

Научная статья

УДК 621.39

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-67-74



# Методы распределения трафика в гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности

- Андрей Евгеньевич Кучерявый, akouch@sut.ru
- Дарина Владимировна Окунева ✉, okuneva.dv@sut.ru
- Александр Иванович Парамонов, paramonov@sut.ru
- Фьюк Ньян Хоанг, khoang.fn@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Аннотация:** В работе приводятся модель и метод распределения трафика в гетерогенной сети Интернета вещей (ИВ), построенной на базе комплексных каналов связи, состоящих из нескольких подканалов, использующих различные технологии передачи радио-, оптических, акустических и других сигналов. Разработанные методы распределения трафика по подканалам гетерогенной сети ИВ позволяют решать задачу повышения эффективности сети за счет использования разнородных ресурсов. Результатом исследования являются методы распределения трафика в форме задач оптимизации для различных стратегий поиска решения. Полученные результаты могут быть использованы при построении гетерогенных сетей ИВ и сетей роботизированных систем.

**Ключевые слова:** Интернет вещей, гетерогенная сеть, радиоканал, оптический канал, аудиоканал, передача данных, распределение трафика, распределение ресурсов

**Ссылка для цитирования:** Кучерявый А.Е., Окунева Д.В., Парамонов А.И., Хоанг Ф.Н. Методы распределения трафика в гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 67–74. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-67-74. EDN:RTNVEU

## Methods of Traffic Distribution in a Heterogeneous High-Density Internet of Things Network

- Andrey Kucheryavy, akouch@sut.ru
- Darina Okuneva ✉, okuneva.dv@sut.ru
- Alexandr Paramonov, paramonov@sut.ru
- Fyock Huang, khoang.fn@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Abstract:** The paper presents a model and method for distributing traffic in a heterogeneous Internet of Things (IoT) network built on the basis of complex communication channels consisting of several subchannels using various signal transmission technologies, for example, radio, optical and acoustic. The developed methods for distributing traffic across subchannels of a heterogeneous IoT network make it possible to solve the problem of increasing network efficiency through the use of heterogeneous resources. The result of the study is methods of traffic distribution in the form of optimization problems for various solution search strategies. The results obtained can be used to build heterogeneous IoT networks and networks of robotic systems.

**Keywords:** Internet of things, heterogeneous network, radio channel, optical channel, audio channel, data transmission, traffic distribution, resource distribution

**For citation:** Koucheryavy A., Okuneva D., Paramonov A., Huang F. Methods of Traffic Distribution in a Heterogeneous High-Density Internet of Things Network. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(2):67–74. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-67-74. EDN:RTNVEU

## Введение

Развитие Интернета вещей (ИВ) является одним из основных направлений эволюции сетей связи [1–9]. Оно включает в себя множество разнообразных направлений в различных прикладных областях: бытовые устройства, оборудование промышленных предприятий, медицина, транспорт, безопасность, военные приложения и др. Большое число устройств, подключенных к сети связи, создает потенциальные проблемы обслуживания трафика [10–13].

В большинстве приложений для организации сети ИВ используются технологии сетей подвижной связи общего пользования или организации локальных беспроводных сетей связи [14, 15] с устройствами ограниченной мощности. Обе основаны на использовании технологий радиосвязи, достоинством которых является энергоэффективность и возможность обеспечивать требования к качеству обслуживания. Однако в условиях высокой плотности устройств [16–19] и высокой интенсивности трафика появляются риски возникновения локальных перегрузок сети и, как следствие, падения ее пропускной способности, в особенности это относится к локальным mesh-сетям.

Если сеть ИВ ориентирована на выполнение определенных (однообразных) задач, например, сбор показаний счетчиков расхода электроэнергии, то угроза перегрузок может быть нивелирована перераспределением трафика во времени.

Если же сеть выполняет разнообразные задачи, например, обеспечивает взаимодействие роботизированных устройств в группе или взаимодействие с оператором, передачу видеопотока и др., то трафик может сочетать в себе свойства интерактивного и потокового (трафика) с различными требованиями ко времени доставки различных сообщений и к скорости передачи. Решить данную задачу в условиях ограниченного ресурса (диапазон частот) с использованием радиосвязи может быть сложно или невозможно. В данной работе предлагается для решения использовать набор технологий, использующих различные способы передачи.

Методы передачи данных с использованием радио-, акустических, оптических и других видов сигналов хорошо известны и широко используются (или использовались) в различных прикладных задачах. Ввиду того, что ресурс радиочастотного спектра ограничен и может быть недостаточен для обслуживания трафика, применение акустического, оптического и иных ресурсов, позволит повысить возможности сети в части доставки данных.

## Сравнительный анализ технологий беспроводной связи

Проведем сравнение наиболее известных технологий беспроводной связи по ряду основных характеристик, таких как: рабочая частота, дальность связи, достижимая скорость передачи данных, задержка доставки и энергопотребление. Разумеется, точное сравнение требует идентичных условий, и результаты его могут быть различными в зависимости от этих условий. Приведем лишь ориентировочные значения упомянутых характеристик, которые достижимы при благоприятных условиях и характеризуют, скорее всего, порядок значений, а не конкретные численные оценки. Такие характеристики, как энергопотребление и время доставки, зависят от конкретных применяемых технологий и условий эксперимента, поэтому приведем лишь лексические сравнительные оценки.

Полученные в результате анализа данные из соответствующих стандартов и технических описаний приведены в таблице 1. Все технологии условно разделены на две группы: технологии ближнего и дальнего действия. Для первой группы дальность связи ограничена сотнями метров, а для второй превышает единицы километров. Под задержкой доставки понимается время распространения сигнала в среде. Естественно, что для технологий радио- и оптической связи время распространения сигналов существенно меньше, чем для акустических сигналов. Однако, в ряде случаев, для технологий ближнего действия это может быть не слишком существенно. Например, при скорости передачи данных в акустическом канале 2400 бит/с и расстоянии 100 м (скорости звука около 335 м/с) время распространения сигнала (0,30 с) будет близко ко времени передачи пакета размером 100 байт (0,33 с). Если требования к задержке не слишком высоки, то использование акустического канала может быть равноценно радио- и оптическим каналам. По другим показателям (кроме времени доставки) рассмотренные технологии ближнего действия вполне сопоставимы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при определенных, весьма вероятных при организации сети ИВ высокой плотности, условиях радио-, оптические и акустические технологии передачи данных вполне «конкурентоспособны» и могут дополнять друг друга в целях повышения эффективности функционирования системы связи.

## Модель сети связи и постановка задачи

Будем полагать, что все устройства находятся в условиях, позволяющих распространяться радио-,

акустическим и оптическим сигналам. Ограничимся рассмотрением только этих трех типов сигналов. Передача данных возможна с использованием как одной, так и двух или трех технологий одновременно. Дальность связи при использовании различных технологий  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3...$ ) и такие параметры канала, как пропускная способность  $B_i$  и

задержка доставки данных  $\tau_i$ , различны. На рисунке 1а приведена модель гетерогенного канала, состоящая из радио-, инфракрасного и акустического подканала. Рисунок 1б демонстрирует модель сети в двумерном пространстве, зона связи шлюза в которой состоит из зон связи радио-, инфракрасного и акустического подканалов.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение беспроводных технологий ближнего и дальнего действия

TABLE 1. Comparison of Wireless Technologies Short-Range and Long-Range

Характеристики	Технологии связи												
	ближнего действия									дальнего действия			
	Blue-tooth	Blue-tooth Low Energy	6LoWPAN	ZigBee	RFID	Wi-Fi Hallow	Z-WAVE	Инфракрасный	Акустика в воздухе	LoRa	SigFox	NB-IoT	Подводная акустика
Рабочая частота, ГГц	2,4	2,4	0,868 (Европа) 0,915 (США) 2,4 (глоб.)	0,868 0,915 2,4	125 КГц – 5,8 МГц	0,9	0,868 (Европа) 0,908 (США)	300–430 ТГц	20 Гц – 20 кГц	868 (Европа) 915 (США) 433 (Азия)	868 (Европа) 902 (США)	900, 1800, Лицензированный 2G/3G/4G/LTE диапазон частот	10 Гц – 1 МГц
Дальность связи, м	30	50	100	100	0,1–200	1000	30*** 100****	100	сотни метров	5*/15**	10*/50**	1*/15**	до тысяч
Скорость передачи данных, Мбит/с	1–3	1	0,25	0,25	4	0,15–40	0,1	2,4 кбит/с – 1 Гбит/с	10 кбит/с – 1 Гбит/с	0,25–50	0,1 (uplink) 0,6 (down-link)	250	1 кбит/с – 1 Мбит/с
Задержка доставки	очень малая	очень малая	малая	малая	очень малая	очень малая	малая	малая	малая	малая	средняя	очень малая	высокая
Энергопотребление	малое	очень малое	малое	малое	сверх-низкое****	малое	очень низкое	малое	малое	малое	очень малое	малое	высокое

Примечание: \* – в городских агломерациях  
 \*\* – в сельских агломерациях  
 \*\*\* – в помещениях  
 \*\*\*\* – на открытом воздухе  
 \*\*\*\*\* – зависит от частоты

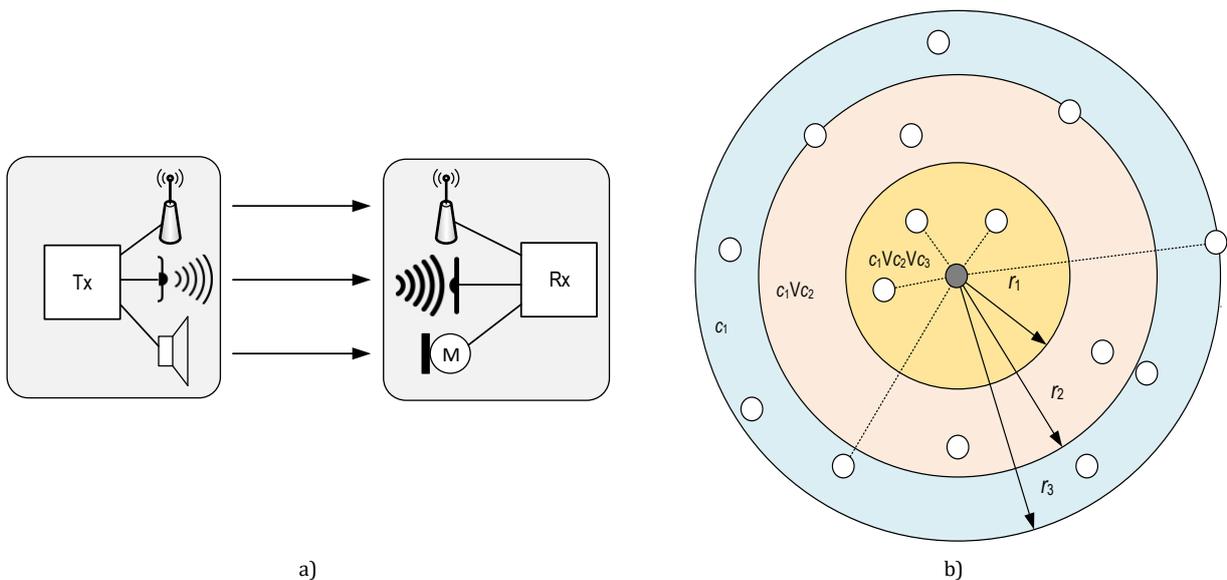


Рис. 1. Модели гетерогенного канала (а) и гетерогенной сети (б) ИВ

Fig. 1. Models of Heterogeneous Communication Channel (a) and Heterogeneous Network (b) IoT

Будем полагать, что основными показателями функционирования сети являются: время доставки данных  $\tau$ ; скорость их передачи  $\beta$ ; вероятность их потери  $\gamma$ . В сети могут передаваться данные услуг, которые в различной степени чувствительны к задержке, потерям и скорости передачи. Например, передача команд управления может иметь повышенные требования ко времени доставки и вероятности потерь, передача видео – повышенные к скорости передачи и не слишком высокие к вероятности потерь. Передача данных о температуре воздуха не критична ко времени доставки, потерям и скорости передачи.

Будем считать, что канал состоит из  $m$  подканалов, реализованных с помощью различных технологий. При передаче данных возможно использовать любой из подканалов, каждый из которых характеризуется своим набором параметров.

В сети присутствуют конкурирующие за ресурсы потоки трафика, которые имеют различную значимость для выполнения задач. Сеть располагает  $m$  видами ресурсов, которыми являются пропускные способности каналов, использующих три различные технологии  $B_i$ .

**Метод распределения трафика в гетерогенной сети ИВ**

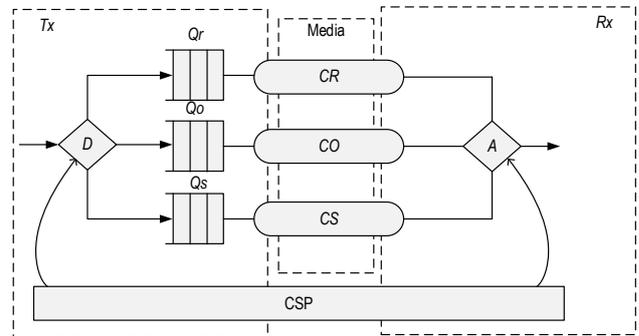
Когда появляется необходимость передачи данных, требуется решить задачу выделения ресурсов для этой цели. Сделаем допущение, что передача данных может быть описана некими условными расходами. Эти расходы тем выше, чем ниже показатель качества. Тогда выбор подканала можно свести к задаче распределения трафика по подканалам с целью минимизации расходов на передачу:

$$\begin{aligned} \{\eta_i^*\} = \min_{\eta_i, i=1..m} \sum_{i=1}^m \omega_i(d_i, \eta_i, \psi_i), \\ d_i \geq 0, \sum_{i=1}^m \eta_i = 1, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $d_i$  – объем передаваемых данных;  $\eta_i$  – доля данных, которые будут переданы через  $i$ -й подканал;  $\omega_i(.)$  – функция, отражающая зависимость условных расходов от передачи по  $i$ -му подканалу;  $\psi_i$  – набор параметров, характеризующих подканал.

Модель гетерогенного канала связи при использовании радио-, оптического и акустического подканалов приведена на рисунке 2. Элементы модели  $Q_r, Q_o, Q_s$  – это очереди для данных, ожидающих передачи по радио-, оптическому и акустическому каналам.  $CR, CO, CS$  – радио-, оптический и акустический подканалы. Элементы  $D$  и  $A$  – средства распределения и агрегирования трафика по подканалам, соответственно. Элемент CSP – протокол выбора

канала, который должен обеспечивать выбор нужного подканала на основе данных о состоянии каналов и о требованиях к качеству обслуживания трафика.



**Рис. 2. Модель гетерогенного канала связи при использовании трех подканалов**

*Fig. 2. Model of Heterogeneous Communication Channel Using Three Subchannels*

Время, необходимое для передачи данных по подканалу  $\tau_i$ , определяется многими факторами: скоростью передачи данных в канале, протоколом гарантированной или негарантированной доставки, вероятностью битовой ошибки, способом кодирования данных, способом модуляции, отношением сигнал/шум.

В этой работе мы не будем описывать детально модель подканала, а будем считать, что время доставки данных в нем описано некоторой функцией  $\tau_i = \tau_i(d_i, \psi_i)$ , где  $\psi_i$  – это набор параметров, характеризующих подканал.

Скорость передачи данных по подканалу может быть описана функцией  $\beta_i = \beta_i(d_i, \psi_i)$ . Вероятность потерь данных может быть описана функцией  $\gamma_i = \gamma_i(d_i, \psi_i)$ .

Параметры подканалов  $\psi_i$  в общем случае могут содержать как характеристики их потенциальных возможностей, так и характеристики использования и качества обслуживания в настоящее время или прогнозы этих характеристик на некоторый интервал времени:

$$\omega_i(d_i, \psi_i) = \alpha \tau_i + \phi \beta_i + \mu \gamma_i, \tag{2}$$

где  $\psi_i = \{\alpha, \phi, \mu\}$  – значения коэффициентов  $\alpha, \phi, \mu$ , характеризуют условные расходы из-за задержки, скорости передачи и потерь, соответственно.

Как видно из рисунка 1b, доминирующее значение при выборе подканала имеет дальность связи, обеспечиваемая подканалами, реализованными с использованием различных технологий. Например, если акустический подканал будет иметь наихудшие энергетические характеристики, однако в случае перегрузки или невозможности использования радио- и оптического каналов он может стать наиболее выгодным средством передачи. При условии невысоких требований ко времени доставки он

также может стать удобным средством передачи, не занимающим ресурсов радиоканала, который может потребоваться для передачи критичных к задержке данных. Тогда проблему оптимизации целесообразно формулировать не как задачу обеспечения максимального качества, а как – обеспечение требований к качеству, т. е. приблизить показатели к заданным значениям.

С учетом вышесказанного, (2) может иметь следующую формулировку:

$$\omega_i(d_i, \psi_i) = \alpha(\tau_i - \tau_0)^2 + \phi(\beta_i - \beta_0)^2 + \mu(\gamma_i - \gamma_0)^2, \quad (3)$$

где значения  $\tau_0, \beta_0, \gamma_0$  – это целевые значения задержки, скорости передачи данных и вероятности потерь, соответственно.

В данной формулировке смысл выражения (3) – это плата (штраф) за отклонение от заданных показателей качества, в том числе за их слишком высокие значения. С учетом (3) решением задачи (1) будет наибольшая близость параметров качества обслуживания к целевым. Такая постановка задачи дает возможность избежать расходов ценных ресурсов, например, ресурсов радиоканала, когда в этом нет необходимости.

В таком случае может иметь место простаивание радиоканала в то время, когда он не занят для передачи критичного ко времени трафика. Однако это не всегда является недостатком, так как снижает вероятность занятости общего ресурса, следовательно, повышает качество обслуживания таких данных (если принять во внимание, что в сети работает множество подобных узлов).

Можно заметить, что решение задач (1 и 3) основано на различных стратегиях распределения ресурса. В задаче (1) стратегия состоит в выделении доступного максимума ресурсов для достижения максимальных значений показателей качества. В задаче (3) стратегия состоит в выделении достаточного ресурса для достижения заданных значений показателей качества. То есть такие стратегии имеют названия «максимальной стратегии» и «осторожной стратегии», соответственно.

Применение «максимальной стратегии» приведет к наибольшему использованию тех ресурсов, которые позволяют получить максимум качества обслуживания, т. е. ресурсов радиоканала. При их нехватке остальные же ресурсы будут использоваться по остаточному принципу.

Применение «осторожной стратегии» приводит к более равномерному использованию различных ресурсов, которые позволяют получить достаточное качество обслуживания. Остальные же ресурсы будут использоваться аналогично.

## Устойчивость функционирования сети связи

Под устойчивостью чаще всего принято понимать свойство сохранять значения конструктивных и режимных параметров в заданных пределах, т. е. способность сохранять функциональность в условиях воздействия различного рода деструктивных факторов. В частности, ГОСТ Р 53111-2008 дает следующее определение устойчивости: «Устойчивость сети связи – способность сети связи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов» [20, 21].

Наиболее распространенным фактором являются отказы аппаратных средств, которые характеризуются коэффициентом готовности. Для сетей беспроводной связи, использующих радиосвязь, наиболее существенными являются такие факторы деструктивных воздействий, как электромагнитные сигналы как естественного, так и искусственного происхождения (шумовые сигналы). Их воздействие приводит к уменьшению доступного ресурса канала. Аналогичные факторы имеют место и в каналах передачи оптических и акустических сигналов. В сетях связи высокой плотности к таким факторам следует отнести и сигналы собственных узлов сети, производимые при обслуживании трафика. В этом контексте беспроводная сеть подвержена риску перегрузок трафиком. Этот фактор является существенным, поскольку для передачи сигналов большим числом устройств используется общая физическая среда.

При использовании различных технологий передачи сигналов в атмосфере, можно считать, что используются и различные среды передачи, поскольку электромагнитные, оптические и акустические сигналы хотя и распространяются в общей среде, но не оказывают друг на друга взаимных влияний.

Таким образом, если устойчивость сети оценивать возможностью передачи данных хотя бы по одному из подканалов (вероятностью связности или доступности) [22, 23], то ее можно характеризовать вероятностью доступности связи как:

$$p_a = 1 - (1 - p_{CR})(1 - p_{CO})(1 - p_{CS}), \quad (4)$$

где  $p_{CR}, p_{CO}, p_{CS}$  – вероятности доступности радио-, оптического и акустического подканалов.

Очевидно, что вероятность доступности связи для группы подканалов, в соответствии с (4), по крайней мере, не меньше, чем для одного подканала. Например, выигрыш при дополнении системы оптическим и акустическим каналами по отношению к одному радиоканалу, можно оценить как снижение вероятности недоступности связи в  $\frac{1}{(1-p_{CO})(1-p_{CS})}$  раз.

Введем условную величину затрат, которые необходимы для обеспечения доступности соответствующего подканала  $v_i$ . Тогда общие затраты на обеспечение доступности системы составят:

$$E(p_i) = \sum_{i=1}^m p_i v_i, \quad q_a^{(0)} = \prod_{i=1}^m (1 - p_i), \quad (5)$$

где  $q_a^{(0)}$  – заданные требования недоступности системы.

На основе (5) можно определить задачу оптимизации [14] системы с позиции выбора доступностей каждого из подканалов как:

$$O = \min_{p_i, i=1 \dots m} \sum_{i=1}^m p_i v_i, \quad q_a^{(0)} = \prod_{i=1}^m (1 - p_i), \quad (6)$$

$$0 \leq p_i \leq 1.$$

Задачу оптимизации (6) следует рассматривать как формальный подход к выбору состава технических средств для обеспечения заданной вероятности доступности связи. Решением (6) является значения вероятностей доступности отдельных подканалов, которые можно рассматривать как исходные данные для выбора ресурсов подканала (его пропускной способности) при заданной величине нагрузки (трафика).

### Заключение

Во-первых, применение нескольких технологий организации канала связи, когда это допустимо на практике, дает возможность распределить трафик с различными требованиями к параметрам обслуживания

по подканалам и уменьшить вероятность занятости ресурсов для критичного к качеству обслуживания трафика. Также это дает возможность повысить устойчивость связи к промышленным и иным помехам, а также к изменениям условий распространения сигналов.

Во-вторых, для распределения трафика по подканалам предлагается решать задачу оптимизации [24, 25], в которой минимизируется общая величина условных затрат, которые определяются параметрами качества обслуживания [26, 27]. Предлагаются две возможные постановки таких задач: максимизация качества и приближение показателей качества к целевым значениям.

В-третьих, разработанные методы распределения трафика по подканалам гетерогенной сети ИВ позволяют решать задачу повышения эффективности сети за счет использования разнородных ресурсов. Такой подход позволяет обеспечить требования к качеству обслуживания и повысить устойчивость сети к различным факторам, destructively влияющим на показатели функционирования сети.

В-четвертых, введение группы подканалов позволяет повысить устойчивость сети в смысле доступности связи между ее узлами за счет введения группы подканалов, использующих различные среды распространения сигналов. Целесообразность такого решения можно рассматривать как задачу оптимизации условных расходов на построение системы, определив условные стоимость обеспечения доступности каждого из подканалов.

### Список источников

1. Киричек Р.В., Парамонов А.И., Прокопьев А.В., Кучерявый А.Е. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2014. Т. 2. № 4. С. 29–41. EDN:TKSXPT
2. Hammoudeh M., Newman R. Information extraction from sensor networks using the Watershed transform algorithm // Information Fusion. 2015. Vol. 22. PP. 39–49. DOI:10.1016/j.inffus.2013.07.001
3. Basha A.R. A Review on Wireless Sensor Networks: Routing // Wireless Personal Communications. 2022. Vol. 125. Iss. 1. PP. 897–937. DOI:10.1007/s11277-022-09583-4
4. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A Literature Review // Journal of Computer and Communications. 2015. Vol. 3. Iss. 5. PP. 164–173. DOI:10.4236/jcc.2015.35021
5. Fadel E., Gungor V.C., Nassef L., Akkari N., Malik M.G.A., Almasri S., et al. A survey on wireless sensor networks for smart grid // Computer Communications. 2015. Vol. 71. PP. 22–33. DOI:10.1016/j.comcom.2015.09.006
6. Laghari A.A., Wu K., Laghari R.A. Retraction Note: A Review and State of Art of Internet of Things (IoT) // Archives of Computational Methods in Engineering. 2023. Vol. 30. P. 5105. DOI:10.1007/s11831-023-09985-y
7. Gulati K., Boddu R.S.K., Kapila D., Bangare S.L., Chandnani N., Saravanan G. A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT) // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 51. Part 1. PP. 161–165. DOI:10.1016/j.matpr.2021.05.067
8. Sobouti M.J., Rahimi Z., Mohajezadeh A.H., Hosseini S.S.A., Ghanbari R., Marquez-Barja J.M., et al. Efficient Deployment of Small Cell Base Stations Mounted on Unmanned Aerial Vehicles for the Internet of Things Infrastructure // IEEE Sensors Journal. 2020. Vol. 20. Iss. 13. PP. 7460–7471. DOI:10.1109/JSEN.2020.2973320
9. Парамонов А.И., Бушеленков С.Н. Анализ методов повышения эффективности сетей IoT // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 2. С. 36–52. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-2-36-52. EDN:JNZPDL
10. Елагин В.С., Васин А.С. Анализ моделей управления сетевыми ресурсами в сетях 5G // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 5. С.32–41. DOI:10.36724/2072-8735-2023-17-5-32-41. EDN:UEIDEK
11. Карташевский И.В., Волков А.Н., Киричек Р.В. Анализ среднего времени задержки в системе массового обслуживания при обработке коррелированного трафика // Электросвязь. 2019. № 3. С. 41–50. EDN:ZABEST

12. Киричек Р.В., Кулик В.А. Исследование и генерация трафика промышленного Интернета Вещей // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 27–36. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-3-27-36. EDN:JQBTYU
13. Liao Z., Han G., Wang H., Liu L. Multistation-Based Collaborative Charging Strategy for High-Density Low-Power Sensing Nodes in Industrial Internet of Things // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8. Iss. 9. PP. 7575–7588. DOI:10.1109/JIOT.2020.3039556
14. Shen X., Liao W., Yin Q. A Novel Wireless Resource Management for the 6G-Enabled High-Density Internet of Things // IEEE Wireless Communications. 2022. Vol. 29. Iss. 1. PP. 32–39. DOI:10.1109/MWC.003.00311
15. Chen N., Okada M. Toward 6G Internet of Things and the Convergence With RoF System // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8. Iss. 11. PP. 8719–8733. DOI:10.1109/JIOT.2020.3047613
16. Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2020. № 1. С. 44–48. DOI:10.34832/ELSV.2020.2.1.006. EDN:IWANZO
17. Тонких Е.В. Анализ характеристик плотности устройств в сетях связи пятого поколения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 1. С. 22–27. DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-1-22-27. EDN:PBSLMR
18. Мутханна А.С.А. Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух–земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 42–59. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-42-59. EDN:SBANAR
19. Бушеленков С.Н., Парамонов А.И. Метод выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2021. № 12. С. 14–20. DOI:10.34832/ELSV.2021.25.12.001. EDN:YJVLGZ
20. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ, 2009.
21. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
22. Окунева Д.В. Исследование беспроводной сенсорной сети с мультимодальным распределением узлов на плоскости // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2017. № 1. С. 9–13. EDN:XXBSJF
23. Нуриллов И.Н., Парамонов А.И. Эффективная связность беспроводной сенсорной сети // Электросвязь. 2018. № 3. С. 68–74. EDN:YSIQIF
24. Черноуцкий И.Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 384 с.
25. Wang N., Ho K. H., Pavlou G., Howarth M. A survey of routing optimization for Internet traffic engineering // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2008. Vol. 10. Iss. 1. PP. 36–56. DOI:10.1109/COMST.2008.4483669
26. Singh M., Baranwal G. Quality of Service (QoS) in Internet of Things // Proceedings of the 3rd International Conference on Internet of Things: Intelligent Innovation and Usage (IoT-SIU, Bhimtal, India, 23–24 February 2018). IEEE, 2018. DOI:10.1109/IoT-SIU.2018.8519862
27. Busetta C., Noor B., Cousin A., Mungla H. QoS in IoT Networks Based on Link Quality Prediction // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC 2021, Montreal, Canada, 14–23 June 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500396

## References

1. Kirichek R.V., Paramonov A.I., Prokopiev A.V., Koucheryavy A.E. The Investigation Evolution in the Wireless Sensor Networks Area. *Telecom IT*. 2014;2(4):29–41. (in Russ.) EDN:TKSXPT
2. Hammoudeh M., Newman R. Information extraction from sensor networks using the Watershed transform algorithm. *Information Fusion*. 2015;22:39–49. DOI:10.1016/j.inffus.2013.07.001
3. Basha A.R. A Review on Wireless Sensor Networks: Routing. *Wireless Personal Communications*. 2022;125(1):897–937. DOI:10.1007/s11277-022-09583-4
4. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*. 2015;3(5):164–173. DOI:10.4236/jcc.2015.35021
5. Fadel E., Gungor V.C., Nassef L., Akkari N., Malik M.G.A., Almasri S., et al. A survey on wireless sensor networks for smart grid. *Computer Communications*. 2015;71:22–33. DOI:10.1016/j.comcom.2015.09.006
6. Laghari A.A., Wu K., Laghari R.A. Retraction Note: A Review and State of Art of Internet of Things (IoT). *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023;30:5105. DOI:10.1007/s11831-023-09985-y
7. Gulati K., Boddu R.S.K., Kapila D., Bangare S.L., Chandnani N., Saravanan G. A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*. 2022;51(Part 1):161–165. DOI:10.1016/j.matpr.2021.05.067
8. Sobouti M.J., Rahimi Z., Mohajerzadeh A.H., Hosseini S.S.A., Ghanbari R., Marquez-Barja J.M., et al. Efficient Deployment of Small Cell Base Stations Mounted on Unmanned Aerial Vehicles for the Internet of Things Infrastructure. *IEEE Sensors Journal*. 2020;20(13):7460–7471. DOI:10.1109/JSEN.2020.2973320
9. Paramonov A., Bushelenkov S. Analysis of Methods to Increase the Efficiency of IoT Networks. *Telecom IT*. 2022;10(2):36–52. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-2-36-52. EDN:JNZPDL
10. Elagin V.S., Vasin A.S. Analysis of Network Resource Scaling Models in 5G Network. *T-Comm*. 2023;17(5):32–41. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2023-17-5-32-41. EDN:UEIDEK
11. Kartashevsky I.V., Volkov A.N., Kirichek R.V. Analysis of the Average Waiting Time in the Queuing System While Processing the Correlated Traffic. *Electrosvyaz*. 2019;3:41–50. (in Russ.) EDN:ZABEST
12. Kirichek R., Kulik V. Industrial Internet of Things Traffic Research and Generation. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(3):27–36. (In Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-3-27-36. EDN:JQBTYU

13. Liao Z., Han G., Wang H., Liu L. Multistation-Based Collaborative Charging Strategy for High-Density Low-Power Sensing Nodes in Industrial Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021;8(9):7575–7588. DOI:10.1109/JIOT.2020.3039556
14. Shen X., Liao W., Yin Q. A Novel Wireless Resource Management for the 6G-Enabled High-Density Internet of Things. *IEEE Wireless Communications*. 2022;29(1):32–39. DOI:10.1109/MWC.003.00311
15. Chen N., Okada M. Toward 6G Internet of Things and the Convergence With RoF System. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021;8(11):8719–8733. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3047613
16. Tonkikh E.V., Paramonov A.I., Koucheryavy A.E. Analysis of Wireless High-Density IoT Network. *Electrosvyaz*. 2020;1:44–48. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2020.2.1.006. EDN:IWAHZO
17. Tonkikh E.V. The Dense of Devices Analysis for 5G Networks. *Telecom IT*. 2020;8(1):22–27. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-1-22-27. EDN:PBSLMR
18. Muthanna A.S.A. A Model for Integrating Edge Computing into an Air-Ground Network Structure and Offloading Traffic Method for High and Ultra-High Densities Internet of Things Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(3):42–59. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-42-59. EDN:SBAHAR
19. Bushelenkov S.N., Paramonov A.I. Route Selection Method for High-Density Wireless IoT Network. *Electrosvyaz*. 2021;12: 14–20. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2021.25.12.001. EDN:YJVLGZ
20. GOST R 53111-2008. *Stability of the functioning of the public communication network. Requirements and verification methods*. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. (in Russ.)
21. GOST 27.002-89. *Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions*. (in Russ.)
22. Okuneva D. Research of a wireless sensor network with multimodal distribution of nodes on a plane. *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2017;1:9–13. (in Russ.) EDN:XXBSJF
23. Nurilloev I.N., Paramonov A.I. Effective Connectivity Parameter of the Wireless Sensor Network. *Electrosvyaz*. 2018;3: 68–74. (in Russ.) EDN:YSIQIF
24. Chernorutsky I.G. *Optimization Methods. Computer Technologies*. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ.; 2011. 384 p. (in Russ.)
25. Wang N., Ho K. H., Pavlou G., Howarth M. A survey of routing optimization for Internet traffic engineering. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2008;10(1):36–56. DOI:10.1109/COMST.2008.4483669
26. Singh M., Baranwal G. Quality of Service (QoS) in Internet of Things. *Proceedings of the 3rd International Conference on Internet of Things: Intelligent Innovation and Usage, IoT-SIU, 23–24 February 2018, Bhimtal, India*. IEEE; 2018. DOI:10.1109/IoT-SIU.2018.8519862
27. Busetta C., Noor B., Cousin A., Mungla H. QoS in IoT Networks Based on Link Quality Prediction. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC 2021, 14–23 June 2021, Montreal, Canada*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500396

Статья поступила в редакцию 12.03.2024; одобрена после рецензирования 09.04.2024; принята к публикации 11.04.2024.

The article was submitted 12.03.2024; approved after reviewing 09.04.2024; accepted for publication 11.04.2024.

## Информация об авторах:

**КУЧЕРЯВЫЙ**  
Андрей Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
 <https://orcid.org/0000-0003-4479-2479>

**ОКУНЕВА**  
Дарина Владимировна

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
 <https://orcid.org/0009-0005-4241-8784>

**ПАРАМОНОВ**  
Александр Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
 <https://orcid.org/0000-0002-4104-3504>

**ХОАНГ**  
Фьюк Ньян

аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
 <https://orcid.org/0009-0008-7733-4494>