

УДК 004.7

МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Т.М. Татарникова^a, И.Н. Дзюбенко^a

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

Адрес для переписки: tatarn@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.06.18, принята к печати 31.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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

Аннотация

Предмет исследования. Предложены модели, позволяющие продлить жизненный цикл сети Интернета вещей в результате кластеризации сенсорного поля и передачи функций по взаимодействию с базовой станцией на головной узел кластера. Выполнена оценка эффективности кластеризованной беспроводной сенсорной сети в сравнении с некластеризованной по параметру остаточной энергии и продолжительности жизненного цикла сети. **Используемые подходы.** Применен метод кластеризации сенсорного поля сети Интернета вещей. Метод основан на идее равновероятной ротации головных узлов, учитывающей уровень остаточной энергии узлов и расстояния от сенсорных устройств до головного узла. Механизм временного разделения канала при взаимодействии сенсорных устройств с головным узлом кластера минимизирует вероятность появления коллизии передачи данных. Имитационное моделирование обеспечивает инструмент выбора параметров кластеризации при обеспечении требуемых характеристик функционирования сети Интернета вещей. **Основные результаты.** Предложена имитационная модель беспроводной сенсорной сети, которая может найти применение в задачах проектирования сети Интернета вещей. Приведены оценки, демонстрирующие целесообразность кластеризации сенсорного поля сети Интернета вещей при размерах сенсорного поля, превышающем расстояние от самого удаленного узла до базовой станции. **Практическая значимость.** Кластеризация сенсорного поля позволяет увеличить жизненный цикл сети Интернета вещей. Предложенные модели будут полезны на ранних стадиях проектирования сети Интернета вещей.

Ключевые слова

беспроводные сенсорные сети, Интернет вещей, кластеризация, самоорганизация, головной узел, базовая станция, сенсорное поле, жизненный цикл, остаточная энергия, временное разделение канала

METHODS OF LIFE CYCLE INCREASE FOR THE INTERNET OF THINGS

T.M. Tatarnikova^a, I.N. Dziubenko^a

^a Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: tm-tatarn@yandex.ru

Article info

Received 30.06.18, accepted 31.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849

Article in Russian

For citation: 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). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849

Abstract

Subject of Research. The paper proposes models that make it possible to extend the Internet of things life cycle as a result of the sensory field clustering and the transfer of the interaction functions from the base station to the head node of the cluster. The efficiency of the clustered wireless sensor network was evaluated in comparison with the nonclustered one in terms of the residual energy parameter and the network lifetime. **Methods.** The Internet of things sensory field clustering method was used. The method is based on the idea of equiprobable rotation of the head nodes, taking into account the level of nodes residual energy and the distance from the sensor devices to the head node. The time division multiple access mechanism in the interaction of sensory devices with the head node of the cluster minimizes the probability of data transmission collision. Simulation modeling provides a tool for selecting clustering parameters while providing the required characteristics of the functioning of the Internet of things. **Main Results.** A wireless sensor network simulation model is proposed, which can find

application in the Internet of things designing tasks. Estimations are given demonstrating the clustering expediency of the Internet of things sensory field at sensory field sizes exceeding the distance from the most remote node to the base station. **Practical Relevance.** Sensor field clustering provides the increase of the Internet of things life cycle. The proposed models will be useful in the early stages of the Internet of things design.

Keywords

wireless sensor networks, Internet of things, clustering, self-organization, head node, base station, sensor field, life cycle, residual energy, Time Division Multiple Access

Введение

Развитие сетей связи в настоящее время определяется потенциалом и перспективами Интернета вещей (Internet of Things – IoT) [1, 2]. IoT – это новая инфокоммуникация, инфраструктура которой образуется вычислительной сетью, состоящей из множества физических предметов («вещей»), способных обмениваться данными как внутри сети, так и с внешней средой¹.

Задачи, решаемые IoT, как правило, требуют значительных вычислительных ресурсов, поэтому сеть IoT представляет собой интеграцию двух типов облачных технологий: облачные вычисления (Cloud Computing) и туманные вычисления (Fog Computing) [3].

Облачные вычисления – это модель обеспечения сетевого доступа по требованию к некоторому общему фонду конфигурируемых вычислительных ресурсов, например, сетям передачи данных, серверам, системам хранения данных, приложениям и сервисам – как вместе, так и по отдельности [4].

Туманные вычисления – это модель облачных сервисов, которые реализуются самоорганизующимися беспроводными сенсорными сетями и предполагают децентрализацию обработки данных посредством передачи части работы с «облака» непосредственно вычислительным ресурсам «тумана». Самоорганизация означает, что сенсорные устройства (СУ), выходя из спящего режима, могут автономно структурироваться в локальную сеть [5].

На рис. 1 приведена типичная схема образования сети IoT.

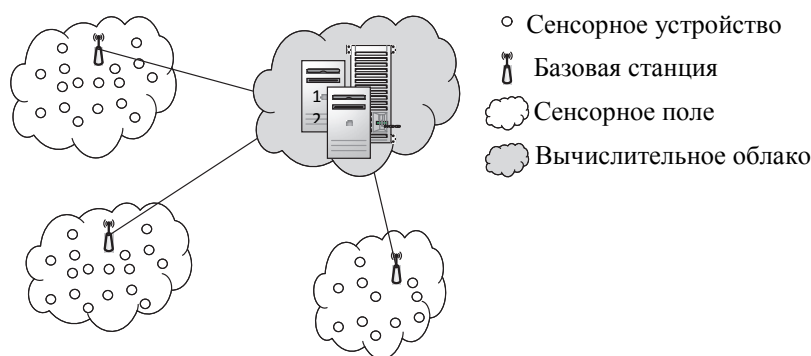


Рис. 1. Схема образования сети Интернета вещей

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) включает узлы двух типов [6]:

1. сенсорные устройства, которые образуют сенсорное поле в месте развертывания сети Интернета вещей;
2. базовые станции, также известные как сетевые шлюзы, выполняющие функции сопряжения сенсорной сети с глобальной сетью (туманных вычислений с облачными вычислениями).

СУ обладают ограниченными возможностями по электропитанию. Расход энергии сенсорным устройством происходит во время передачи данных, их обработки, вычисления маршрута и т.д. [7]. По этой причине выбор способа организации информационного взаимодействия является одной из основных научных проблем при создании беспроводной сенсорной сети. Необходимы алгоритмы, позволяющие сокращать число операций при функционировании СУ, тем самым увеличивая продолжительность жизненного цикла сети Интернета вещей и выполнения ее основных функций.

Кластеризация беспроводной сенсорной сети

Одним из действенных методов создания БСС является кластеризация сенсорного поля. Функционирование такой сети заключается сначала во взаимодействии СУ с головным узлом кластера, при котором данные, поступающие от СУ, агрегируются на головном узле, и затем передачи этих данных дальше на шлюз [8]. Временная диаграмма жизненного цикла кластеризованной БСС приведена на рис. 2. Головной узел может быть выбран в процессе самоорганизации случайно или predetermined [9]. В первом случае каждое СУ равновероятно может стать головным узлом, во втором случае головной

¹ Recommendation Y.2060: Overview of Internet of Things/Geneva: ITU-T, February 2012. <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I> (дата обращения: 26.06.2018).

узел назначается исходя из центральных характеристик расположения СУ – евклидова расстояния или остаточной энергии. Известны следующие алгоритмы выбора головного узла: LEACH, TEEN, PEGASIS и их последующие модификации. Случайный выбор головных узлов предпочтительнее, так как это позволяет создавать кластеры различных размеров [2, 9].

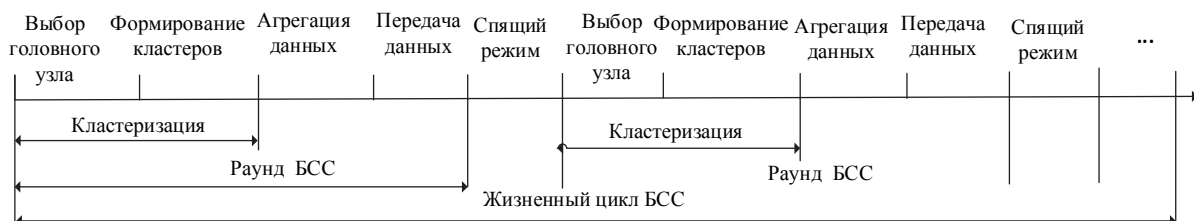


Рис. 2. Временная диаграмма жизненного цикла беспроводной сенсорной сети

Наиболее известным является алгоритм адаптивной кластеризации с низким потреблением энергии LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), предполагающий обеспечение баланса расхода энергии [10]. Этот алгоритм взят за основу при моделировании процесса кластеризации БСС.

Суть алгоритма LEACH заключается в следующем. В каждом новом раунде самоорганизации БСС выбираются новые головные узлы, около которых формируются кластеры. Одновременно и независимо друг от друга все СУ генерируют случайное число $k \in [0,1]$ и вычисляют свое пороговое значение в соответствии с выражением

$$T_i = \frac{P}{1 - P(r \bmod i)}, \quad (1)$$

где P – априорная вероятность в %, устанавливающая порог числа головных узлов в сенсорном поле; i – порядковый номер сенсорного устройства; r – номер текущего раунда.

На рис. 3 приведена диаграмма получения значения T на каждом новом раунде для разной априорной вероятности P при 100 сенсорных устройств.

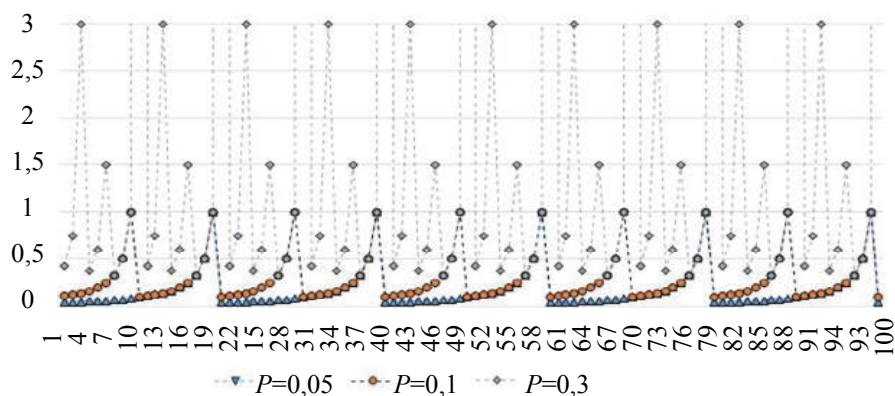


Рис. 3. Диаграмма зависимости $T(r)$

Решение о выборе головного узла принимается на основе логического правила: для $\forall k_i, i = \overline{1, N}$, если $k_i < T(i)$, то i -ое сенсорное устройство становится головным узлом, иначе остается рядовым сенсорным устройством кластера. Таким образом, входными параметрами алгоритма LEACH являются:

1. общее количество СУ, N ;
2. предполагаемый процент головных узлов, P ;
3. значение счетчика, фиксирующего, сколько раз за цикл i -ое СУ выбиралось головным узлом, $\text{Count}_i, i = \overline{1, N}$;
4. остаточная энергия i -го СУ в текущий момент времени, $E_i, i = \overline{1, N}$.

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

После определения головных узлов остальные СУ начинают формировать кластеры на основе мощности сигнала RSS (Received Signal Strength) в дБм, получаемого от головного узла. RSS является параметром, позволяющим в БСС измерить расстояние от СУ до головного узла. Уравнение для вычисления расстояния P_d имеет следующий вид [11]:

$$P_d = P_0 - 10 \cdot n \cdot \lg(d/d_0), \quad (2)$$

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_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). Данное уравнение следует из формулы передачи Фрииса для распространения радиосигнала в свободном пространстве.

После того, как кластеры сформировались, головной узел каждого кластера создает расписание передачи данных и широковещательным пакетом передает его на все свои СУ. Прием данных от СУ происходит на основе метода TDMA (Time Division Multiple Access) – множественный доступ с разделением по времени, что гарантирует отсутствие коллизий передачи данных [12]. Сенсорные устройства, передав данные на головной узел, переходят в спящий режим, что позволяет избежать излишнего потребления энергии.

Критическим параметром сенсорной сети является процент узлов, которые могут быть выбраны головными. В случае большого процента и если расстояние до головного узла больше, чем между сенсорными устройствами, тратится больше энергии. Моделирование протокола LEACH помогает оценить необходимое значение P , позволяющее достигнуть уменьшения общей энергии сети и соответственно продлить жизненный цикл беспроводной сенсорной сети? в частности, и сети Интернета вещей в целом.

Модель взаимодействия сенсорных устройств с головным узлом кластера

При передаче данных на головной узел методом TDMA сенсорные устройства начинают передачу данных только по запросу головного узла. Если у СУ нет подготовленного для передачи пакета данных, то специальный логический механизм СУ формирует пакет состояния и оповещает головной узел о своей работоспособности. Время выполнения опроса зависит от физических характеристик канала взаимодействия, которые и определяют задержку распространения [13].

Время обслуживания t_s сенсорного устройства формируется следующим образом:

$$t_s = t_p + \frac{L}{C}, \quad (3)$$

где t_p – время, затрачиваемое на сигнал опроса, с; соответственно, полный цикл взаимодействия N сенсорных устройств и головного узла составляет $t = Nt_s$. Время t_p включает как время формирования опроса, так и задержку распространения. Отношение L/C – это время, необходимое для передачи L бит со скоростью C бит в секунду. Если опрашиваемое СУ не имеет готовых данных для передачи, то L очень мало, поскольку передается стандартное управляющее сообщение о том, что нечего передавать. Если же в буфере сформирован пакет данных, то L равно числу бит пакета. Отношение (3) позволяет оценить среднее время обслуживания одного СУ.

Если каждое СУ передает в среднем λ пакетов в секунду, то при наличии в системе N сенсорных устройств общая интенсивность потока данных составит λN пакетов в секунду, а средний интервал между их поступлениями равен $1/\lambda N$ с. Следовательно, во избежание неограниченного роста очередей время обслуживания t_s должно соответствовать условию

$$\bar{t}_s = t_p + \frac{L}{C} \leq \frac{1}{\lambda N}. \quad (4)$$

Решая (4) относительно C , получим условие, гарантирующее отсутствие очереди для каждого сенсорного устройства:

$$C \geq \frac{\lambda N L}{1 - \lambda N t_p}. \quad (5)$$

Это объясняется тем, что любое из сенсорных устройств опрашивается каждые $1/\lambda$ с и в то же время в нем формируется очередной пакет данных.

За меру производительности режима взаимодействия СУ с головным узлом кластера можно принять коэффициент загрузки ρ . Если $\rho > 1$, то пакеты данных поступают быстрее, чем они могут быть обслужены, что приводит к неограниченному росту очередей. При $\rho < 1$ очередь остается конечной. Физический смысл ρ есть отношение среднего времени обслуживания к среднему интервалу времени между поступлением пакетов данных.

Результаты моделирования БСС

Имитационная модель БСС реализована на языке Python 3.6 и включает модули, соответствующие временной диаграмме жизненного цикла БСС, приведенной на рис. 2. Распределение сенсорных устройств в каждом новом жизненном цикле происходило случайно в границах, заданных координатами сенсорного поля. Моделирование алгоритма LEACH выполнено в соответствии с выражением (1), фор-

мирование кластеров – в соответствии с выражением (2), моделирование механизма передачи данных TDMA – в соответствии с выражениями (3)–(5) [14–20].

Моделирование выполнялось при следующих параметрах: $N=100$, $P=5\%$, размер сенсорного поля 100×100 м, локация базовой станции в верхнем правом углу сенсорного поля с координатами 100, 100 м, размер пакета, формируемого на СУ $L=32$ бита, энергия сбора данных $E_a=5$ нДж, остаточная энергия одного сенсорного устройства $E=0,5$ Дж, радиус действия сенсорного устройства $R=20$ м, радиус распространения сигнала $RSS=2R$, продолжительность одного раунда $r=1$ с. Продолжительность жизненного цикла равняется числу раундов до первого потерянного сенсорного узла. Скорость передачи данных $C=9600$ бит/с, энергия передачи одного бита данных $E_b=50$ нДж.

На рис. 4 приведена гистограмма сравнения продолжительности жизненного цикла некластеризованной БСС и кластеризованной БСС. Результаты демонстрируют меньший период стабильности у некластеризованной БСС, где первый узел погиб уже в 167 раунде, т.е. к третьей минуте работы БСС, тогда как для алгоритма LEACH это произошло в 645 раунде, т.е. на одиннадцатой минуте работы БСС. Приблизительно такой же баланс сохраняется, если за продолжительность жизненного цикла БСС взять число раундов до 40% потерянных СУ.

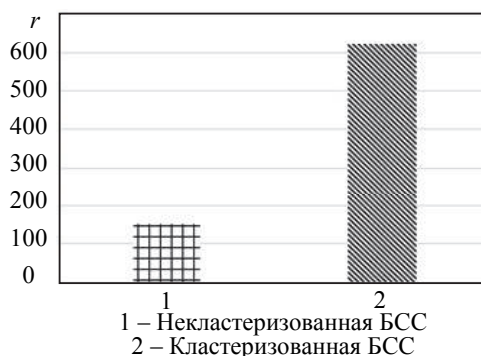


Рис. 4. Жизненный цикл беспроводной сенсорной сети в раундах

На рис. 5, а, приведена зависимость максимального числа СУ от нагрузки. Таким образом, при кластеризации БСС модель позволяет выбрать оптимальный режим взаимодействия при планируемой нагрузке в кластере и определить максимально возможное число n сенсорных устройств, входящих в кластер БСС.

С увеличением количества СУ, взаимодействующих с головным узлом, среднее время передачи увеличивается. Таким образом, исходя из требований ко времени передачи, модель также позволяет определить максимально возможное количество n сенсорных устройств, входящих в кластер БСС.

На рис. 5, б, приведены результаты среднего времени передачи данных \bar{t}_s при размере кластера $n=10$ и разной нагрузке.

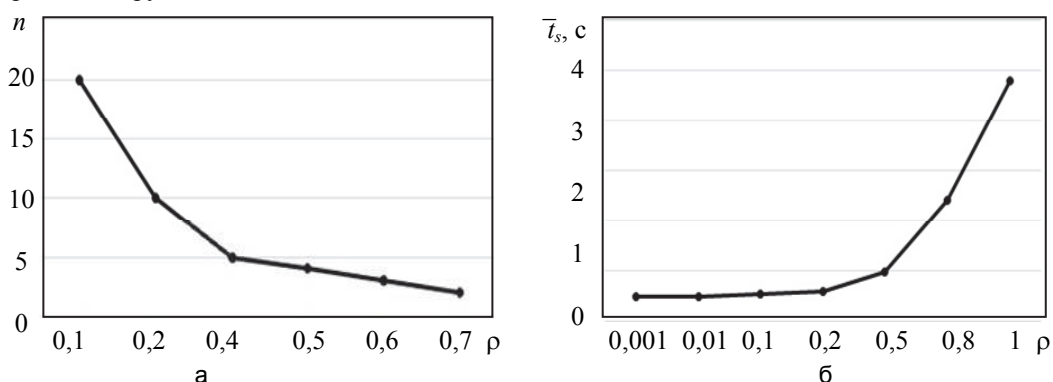


Рис. 5. Зависимость максимального числа сенсорных устройств от ρ (а); результаты среднего времени передачи данных \bar{t}_s от ρ (б)

На рис. 6 показана зависимость остаточной энергии БСС от числа раундов. Остаточная энергия каждого СУ в i -ом раунде оценивалась как $E_i = (E_{i-1} - L \cdot E_b)$ для рядовых СУ кластера и $E_i = (E_{i-1} - E_a)$ для головных узлов БСС, соответственно, остаточная энергия в целом сенсорной сети составит $E = \sum_{i=1}^N E_i$.

Когда уровня остаточной энергии СУ или головного узла не хватает для передачи/сбора данных, то СУ считается потерянным.

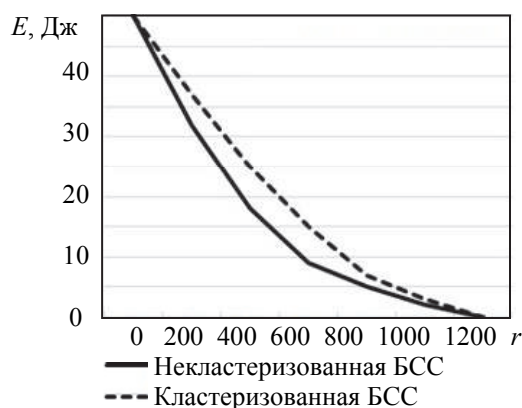


Рис. 6. Остаточная энергия

На рис. 7 приведена зависимость числа живущих узлов от номера раунда. Например, на 400 раунде в некластеризованной БСС 40 сенсорных устройств считаются потерянными из-за невозможности передать данные на базовую станцию в силу недостаточного уровня остаточной энергии, в то время как в кластеризованной БСС не потеряно ни одно сенсорное устройство.

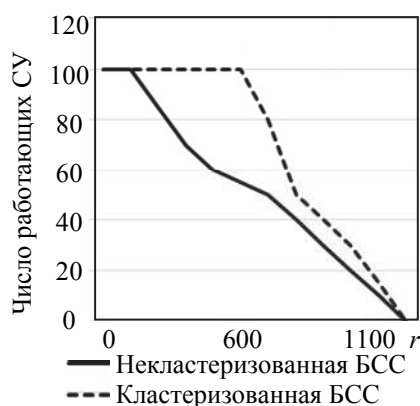


Рис. 7. Число живущих узлов

Заключение

Проектирование сетей Интернета вещей связано с рядом задач, требующих разработки моделей, способствующих увеличению жизненного цикла подобных систем. Отличие сетей Интернета вещей от классических инфраструктурных сетей связи состоит в свойстве самоорганизации, при котором элементы сенсорной сети получают возможность экономить энергию. Как показали результаты моделирования, кластеризация беспроводной сенсорной сети позволяет сократить расход энергии за счет передачи функций по взаимодействию с базовой станцией на головной узел кластера.

Моделирование механизма временного разделения канала позволило получить зависимости максимального количества сенсорных устройств, которые могут формировать кластер и времени передачи данных на головной узел от нагрузки на кластер. Предложенные модели могут найти применение на ранних стадиях проектирования сетей Интернета вещей.

Литература

References

<ol style="list-style-type: none"> 1. Kellmerein D., Obodoevski D. <i>The Silent Intelligence: The Internet of Things</i>. DND Ventures LLC, 2013. 166 p. 2. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 160 с. 3. Татарникова Т.М., Елизаров М.А. Модель оценки временных характеристик при взаимодействии в сети Интернета вещей // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2 (87). С. 44–50. doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.2.44 4. Liu B., Dousse O., Nain P., Towsley D. Dynamic coverage of mobile sensor networks // <i>IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems</i>. 2013. V. 24. N 2. P. 301–311. doi: 10.1109/tpds.2012.141 5. Осипов И.Е. Mesh-сети: технологии, приложения, оборудование // Технологии и средства связи. 2006. № 4. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kellmerein D., Obodoevski D. <i>The Silent Intelligence: The Internet of Things</i>. DND Ventures LLC, 2013, 166 p. 2. Goldshtein B.S., Koucheryavy A. <i>Post-NGN Era Communication Networks</i>. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2014, 160 p. (in Russian) 3. Tatarnikova T.M., Elizarov M.A. Model of estimating temporal characteristics of IoT Network interaction. <i>Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy</i>, 2017, no. 2, pp. 44–50. (in Russian). doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.2.44 4. Liu B., Dousse O., Nain P., Towsley D. Dynamic coverage of mobile sensor networks. <i>IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems</i>, 2013, vol. 24, no. 2, pp. 301–311. doi: 10.1109/tpds.2012.141 5. Osipov I.E. Mesh-networks: technologies, applications,
--	---

- C. 38–45.
6. Park D.S. Fault tolerance and energy consumption scheme of a wireless sensor network // *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013. V. 9. N 11. Art. 396850. doi: 10.1155/2013/396850
 7. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Критерии оптимальности многоустойчивых отказоустойчивых компьютерных систем // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2009. № 5(63). С. 92–97.
 8. Жарков С.Н. Стохастическое формирование проактивного множества при кластеризации в мобильных беспроводных сенсорных сетях // *T-Comm – телекоммуникации и транспорт*. 2013. № 5. С. 29–34.
 9. 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. P. 767–775.
 10. Вишневецкий В.В., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия Wi-Max. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472 с.
 11. Татарникова Т.М., Елизаров М.А. Процедура разрешения коллизий в RFID-системе // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 2. С. 150–157. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-150-157
 12. Wang Y.C., Wu F.J., Tseng Y.C. Mobility management algorithms and applications for mobile sensor networks // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2012. V. 12. N 1. P. 7–21. doi: 10.1002/wcm.886
 13. Markovich N.M., Krieger U.R. Statistical analysis and modeling of peer-to-peer multimedia traffic // *Lecture Notes in Computer Science*. 2011. V. 5233. P. 70–97. doi: 10.1007/978-3-642-02742-0_4
 14. Богатырев В.А., Богатырев А.В., Богатырев С.В. Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57. № 4. С. 46–48.
 15. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Инфокоммуникационные сети. Моделирование и оценка вероятностно-временных характеристик. СПб.: ГУАП, 2015. 381 с.
 16. Татарникова Т.М. Аналитико-статистическая модель оценки живучести сетей с топологией mesh // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 1(86). С. 17–22. doi: 10.15217/issnl684-8853.2017.1.17
 17. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Функциональная надежность систем реального времени // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 4(86). С. 150–151.
 18. Татарникова Т.М. Структурный синтез центра сопряжения корпоративных сетей // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 3. С. 92–98. doi:10.15217/issnl684-8853.2015.3.92
 19. Кутузов О.И., Сергеев В.Г., Татарникова Т.М. Коммутаторы в корпоративных сетях. Моделирование и расчет. СПб.: Судостроение, 2003. 170 с.
 20. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оптимизация древовидной сети с резервированием коммутационных узлов и связей // *Телекоммуникации*. 2013. № 2. С. 42–48.
 - equipment. *Communication Technologies and Equipment*, 2006, no. 4, pp. 38–45. (in Russian)
 6. Park D.S. Fault tolerance and energy consumption scheme of a wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, vol. 9, no. 11, art. 396850. doi: 10.1155/2013/396850
 7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Optimality criteria of multilevel failure-safe computer systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2009, no. 5, pp. 92–97. (in Russian)
 8. Zharkov S.N. Stochastic generation proactive set clustering in mobile wireless sensor networks. *T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2013, no. 5, pp. 29–34. (in Russian)
 9. 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, pp. 767–775.
 10. Vishnevskii V.V., Portnoi S.L., Shakhnovich I.V. *Encyclopaedia of WiMAX. A Way to 4G*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009, 472 p. (in Russian)
 11. Tatarnikova T.M., Elizarov M.A. A procedure for conflict resolution in RFID-system. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 150–157. (in Russian) doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-150-157
 12. Wang Y.C., Wu F.J., Tseng Y.C. Mobility management algorithms and applications for mobile sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 7–21. doi: 10.1002/wcm.886
 13. Markovich N.M., Krieger U.R. Statistical analysis and modeling of peer-to-peer multimedia traffic. *Lecture Notes in Computer Science*, 2011, vol. 5233, pp. 70–97. doi: 10.1007/978-3-642-02742-0_4
 14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Estimation of reliability of execution of real-time queries. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 46–48. (in Russian)
 15. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Infocommunication Networks. Simulation and Evaluation of Probability-Time Characteristics*. St. Petersburg, SUAI Publ., 2015, 381 p. (in Russian)
 16. Tatarnikova T.M. Analytical-statistical model of mesh network survivability evaluation. *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2017, no. 1, pp. 17–22. (in Russian) doi: 10.15217/issnl684-8853.2017.1.17
 17. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Functional reliability of real-time systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 4, pp. 150–151. (in Russian)
 18. Tatarnikova T.M. Structural synthesis of an interface center for corporate networks. *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2015, no. 3, pp. 92–98. (in Russian)
 19. Kutuzov O.I., Sergeev V.G., Tatarnikova T.M. *Switches in the Corporate Networks. Simulation and Calculation*. St. Petersburg, Sudostroenie Publ., 2003, 170 p. (in Russian)
 20. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Optimization of the tree-structured network with redundant of switching nodes and links. *Telekommunikatsii*, 2013, no. 2, pp. 42–48. (in Russian)

Авторы

Татарникова Татьяна Михайловна – доктор технических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, Scopus ID: 36715607400, ORCID ID: 0000-0002-6419-0072, tm-tatarn@yandex.ru

Дзюбенко Иван Николаевич – студент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1745-6202, azruhal@gmail.com

Authors

Tatiana M. Tatarnikova – D.Sc, Associate Professor, Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, Scopus ID: 36715607400, ORCID ID: 0000-0002-6419-0072, tm-tatarn@yandex.ru

Ivan N. Dziubenko – student, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1745-6202, azruhal@gmail.com