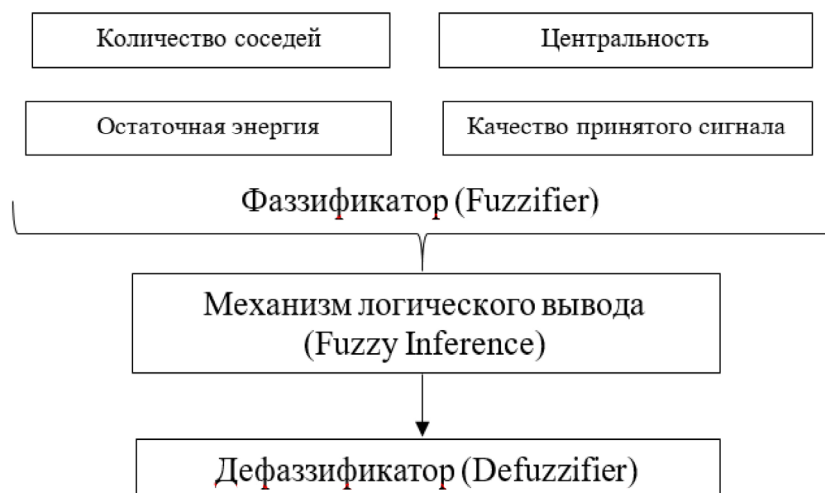


Рис. 2. Компоненты нечеткой системы

Фаззификатор (*Fuzzifier*) сопоставляет каждое четкое входное значение с соответствующими нечеткими множествами и таким образом присваивает ему значение истины или степень принадлежности для каждого нечеткого множества. Фаззифицированные значения обрабатываются механизмом логического вывода, который состоит из базы правил и различных методов для определения правила.

База правил представляет собой набор правил вида «ЕСЛИ-ТО», которые касаются входных и выходных нечетких переменных с использованием лингвистических переменных, каждая из которых описывается с помощью нечетких множеств и нечетких операторов импликации, таких как «И», «ИЛИ» и т.д.

Дефаззификатор (*defuzzifier*) осуществляет дефаззификацию в области нечетких решений. Он находит единственное выходное нечеткое значение на области нечетких решений. Наиболее популярны следующие методы дефаззификации:

- метод центра площади (Center of Area, COA);
- метод центра тяжести (Center of Gravity, COG);
- расширенный метод центра площади (Extended Center of Area, ECOA);
- метод среднего максимума (Mean of Maxima, MeOM).

В данной статье для фаззификации используется метод COA, который является простейшим и широко используемым методом. Этот метод является быстрым, поскольку в нем используются только простые операции, также он делает возможным постоянное изменение значения дефаззификации, поэтому метод удобен для использования в нечетких контроллерах [10].

Входы нечеткой системы являются четкими числами, которые затем преобразуются в нечеткие значения функции принадлежности. Узлы просто определяют эти входные значения. Узлы получают информацию от соседних узлов о расстоянии до них, как только один из соседей отправляет или получает данные. Предположим, что количество головных узлов составляет 5 % от общего количества сенсоров в каждом раунде.

Параметрами, играющими основную роль в выборе головного узла, являются:

- количество соседей (концентрация) – узел выбирается в качестве головного, если он находится в центре кластера и через него проходит много сигналов. Максимальное количество соседей $N_{\max}$ определяется по формуле

$$N_{\max} = n - 1, \quad (2)$$

где n – количество сенсорных узлов в кластере;

- остаточная энергия – узел обладает максимальным уровнем энергии, поскольку энергопотребление головного узла больше, чем у остальных узлов.

Энергия, затрачиваемая на передачу (E_{TX}) и прием (E_{RX}), определяется соответственно по формулам

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec}^{TX} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec}^{TX} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$E_{RX}(l) = lE_{elec}^{RX}, \quad (4)$$

где l – размер пакета; E_{elec}^{TX} – энергия, необходимая для работы электронной схемы передатчика; E_{elec}^{RX} – энергия, требуемая для работы электронной схемы приемника; d – расстояние между передатчиком и приемником; $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{mp}}$ – пороговое расстояние между передатчиком и приемником; ϵ_{fs} – постоянное усиление; ϵ_{mp} – мультисетевая постоянная;

- центральность – ближайшим сенсором к центру тяжести кластера является узел, среднее расстояние от которого до других узлов минимально. Центральность головного узла приводит к снижению энергопотребления для связи внутри кластера (между узлами-членами и головным узлом);

- качество принятых сигналов – данный критерий базируется на том, какой из узлов получает больше энергии сигнала – количество сигналов, исходящих из этого узла, определяет его качество как головного.

Определение качества приема легко выполняется с использованием метода индикации силы принятого сигнала (Received Signal Strength Indication, RSSI) [3].

Функции принадлежности, преобразующие входные четкие значения в нечеткие, представлены на рис. 3.

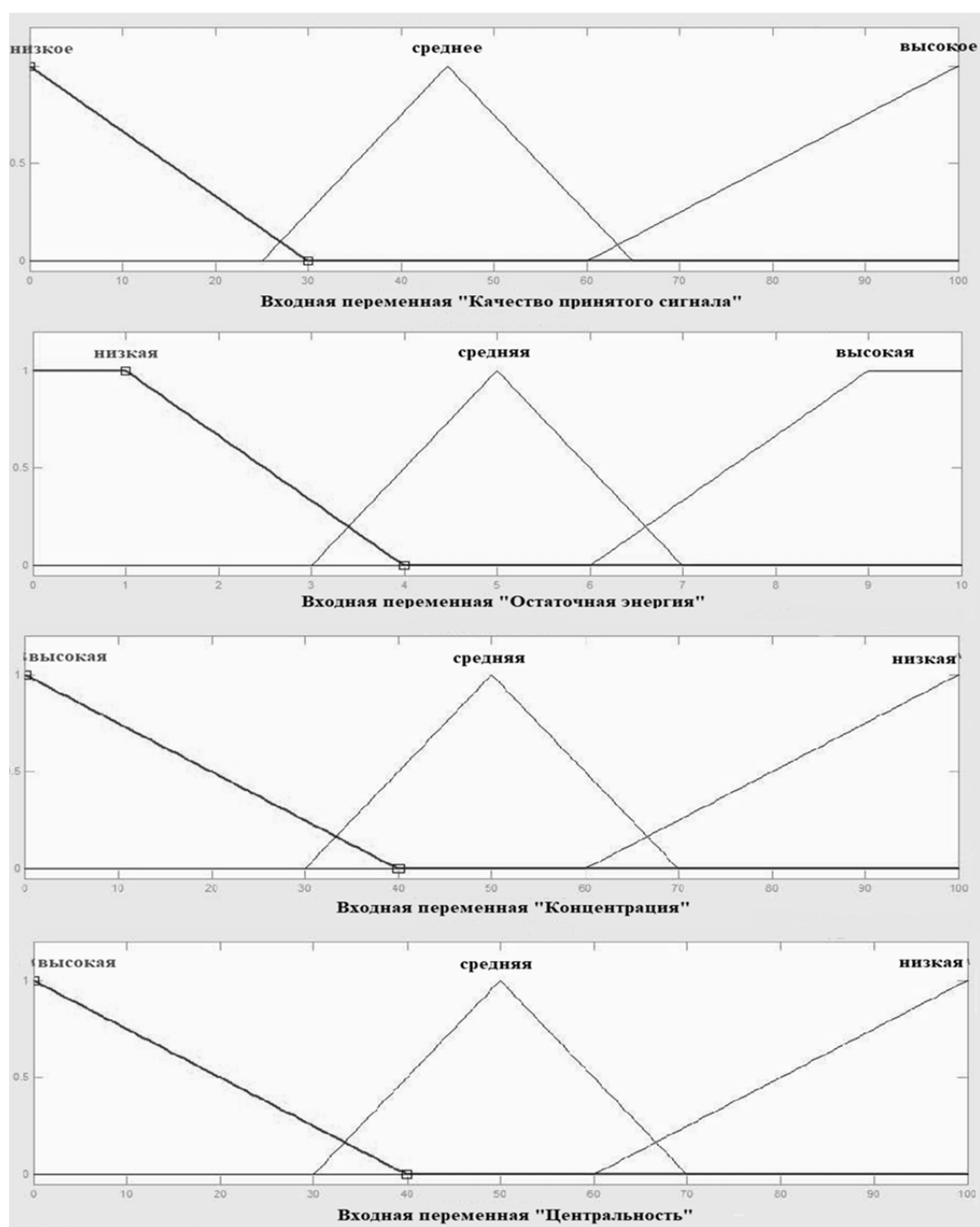


Рис. 3. Функции принадлежности для входных нечетких переменных

На этапе нечеткого вывода используется метод Мамдани для определения выходных данных. Правила, используемые в методе Мамдани, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Некоторые правила нечеткого вывода для выбора головного узла

Если Концентрация	И Остаточная энергия	И Центральность	И Качество сигнала	Тогда Вероятность выбора головного узла
1	2	3	4	5
Низкая	Низкая	Низкая	Низкое	Минимальная
Низкая	Низкая	Низкая	Среднее	Очень низкая
Низкая	Низкая	Высокая	Высокое	Низкая

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Низкая	Средняя	Низкая	Низкое	Очень низкая
Низкая	Средняя	Высокая	Высокое	Средняя
Низкая	Высокая	Низкая	Низкое	Низкая
Средняя	Средняя	Высокая	Высокое	Высокая
Средняя	Высокая	Низкая	Низкое	Средняя
Средняя	Высокая	Высокая	Высокое	Очень высокая
Высокая	Средняя	Средняя	Низкое	Высокая
Высокая	Средняя	Средняя	Среднее	Высокая
Высокая	Средняя	Средняя	Высокое	Очень высокая
Высокая	Средняя	Высокая	Низкое	Очень высокая
Высокая	Высокая	Высокая	Высокое	Максимальная

Чтобы преобразовать полученный нечеткий результат в четкий, используется функция принадлежности, представленная на рис. 4.



Рис. 4. Выходная функция принадлежности

Для дефазификации выходных данных используется метод центра площади (COA). Порог значения α определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\int_z \mu A(z) z dz}{\int_z \mu A(z) dz}, \quad (5)$$

где α – четкое выходное значение для нечеткой системы z ; $\mu A(z)$ – агрегированная выходная функция принадлежности.

Моделирование проводилось с использованием программного пакета Matlab.

Для сравнения с протоколами LEACH и LEACH-FL использовалась сеть размерностью 100×100 с выбранными 20 узлами. Координаты базовой станции – (50; 200), а энергетические параметры представлены в табл. 2.

Таблица 2

Энергетические параметры системы

E_s , Дж	Постоянное усиление ε_{fs} , пДж/(бит·м ²)	Требуемая энергия E_{elec} , нДж/бит	Мультисетевая постоянная ε_{mp} , пДж/(бит·м ⁴)
0,5	10	50	0,0013

На рис. 5 показано различие между предлагаемым методом и протоколами LEACH и LEACH-FL с точки зрения энергопотребления.

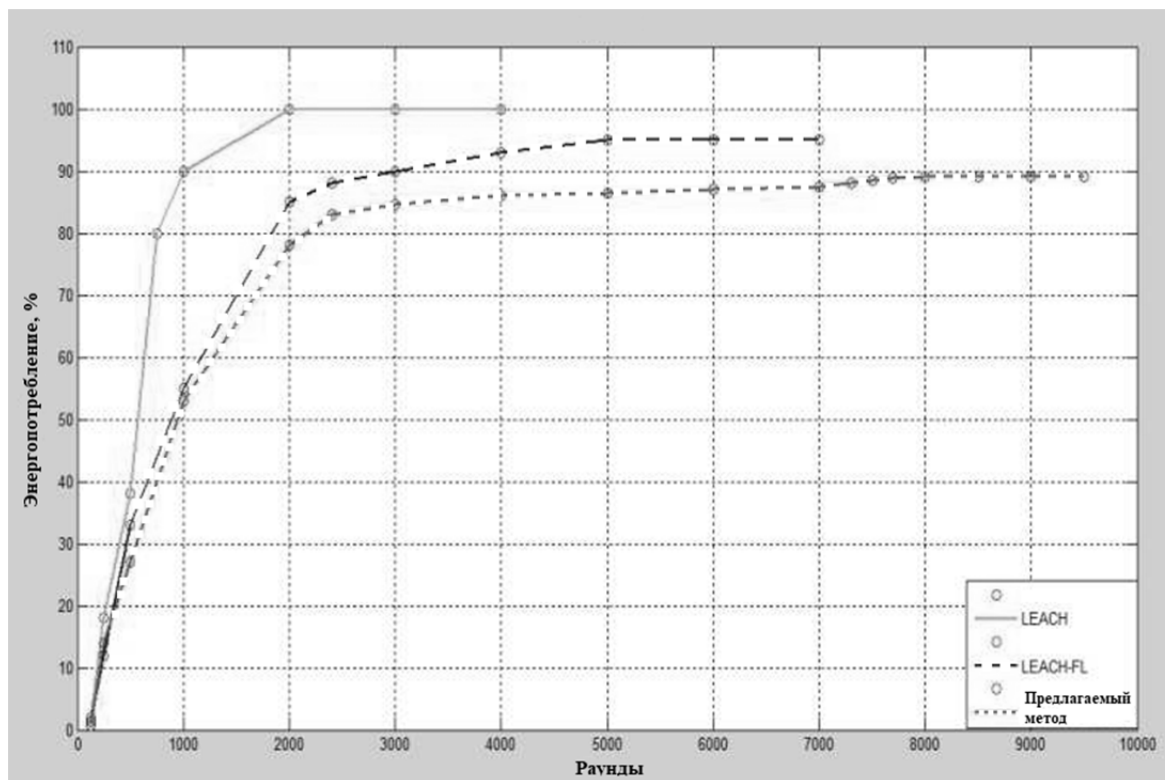


Рис. 5. Зависимость энергопотребления от количества раундов для каждого алгоритма

Остаточная энергия сети в каждом раунде является хорошей метрикой для измерения энергоэффективности алгоритмов. Менее крутой график говорит о сбалансированности энергопотребления и эффективном распределении энергии между узлами.

Как видно на графике, с использованием данного метода потребляется меньше энергии в сравнении с LEACH и LEACH-FL, следовательно, такая сенсорная сеть будет обладать большим временем жизни.

Поскольку все операции по формированию кластера выполняются локально, экономится большое количество энергии и увеличивается скорость формирования кластера. Поэтому метод кластеризации сочетает в себе достоинства протокола LEACH и нечеткой логики с небольшими вычислительными затратами.

Таким образом, данный алгоритм кластеризации на базе нечеткой логики обладает более высокой скоростью и низким энергопотреблением и, следовательно, повышает время жизни беспроводной сенсорной сети.

Библиографический список

1. Akkaya, K. A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks / K. Akkaya, M. Younis // *Ad Hoc Network Journal*. – 2005. – Vol. 3/3. – P. 325–349.
2. Al-Karak, J. N. Routing techniques in wireless sensor network: A survey / J. N. Al-Karak, A. E. Karmal // *IEEE wireless communications*. – 2004. – Vol. 11. – P. 6–28.
3. Akyildiz, I. F. Wireless sensor networks: a survey / I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci // *Computer Networks*. – 2002. – Vol. 38. – P. 393–422.
4. Dastgheib, S. J. An Efficient Approach for Clustering in Wireless Sensor Network Using Fuzzy Logic / S. J. Dastgheib, H. Oulia, M. R. S. Ghassami // *International Conference on Computer Science and Network Technology*. – Harbin, China, 2011. – P. 256–260.
5. Gupta, I. Cluster-head Election using Fuzzy Logic for Wireless Sensor Networks / I. Gupta, D. Riordan, S. Sampalli // *Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference*. – Washington, DC, USA, 2005. – P. 255–260.
6. Myoung Kim, J. CHEF: Cluster Head Election mechanism using Fuzzy logic in Wireless Sensor Networks / J. Myoung Kim, S. Park, Y. Han, T. Chung // *10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. – Gangwon-Do, South Korea, 2008. – P. 654–659.

7. De, D. A Distributed Algorithm for Localization Error Detection-Correction, Use in In-network Faulty Reading Detection: Applicability in Long-Thin Wireless Sensor Networks / D. De // Conference IEEE. – Budapest, Hungary, 2009. – P. 568–571.
8. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks // IEEE Transactions on Wireless communications. – 2002. – P. 660–670.
9. Vanheel, F. Automated Linear Regression Tools Improve RSSI WSN Localization in Multipath Indoor Environment / F. Vanheel, J. Verhaevert // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2011. – Vol. 2011/2011. – P. 1–27.
10. Saletic, D. Z. Analysis of Basic Defuzzification Techniques / D. Z. Saletic, D. M. Velasevic, N. E. Mastorakis // Recent Advances in Computers, Computing and Communications. – N.Y. :WSEAS Press, 2002. – P. 247–252.

References

1. Akkaya K., Younis M. *Ad Hoc Network Journal*. 2005, vol. 3/3, pp. 325–349.
2. Al-Karak J. N., Karmal A. E. *IEEE wireless communications*. 2004, vol. 11, pp. 6–28.
3. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayirci E. *Computer Networks*. 2002, vol. 38, pp. 393–422.
4. Dastgheib S. J., Oulias H., Ghassami M. R. S. *International Conference on Computer Science and Network Technology*. Harbin, China, 2011, pp. 256–260.
5. Gupta I., Riordan D., Sampalli S. *Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference*. Washington, DC, USA, 2005, pp. 255–260.
6. Myoung Kim J., Park S., Han Y., Chung T. *10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. Gangwon-Do, South Korea, 2008, pp. 654–659.
7. De D. *Conference IEEE*. Budapest, Hungary, 2009.
8. Heinzelman A. *IEEE Transactions on Wireless communications*. 2002, pp. 660–670.
9. Vanheel F., Verhaevert J. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2011, vol. 2011/2011, pp. 1–27.
10. Saletic D. Z., Velasevic D. M., Mastorakis N. E. *Recent Advances in Computers, Computing and Communications*. N.Y.: WSEAS Press, 2002, pp. 247–252.

Демидов Дмитрий Евгеньевич

старший преподаватель,
кафедра общепрофессиональных дисциплин
технических специальностей,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: demidovde@mail.ru

Будылина Надежда Вениаминовна

кандидат технических наук, профессор,
кафедра общепрофессиональных
дисциплин технических специальностей,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: bnv@mail.ru

Demidov Dmitry Evgenievich

senior lecturer,
sub-department of general professional disciplines
of technical specialties,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin street, Ekaterinburg, Russia)

Budyldina Nadezhda Veniaminovna

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of general professional disciplines
of technical specialties,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin street, Ekaterinburg, Russia)

УДК 519.87:621.035**Демидов, Д. Е.**

Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики / Д. Е. Демидов, Н. В. Будылина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 50–58. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-7.