

Показатели эффективности процесса информационного взаимодействия в сети интернета вещей

Н. А. Верзун[✉], М. О. Колбанёв, А. А. Романова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] Dina-125@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается сеть интернета вещей, узлы которой – умные вещи – взаимодействуют друг с другом при помощи технологий беспроводной связи, способны перемещаться в пространстве, характеризуются пространственными координатами и автономным электропитанием. Устанавливаются существенные различия между требованиями, предъявляемыми к процессам функционирования инфраструктурных сетей и сетей интернета вещей с точки зрения используемых ими трех видов физических ресурсов: пространственных, временных и энергетических. Показано, что эти различия, наряду со спецификой предметных областей применения, существенным образом влияют на показатели эффективности процесса информационного взаимодействия умных вещей внутри сети и с внешним окружением. Предлагается классификация показателей эффективности процесса функционирования сетей интернета вещей, созданная с учетом потребляемых ими физических ресурсов. Для оценки эффективности процесса информационного взаимодействия в сети интернета вещей вводятся вероятностные характеристики – такие, например, как зона охвата и плотность локации умных вещей, мощность сигналов взаимодействия и остаточный заряд батареи, время доставки сообщений между элементами сети, а также время, затрачиваемое на отдельные этапы процесса передачи сообщений. Представлены модели, позволяющие не только оценивать показатели эффективности, обобщающие введенные характеристики, но и изучать взаимное влияние вероятностно-пространственных, вероятностно-временных и вероятностно-энергетических показателей эффективности процесса информационного взаимодействия.

Ключевые слова: инфраструктурные сети, интернет вещей, информационное взаимодействие умных вещей, показатели эффективности информационного взаимодействия, вероятностно-пространственные показатели, вероятностно-временные показатели, вероятностно-энергетические показатели

Для цитирования: Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Романова А. А. Показатели эффективности процесса информационного взаимодействия в сети Интернета вещей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 3. С. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-5-14.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Performance Indicators of Information Interaction in the Internet of Things

N. A. Verzun[✉], M. O. Kolbanev, A. A. Romanova

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉] Dina-125@yandex.ru

Abstract. The Internet of Things network is considered, the nodes of which – smart things – interact with each other using wireless communication technologies, are able to move in space, are characterized by spatial coordinates and autonomous power supply. Significant differences are established between the requirements for the functioning of infrastructure networks and networks of the Internet of things in terms of the three types of

physical resources they use: spatial, temporal and energy. It is shown that these differences, along with the specifics of subject areas of application, significantly affect the efficiency indicators of the process of information interaction of smart things within the network and with the external environment. A classification of performance indicators for the process of functioning of Internet of things networks is proposed, created taking into account the physical resources consumed by them. To assess the effectiveness of the process of information interaction in the Internet of Things, probabilistic characteristics are introduced, such as, for example, the coverage area and location density of smart things, the power of interaction signals and the remaining battery charge, the delivery time of messages between network elements, as well as the time spent on individual stages the process of transmitting messages. Models are presented that allow not only to evaluate performance indicators that summarize the introduced characteristics, but also to study the mutual influence of probabilistic-spatial, probabilistic-temporal and probabilistic-energy indicators of the effectiveness of the information interaction process on each other.

Keywords: infrastructure networks, Internet of things, information interaction of smart things, information interaction efficiency indicators, probabilistic-spatial indicators, probabilistic-temporal indicators, probabilistic-energy indicators

For citation: Verzun N. A., Kolbanev M. O., Romanova A. A. Performance Indicators of Information Interaction in the Internet of Things // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-5-14.

Введение. Любая сеть электросвязи в процессе своего функционирования потребляет физические ресурсы. Физические ресурсы – это количественная мера, позволяющая оценить возможность реализации информационного взаимодействия с физической средой. Использование физических ресурсов обеспечивает перемещение данных как материальных объектов во времени и в пространстве, а также изменение формы представления данных. К физическим ресурсам относят, в первую очередь, пространственные, временные и энергетические ресурсы. При создании и эксплуатации инфраструктурных (фиксированных) сетей – например, телефонных сетей общего пользования или пакетных сетей X.25, основное внимание уделялось разработке моделей, которые позволяли бы оценивать вероятностно-временные характеристики, т. е. характеристики, зависящие от сетевого трафика. Пространственные и энергетические характеристики подобных сетей рассматривались как статические, т. е. неизменные в процессе их функционирования, что было оправданно, поскольку пространственное расположение элементов сетей и их энергопотребление не изменялись в ходе предоставления услуг связи.

Одним из существенных отличий сетей интернета вещей служит динамический характер и пространственных, и временных, и энергетических характеристик. Так, например, умные вещи, являющиеся источниками нагрузки в интернете вещей, могут менять свое пространственное расположение в ходе информационного взаимодействия с другими умными вещами или внешним

окружением. Они, как правило, получают энергию от автономных источников питания, емкость которых ограничена, а это означает, что объемы трафика и услуг зависят от ресурса этих батарей. Времена доставки сообщений, в свою очередь, зависят от локации участников информационного взаимодействия в интернете вещей, от размера охватываемого пространства и плотности их размещения в этом пространстве.

Указанные различия требуют разработки новых моделей процесса информационного взаимодействия – таких, которые будут учитывать не только параметры трафика, но также и параметры зоны охвата, и источников автономного питания.

В настоящей статье представлены соответствующие модели, которые позволяют:

– во-первых, оценивать показатели эффективности, обобщающие вероятностные характеристики – зону охвата, плотность локации умных вещей, мощность сигналов информационного взаимодействия, остаточный заряд батареи, время доставки сообщений между элементами сети, а также время, затрачиваемое на отдельные этапы процесса передачи сообщений;

– во-вторых, исследовать взаимное влияние вероятностно-пространственных, вероятностно-временных и вероятностно-энергетических показателей эффективности процесса их информационного взаимодействия.

Классификация показателей эффективности процесса функционирования сетей связи. Физические ресурсы сетей связи и соответствующие им

системные характеристики могут быть разделены на три группы – пространственные, временные и энергетические, имеющие следующий смысл:

– пространственные характеристики измеряются в единицах длины и расстояния, определяют зону охвата, масштаб сети, описывают распределение в пространстве пользователей и данных, топологические свойства структур, образующих сеть, расположение их элементов друг относительно друга и т. п.;

– временные характеристики – это мера для сопоставления порядка следования и частоты (скорости) событий, изменяющих состояния сетей, данных и пользователей в процессе информационного взаимодействия;

– энергетические характеристики – мера для оценки усилий, которые необходимо совершить для движения объектов в пространстве и во времени в процессе информационного взаимодействия.

Следует отметить, что:

1. Пространственные характеристики меняются по мере развития сетей. Так, например, зоной охвата современных инфокоммуникаций стала вся Земля. Отдельные сети имеют собственную зону охвата, управляются собственными администрациями и характеризуются используемыми информационными технологиями, составом пользователей, их количеством, интенсивностью взаимодействия, мобильностью, распределением по территории и др. Сети, в зависимости от масштаба, разделяют:

- на нательные сети (BAN, Body Area Network);
- персональные сети (PAN, Personal Area Network);
- локальные сети (LAN, Local Area Network);
- городские сети (MAN, Metropolitan Area Network);
- глобальные сети (WAN, Wide Area Network).

2. Временные характеристики также изменили диапазон своих значений, притом что основной временной характеристикой по-прежнему остается время доставки данных, т. е. период времени, который начинается с момента наступления потребности в передаче данных и заканчивается в момент их доставки адресату. Время доставки данных включает три составляющие:

– время передачи данных от источника информации в канал связи. Оно зависит от согласованности объемов сигнала и канала. Пропускная способность канала – это наибольшая скорость передачи данных, измеряемая в битах в секунду, т. е. количество данных, которые сеть может передать

за единицу времени между двумя оконечными устройствами. Она достигается при использовании оптимальных для данного канала настроек источника информации, когда на каждом такте работы канала каждый символ переносит максимально возможное количество бит данных;

– время перемещения сигнала по каналам между сетевыми узлами. Это время у эфирных сетей определяется скоростью света – $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, а у проводных сетей зависит от свойств направляющей среды медного или оптического кабеля;

– время управления движением сигнала в сетевых узлах – маршрутизаторах, серверах или телефонных станциях. Сетевые узлы должны получать и анализировать адресную информацию, выбирать маршруты доставки и выполнять другие алгоритмы обработки, – задерживая при этом доставку сигналов.

3. Выбор энергетических характеристик всегда занимал важное место в процессе проектирования сетей связи, но в настоящее время этот показатель приобретает все большее значение. По словам президента Курчатовского института М. Ковальчука: «Уже сейчас (или в ближайшие годы) треть производимой энергии уйдет на обеспечение работы сетей» [1]. По прогнозам к 2030 г. цифровым технологиям потребуется больше энергии, чем всем остальным потребителям электроэнергии.

К энергоемким устройствам относятся терминальные устройства, ЦОДы, маршрутизаторы. Эффективность информационных систем во многом связана сегодня с фактическим потреблением ими электроэнергии и в крупных компаниях оценивается:

- объемом энергии, потребляемой в расчете на единицу инфоуслуг;
- объемами выбросов углерода в пересчете на один сервер или на группу пользователей;
- соотношением энергопотребления информационного оборудования инженерных систем, поддерживающим его работу;
- энергопотреблением на 1 м² площади технических помещений;
- стоимостью транзакций в киловатт-часах или в объеме выбросов углерода.

Сравнение требований к показателям эффективности функционирования инфраструктурных сетей и интернета вещей. Принципы построения инфраструктурных сетей были разработаны в XX в. Их развитие было нацелено:

– в области пространственных характеристик – на рост числа пользователей за счет увеличения зоны охвата иерархически организованными и стационарно располагаемыми станциями и узлами первичной и вторичной сетей;

– в области временных характеристик – на увеличение пропускной способности первичной сети и скоростей обработки служебных данных во вторичной сети для уменьшения задержек и блокировок при передаче данных;

– в области энергетических характеристик – на обеспечение бесперебойного питания за счет резервирования систем электроснабжения и аккумуляции энергии непосредственно в станциях и узлах первичной и вторичной сетей связи.

В отличие от инфраструктурных сетей, интернет вещей предназначен для контроля физических параметров окружающей среды посредством различных связанных друг с другом и с облаком умных вещей. Информационное взаимодействие в интернете вещей обеспечивают технологии беспроводной связи. Пространство, охватываемое вещами (зона охвата), называется сенсорным полем и представляет собой самостоятельный объект исследования в той или иной предметной области. Таким полем может быть территория населенного пункта, ферма в сельском хозяйстве, тело или часть тела человека в медицине, нефтяная платформа в добывающей промышленности и т. п. Характерными особенностями сенсорных полей являются:

– широкий разброс геометрических размеров – от долей метров до километров, и способность к масштабированию;

– автономность работы каждого устройства, которое имеет собственное питание и функционирует по собственному алгоритму;

– большое разнообразие сенсоров, осуществляющих комплексные измерения различных параметров пространства;

– способность к самоорганизации при случайном изменении количества и места расположения взаимодействующих сенсоров из-за отказов, перехода в режим сна, мобильности и т. п.;

– использование беспроводных технологий передачи сигналов;

– низкое энергопотребление из-за невозможности частой замены или подзарядки аккумуляторов в процессе работы;

– широкий диапазон скоростей передачи данных и допустимого времени реакции на происходящие события и др.

В целом интернет вещей характеризуется:

– разнообразием требований к пространственным, временным и энергетическим характеристикам процесса информационного взаимодействия в разных предметных областях. Примером здесь может служить различие требований к сетям беспилотного транспорта и сетям бытовых устройств;

– значительной взаимной зависимостью пространственных, временных и энергетических характеристик процесса информационного взаимодействия. Например, увеличение линейных размеров сенсорного поля ведет к увеличению энергозатрат, а изменение скорости передвижения умных вещей в зоне охвата – к изменению маршрутов передачи данных, и т. п.

Все это влияет на выбор показателей эффективности процесса информационного взаимодействия в сетях интернета вещей и моделей для их оценки.

Модели оценки пространственных, временных и энергетических показателей эффективности функционирования интернета вещей. Основным пространственным параметром интернета вещей, объединяющим многие частные его характеристики, стал размер сенсорного поля. В отличие от зоны охвата инфраструктурных сетей, сенсорное поле может:

– вмещать тысячи вещей (в том числе нановещей), требующих комплексного управления;

– менять линейные размеры, которые зависят от случайных перемещений умных вещей;

– быть как двумерным (как поле с посадками в земледелии), так и трехмерным (как ферма или склад).

Математической моделью сенсорного поля служит случайное поле точек – совокупность точек, которые случайным образом распределены в пространстве. Плотность поля – это среднее число точек, находящихся на единице площади (объема). Выделяют плотные и сверхплотные сенсорные поля. В сетях 5G плотность поля может достигать 1 млн вещей на 1 км².

Равномерное поле – это поле, количество точек в котором зависит только от размера выбранной области и не зависит от того, в какой части зоны охвата данная область выбрана. Во многих приложениях сенсорное поле можно описать пуассоновским полем точек, которое обладает такими свойствами:

– вероятность появления того или другого числа точек в любой области плоскости (пространства) не зависит от того, сколько точек попало в любые области, не пересекающиеся с данной;

– вероятность попадания в элементарную область двух или более точек пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одной точки.

Модель пуассоновского поля точек задается следующими соотношениями.

Число точек (m) пуассоновского поля, попадающих в любую область плоскости (пространства) площадью (объемом) S , m^2 (m^3), распределено по закону Пуассона [2]:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (1)$$

где a – математическое ожидание числа точек, попадающих в выбранную область. Если поле точек равномерно с плотностью λ ($1/m$), то $a = S\lambda$.

Расстояние между ближайшими точками пуассоновского поля – это случайная величина $r > 0$, которая на плоскости определяется следующими функциями распределения (F_1) и плотности (f_1) вероятностей, соответственно (формула Рэлея) [2]:

$$F_1(R < r) = 1 - e^{-\lambda\pi r^2}; \quad (2)$$

$$f_1(R < r) = 2\lambda\pi r e^{-\lambda\pi r^2}. \quad (3)$$

Для объемного сенсорного поля функция распределения вероятностей определяется формулой Максвелла, в показателе числа « e » которой площадь круга πr^2 надо заменить объемом сферы $\frac{4}{3}\pi r^3$.

Для функции распределения (m_r) и плотности вероятностей расстояния (f_n) до n -й ($n \geq 2$) по удаленности точки пуассоновского поля на плоскости справедливы формулы:

$$m_r = \int_0^{\infty} r 2\pi\lambda r e^{-\lambda\pi r^2} dr = \frac{1}{2\sqrt{\lambda}}; \quad (4)$$

$$F_n(R < r) = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{a^i}{i!} e^{-a}; \quad (5)$$

$$f_n(R < r) = \frac{a^{n-1}}{(n-1)!} 2\lambda\pi r e^{-a}, \quad (6)$$

$$a = \lambda\pi r^2, \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

Все рассмотренные параметры (1)–(6) представляют собой *вероятностно-пространственные характеристики* процесса информационного взаимодействия умных вещей.

Вероятностно-временные характеристики интернета вещей описывают время доставки сообщений между элементами сетей, а также времена, затрачиваемые на отдельные этапы этого процесса. Временные характеристики являются случайными величинами, поскольку зависят:

- от загрузки сетевого оборудования;
- интенсивности нагрузки (трафика), генерируемой пользователями и умными вещами;
- требований к качеству обслуживания трафика;
- надежности и готовности оборудования и многих других факторов.

Требования к временным характеристикам функционирования интернета вещей могут варьироваться в широких пределах. В рекомендациях МСЭ-T для сетей NGN определена допустимая задержка передачи пакета не выше 100 мс по наибольшим диагоналям в США (Дейтона-Бич (Флорида) – Сиэтл) и Европе (Москва – Лиссабон). Для больших расстояний допускается задержка в 400 мс, несмотря на ухудшение качества передачи речи и видео. Технологии NGN обеспечивают задержку 100 мс при централизованном предоставлении услуг.

Требования к задержкам в интернете вещей полностью зависят от вида физических процессов, протекающих в предметной области и фиксируемых датчиками сенсорного поля. Например, опрос датчиков, измеряющих температуру почвы, может проводиться один раз в несколько дней, а допустимое время их реакции на сигнал опроса может измеряться секундами.

Совсем другие требования к задержкам предъявляются в сетях, измеряющих показатели здоровья человека (нательных сетях – BAN). Только уменьшение задержки до 10 мс позволяет медицинским приложениям изменить традиционную модель «пациент–доктор». Носимые умные вещи могут как контролировать ход лечения, оценивать влияние медикаментов, фиксировать изменение физических показателей, ход реабилитации пациентов, так и воздействовать на состояние человека при помощи медицинских актуаторов. Наименьшая задержка требуется тактильному интернету [3], т. е. таким системам связи, которые обеспечивают тактильное взаимодействие через интернет при помощи роботизированных систем, управляемых с незаметным для человека временем задержки. В табл. 1 приведены требования к задержкам и скорости сетей различного типа.

Табл. 1. Требования к сетям
Tab. 1. Network Requirements

Тип сети	Задержка	Единица измерения скорости сети	
		доступа	магистрالی
NGN	100 мс	Мбит/с	Гбит/с
Сеть с малыми задержками	10 мс	Гбит/с	Тбит/с
Тактильный Интернет	1 мс	Тбит/с	Пбит/с

Тактильные ощущения связаны с прикосновениями и являются результатом раздражения нервных окончаний. Задержка в 1 мс выбрана, исходя из скорости распространения электрических импульсов по нервной сети человека – от 0.5 до 100 м/с [3]. Сетевая задержка в 1 мс позволит пережить «реальные тактильные ощущения», сформированные умными тактильными вещами.

Тактильный интернет может обеспечивать осязаемую (прикосновение ощущают обе стороны) или неосязаемую обратную связь. В первом случае тактильные приставки нужны на обеих сторонах сети, во втором – обратная связь представляет собой только аудио- или видеосигналы.

Сокращение времени доставки данных: $T_d = 5L + Zt$ (где L – расстояние между взаимодействующими объектами, км; Z – число транзитов (переприемов), t – время переприема (мкс)), требует децентрализации процесса предоставления услуг для уменьшения времени распространения сигнала и числа транзитов.

Вероятностно-энергетические характеристики информационного взаимодействия зависят от процесса потребления энергии компонентами интернета вещей, в частности от способов реализации и интенсивности выполнения процессов обработки данных умными вещами и передачи сформированных сообщений по беспроводной сети. Наибольшее значение в этом контексте имеют мощность сигнала, при помощи которого идет передача, и доступный ресурс аккумулятора.

Экономия энергии умных вещей – важный приоритет разработчиков интернета вещей. Энергосбережение может быть обеспечено аппаратно-программными и системными методами. Первые связаны с технологиями производства устройств. Необходимо ориентироваться на современный технологический процесс и надежность при выборе чипов и других компонентов, стремиться к уменьшению напряжения питания, применять эффективные схемные решения, использовать системное

программное обеспечение, соответствующее особенностям сенсорных узлов, разрабатывать эффективные алгоритмы предварительной обработки данных, стремиться к увеличению периода сна умных вещей, и т. д.

Цикл работы умной вещи включает этапы сбора, обработки, приема и передачи данных и «сон». Анализ типичного профиля энергопотребления показывает следующее [4]:

- главным потребителем энергии является приемопередатчик;
- энергопотребление на этапах обработки данных в миллион раз меньше в пересчете на 1 бит;
- надо стремиться к предварительной обработке для сокращения объема пересылаемых данных;
- основную часть жизни вещь должна «спать».

Системные методы энергосбережения ориентированы на рациональное построение физической среды и алгоритмов взаимодействия умных вещей друг с другом и остальными сетевыми элементами. В основе решений лежат следующие предпосылки:

- свойства среды зависят от радиочастотного диапазона (пример представлен в табл. 2);
- топология сети определяет правила физического взаимодействия элементов сети и поэтому влияет на уровни сигналов, излучаемых элементами;
- протоколы физического, канального и сетевого уровней должны строиться, исходя из увеличения времени жизни сети в целом (например, протокол маршрутизации EBMR (Energy-Balancing Multipath Routing) основан на энергетической балансировке маршрута, кластеризация уменьшает расстояние между взаимодействующими умными вещами);

Табл. 2. Преимущества работы беспроводных сетей в разных частотных диапазонах
Tab. 2. Advantages of wireless networks in different frequency ranges

Частотный диапазон	
Ниже 6 ГГц	Выше 6 ГГц
Преимущества	
Меньше базовых станций, хорошее проникновение в дома	Большая пропускная способность
Использование	
Низкоскоростные службы	3D-видео, тактильный интернет, дополненная реальность...

– дополнительный (служебный) трафик значительно увеличивает энергозатраты умных вещей (например, служебный трафик LTE в разы больше, чем речевой, за сутки);

– помехоустойчивое кодирование и квитирование – процедуры энергозатратные. Влияние ошибок можно уменьшить за счет повышения уровня излучаемых сигналов или исправления ошибок протоколами верхних уровней;

– сжатие данных относится к числу эффективных механизмов уменьшения энергопотребления умными вещами благодаря уменьшению числа излучаемых знаков.

Взаимная зависимость пространственных, временных и энергетических характеристик. Важной особенностью интернета вещей по сравнению с инфраструктурными сетями является не только вероятностный характер пространственных, временных и энергетических характеристик, но и их существенное взаимное влияние друг на друга.

Так, например, пространственные характеристики влияют на энергопотребление, поскольку увеличение расстояния между взаимодействующими устройствами требует увеличения мощности сигнала на передающей антенне в соответствии с формулой Фрииса:

$$P_{\text{пер}} = \frac{16P_{\text{пр}}\pi^2 r_a^2 f^2}{C_{\text{пр}}C_{\text{пер}}c^2}; \quad \gamma = \frac{c}{f}, \quad (7)$$

где $P_{\text{пер}}$, $P_{\text{пр}}$ – мощности сигнала на антеннах передатчика и приемника соответственно; c – скорость света, м/с; $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{пер}}$ – коэффициенты усиления приемной и передающей антенн; r_a – расстояние между антеннами, м; f – частотный диапазон передачи, Гц; γ – длина волны передаваемого радиосигнала. Используемую для передачи мощность $P_{\text{пер}}$ можно пересчитать в радиус круга r , м, в пределах которого может быть выбрана умная вещь для транзита блока данных:

$$r_a = \frac{\gamma}{4\pi\sqrt{P_{\text{пр}}}} \sqrt{C_{\text{пер}}C_{\text{пр}}P_{\text{пер}}}.$$

Таким образом, из (7) можно сделать вывод, что мощность, затрачиваемая на передачу сигналов, непосредственно зависит и от размера сенсорного поля, и от плотности размещаемых там устройств – умных вещей.

На энергопотребление влияют также и временные характеристики. Например, по мере увеличения объема обрабатываемых данных и коли-

чества бит, излучаемых в эфир, растет энергия, затрачиваемая умными вещами. При этом известно, что энергия, требуемая для излучения одного бита данных, примерно в миллион раз превышает энергию, затрачиваемую на обработку этого бита в процессоре.

Длина передаваемых сообщений влияет на энергопотребление, затрачиваемое на обработку метаданных и на распространение данных, а также на вероятностную характеристику – вероятность своевременной доставки.

Ниже представлены выражения [5] для оценки потребления энергии в процессе обработки ($E_{\text{обр}}$) и распространения данных ($E_{\text{рас}}$):

$$E_{\text{обр}} = k_B T_{\text{и.п}} \eta \frac{[F/s] r_{\text{с.и}}}{Q_c};$$

$$E_{\text{рас}} = k_B T_{\text{и.п}} \eta \frac{[F/s](s + r_{\text{с.и}})}{Q_c},$$

где k_B – постоянная Больцмана; $T_{\text{и.п}}$ – температура, при которой ведутся информационные преобразования, К; F – длина передаваемых сообщений, бит; s – длина пакетов, бит, на которые разбивается (фрагментируется) передаваемое сообщение; $r_{\text{с.и}}$ – длина служебного поля в пакете, бит; Q_c – вероятность успешной однократной передачи пакета; η – коэффициент, учитывающий особенности используемых технологий обработки и распространения. В результате исследований было выявлено, что качество канала существенно влияет на энергопотребление беспроводной сети [5]. При определенных условиях существует такое значение длины передаваемых по сети пакетов s , при котором уровень потребления энергии минимален.

В свою очередь, энергетические характеристики интернета вещей влияют и на пространственные, и на временные. Так, например, от энергетических возможностей напрямую зависит дальность передачи сигналов, а также вероятности искажения сигналов помехами и, как следствие, вероятность своевременной доставки сообщения.

Связность. Одним из показателей, которые в комплексе учитывают пространственные, временные и энергетические характеристики интернета вещей, является связность, т. е. способность передавать данные между сетевыми элементами в пределах границ зоны охвата сети в реальном масштабе времени. В отличие от инфраструктурных сетей, связность которых зависит от целост-

ности узлов и линий связи, связность интернета вещей зависит и от топологии, и от трафика, и от надежности устройств, и от емкости аккумуляторов автономного электропитания [6].

В [6] авторами было предложено для оценки связности сети и ее жизнеспособности использовать показатели, учитывающие вероятностную и переменную топологию беспроводных сетей; в частности, предложены следующие показатели:

– $P_{св}$ – вероятность связности сенсорных устройств, т. е. вероятность того, что передача данных от сенсорного узла к головному кластерному узлу возможна либо напрямую, либо через транзитные узлы. Будем считать беспроводную сенсорную сеть работоспособной (жизнеспособной), если вероятность связности сенсорных устройств больше допустимого значения $P_{св,д}$, т. е. когда выполняется условие $P_{св} > P_{св,д}$;

– $T_{ср}$ – среднее время доставки блока данных от сенсорного устройства до головного кластерного узла;

– μ – квантиль случайной величины времени доставки блока данных от сенсорного к головному кластерному узлу;

– t_{μ} – значение, которое случайная величина времени доставки блока данных от сенсорного устройства к головному кластерному узлу (t) не превышает с заданной вероятностью μ .

В [6] проводился анализ влияния мощности радиопередатчика сенсорного устройства на вероятность связности беспроводной сенсорной сети. Предполагается, что в сети имеется возможность передачи блоков данных от сенсорных устройств либо напрямую головному узлу, либо через транзитные узлы. При этом каждое сенсорное устройство размещается в центре круга и в круге можно выделить сектор (угол сектора – α), ориентированный в направлении головного кластерного узла. Исследовалась зависимость вероятности связности сенсорных узлов P_s от мощности радиопередатчика $P_{пер}$:

$$P_s(P_{пер}) = -\frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} A \sqrt{\alpha \lambda} \sqrt{P_{пер}} \right) \sqrt{\pi} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\alpha \lambda} e^{\frac{1}{4} A^2 P_{пер} \alpha \lambda} A \sqrt{P_{пер}} - 2e^{\frac{1}{2} A^2 P_{пер} \alpha \lambda} + 2 \right] \times \\ \times e^{\frac{1}{2} A^2 P_{пер} \alpha \lambda} .$$

Коэффициент A определяется из следующего соотношения:

$$A = \frac{\gamma}{4\pi \sqrt{P_{пр}}} \sqrt{C_{пер} C_{пр}} .$$

К показателям относятся также жизненный цикл сети [7], время жизни сети [8] и некоторые другие показатели [9], [10].

Заключение. Был проведен анализ особенности функционирования интернета вещей в контексте его отличий от инфраструктурных сетей. Описаны наиболее существенные различия между требованиями, предъявляемыми к процессам функционирования инфраструктурных сетей и сетей интернета вещей, с точки зрения используемых ими трех видов физических ресурсов: пространственных, временных и энергетических. Предложена классификация показателей эффективности процесса функционирования сетей связи, в рамках которой предполагается разделить весь набор характеристик на три большие группы: пространственные, временные и энергетические.

Для оценки эффективности процесса информационного взаимодействия в сети интернета вещей были введены вероятностные характеристики: зона охвата и плотность локации умных вещей, мощность сигналов взаимодействия и остаточный заряд батареи, время доставки сообщений между элементами сети, а также время, затрачиваемое на отдельные этапы процесса передачи сообщений. Представлены модели, позволяющие оценивать предложенные показатели эффективности.

Приведено сравнение требований к показателям эффективности функционирования инфраструктурных сетей и интернета вещей, которое обосновывает, что при выборе параметров сетей интернета вещей, в отличие от инфраструктурных сетей, нельзя отказаться от учета взаимной зависимости пространственных, временных и энергетических характеристик. Предложенные модели информационного взаимодействия в интернете вещей позволяют учесть эту зависимость.

В качестве комплексного показателя, который учитывает пространственные, временные и энергетические характеристики интернета вещей, была предложена связность, т. е. свойство, которое характеризует способность передавать данные между сетевыми элементами в пределах границ зоны охвата сети в реальном масштабе времени. Для оценки связности сети и ее жизнеспособности предложено использовать показатели, учитывающие вероятностную и переменную топологию беспроводных сетей.

Список литературы

1. Интервью 11.02.2018 г. в «Воскресном вечере с В. Соловьевым» URL: <https://newsvideo.su/stream/83166> (дата обращения 14.01.2022).
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 10-е изд. М.: Высш. шк., 2006. 575 с.
3. Кузнецов К. А., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е. Тактильный Интернет и его приложения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Т. 7, № 2. С. 12–20.
4. Калачев А. В. Аппаратные и программные решения для беспроводных сенсорных сетей / АлтГУ. Барнаул, 2016. URL: <http://elibrary.asu.ru/handle/asu/3377> (дата обращения 14.01.2022).
5. Колбанёв М. О., Верзун Н. А., Омельян А. В. Об энергетической эффективности сетей пакетной передачи данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 9. С. 42–46.
6. Исследование моделей связности сенсорных сетей / Т. Н. Астахова, Н. А. Верзун, В. В. Касаткин, М. О. Колбанев, А. А. Шамин // Информационно-управляющие системы. 2019. № 5. С. 38–50.
7. Татарникова Т. М., Дзюбенко И. Н. Методы увеличения жизненного цикла сети Интернета вещей // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2018. № 5. С. 843–849.
8. Демидов Д. Е., Будылдина Н. В. Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3 (23). С. 50–58.
9. Bogatyrev V. A., Derkach A. N. Evaluation of a cyber-physical computing system with migration of virtual machines during continuous computing // Computers. 2020. Vol. 9, no. 2. P. 42.
10. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9131517> (дата обращения 20.01.2022).

Информация об авторах

Верзун Наталья Аркадьевна – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: Dina-125@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0126-2358>

Колбанёв Михаил Олегович – д-р техн. наук, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: mokolbanev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>

Романова Анна Александровна – аспирант кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: anya-romanova-07@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8940-8111>

References

1. Interv'yu 11.02.2018 g. v «Voskresnom vechere s V. Solov'evym» URL: <https://newsvideo.su/stream/83166> (data obrashcheniya 10.01.2022). (In Russ.).
2. Ventcel' E. S. Teoriya veroyatnostej. 10-e izd. M.: Vysshaya shkola, 2006. 575 s. (In Russ.).
3. Kuznecov K. A., Muthanna A. S. A., Kucheryavyj A. E. Taktil'nyj Internet i ego prilozheniya // Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2019. T. 7, № 2. S. 12–20. (In Russ.).
4. Kalachev A. V. Apparatnye i programmnye resheniya dlya besprovodnyh sensornyh setej. Barnaul: AltGU, 2016. URL: <http://elibrary.asu.ru/handle/asu/3377> (data obrashcheniya 14.01.2022). (In Russ.).
5. Kolbanev M. O. Verzun N. A., Omel'yan A. V. Ob energeticheskoj effektivnosti setej paketnoj peredachi dannyh // Izv. VUZov. Priborostroenie. 2014. T. 57, № 9. С. 42–46. (In Russ.).
6. Issledovanie modelej svyaznosti sensornyh setej / T. N. Astahova, N. A. Verzun, V. V. Kasatkin, M. O. Kolbanev, A. A. SHamin // Informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2019. № 5. С. 38–50. (In Russ.).
7. Tatarnikova T. M., Dzyubenko I. N. Metody uvelicheniya zhiznennogo cikla seti Interneta veshchej // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2018. № 5. С. 843–849. (In Russ.).
8. Demidov D. E., Budyldina N. V. Povyshenie vremeni zhizni besprovodnyh sensornyh setej s ispol'zovaniem nechetkoj logiki // Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem. 2018. № 3 (23). S. 50–58. (In Russ.).
9. Bogatyrev V. A., Derkach A. N. Evaluation of a cyber-physical computing system with migration of virtual machines during continuous computing // Computers. 2020. Vol. 9, no. 2. P. 42.
10. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9131517> (accessed: 20.01.2022).

Information about the authors

Nataylia A. Verzun – Cand. Sci. (Eng.), Assistant professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: Dina-125@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0126-2358>

Mikhail O. Kolbanev – Dr Sci. (Eng.), Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: mokolbanev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>

Anna A. Romanova – postgraduate student of the Department of information systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: anya-romanova-07@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8940-8111>

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; принята к публикации после рецензирования 25.02.2022; опубликована онлайн 30.03.2022.

Submitted 08.02.2022; accepted 25.02.2022; published online 30.03.2022.
