

УДК 004.7

Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова, В. В. Цехановский
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оценка энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях

Рассматривается беспроводная сенсорная сеть интернета вещей, объединяющая умные вещи с автономным электропитанием, которые обмениваются друг с другом информационными сообщениями. Время жизни или работоспособности подобной сети зависит от энергетической емкости аккумуляторов умных вещей. Показано, что существенное влияние на время работоспособности оказывает алгоритм множественного доступа, предназначенный для разделения общей физической среды взаимодействия между многими источниками нагрузки. Исследуются модели, отражающие взаимное влияние вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия умных вещей в эфирной среде и позволяющие найти баланс между качеством обслуживания и затратами электроэнергии. Получены зависимости среднего времени и вероятности своевременной доставки сообщений, формируемых умными вещами, и информационной скорости реального времени эфирной сети от мощности радиосигнала на передающей антенне.

Интернет вещей, вероятностно-временные характеристики, вероятностно-энергетические характеристики, беспроводная сенсорная сеть, мощность радиосигнала, умная вещь

Цифровая трансформация экономики предполагает переход на новые модели деятельности, которые становятся реальностью, благодаря возможностям цифровых технологий. К числу наиболее востребованных инфокоммуникационных технологий относят интернет вещей. Внедрение в различные сферы экономики разнообразных приложений, созданных на базе концепции интернета вещей, порой кардинально меняет устоявшуюся традиционную модель экономической деятельности и принципы взаимодействия всех ее компонент и участников.

Инфраструктурной основой, обеспечивающей взаимодействие умных вещей в киберфизических системах, являются беспроводные сенсорные сети (БСС). Умные вещи – это устройства, которые способны взаимодействовать по беспроводной сети между собой и с окружающей их средой без участия человека [1], [2]. Как правило, умные вещи реализуются с автономным питанием и обладают ограниченным энергоресурсом [3]. Время жизни (или время работоспособности) БСС определяется временем жизни каждой вещи. Поэтому при исследовании процессов функционирования БСС важной задачей является оценка энергетических характеристик умной вещи [4], [5].

В качестве характеристик взаимодействия умных вещей с автономным питанием в БСС учитываются вероятностно-временные характеристики (ВВХ) процесса передачи сообщений и вероятностно-энергетические характеристики. Случайный процесс передачи сообщений описывается средним временем и вероятностью своевременной доставки сообщения, а также информационной скоростью реального времени сети, а процесс энергопотребления умной вещью – мощностью радиосигнала, формируемого на передающей антенне. Допустимый уровень мощности радиосигнала зависит от уровня (мощности) помех в радиоканале.

Можно предположить, что увеличение мощности радиосигнала на выходе передающей антенны умной вещи, с одной стороны, повысит надежность передачи сигнала и позволит добиться улучшения качества обслуживания, но, с другой стороны, может привести к повышению трат энергии умными вещами и, соответственно, к уменьшению срока их жизни. Для продуктивной работы умных вещей и БСС в целом, а также для увеличения времени жизни сети важно найти баланс между качеством обслуживания и затратами электроэнергии, т. е. подобрать такую мощность радиосигнала, которая обеспечит требуемую ско-

рость доставки сообщения. Таким образом, исследование взаимовлияния вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик БСС – актуальная задача современных инфокоммуникаций, а эффективность ее решения существенно влияет на перспективы внедрения БСС в практику различных сфер деятельности.

При моделировании информационного взаимодействия умных вещей в БСС берутся во внимание особенности двух нижних уровней модели ЭМВОС (физического и канального).

На физическом уровне учитываются физические параметры взаимодействия узлов беспроводной сети: N – число умных вещей, D – расстояние между ними, м; B – частота радиоканала, Гц; $P_{пер}$ и $P_{пр}$ – мощность радиосигнала на передающей и приемной антенне, Вт; $P_{шум}$ – мощность шума в радиоканале, Вт и пр.

Зависимость между $P_{пер}$ и $P_{пр}$ задается известной формулой Г. Фрииса (Harald Friis) [6]:

$$\frac{P_{пр}}{P_{пер}} = C_{пр} C_{пер} \left(\frac{\gamma}{4\pi D} \right)^2,$$

где $C_{пер}$ – коэффициент усиления передающей антенны; $C_{пр}$ – коэффициент усиления приемной антенны; γ – длина волны передаваемого радиосигнала, м.

В соответствии с формулой Шеннона–Хартли пропускная способность радиоканала определяется следующим соотношением:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{пер}}{P_{шум}} \right). \quad (1)$$

Рассматривается БСС, состоящая из однотипных умных вещей, т. е. одинаковы форматы и длины передаваемых сообщений, требования к качеству доставки и интенсивность передачи для каждой. Входной поток сообщений от каждой умной вещи – пуассоновский с интенсивностью λ , сооб/с.

На канальном уровне определяются формат и длина передаваемых сообщений и режимы их передачи [7]. Сообщения передаются в кадрах длиной n_k , бит, каждый кадр содержит метаданные и непосредственно передаваемую информацию длиной k , бит. Предположим прямой режим передачи кадров (без переспросов) с передачей в обратном направлении квитанции-уведомления о правильности (или неправильности) приема.

На канальном уровне для разделения общей эфирной среды между умными вещами применяется синхронно-временной метод множественного доступа [7], который предусматривает, что все время использования радиоканала поделено на циклы, а циклы – на временные окна, каждое длительностью $T_{ок}$, с, по числу передающих умных вещей (т. е. на N окон). В каждом цикле в свое временное окно право на передачу одного кадра имеет только одна определенная умная вещь, если же у нее нет сообщения для передачи, радиоканал простаивает [7]. Также в длительность временного окна входит время, которое требуется на передачу в обратном направлении (узлу передатчика от узла приемника) квитанции, и время, затрачиваемое на декодирование кадра и квитанции. Окончательная формула для расчета длительности временного окна имеет следующий вид:

$$T_{ок} = \frac{n_k + n_{кв}}{B \log_2 \left(1 + \frac{P_{пер}}{P_{шум}} \right)} + t_{pij} + t_{д.к} + t_{рji} + t_{д.к.кв}, \quad (2)$$

где $n_{кв}$ – длина квитанции, бит; t_{pij} и $t_{рji}$ – времена распространения сигнала от i -й станции к j -й и в обратном направлении соответственно, с; $t_{д.к}$ и $t_{д.к.кв}$ – время декодирования кадра и квитанции, с; в (2) входит также пропускная способность канала, которая оценивается по формуле Шеннона–Хартли (1).

Для оценки выбранных характеристик случайного процесса передачи сообщений в БСС используется система массового обслуживания M/G/1 [8], для которой известно уравнение Хинчина–Полячека, преобразования Лапласа–Стилтьеса (ПЛС), функции распределения времени ожидания обслуживания:

$$W(s) = \frac{s(1-\rho)}{s - \lambda + \lambda B(s)}, \quad (3)$$

где s – параметр ПЛС; ρ – загрузка (вероятность занятости канала передачи: $\rho = \lambda N T_{ок}$), $B(s)$ – ПЛС непосредственно времени обслуживания (в данном случае передачи сообщения), которое при использовании синхронно-временного доступа к среде передачи задается следующим соотношением:

$$B(s) = e^{-s N T_{ок}}. \quad (4)$$

Совокупность выражений (1)–(4) задает математическую модель процесса информационного взаимодействия узлов в БСС интернета ве-

щей. На основе этих выражений получим формулы для расчета ВВХ процесса передачи сообщений в БСС:

1) среднего времени доставки сообщения, с:

$$\bar{t} = \frac{NT_{\text{ок}} (\lambda NT_{\text{ок}} - 2)}{2(\lambda NT_{\text{ок}} - 1)}; \quad (5)$$

2) вероятность своевременной доставки сообщения:

$$Q = \frac{\frac{1}{T_{\text{доп}}} (1 - \lambda NT_{\text{ок}})}{\frac{1}{T_{\text{доп}}} \lambda + \lambda e^{-\frac{1}{T_{\text{доп}}} NT_{\text{ок}}}} e^{-\frac{1}{T_{\text{доп}}} NT_{\text{ок}}}, \quad (6)$$

где $\overline{T_{\text{доп}}}$ – среднее допустимое время старения сообщений, с. Выражение (6) представлено для случая стохастического ограничения на допустимое время старения сообщений;

3) информационная скорость реального времени сети, бит/с:

$$R_{\text{с.р.в}} = R_{\text{с.о.п}} Q, \quad R_{\text{с.о.п}} = kN\lambda, \quad (7)$$

где $R_{\text{с.о.п}}$ – информационная скорость общего применения БСС, бит/с.

Полученные выражения (5)–(7) позволяют получить зависимости вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик процесса функционирования БСС (процесса доставки сообщения в БСС интернета вещей).

Проведен расчет для следующего набора значений исходных данных: число узлов в БСС $N = 10\,000, 12\,000, 15\,000$; длина передаваемых кад-

ров $n_{\text{к}} = 256$ бит; длина информационной части передаваемых кадров $k = 128$ бит; длина квитанции $n_{\text{кв}} = 16$ бит; частота радиоканала $B = 2.4$ ГГц; среднее допустимое время старения сообщений $\overline{T_{\text{доп}}} = 80$ с; время кодирования и декодирования кадра и квитанции 10^{-8} с.

На рис. 1 представлены графики зависимости среднего времени доставки сообщений от интенсивности их появления для одного узла БСС

(рис. 1, а) и от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ (рис. 1, б) при различных значениях числа узлов в БСС.

Из графиков на рис. 1, а, видна очевидная закономерность: по мере увеличения числа умных вещей в БСС возникает ее перегрузка и сеть теряет эргодичность. Так, при числе узлов $N = 15\,000$ сеть теряет эргодичность при интенсивности равной ~ 2.7 сооб/с.

Для увеличения диапазона рабочей интенсивности БСС требуется повышение ее пропускной способности. Для того чтобы «вернуть» сети эргодичность, можно увеличить скорость передачи или число радиоканалов либо уменьшить нагрузку на БСС (интенсивность или число источников нагрузки). Еще одним возможным способом, который часто не учитывается в исследованиях сетей, является улучшение отношения мощности сигнала к мощности шума.

На рис. 1, б показана зависимость среднего времени доставки от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$. Из гра-

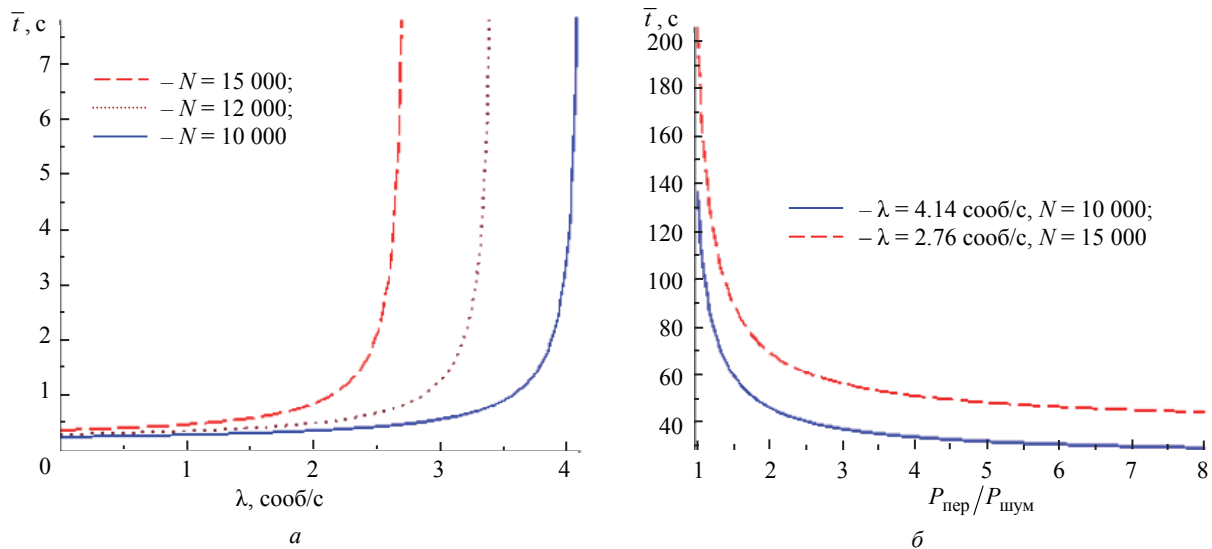


Рис. 1

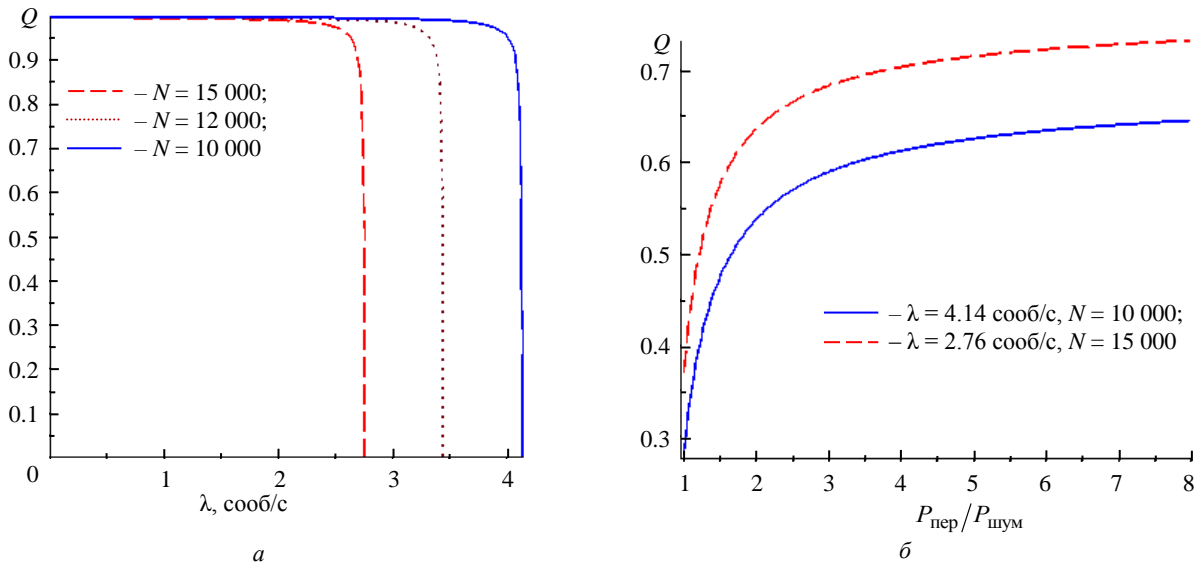


Рис. 2

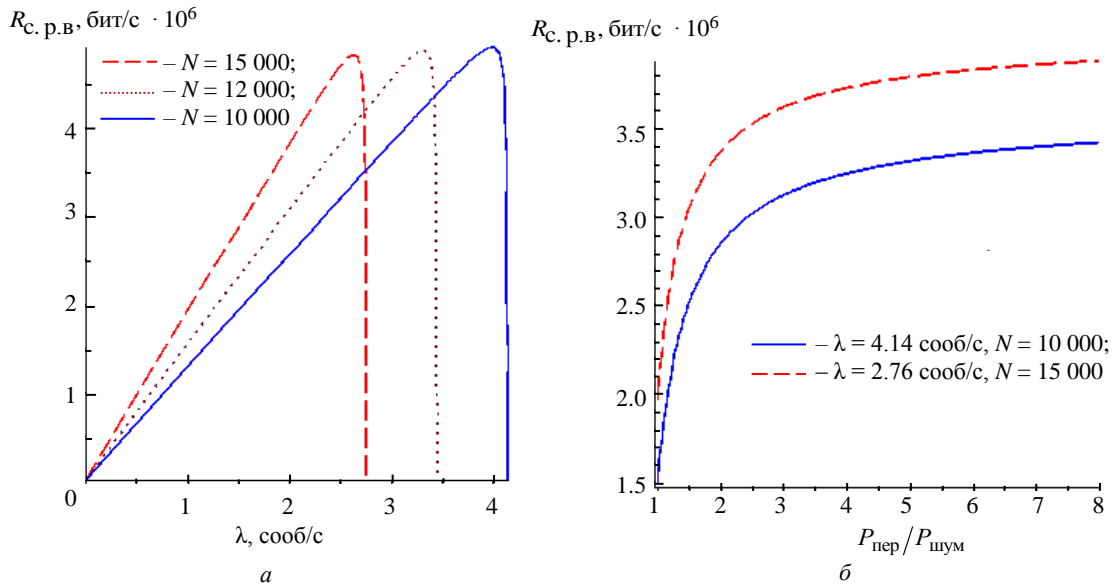


Рис. 3

фиков зависимостей видно, что увеличение этого отношения позволяет существенно уменьшить среднее время доставки сообщения в БСС.

Подобную ситуацию иллюстрируют также графики, представленные на рис. 2 и 3.

На рис. 2 показаны графики зависимости вероятности своевременной доставки сообщений от интенсивности сообщений от одного узла БСС (рис. 2, а) и от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ (рис. 2, б) при различных значениях числа узлов в БСС. На рис. 3

показаны графики зависимости информационной скорости реального времени от интенсивности сообщений от одного узла БСС (рис. 3, а) и от от-

ношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ (рис. 3, б) при различных значениях числа узлов в БСС.

Рост числа умных вещей в БСС ведет к ее перегрузке: сеть теряет эргодичность и вероятность того, что сообщение будет доставлено своевременно, стремится к 0, соответственно, и информационная скорость реального времени падает до 0. Так, при числе узлов $N = 15\,000$ сеть теряет эргодичность при интенсивности равной ~ 2.7 сооб/с.

Добиться увеличения диапазона рабочих интенсивностей позволяет увеличение отношения мощности сигнала к мощности шума (рис. 2, б и рис. 3, б).

В статье построена модель процесса функционирования беспроводной сенсорной сети интернета вещей, которая учитывает протоколы функционирования сети на физическом и канальном уровнях. Модель предполагает, что на физическом уровне передаваемые сигналы подвергаются воздействию белого шума, на канальном уровне используется протокол синхронного-временного множественного доступа узлов к общей среде передачи.

Получены выражения для оценки среднего времени доставки сообщений, вероятности их своевременной доставки и информационной скорости сети реального времени.

Произведен численный расчет зависимости этих вероятностно-временных характеристик от мощности сигнала на передающих антеннах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахова Т. Н., Колбанев М. О., Романова А. А. Умное сельскохозяйственное поле на основе интернета вещей // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. СПОИСУ. СПб., 2018. Вып. 5. С. 201–202.
2. Обзор интернета вещей. URL: <https://iotas.ru/files/documents/wg/T-REC-Y.2060-201206-!!!PDF-R.pdf> (дата обращения 20.11.2019).
3. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011. 312 с.
4. Росляков А. В. Оценка энергоэффективности будущих сетей // Информ. технологии и телеком. 2015. № 3 (11). С. 54–64.

5. Росляков А. В. Оценка энергопотребления будущих сетей // Электросвязь. 2016. № 8. С. 43–50.
6. Уоллес Р. Максимальная дальность связи по радиоканалу в системе: как этого добиться? // Новости электроники. 2015. № 11. С. 3–13.
7. Основы моделирования информационных систем множественного доступа: учеб. пособие / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, И. Л. Коршунов, С. Ю. Микадзе // СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2015. 142 с.
8. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.

N. A. Verzun, M. O. Kolbanev, A. A. Romanova, V. V. Tsehanovsky
Saint Petersburg Electrotechnical University

EVALUATION OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF MULTIPLE ACCESS IN WIRELESS NETWORKS

We consider the wireless sensor network of the Internet of things, combining smart things with Autonomous power supply, which exchange information messages with each other. The lifetime or performance of such a network depends on the energy capacity of the batteries of smart things. It is shown that the algorithm of multiple access intended for division of the General physical environment of interaction between many sources of loading renders essential influence on time of working capacity. The models reflecting the mutual influence of probabilistic-time and probabilistic-energy characteristics of information interaction of smart things in the ethereal environment and allowing to find a balance between the quality of service and energy costs are investigated. The dependences of the average time and probability of timely delivery of messages generated by smart things, and the information speed of the real-time terrestrial network on the power of the radio signal on the transmitting antenna are obtained.

Internet of things, probabilistic-time characteristics, probabilistic-energy characteristics, wireless sensor network, radio signal power, smart thing
