

# МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ЛЕТАЮЩИХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

А. В. Шкляева<sup>1</sup>, Р. В. Киричек<sup>1</sup>, А. Е. Кучерявый<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация  
Адрес для переписки: kirichek@sut.ru

## Информация о статье

УДК 004.7

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 12.04.16, принята к печати 13.05.16.

**Ссылка для цитирования:** Шкляева А. В., Киричек Р. В., Кучерявый А. Е. Методы тестирования летающих сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 2. С. 43–52.

## Аннотация

**Предмет исследования.** Данная статья посвящена обзору возможных видов и методов тестирования летающих сенсорных сетей. **Метод.** В качестве метода исследования приводится анализ основных задач летающих сенсорных сетей, их объектов и видов взаимодействия сегментов ЛСС. **Основные результаты.** В статье приведены результаты тестирования ЛСС по разработанной методике: количество одновременно опрашиваемых узлов, максимальное расстояние взаимодействия, среднее значение задержек при передаче данных между узлами. **Практическая значимость.** Предложены тестовые спецификации, которые могут применяться при проведении тестирования летающих сенсорных сетей.

## Ключевые слова

летающая сенсорная сеть, FUSN, ZigBee, BLE, 6LoWPAN, IoT, БПЛА, квадрокоптер, сенсорный узел, датчик, тестирование.

# METHODS FOR THE FLYING UBIQUITOUS SENSOR NETWORKS

A. Shklyueva<sup>1</sup>, R. Kirichek<sup>1</sup>, A. Koucheryavy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation  
Corresponding author: kirichek@sut.ru

## Article info

Article in Russian.

Received 12.04.16, accepted 13.05.16.



**For citation:** Shklyayeva A., Kirichek R., Koucheryavy A.: Methods for the Flying Ubiquitous Sensor Networks // Telecom IT. 2016. Vol. 4. Iss. 2. pp. 43–52 (in Russian).

## Abstract

**Research subject.** This article provides an overview of possible types and methods of testing the flying ubiquitous sensor networks. **Method.** As a research method the analysis of the main tasks of FUSN, their facilities and the types of interactions between FUSN segments was made. **Core results.** The article contains results of testing the FUSN by the developed technique: the number of simultaneously sampled nodes, the maximum distance of interaction, the average delay during the data transmission between nodes. **Practical relevance.** Test specifications that can be used for testing FUSN were proposed in this article.

## Keywords

flying ubiquitous sensor network, FUSN, ZigBee, BLE, 6LoWPAN, IoT, UAV, quadrocopter, sensor node, testing.

## Введение

В современном мире технологии развиваются с невероятной скоростью, и появление таких устройств, как беспилотные летательные аппараты (БПЛА), не обошло сферу инфотелекоммуникаций. На основе БПЛА активно разворачиваются новые сети связи, которые получили название летающих сенсорных сетей [1, 2]. Данные сети относятся к беспроводным сенсорным сетям и в настоящее время являются одним из актуальных направлений в развитии сетей связи.

Благодаря БПЛА, оснащённым средствами связи и датчиками, появилась возможность автоматизированного сбора данных с удаленных сенсорных узлов, которые накапливают информацию за время автономной работы. Во многих сферах жизни такие сети просто необходимы, поэтому летающие сенсорные сети уже давно нашли широкое применение в военных целях для наблюдения и размещения целей, а также активно используются в сельскохозяйственной сфере, комплексах жизнеобеспечения и для организации резервирования каналов связи при чрезвычайных ситуациях [3, 4].

С помощью данных сетей можно заблаговременно предотвратить какие-либо бедствия, постоянно отслеживая и контролируя небезопасные участки посредством квадрокоптеров, которые собирают информацию с установленных датчиков [5] и моментально передают ее в Интернет [6].

Наиболее важным преимуществом летающих сенсорных сетей является способность обеспечивать связь в реальном времени без необходимости какой-либо инфраструктуры.

Многие крупные компании, такие как Amazon, Google и Facebook, активно исследуют перспективы использования беспилотных летательных средств для предоставления доступа в Интернет в развивающихся странах.

Использование БПЛА с высокой мобильностью и ограниченными энергетическими возможностями вносит не только множество возможностей для предоставления новых услуг, но и ряд проблем, одной из которых является разработка необходимых методик тестирования летающих сенсорных сетей.

Особое место в развитии любых технологий занимает проблема разработки новых стандартов для тестирования. Существуют рекомендации Международного союза электросвязи серии Q.3900-Q.4099<sup>1</sup>, описывающие принципы по-

<sup>1</sup> Y.2069. Термины и определения для Интернета Вещей // Рекомендация МСЭ-Т // 07.2012.



строения и тестирования модельных сетей. Разработкой методик тестирования для приложений Интернета Вещей занимается 11 Исследовательская Комиссия МСЭ-Т. Для области IoT была разработана рекомендация Q.3950 – «Методика тестирования и архитектура модельной сети для систем и функций идентификации на основе тегов». Она определяет функции и целевые системы, которые необходимо протестировать, и задает модельные сети для тестирования их взаимодействия и соответствия<sup>2</sup>.

К сожалению, этого недостаточно, и поэтому существует необходимость в разработке новых методик и стандартов для тестирования приложений Интернета Вещей, а именно для летающих сенсорных сетей [7].

### Определение задач и объектов ЛСС

Перед тем как приступить к процедуре разработки методики тестирования, необходимо определить основные задачи летающих сенсорных сетей и их объекты.

Задач по тестированию ЛСС достаточно много, основными можно считать стадии, которые описывают жизненный цикл летающих сенсорных сетей.

Он состоит из следующих этапов [2, 8, 9]:

- 1) Установка сенсорных узлов с БПЛА.
- 2) Определение координат сенсорных узлов и построение карты сенсорного поля с помощью БПЛА.
- 3) Сбор данных с сенсорного поля по оптимальным маршрутам.
- 4) Доставка полученных данных в ССОП.
- 5) Подзарядка сенсорных узлов с БПЛА.
- 6) Деинсталляция сенсорной сети.

На каждом из перечисленных этапов предполагается проведение тестирования. Например, проведение испытаний для оптимального распределения сенсорных узлов на местности, исследование канала передачи для предоставления требуемого качества обслуживания (пропускная способность, задержки, джиттер, коэффициент потерянных пакетов), определение остаточной энергии сенсорных узлов с возможностью последующей подзарядки. Помимо этого, необходимо проследить за правильностью работы сети и обеспечить соединение с сетью Интернет.

### Виды взаимодействия сегментов ЛСС

Также необходимо рассмотреть основные возможные сценарии использования БПЛА в летающих сенсорных сетях и виды взаимодействия между сегментами сети, для того чтобы определить возможные виды тестов.

Далее приведены сценарии использования БПЛА в беспроводных сетях (рис. 1) [10, 11, 12].

- 1) Увеличение зоны покрытия при помощи БПЛА:

Летающая сенсорная сеть разворачивается для помощи существующей инфраструктуре связи, например, быстрое восстановление связи после частичного или полного повреждения инфраструктуры в результате стихийных бед-

<sup>2</sup> Q.3900. Методы тестирования и архитектура модельных сетей для тестирования технических средств СПП, используемых в сетях электросвязи общего пользования // Рекомендация МСЭ-Т // 09.2006.



ствий или разгрузка базовой станции в местах с большим скоплением людей (концертные площадки, стадионы и т. д.).

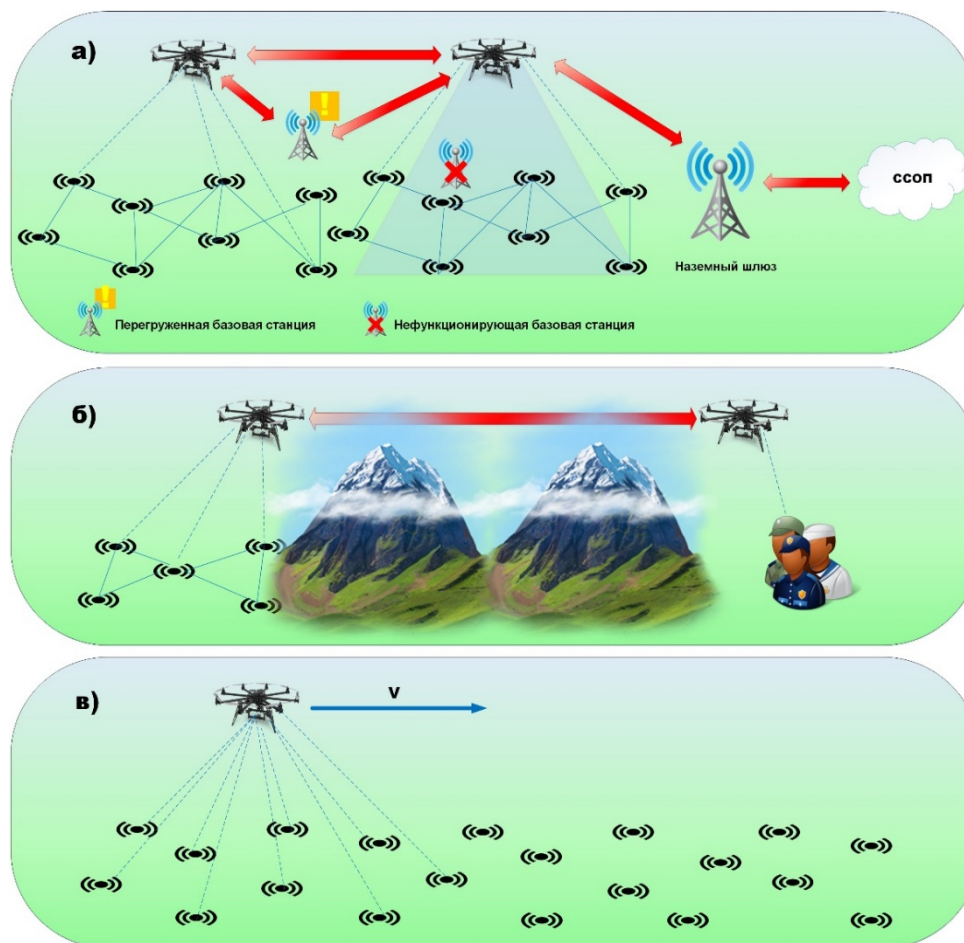


Рис. 1. Сценарии использования БПЛА: а) увеличение зоны покрытия при помощи БПЛА; б) ретрансляция информации посредством БПЛА; в) опрос и сбор данных с сенсорных полей при помощи БПЛА

## 2) Ретрансляция информации посредством БПЛА:

Обеспечение беспроводной связи между двумя и более удаленными пользователями или группами пользователей без надежной сети связи. Это может быть реализовано на пограничных линиях или в центрах экстренного реагирования.

## 3) Опрос и сбор данных с сенсорных полей при помощи БПЛА:

БПЛА прилетает на сенсорное поле и начинает опрашивать конечные узлы, получая различные данные (температуру, освещенность, давление, остаточную энергию и т. д.). Примером такого сценария может служить использование летающих сенсорных сетей в сельском хозяйстве.

Виды взаимодействия сегментов ЛСС (рис. 2.).

Летающий сегмент сети может быть реализован как на основе одного БПЛА, так и на основе группы БПЛА [13, 14, 15].

Наземный сегмент может быть представлен сетью из самоорганизующихся узлов, поддерживающих технологии (BLE, ZigBee, IEEE 802.11s, 6LoWPAN), а также сетью, которая не поддерживает самоорганизацию узлов (Wi-Fi, RFID, LoRa) [10, 11].





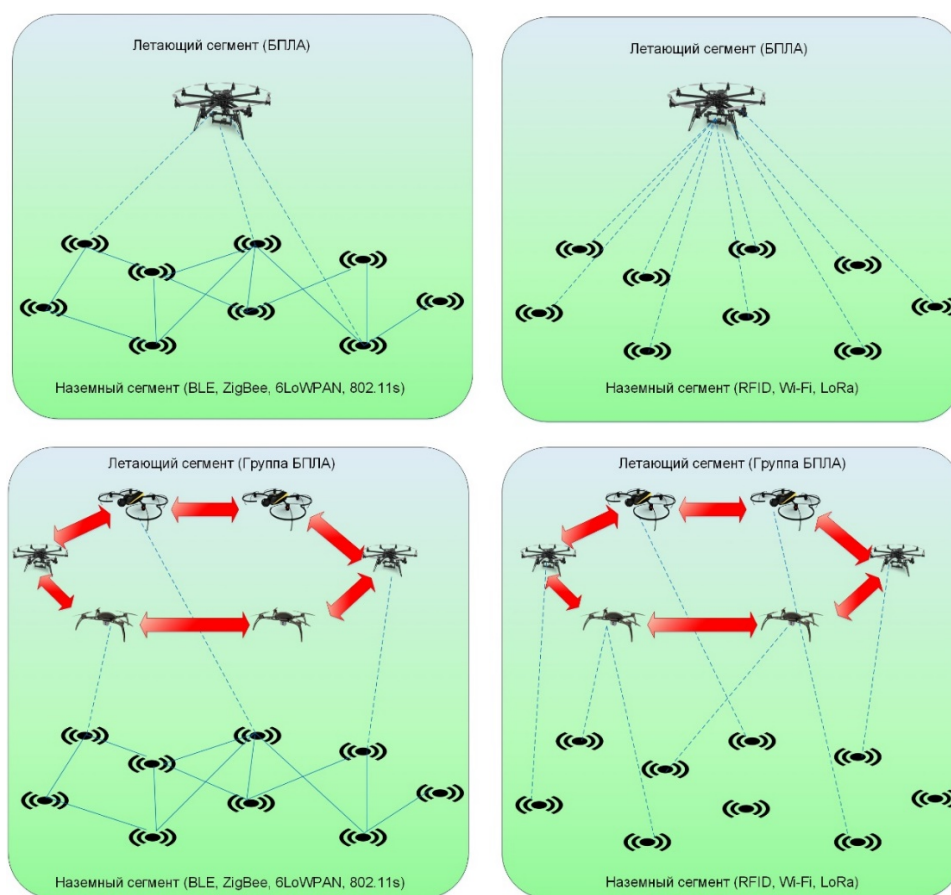


Рис. 2. Виды взаимодействия сегментов ЛСС  
и возможные технологии построения наземного сегмента

### Методы тестирования сегментов ЛСС

Изучив возможные сценарии использования БПЛА и виды взаимодействия сегментов ЛСС, была составлена таблица с возможными тестами и методами тестирования относительно используемых сетевых технологий сенсорными узлами наземного сегмента (рис. 3.).

По данным тестам были разработаны 6 тестовых спецификаций:

- 1) Тестирование наземного сегмента ЛСС, построенного на основе протокола ZigBee (определение коэффициента битовых ошибок).
- 2) Тестирование наземного сегмента ЛСС, построенного по стандарту IEEE 802.11s (проверка целостности сети).
- 3) Тестирование наземного сегмента ЛСС, построенного по технологии LoRa (определение коэффициента ошибочных пакетов).
- 4) Определение периода для опроса и сбора данных с сенсорных узлов.
- 5) Тестирование летающего сегмента ЛСС (тестирование сходимости летающего сегмента при выходе из строя одного или нескольких БПЛА и определение минимального времени реконфигурации сети).
- 6) Тестирование дальности связи.

	Самоорганизующиеся сети				Несаморганизующиеся сети		
	ZigBee	6LoWPAN	802.11s	BLE	Wi-Fi	RFID	LoRa
Один БПЛА	<b>Физический уровень:</b> 1. Тестирование мощности передатчика; 2. EVM; 3. BER. <b>Канальный уровень:</b> 1. PER; 2. Утилизация канала.	1. Проверка доступности узлов; 2. Проверка совместимости; 3. Тестирование производительности.	1. Проверка маршрутов и управления; 2. Проверка целостности сети; 3. Тестирование производительности; 4. Управление ресурсами памяти.	1. Тестирование мощности передатчика; 2. BER; 3. Спектральные измерения с использованием измерительного оборудования (например, Rohde & Schwarz). 4. Измерение параметров модуляции; 5. Измерение частотных характеристик.	<b>Физический уровень:</b> Следует использовать высокоточное измерительное оборудование, позволяющее имитировать ошибки в канале связи (например, Rohde & Schwarz). <b>Канальный уровень:</b> 1. PER; 2. Утилизация канала.	1. Определение чувствительности метки; 2. Определение диаграммы направленности антенн; 3. Проверка совместимости устройств между собой.	1. PER; 2. Проверка адаптации скорости передачи данных; 3. Проверка состояния устройства; 4. Проверка возможности регулирования мощности передатчика; 5. Измерение показателей TRP.
	1. Проверка подлинности узлов; 2. Проверка остаточной энергии сенсорных узлов (кроме RFID); 3. Определение периода для опроса и сбора данных с сенсорных узлов (как часто опрашивать?).						
Группа БПЛА	1. Тестирование сходимости летающего сегмента при выходе из строя одного или нескольких БПЛА и определение минимального времени для реконфигурации сети: а) если все узлы одинаковы по функциональности; б) если имеется головной узел (решающая структура); 2. Тестирование дальности связи; 3. Проверка подлинности узлов летающего сегмента.						

Рис. 3. Возможные виды тестов видами относительно используемых сетевых технологий сенсорными узлами наземного сегмента и видов взаимодействия сегментов ЛСС

### Методика тестирования и проведение натурального эксперимента

На базе предложенных спецификаций была разработана методика тестирования фрагмента летающий сенсорной сети, которая включала в себя:

- 1) Определение максимально возможного количества обслуживаемых сенсорных узлов точкой доступа.
- 2) Измерение максимального расстояния от сенсорных узлов до сервера с возможностью передачи данных посредством точки доступа.
- 3) Измерение задержек при передаче данных от сенсорных узлов к серверу.

Целью данного тестирования являлось определение максимально возможного расстояния между удаленными сенсорными узлами и сервером, обмен данными между которыми происходит посредством точки доступа. Роль точки доступа выполняет модуль NodeMCU, который располагается на борту квадрокоптера (рис. 4.). Также в данном тестировании требовалось определить, возникают ли задержки при передаче данных, и сколько возможно одновременно опросить узлов.

В ходе исследования были определены следующие параметры:

- количество узлов, которые одновременно посылают данные на точку доступа;
- максимальное расстояние между сенсорными узлами и БПЛА;
- значение задержек при передаче.

В тестировании использовалось 5 сенсорных узлов. Одновременно данные могут посылать четыре узла, пятый узел «отбрасывается», так как модуль NodeMCU, установленному на квадрокоптере, не хватает производительности для обработки большего числа подключений.



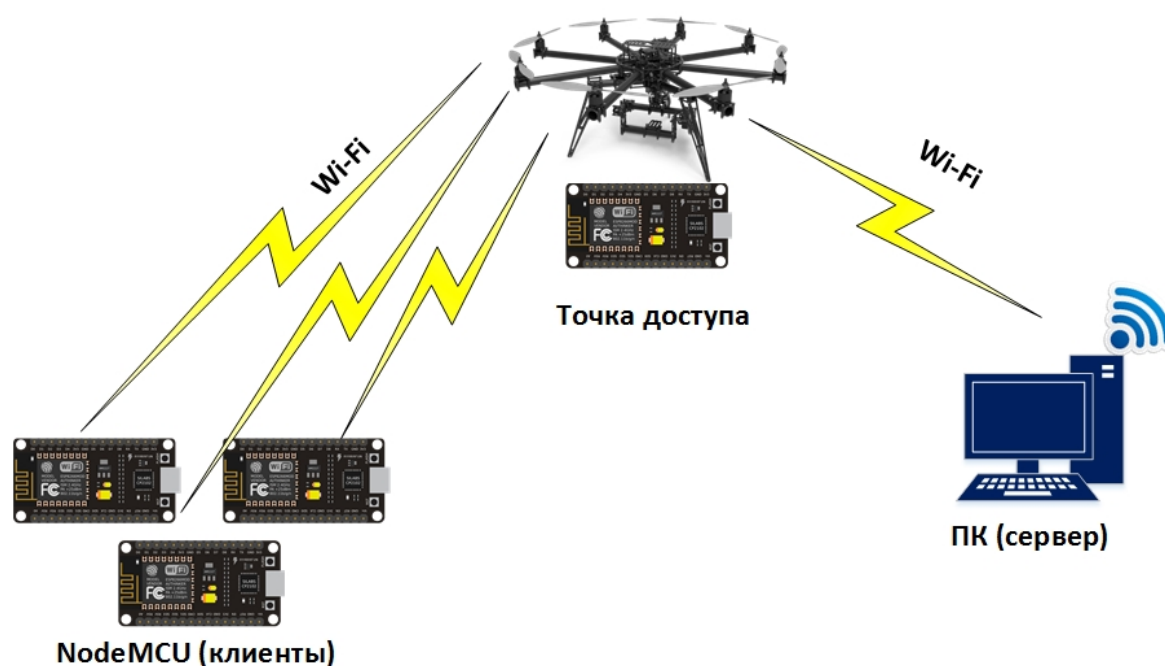


Рис. 4. Сегмент летающей сенсорной сети, подлежащий тестированию

При одновременном опросе датчиков и ретрансляции полученных данных на сервер точка доступа, установленная на БПЛА, смогла обслужить только два сенсорных узла.

В таблице приведены средние значения задержек от двух сенсорных узлов при различных расстояниях:

Таблица.

Среднее значение задержек

IP-адрес сенсорного узла	192.168.4.2	192.168.4.3
Расстояние, м		
10	55 мс	37 мс
20	40 мс	16 мс
44	260 мс	40 мс
74	252 мс	27 мс

В результате тестирования удалось определить максимальное расстояние между сенсорными узлами и БПЛА, при котором осуществлялась передача данных. Это расстояние составило 74 м.

Задержки не превышают допустимые значения даже при максимальном расстоянии.

При использовании более мощных модулей для создания точки доступа будет возможно одновременное подключение большего количества сенсорных узлов и увеличения расстояния передачи.

Использование БПЛА в качестве точки доступа и ретранслятора способствует увеличению расстояния между удаленными узлами и серверами хранения.



## Заключение

В данной статье были рассмотрены основные сценарии использования беспилотных летальных аппаратов в летающих сенсорных сетях, а также виды взаимодействия сегментов ЛСС. Относительно них была составлена и приведена таблица с возможными видами тестов, на базе которых предложены тестовые спецификации. Данные тестовые спецификации могут применяться при проведении тестирования летающих сенсорных сетей. На базе одной из тестовых спецификаций была представлена методика тестирования, проведен натурный эксперимент и представлены его результаты.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта N15-07-09431a «Разработка принципов построения и методов самоорганизации для летающих сенсорных сетей».*

## Литература

1. Кучерявый А. Е., Киричек Р. В., Парамонов А. И., Прокопьев А. В. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2014. № 4. С. 29–41. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>
2. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В., Парамонов А. И., Прокопьев А. В., Богданов И. А., Дорт-Гольц А. А. Летающие сенсорные сети // Электросвязь. 2014. № 9. С. 2–5.
3. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В. Летающие сенсорные сети – новое приложение Интернета Вещей // IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». СПб. : СПбГУТ, 2015. С. 17–22. URL: <http://sut.ru/doci/nauka/4.apino.2015.sut.pdf>
4. Kirichek R. The Model of Data Delivery from the Wireless Body Area Network to the Cloud Server with the use of Unmanned Aerial Vehicles // 30<sup>th</sup> European Conference on Modeling and Simulation (ECMS 2016), 2016. pp. 603–606. URL: [http://scs-europe.net/dlib/2016/ecms2016acceptedpapers/0603-dis\\_ECMS\\_0111.pdf](http://scs-europe.net/dlib/2016/ecms2016acceptedpapers/0603-dis_ECMS_0111.pdf)
5. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб. : Любавич, 2011. 312 с. ISBN 978-5-86983-318-1.
6. Кучерявый А. Е. Интернет Вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
7. Kirichek R., Koucheryavy A. Internet of Things Laboratory Test Bed // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. Vol. 348. pp. 485–494.
8. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей // Электросвязь. 2015. № 7. С. 9–11.
9. Koucheryavy A., Vladiko A., Kirichek R. State of the Art and Research Challenges for Public Flying Ubiquitous Sensor Networks // Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9247. pp. 299–308.
10. Kirichek R., Kulik V. Methods of test Flying Ubiquitous Sensor Networks // 18th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2015). Moscow, 2015. pp. 489–499.
11. Zeng Y., Zhang R., Lim T. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges // IEEE Communication Magazine, 2016. pp. 36–42.
12. Кулик В. А., Киричек Р. В., Бондарев А. Н. Методы исследования беспроводных каналов связи Интернета Вещей в условиях совместной работы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 1. С. 106–114. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/1-15.pdf>
13. Киричек Р. В., Владыко А. Г., Захаров М. В., Кучерявый А. Е. Модельные сети для Интернета Вещей и программируемых сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 3 (11). С. 17–26. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/3-15.pdf>
14. Kirichek R., Vladiko A., Zakharov M., Koucheryavy A. Model networks for internet of things and SDN // 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2016. pp. 76–79.





15. Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A. Swarm of Public Unmanned Aerial Vehicles as a Queuing Network // Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 601. pp. 111–120.

## References

1. Koucheryavy, A. E., Kirichek, R. V., Paramonov, A. I., Prokopiev, A. V. The Investigation Evolution in the Wireless Sensor Networks Area // Telecom IT. 2014. No. 4. pp. 29–41. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>
2. Koucheryavy, A. E., Vladko, A. G., Kirichek, R. V., Paramonov, A. I., Prokopiev, A. V., Bogdanov, I. A., Dort-Goltz, A. A. Flying Sensor Networks // Electrosvyaz'. 2014. No. 9. pp. 2–5.
3. Koucheryavy, A. E., Vladko, A. G., Kirichek, R. V. Flying Sensor Networks – New Application of the Internet of things // IV International Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conference: Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education. SPb. : The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 2015. pp. 17–22. URL: <http://sut.ru/doci/nauka/4.apino.2015.sut.pdf>
4. Kirichek, R. The Model of Data Delivery from the Wireless Body Area Network to the Cloud Server with the use of Unmanned Aerial Vehicles // 30th European Conference on Modeling and Simulation (ECMS 2016), 2016. pp. 603–606. URL: [http://scs-europe.net/dlib/2016/ecms2016/acceptedpapers/0603-dis\\_ECMS\\_0111.pdf](http://scs-europe.net/dlib/2016/ecms2016/acceptedpapers/0603-dis_ECMS_0111.pdf)
5. Koucheryavy, A. E., Prokopiev, A. V., Koucheryavy, E. A. Self-Organizing Networks. SPb. : Lubavich, 2011. 312 p. ISBN 978-5-86983-318-1.
6. Koucheryavy, A. E. The Internet of Things // Electrosvyaz'. 2013. No. 1. pp. 21–24.
7. Kirichek, R., Koucheryavy, A. Internet of Things Laboratory Test Bed // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. Vol. 348. pp. 485–494.
8. Koucheryavy, A. E., Vladko, A. G., Kirichek, R. V. Theoretical and Practical Directions in the Area of Flying Sensor Network Research // Electrosvyaz'. 2015. No. 7. pp. 9–11.
9. Koucheryavy, A., Vladko, A., Kirichek, R. State of the Art and Research Challenges for Public Flying Ubiquitous Sensor Networks // Lecture Notes in Computer Science, 2015. Vol. 9247. pp. 299–308.
10. Kirichek R., Kulik V. Methods of test Flying Ubiquitous Sensor Networks // 18th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2015). Moscow, 2015. pp. 489–499.
11. Zeng Y., Zhang R., Lim T. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges // IEEE Communication Magazine, 2016. pp. 36–42.
12. Kulik, V. A., Kirichek, R. V., Bondarev, A. N. Research Methods Wireless Channel of Internet of Things in other Networks Interference // Telecom IT. 2015. No. 1. pp. 106–114. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/1-15.pdf>
13. Kirichek, R. V., Vladko, A. G., Zakharov, M. V., Koucheryavy, A. E. Model Networks for Internet of Things and SDN // Telecom IT. 2015. No. 3 (11). pp. 17–26. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/3-15.pdf>
14. Kirichek R., Vladko A., Zakharov M., Koucheryavy A. Model networks for internet of things and SDN // 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2016. pp. 76–79.
15. Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A. Swarm of Public Unmanned Aerial Vehicles as a Queuing Network // Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 601. pp. 111–120.

**Шкляева Алина Владимировна**

– магистрант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, malinovaya94@yandex.ru

**Киричек Руслан Валентинович**

– кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, ruslan.stk@gmail.com



**Кучерявый Андрей Евгеньевич**

– доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, akouch@mail.ru

**Shklyueva Alina**

– undergraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, malinovaya94@yandex.ru

**Kirichek Ruslan**

– Ph.D., assistant professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, ruslan.stk@gmail.com

**Koucheryavy Andrey**

– D.Sc., professor, head of the Department, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, akouch@mail.ru