

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-100-109>

Энергоэффективный алгоритм выбора маршрута передачи данных в беспроводных сенсорных сетях высокой плотности

Татьяна Николаевна Астахова¹, ctn_af@mail.ru
Михаил Олегович Колбанёв², mokolbanev@mail.ru
Александр Сергеевич Лямин¹, a.s.lyamin@gmail.com
Никита Сергеевич Маслов¹, j-knaginino@yandex.ru
Дарья Александровна Маслова¹ ✉, dasha.kirilova.96@bk.ru

¹Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
Княгинино, 606340, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Повышение числа сенсорных устройств на единицу площади, как следствие, сокращает физическое расстояние между устройствами сенсорной сети. Такие сети, как правило, разворачиваются на большой площади и сенсорное устройство, которое хочет передать пакет данных, располагается далеко от базовой станции. В таком случае перед устройством-источником ставится задача выбрать такой путь передачи, при котором затрачивается наименьшее количество энергетических ресурсов и удовлетворяет требованиям времени доставки.

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование эффективности применения эмпирического алгоритма выбора маршрута передачи данных, снижающего энергопотребление беспроводных сенсорных сетей высокой плотности. Используются **методы** системного анализа, аналитического моделирования, геометрии и теорий вероятностей.

Решение. Предполагается, что сенсорная сеть развернута на ограниченной территории и представляет собой совокупность устройств, которые связаны друг с другом информационно и энергетически. При построении маршрутов передачи данных допускается использование любых сенсорных устройств в качестве ретрансляторов.

Новизна. Разработана новая математическая модель, основанная на теореме косинусов и формуле Фрииса, которая позволяет выбрать рациональный маршрут передачи данных от оконечного устройства на системный координатор по критерию совокупного энергопотребления всеми устройствами, составляющими маршрут.

Значимость (теоретическая). Получены зависимости уровня энергопотребления от различных системных параметров, влияющих на процессы функционирования беспроводных сенсорных сетей высокой плотности.

Значимость (практическая). Предложенный эмпирический алгоритм выбора рационального маршрута передачи данных в беспроводной сенсорной сети позволяет определить среди всех альтернативных тот маршрут к координатору, который требует наименьшей мощности. Эффективность предложенного эмпирического энергосберегающего алгоритма подтверждена имитационным моделированием.

Ключевые слова: энергосбережение, беспроводная сенсорная сеть, алгоритм выбора маршрута, сенсорное устройство, мощность сигнала

Ссылка для цитирования: Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Лямин А.С., Маслов Н.С., Маслова Д.А. Энергоэффективный алгоритм выбора маршрута передачи данных в беспроводных сенсорных сетях высокой плотности // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 100–109. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-100-109. EDN:VPHYUT

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-100-109>

Energy-Efficient Algorithm for Data Path Selection in High-Density Wireless Sensor Networks

 **Tatiana N. Astakhova**¹, ctn_af@mail.ru
 **Mikhail O. Kolbanev**², mokolbanev@mail.ru
 **Alexandr S. Lyamin**¹, a.s.lyamin@gmail.com
 **Nikita S. Maslov**¹, j-knaginino@yandex.ru
 **Daria A. Maslova**¹ , dasha.kirilova.96@bk.ru

¹Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University,
Knyaginino, 606340, Russian Federation

²St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI",
St. Petersburg, 197376, Russian Federation

Annotation

Relevance. Increasing the number of sensor devices per unit area consequently reduces the physical distance between the devices in the sensor network. Such networks are usually deployed over a large area and the sensor device that wants to transmit a data packet is located far away from the base station. In such a case, the source device is challenged to choose a transmission path that consumes the least amount of energy resources and satisfies the delivery time requirements.

The objective of this study is to develop and validate the effectiveness of an empirical algorithm for selecting a transmission path that reduces the energy consumption of high-density wireless sensor networks. **Methods** of system analysis, analytical modeling, geometry and probability theories are used.

Solution. It is assumed that the sensor network is deployed in a limited area and is a set of devices that are connected to each other informationally and energetically. When building data transmission routes, any sensor devices can be used as repeaters. At the same time, the increase in the number of repeaters leads to an increase in the time of data delivery.

Novelty. It is assumed that the sensor network is deployed in a limited area and is a set of devices that are connected to each other informationally and energetically. Any sensor devices may be used as repeaters when constructing data transmission routes.

Significance (theoretical). Dependences of power consumption level on various system parameters affecting the processes of functioning of high-density wireless sensor networks have been obtained.

Significance (practical). The proposed empirical algorithm for selecting a rational data transmission route in a wireless sensor network allows us to determine, among all alternatives, the route to the coordinator that requires the least power. The effectiveness of the proposed empirical power-saving algorithm is confirmed by simulation modeling.

Keywords: energy saving, wireless sensor networks, route selection algorithm, sensor device, signal strength

For citation: Astakhova T.N., Kolbanev M.O., Lyamin A.S., Maslov N.S., Maslova D.A. Energy-Efficient Algorithm for Data Path Selection in High-Density Wireless Sensor Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(4):100–109. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-100-109. EDN:VPHYUT

Введение

Четвертая промышленная революция и цифровая трансформация процессов деятельности невозможны без создания, внедрения и эксплуатации сенсорных сетей, которые собирают данные о состоянии физических или социальных сущностей. Сенсорные сети охватывают большие территории

и комплексно обрабатывают информацию в широком спектре предметных областей. Под сенсорной сетью будем понимать совокупность информационно и энергетически связанных сенсорных устройств (далее – устройств, сенсоров), каждое из которых в реальном масштабе времени проводит измерения тех или иных параметров в относи-

тельно малой окружающей их области естественного, общественного, кибернетического или другого вида пространств и передачу данных о результатах измерений к некоторому централизованному системному координатору (точке доступа, базовой станции, центру обработки данных и т. п.). Координатор тем или иным образом способен сам или при помощи других информационных систем проводить комплексный анализ собранных данных и формировать варианты управленческих решений в интересах субъектов деятельности [1].

В качестве примера сенсорной сети приведем архитектуру широко распространенной технологии энергоэффективных систем дальнего радиуса действия LPWAN (аббр. от англ. Low-Power Wide-Area Network). Это класс технологий с радиальной топологией, разработанных для интернета вещей и нацеленных на передачу небольших по объему данных на дальние расстояния. К числу практических реализаций соответствующей концепции относятся, например, системы LoRaWAN [2], СТРИЖ (<https://strij.tech>), NB-FI [3], SNB [4] и др.

В сетях LPWAN координатором при передаче данных является базовая станция. Она принимает данные от сенсоров через радиальные соединения, отвечает за накопление данных, поступающих от оконечных устройств, и отправку этих данных на серверы облачной инфраструктуры для обработки и хранения. Схематично архитектура систем LPWAN очень проста и может быть представлена так, как показано на рисунке 1.

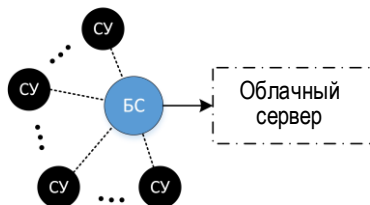


Рис. 1. Архитектура технологии LPWAN

Fig. 1. LPWAN Technology Architecture

Реализация систем LPWAN отличается большим разнообразием:

- данные между сенсорными устройствами и базовой станцией могут передаваться с помощью многих беспроводных технологий;
- базовая станция может располагаться на более или менее высоком здании или вышке, что существенно влияет на дальность связи;
- радиоканалы могут быть организованы как на лицензированных, так и на нелицензируемых диапазонах частот и т. д.

Тенденции развития энергоэффективных технологий дальнего радиуса действия нацелены на преодоление целого ряда ограничений, к числу которых относятся:

- увеличение пропускной способности системы за счет создания более эффективных алгоритмов множественного доступа сенсорных устройств к частотному ресурсу каналов связи;
- привлечение технологий сотовых сетей или сетей другого типа для расширения зоны покрытия;
- внедрение все более надежных технологий безопасности и многое другое.

Однако главным трендом развития систем LPWAN остается стремление к экономии той энергии, которая требуется сенсорным устройствам для передачи данных на базовую станцию. Очевидно, что потребляемая энергия при прочих равных условиях увеличивается из-за роста интенсивности информационного взаимодействия устройств, расстояния от сенсорных устройств до базовой станции и неблагоприятных условий распространения сигнала между удаленными элементами системы.

В данной работе для экономии энергетических ресурсов отдельных устройств и всей системы в целом допускается возможность создания маршрутов передачи данных от устройства-источника на координатор через последовательность нескольких сенсорных устройств системы, которые выступают в качестве ретрансляторов. Это означает, что система в целом для построения маршрутов должна реализовать некоторые алгоритмы, использующие в качестве исходных данных не только расстояние до базовой станции, но и расстояния между любой парой сенсорных устройств и методы оценки энергетических характеристик процесса передачи информации между ними.

Материалы и методы

Для рассматриваемой сенсорной сети первостепенное значение приобретают характеристики связей между всей совокупностью сенсорных устройств. Они зависят от множества внешних и внутренних факторов, таких как:

- масштаб зоны охвата сенсорной сети и количество сенсорных устройств в этой зоне;
- законы распределения и движения сенсоров в пространстве;
- требования ко времени доставки результатов измерений к координатору и энергопотребление этого процесса, а также многое другое.

Будем далее предполагать, что система работает в определенных условиях.

Во-первых, сенсорная сеть объединяет устройства разной конструкции, типа и назначения (рисунок 2).

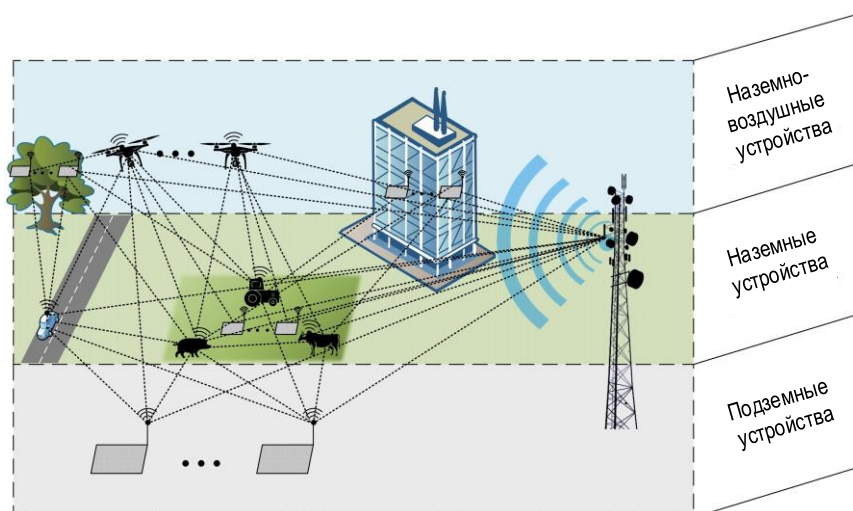


Рис. 2. Типы сенсорных устройств

Fig. 2. Types of Sensor Devices

Во-вторых, сенсорные устройства имеют автономные источники электропитания и по этой причине энергозатраты устройств относятся к важнейшим параметрам системы. Это, в частности, приводит к тому, что время жизни сенсорной сети в целом зависит от емкости электрических батарей отдельных устройств. В работе [5] выявлены условия связности системы, которая может нарушаться из-за потери энергопитания частью устройств.

В-третьих, критерием энергоэффективности системы является общая мощность, потребляемая всеми сенсорами построенного маршрута при передаче сообщения от оконечных сенсорных устройств (источников данных) до координатора. Чем меньше эта мощность, тем эффективнее система в целом.

В-четвертых, энергозатраты связаны, в основном, с передачей сигналов электросвязи по беспроводной сети между сенсорными устройствами. Они зависят от мощности, потребляемой радиопередатчиками и приемниками сигналов электросвязи, и времени занятия радиоканала [6].

В-пятых, устройства передают данные внутри системы с помощью беспроводных технологий связи. Мощность сигнала, необходимая для надежной доставки данных от излучающей на принимающую антенны взаимодействующих устройств, определяется эмпирическими законами, рассмотренными в работе [4], в частности, формулой Фрииса [7].

В-шестых, допустимое время доставки данных к координатору от сенсорных устройств ограничено. При превышении допустимого времени данные «стареют» и их привлечение для дальнейшего анализа становится нецелесообразным. Информация разных устройств может иметь разное время старения. В общем случае время доставки складывается из времени предварительной обработки данных

устройствами, времени доступа к общей для устройств среде передачи, времени распространения сигналов и других временных задержек. Далее будем оценивать время доставки числом ретрансляций, которые использовались в процессе передачи данных координатору, пренебрегая другими параметрами.

В-седьмых, сенсорная сеть состоит из достаточно большого числа устройств, размещенных в ограниченном пространстве так, что систему в целом можно считать плотной. Количественная оценка плотности – это число устройств, расположенных в среднем в единице площади или объема контролируемого пространства.

В-восьмых, в общем случае каждое устройство имеет возможность установить соединение по радиоканалу с любым другим устройством для обмена информацией напрямую без участия транзитных устройств, однако внутри сенсорной сети могут существовать запреты на некоторые из связей, вызванные ограничениями протоколов взаимодействия, пропускной способности каналов связи, остаточной мощности батарей устройств, условиями распространения радиосигналов и др., что ведет к запрету на передачу данных между некоторыми парами устройств.

Сделанные предположения позволяют описать топологические, геометрические, информационные и энергетические связи внутри сенсорной сети в виде нагруженного графа, общий вид которого представлен на рисунке 3. Здесь вершины соответствуют отдельным устройствам системы, а существование ребра указывает на возможность передачи данных между соответствующими устройствами. Нагрузка на ребра представляет собой весь набор физических ресурсов, необходимых цифровым системам для выполнения своих функций: рас-

стояние (дистанция) между устройствами, пропускная способность соответствующего канала связи, информационный объем передаваемых сообщений, энергетические характеристики, необходимые для реализации процесса передачи [8].

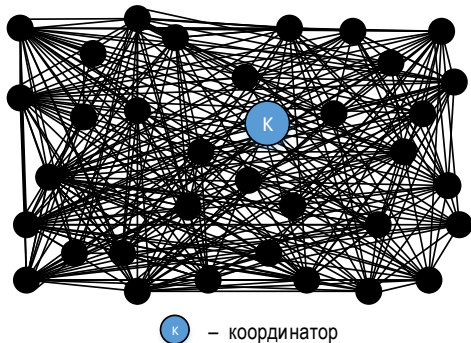


Рис. 3. Фрагмент графа, отображающего сенсорную сеть

Fig. 3. A Fragment of a Graph Showing the Sensory Network

При реализации такой архитектуры сенсорной сети возникает задача создания эффективных алгоритмов поиска и установления маршрутов передачи данных. С учетом сделанных выше предположений о свойствах сенсорной сети задача поиска энергоэффективного маршрута может быть сведена к задаче поиска кратчайшего в энергетическом смысле пути в графе, который отображает топологические и геометрические свойства сенсорной сети. Предлагаемый ниже подход к решению этой задачи может быть реализован при двух условиях:

1) существует механизм вычисления мощности, необходимой для формирования радиосигнала, как функции расстояния между взаимодействующими устройствами, и условий распространения радиосигнала;

2) время доставки данных от устройства источника данных до координатора может быть выражено через число транзитных устройств в маршруте передачи.

Если оба условия выполнены, то ребрам графа можно сопоставить не только расстояния между вершинами, но и мощность, которая необходима для надежной передачи данных, а допустимое время доставки обеспечить ограничением на число ретрансляций.

Особенностью предлагаемого энергоэффективного алгоритма поиска маршрутов передачи данных является использование свойств тех функций, которые связывают энергетические характеристики радиосигнала с дистанцией передачи данных. К числу важных свойств алгоритма следует отнести три обстоятельства:

– алгоритм не гарантирует нахождение самого энергоэффективного маршрута, но предлагаемые им решения всегда являются рациональными;

– по мере повышения плотности устройств в сенсорной сети точность алгоритма растет;

– с вычислительной точки зрения алгоритм существенно проще известных алгоритмов маршрутизации.

В основе предлагаемого алгоритма лежат следующие предпосылки.

В-первых, затухание радиосигнала в среде распространения между передающей и приемной антеннами определяется степенной функцией от расстояния. Например, в соответствии с формулой Фрииса затрачиваемая мощность при передаче радиосигналов зависит от расстояния между взаимодействующими устройствами следующим образом:

$$P_{\text{пер}} = \frac{16P_{\text{пр}}\pi^2 R^2 f^2}{C_{\text{пер}}C_{\text{пр}}v^2}, \quad (1)$$

где $C_{\text{пер}}$ и $C_{\text{пр}}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, соответственно; $P_{\text{пр}}$ – мощность радиосигнала на приемной антенне, Вт (без учета потерь); f – частота радиосигнала, Гц; v – скорость света ($\sim 3 \cdot 10^8$ м/с).

Во-вторых, следствием из формулы Фрииса, устанавливающей квадратичную зависимость мощности сигнала от расстояния между антеннами, является утверждение 1 (рисунок 4).

УТВЕРЖДЕНИЕ 1. При передаче данных от устройства-источника данных A к устройству-приемнику B через транзитное устройство $B2$ общая затрачиваемая мощность будет меньше, чем при передаче данных непосредственно на устройство B без ретрансляции, если только угол $B2$ тупой. Наибольший выигрыш в мощности достигается в том случае, когда ретранслюющее устройство расположено на середине отрезка AB , таким образом, как устройство $B1$. Следствие данного утверждения можно отобразить следующим образом:

$$\begin{aligned} (a1 + a2)^2 &> a1^2 + a2^2, \\ (a1 + a2)^2 &> c^2 + b^2, \\ a1^2 + a2^2 &< c^2 + b^2. \end{aligned} \quad (2)$$

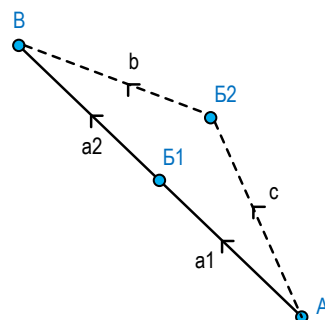


Рис. 4. Следствие квадратичной зависимости мощности от расстояния для сенсорных сетей

Fig. 4. Corollary of the Power Quadratic Distance Dependence for Sensor Network

В [9] для оценки мощности сигнала в специфических условиях предлагается кубическая, четвертичная и даже бóльшая степень зависимости мощности от расстояния. Очевидно, что в этих случаях ретрансляция через правильно выбранные устройства приведет к еще большей экономии заряда батарей электропитания устройств.

В-третьих, в случае, когда на прямой нет сенсорных устройств – кандидатов для ретрансляции, в целях оценки экономии мощности следует использовать теорему косинусов [10], следствием которой является утверждение 2.

УТВЕРЖДЕНИЕ 2. Чем ближе сенсорное устройство, которое можно было бы использовать в качестве ретранслятора, расположено к середине прямой, соединяющей устройство-источник с устройством-приемником, тем бóльшая экономия энергии будет достигнута за счет ретрансляции.

В-четвертых, если принять предположение, что сенсорные устройства распределены в пространстве по закону Пуассона, то вероятность нахождения хотя бы одного устройства в секторе площадью D , такого, что его использование как транзитного уменьшает энергопотребление, определяется формулой Рэлея [11]:

$$P = 1 - e^{-\lambda D}, \quad (3)$$

где λ – плотность распределения сенсорных устройств в пространстве (среднее число устройств на единицу площади).

По мере увеличения плотности сенсорной сети вероятность P достаточно быстро приближается к единице, а это увеличивает возможности экономии энергии за счет транзитов. Заметим, что повышение плотности – это характерная тенденция разви-

тия сенсорных сетей. Так, плотность устройств в сетях 5-го поколения в среднем может составлять 1 устройство на 1 м² (10⁶ устройств на 1 км²), а предполагаемая плотность сетей 6-го поколения – уже 100 устройств на 1 м² (10⁹ устройств на 1 км²).

Алгоритм поиска энергоэффективного маршрута состоит из N этапов. На первом этапе прямое направление от устройства-источника данных к координатору длиной L разобьем на секторы круга так, как показано на рисунке 5. Такое деление на секторы отражает свойства антенн сенсорных устройств, ориентированных в направлении координатора. Каждый выделенный базовый сектор характеризуется центральным углом θ_k и радиусом R_k ($k = \overline{1, K}$, K – число базовых секторов) и содержит две опорные точки: нижнюю (начальную, передающую данные) и верхнюю (конечную, принимающую данные). Сектора сопрягаются таким образом, чтобы верхняя опорная точка предыдущего базового сектора одновременно являлась нижней опорной точкой последующего базового сектора. Нижняя точка первого базового сектора ($k = 1$) соответствует устройству-источнику данных, а верхняя точка последнего базового сектора ($k = K$) – координатору. Все промежуточные опорные точки ($k = 2, \dots, K-1$) соответствуют устройствам-ретрансляторам. Зависящие от базовых углов и радиусов геометрические свойства секторов выбираются так, чтобы именно в них умещались все устройства системы, ретрансляция через которые ведет к сокращению энергии, потребляемой при передаче данных. Для этого центральный угол k -го сектора θ_k должен удовлетворять условию $\theta_k < 90^\circ$, так как экономия энергии достигается только при ретрансляции через устройства, образующие тупые углы с прямой, соединяющей узел-источник данных с координатором.

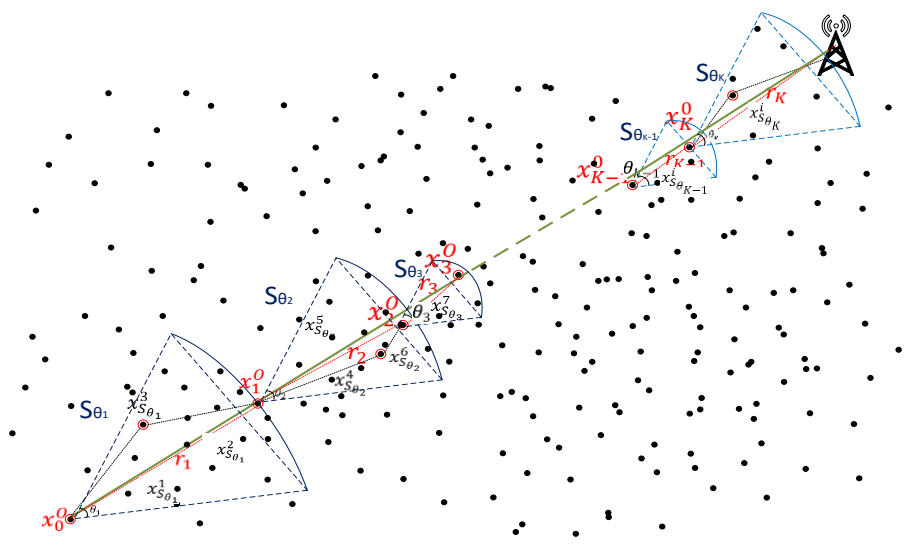


Рис. 5. Алгоритм выбора маршрута

Fig. 5. Route Selection Algorithm

При выборе радиуса k -го сектора R_k ($k = \overline{1, K}$) надо учитывать расстояние L от устройства-источника данных до координатора и количество отрезков K , на которое делится это расстояние. С учетом длины отрезка, которая равна $\frac{L}{K}$, для поиска R_k сначала отметим такую точку на прямой, которая удалена от узла-источника на расстояние $k \cdot \frac{L}{K}$. Затем назовем верхней опорной точкой такое устройство сенсорной сети, которое расположено в k -м секторе и наиболее близко к отмеченной точке на прямой. Радиус R_k равен расстоянию от нижней опорной точки сектора до назначенной верхней опорной точки. В результате реализации такой процедуры радиусы R_k секторов могут отличаться друг от друга.

На этапах 2, ..., i , ..., N работы алгоритма некоторые из секторов, выделенных на предыдущем этапе, рассматриваются в качестве подсистемы сенсорной сети, внутри которой между опорными точками при помощи аналогичной процедуры осуществляется поиск устройств для дополнительных ретрансляций.

Алгоритм может быть реализован и в один этап. Разделение его на несколько этапов становится целесообразным при неравномерном распределении сенсорных устройств в зоне охвата, при котором количество устройств в некоторых выделяемых секторах существенно отличается от количества устройств в других секторах.

Сформулированные выше утверждения 1 и 2 указывают на то, что рациональный по критерию энергозатрат маршрут передачи данных состоит только из устройств сенсорной сети, расположенных в выделяемых секторах, а привлечение для ретрансляций других устройств ведет к увеличению совокупного энергопотребления. Если в некоторых секторах отсутствуют устройства, доступные для ретрансляции, то следует увеличить площадь сектора за счет увеличения центрального угла и (или) радиуса, но в плотных сенсорных сетях вероятность такого события достаточно мала даже для небольших по площади секторов, в соответствии с формулой (3). Энергоэффективность выбранного маршрута будет повышаться при уменьшении центральных углов секторов θ_k и увеличении числа секторов (уменьшении радиусов R_k) и, следовательно, числа ретрансляций. Возможность уменьшения R_k ограничена допустимым временем доставки данных.

Эффект от использования предложенного подхода проявляется в уменьшении вычислительной сложности поиска маршрута, так как вместо вычислений в полном графе с большим количеством вершин строятся маршруты внутри секторов, охватывающих значительно меньшее число устройств системы.

Численный пример

Для проведения расчетов использовалась модель беспроводной сенсорной сети, включающая в себя координатор с антенной LoRa 868 МГц. Количество секторов $K = 3$, $v = 3 \cdot 10^8$ м/с, $C_{\text{пер}} = 1$, $C_{\text{пр}} = 1$, $P_{\text{пр}} = 2,2 \cdot 10^{-11}$ Вт, $f = 868 \cdot 10^6$ Гц. Допустимое число ретрансляций – 6. Предполагалось, что устройства распределены в пространстве по закону Пуассона. Использовался двухэтапный алгоритм, причем на втором этапе в каждом из секторов допускалась одна или несколько ретрансляций.

В основе методики расчета лежит следующая процедура. Случайным образом генерировались плотные сенсорные поля, образующие сенсорные сети с пуассоновским распределением точек на плоскости, для которых применялся эмпирический алгоритм поиска маршрута передачи данных. Для найденных маршрутов фиксировались показатели энергопотребления.

Зависимости потребляемой мощности при разных значениях плотности сенсорной сети и допустимого числа ретрансляций представлены на рисунке 6.

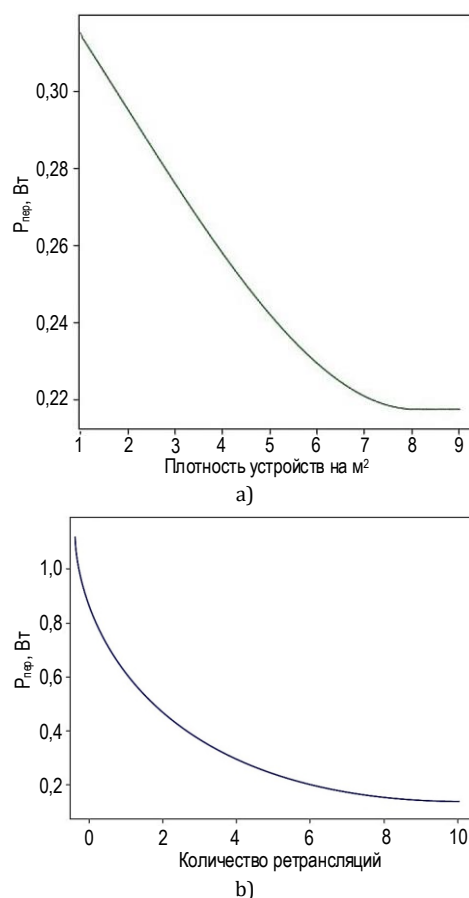


Рис. 6. Зависимость затрачиваемой мощности на передачу пакета данных к базовой станции от плотности распределения устройств (а) и количества ретрансляций (б)

Fig. 6. Dependence of Power Consumption for Data Packet Transmission to the Base Station on Device Distribution Density (a) and Number of Retransmissions (b)

Полученные графики соответствуют следствию из теоремы косинусов [10], а также показывают эффективность предлагаемого алгоритма. При увеличении плотности устройств на квадратный метр мощность, затрачиваемая на передачу сигнала, уменьшается, это свидетельствует о том, что эффективность предлагаемого алгоритма повышается в сверхплотных системах. Такая же тенденция наблюдается и при увеличении количества ретрансляций. Однако увеличение числа ретрансляций ведет к дополнительным энергетическим затратам вычислительных ресурсов, что связано с необходимостью обработки большого количества информации на каждом этапе ретрансляции.

Было проведено сравнение результатов работы предложенного эмпирического алгоритма с точными алгоритмами поиска рациональных путей, которые не учитывают свойства функций, устанавливающих зависимость мощности радиосигнала от расстояния. Результаты сравнения приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты сравнения эмпирического и точного алгоритмов выбора маршрута

TABLE 1. Results of Comparison of Route Selection Algorithms

Допустимое число ретрансляций – 6		
Плотность (сенсорных устройств в среднем на м ²)	Среднее значение мощности на передачу данных, Вт	
	Предлагаемый алгоритм	Точный алгоритм
1	~ 0,33	~ 0,30
2	~ 0,29	~ 0,27
3	~ 0,27	~ 0,26

Можно заметить, что точность эмпирического алгоритма повышается при увеличении плотности сети, поскольку в этом случае увеличивается вероятность нахождения опорного узла P в секторе с меньшим углом θ_k в соответствии с выражением (2). Одновременно по мере увеличения плотности уменьшается и минимальная мощность, требуемая для передачи данных, так как повышается вероятность нахождения транзитных устройств, в большей степени удовлетворяющих условиям теоремы косинусов.

Результаты и их обсуждение

Для оптимизации энергозатрат сенсорных сетей при передаче данных известен целый ряд алгоритмов. Среди них – EADVR (аббр. от англ. Energy-Aware Distance Vector Routing) – протокол векторной маршрутизации расстояния с учетом затрачиваемой энергии, основанный на алгоритме Белмана – Форда; EALSR (аббр. от англ. Energy-Aware Link State Routing) [12, 13]. Известны и другие про-

токолы маршрутизации, позволяющие минимизировать энергопотребление: AODV (аббр. от англ. Ad hoc On-Demand Distance Vector), DSR (аббр. от англ. Dynamic Source Routing), OLSR (аббр. от англ. Optimized Link State Routing), LOAD (аббр. от англ. Link and Energy Aware Multipath Routing) и пр.

Алгоритмы маршрутизации различаются способом выбора маршрута и разным принципом управления процессом передачи данных. Они нацелены на оптимизацию либо длины маршрута на основе данных о расстоянии между устройствами, либо информации об остаточной емкости батарей питания в разных устройствах.

В отличие от популярного протокола EALSR, в котором используется алгоритм Дейкстры (поиска кратчайшего пути), предложенный алгоритм при выборе маршрута использует данные о необходимой мощности для передачи данных между конкретной парой устройств и свойствах функции, устанавливающей зависимость мощности от расстояния. В то время как алгоритмы EADVR и EALSR нацелены на минимизацию задержек при ограниченной пропускной способности каналов связи, предлагаемый алгоритм обеспечивает экономию мощности, затрачиваемой при передаче, при ограниченном времени доставки.

Очевидным преимуществом предлагаемого алгоритма является нацеленность на минимизацию мощности по всему выбранному маршруту в конкретном маршруте, что приводит к точным оценкам затрачиваемых энергетических ресурсов системы в целом.

Точность предлагаемого алгоритма повышается по мере увеличения плотности сенсорной сети. Он имеет преимущество и для сенсорных сетей, развернутых на большой площади, так как использует информацию о расположении в пространстве относительно небольшого количества сенсорных устройств, расположенных в относительной близости к прямой, соединяющей источник данных с координатором.

Использование теоремы косинусов при выборе маршрута позволяет исключить из рассмотрения заведомо неэффективные в энергетическом смысле маршруты, так как при выборе пути учитывается не только расстояние, но и углы между взаимодействующими сенсорами по всему маршруту относительно прямого пути.

Выводы

В статье рассмотрена сенсорная сеть, процессы функционирования которой характеризуются не только взаимодействиями сенсорных устройств друг с другом и координатором во времени и пространстве, но и энергетическими характеристиками, влияющие на связность и время жизни сети.

В ходе исследования были сформулированы утверждения, являющиеся следствиями теоремы косинусов и формулы Фрииса и, на их основе предложен эмпирический алгоритм выбора маршрута передачи данных от устройства-источника данных к координатору, снижающий совокупное потребление энергии устройствами, составляющими маршрут. Алгоритм гарантирует директивное время доставки данных потребителям.

Построена модель, позволяющая оценить зависимости потребляемой мощности от допустимого числа ретрансляций и плотности сети и представлены соответствующие расчеты.

Проведено сравнение с точными алгоритмами поиска рациональных путей. Выявлена и объяс-

нена закономерность, согласно которой при увеличении плотности сенсорной сети повышается точность предложенного эмпирического алгоритма, практическое использование которого становится целесообразным уже при плотности системы $\sim 1,5$ устройства в среднем на 1 м^2 .

Доказано, что предложенный эмпирический алгоритм выбора рационального маршрута передачи данных в беспроводной сенсорной сети позволяет определить среди всех альтернативных тот маршрут к координатору, который требует наименьшей мощности, снижая тем самым количество энергии, потребляемой в совокупности всеми сенсорами сети.

Список источников

1. Романова А.А. Модели и методы оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2023. 21 с.
2. Almuhaaya M.A.M., Jabbar W.A., Sulaiman N., Abdulmalek S. A survey on LoraWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Iss. 1. P. 164. DOI:10.3390/electronics11010164
3. Levchenko P., Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 24. P. 9633. DOI:10.3390/s22249633
4. Зверев Б., Сартаков А. SNB новая LPWAN-технология «Интернета вещей» с высокой пропускной способностью // *Control Engineering Россия*. 2019. № S. С. 38–41. EDN:JRNENT
5. Астахова Т.Н., Верзун Н.А., Касаткин В.В., Колбанев М.О., Шамин А.А. Исследование моделей связности сенсорных сетей // *Информационно-управляющие системы*. 2019. № 5(102). С. 38–50. DOI:10.31799/1684-8853-2019-5-38-50. EDN:GLMGRC
6. 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. EDN:FCHFEL
7. Уоллес Р. Максимальная дальность связи по радиоканалу в системе: как этого добиться? // *Новости электроники*. 2015. № 11. С. 3.
8. Колбанёв М.О., Татарникова Т.М. Физические ресурсы информационных процессов и технологий // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 6(94). С. 113–123. EDN:TBDGTL
9. Аунг Т.А. Разработка методов и средств защищенного сбора данных окружений Интернета Вещей (ИВ). Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2020. 297 с. EDN:QTBXRI
10. Астахова Т.Н., Кирилова Д.А., Колбанёв М.О., Маслов Н.С., Шамин А.А. Критерий выбора оптимального маршрута передачи сообщения в беспроводных сенсорных сетях // *Телекоммуникации*. 2020. № 7. С. 6–12. EDN:VIEYJZ
11. Астахова Т.Н., Верзун Н.А., Колбанев М.О., Полянская Н.А., Шамин А.А. Вероятностно-энергетические характеристики взаимодействия умных вещей // *Вестник НГИЭИ*. 2019. № 4(95). С. 66–77. EDN:IEAGYT
12. Kocakulak M., Butun I. An overview of Wireless Sensor Networks towards internet of things // *Proceedings of the 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC, Las Vegas, USA, 09–11 January 2017)*. IEEE, 2017. DOI:10.1109/CCWC.2017.7868374
13. Mahlke S., Madani S.A., Roetzer M. Energy aware distance vector routing Scheme for Data Centric Low Power Wireless Sensor Networks // *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Industrial Informatics (Singapore, 16–18 August 2006)*. IEEE, 2006. PP. 1030–1035. DOI:10.1109/INDIN.2006.275739
14. Levchenko P., Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 24. P. 9633. DOI:10.3390/s22249633

References

1. Romanova A.A. *Models and methods for evaluating probabilistic-energetic characteristics of information interaction in the Internet of Things*. Phd Theses. St. Petersburg: St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" Publ.; 2023. 21 p. (in Russ.)
2. Almuhaaya M.A.M., Jabbar W.A., Sulaiman N., Abdulmalek S. A survey on LoraWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions. *Electronics*. 2022;11(1):164. DOI:10.3390/electronics11010164
3. Levchenko P., Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN. *Sensors*. 2022;22(24):9633. DOI:10.3390/s22249633
4. Zverev B., Sartakov A. SNB new LPWAN technology of "Internet of Things" with high throughput. *Control Engineering Russia*. 2019;S:38–41. (in Russ.) EDN:JRNENT

5. Astakhova T.N., Verzun N.A., Kasatkin V.V., Kolbanov M.O., Shamin A.A. Sensor network connectivity models. *Information and Control Systems*. 2019;5(102):38–50. (in Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2019-5-38-50. EDN:GLMGRC
6. 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;22(2):294–301. (in Russ.) DOI:10.17586/2226-1494-2022-22-2-294-301. EDN:FCHFEL
7. Uolles R. Maximum radio communication range in the system: how to achieve this? *News of Electronics*. 2015;11:3–13. (in Russ.)
8. Kolbanov M.O., Tatarnikova T.M. Physical resources of information processes and technologies. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014;6(94):113–123. (in Russ.) EDN:TBDGTL
9. Aung T.A. *Development of methods and means of protected data collection of Internet of Things (IoT) districts*. Phd Theses. St. Petersburg: ITMO University Publ.; 2020. 297 p. (in Russ.)
10. Astakhova T.N., Kirilova D.A., Kolbanov M.O., Maslov N.S., Shamin A.A. Criterion for selecting the optimal route of message transmission in wireless sensor networks. *Telecommunications*. 2020;7:6–12. (in Russ.) EDN:VIEYJZ
11. Astakhova T.N., Verzun N.A., Kasatkin V.V., Kolbanov M.O., Shamin A.A. Sensor network connectivity models. *Information and Control Systems*. 2019;5(102):38–50. (in Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2019-5-38-50. EDN:GLMGRC
12. Kocakulak M., Butun I. An overview of Wireless Sensor Networks towards internet of things. *Proceedings of the 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC, 09–11 January 2017, Las Vegas, USA*. IEEE; 2017. DOI:10.1109/CCWC.2017.7868374
13. Mahlknecht S., Madani S.A., Roetzer M. Energy aware distance vector routing Scheme for Data Centric Low Power Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 16–18 August 2006, Singapore*. IEEE; 2006. p.1030–1035. DOI:10.1109/INDIN.2006.275739

Статья поступила в редакцию 12.07.2024; одобрена после рецензирования 05.08.2024; принята к публикации 07.08.2024.

The article was submitted 12.07.2024; approved after reviewing 05.08.2024; accepted for publication 07.08.2024.

Информация об авторах:

АСТАХОВА
Татьяна Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологии Нижегородского государственного инженерно-экономического университета

 <https://orcid.org/0000-0002-7032-0697>

КОЛБАНЁВ
Михаил Олегович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

 <https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>

ЛЯМИН
Александр Сергеевич

кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологии Нижегородского государственного инженерно-экономического университета

 <https://orcid.org/0000-0003-0027-2404>

МАСЛОВ
Никита Сергеевич

старший преподаватель кафедры информационных систем и технологии Нижегородского государственного инженерно-экономического университета

 <https://orcid.org/0000-0003-0209-7267>

МАСЛОВА
Дарья Александровна

старший преподаватель кафедры информационных систем и технологии Нижегородского государственного инженерно-экономического университета

 <https://orcid.org/0000-0002-3329-4821>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.