

8. Uilson E. *Monitoring and Analysis of Networks. Troubleshooting Methods*. Moscow: Lori, 2016, 480 p. (In Russ.)
9. Aladyshev O.S., Ovsjannikov A.P., Shabanov B.M. Development of the corporate network of the Interdepartmental Supercomputer Center. URL: <http://vbakanov.ru/metods/1441/corpor.pdf> (accessed: 02.02.2020).
10. Perlman R. *Interconnections: Bridges & Routers*. Boston: Addison-Wesley, 2016, 245 p.
11. Khalil H.K. *Nonlinear Systems*; 3rd ed. New Jersey: Pearson, 2016, 766 p. URL: <https://en.bookfi.net/book/1417228> (accessed: 02.02.2020).

Received 05.05.2020

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.738

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ FUSN

Белоногов А.С., Шорохов Н.С.

Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, РФ

E-mail: abelonogov@rambler.ru

В рамках концепций «Цифровая железная дорога» и «Интеллектуальные транспортные сети» предлагается новый способ организации системы мониторинга состояния объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на примере опор контактной сети и устройств линейных кабельных сооружений. За основу взята технологическая платформа всепроникающих сенсорных сетей Интернета вещей, в частности класс «летающие сенсорные сети». Кратко представлены основные характеристики и особенности построения летающих сенсорных сетей. Проведено аналитическое моделирование летающих сенсорных сетей, которое позволило оценить различные показатели сети на физическом уровне, установить зависимости скорости передачи данных от мощности сигнала и расстояния между приемными и передающими антеннами. Предложено архитектурное решение по системе мониторинга состояния объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: *система мониторинга, опоры контактной сети, устройства линейных кабельных сооружений, всепроникающие сенсорные сети, летающие сенсорные сети, Интернет вещей, наземный и летающий сегменты, шлюз, беспилотный летательный аппарат*

Введение

Бесперебойность перевозочного процесса ставит жесткие требования к объектам и устройствам инфраструктуры железнодорожного транспорта. В условиях, когда с ростом скорости последствия отказов устройств могут быть особенно опасными, весьма актуальным становится вопрос удаленного мониторинга неисправностей и предотказных состояний устройств инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Создание системы мониторинга рассмотрим на примере контроля состояния опор контактной сети и элементов линейных кабельных сооружений связи. Контроль состояния опор контактной сети железной дороги в режиме реального времени позволит предотвратить аварии и значительно увеличить рентабельность эксплуатации дороги, так как будет осуществляться ремонт или замена лишь тех опор, которые действительно нуждаются в этом. В линейных кабельных сооружениях

связи актуальным является вопрос контроля герметичности кабельных муфт, контроля целостности оболочек кабелей, находящихся под постоянным давлением, а также мониторинга рабочей температуры кабелей.

Особенности беспроводных летающих всепроникающих сенсорных сетей

Рассмотрим особенности применения беспроводных летающих всепроникающих сенсорных сетей (Flying Ubiquitous Sensor Networks – далее FUSN) для сбора данных о состоянии устройств и объектов железнодорожной инфраструктуры. Сети FUSN представляют собой один из классов всепроникающих сенсорных сетей USN. Преимуществами таких сетей являются [1]:

- отсутствие необходимости в прокладке кабелей для передачи данных;
- низкая стоимость оборудования, пусконаладочных работ и технического обслуживания;

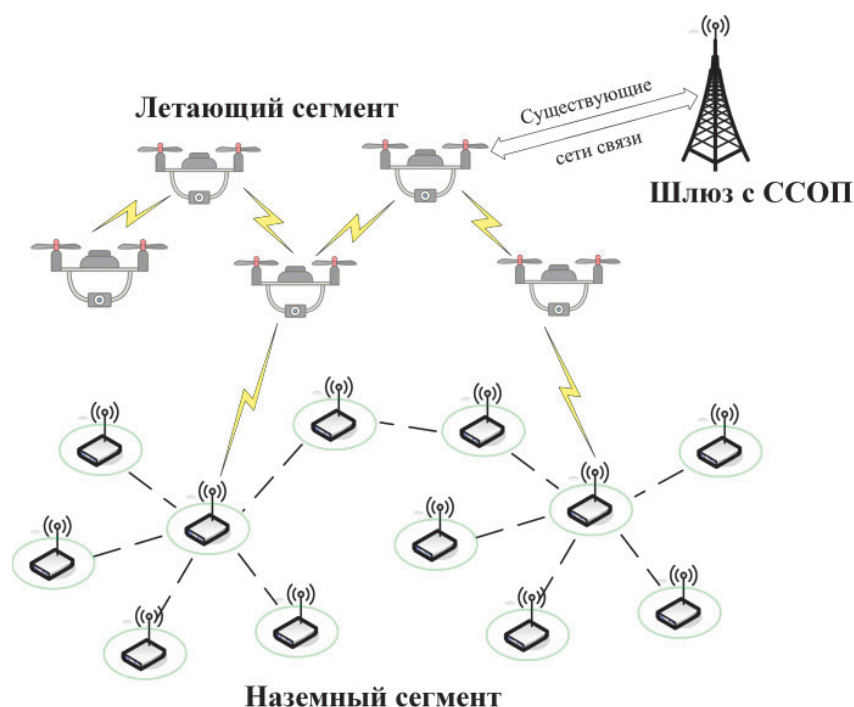


Рисунок 1. Пример организации сети FUSN

- скорость развертывания сети;
- возможность модификации сети почти на любом участке без нарушения при этом работоспособности системы.

Сети FUSN являются одной из основных технологических платформ Интернета вещей (IoT), и их применение позволит решить часть вопросов при реализации концепций «Интеллектуальные транспортные сети» и «Цифровая железная дорога» [2]. Эволюция IoT в настоящее время привела к созданию достаточно большого числа ее приложений, реализуемых для физических вещей. Общее название для сетей, обеспечивающих услугами физические интернет-вещи, в настоящее время выглядит как «Машина – Машина» M2M (Machine-to-Machine) [3].

Беспроводная сенсорная сеть представляет собой набор сенсорных узлов, организованных в интегрированную сеть. Летающие сенсорные сети FUSN являются одним из классов беспроводных или всепроникающих сенсорных сетей WSN/USN. Технология данных сетей основана на самоорганизационном объединении множества различных датчиков с низким энергопотреблением в сеть и их размещении в труднодоступных местах. Передача данных осуществляется посредством протоколов ZigBee, Bluetooth, 6LoWPAN.

Основные компоненты сенсорной сети FUSN:

- сеть датчиков: датчик является единицей создания USN и представляет собой устройство, реагирующее на какое-либо действие, явление (свет, тепло, звук, движение, касание и т. д.).

При этом датчик, совмещенный с микропроцессором, обрабатывающим данные, называется интеллектуальным датчиком;

- сеть доступа USN: узлы посредники, шлюзы, агрегирующие информацию от группы датчиков с целью облегчения последующей передачи данных в центры управления или другие внешние объекты;

- сетевая инфраструктура: активное, пассивное оборудование существующих проводных/беспроводных сетей;

- программное обеспечение для сбора и обработки больших объемов данных, облачные платформы, IoT-платформы и т. д.

Основными условиями организации USN является низкое потребление энергии устройствами (сети LPWAN) и самоорганизация сети (Ad Hoc сети).

Летающие сенсорные сети FUSN подразумевают наличие двух сегментов: наземного и летающего, которые взаимодействуют между собой (см. рисунок 1).

Наземный сегмент, как правило, представляет собой распределенную сеть самоорганизующихся сенсорных узлов [4]. Летающий сегмент состоит из трех частей:

- БПЛА (беспилотный летательный аппарат) с функциями сбора данных с сенсорных узлов, дальнейшей передачи собранных данных;

- группа БПЛА, которые исполняют роль только ретрансляторов (повторителей);

- базовая станция сети.

В зависимости от специфики решаемой задачи летающим сегментом могут выступать один или несколько БПЛА общего пользования или специально сконструированные БПЛА. Летающий сегмент базируется на основных принципах, относящихся к сетям FANET (Flying Ad Hoc Networks), с одним отличием: для доставки информации могут использоваться принципы, характерные для сетей DTN (Delay-Tolerant Networks). Основная задача сетей DTN состоит в том, что доставка данных от отправителя к получателю должна осуществляться даже после прерывания связи. То, что данный подход успешно реализован и используется в сетях MANET (Mobile Ad Hoc Networks), означает возможность его применения и для летающих сенсорных сетей [4].

Обмен информацией БПЛА со шлюзом сети связи общего пользования происходит в тот момент, когда он входит в зону видимости шлюза. Такая связь осуществляется за счет стабильного радиоканала с дальностью действия 100–200 м. На больших расстояниях БПЛА может передавать информацию через подключение к сети связи общего пользования с помощью модуля мобильной связи LTE, WiMax, 3G [4], а если для передачи данных используется сеть ретранслирующих БПЛА, то в качестве протокола для ретрансляции можно использовать протоколы LPWAN (Low Power Wide Area Network) на базе технологий 802.15.4g, например LoRaWAN.

Сенсорные узлы чаще всего выполняют функцию сбора информации и при необходимости могут управлять подконтрольным им объектом. Работают в автономном режиме, имеют довольно незначительные размеры, а также имеют функцию нахождения в режиме сна. Однако полученные сигналы от сенсоров непригодны для обработки и анализа, поэтому они проходят стадию предварительного преобразования сигнала, необходимую для дальнейшего использования: усиление сигнала, его фильтрацию от шумов и т. д. [5]. Множество сенсорных узлов образует сенсорные поля, которые дают возможность отслеживать различные физические процессы на базе датчиков [6].

В зависимости от дальности расположения шлюзов передавать собранную информацию с наземного сегмента можно либо через сеть БПЛА на основе протокола LoRaWAN при больших расстояниях, либо через сети ближнего действия на основе IEEE 802.15.4 (ZigBee, 6LoWPAN, Thread, RPL) при небольших расстояниях.

Модель фрагмента системы мониторинга объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на основе FUSN с возможностью передачи данных на большие расстояния

В качестве примера рассмотрим реализацию системы мониторинга состояния опор контактной сети и элементов линейных кабельных сооружений связи. Эти объекты имеют большую протяженность и территориальную распределенность, организовать оперативный контроль в режиме реального времени за ними довольно сложно.

На данный момент более половины опор контактной сети выполнено из железобетона. Для оценки несущей способности центрифугированных железобетонных стоек опор контактной сети применяется методика, в основе которой лежит измерение скорости распространения продольных ультразвуковых волн в теле стойки в продольном и поперечном направлениях [7]. В качестве основного измерительного средства при контроле опор используется переносной ультразвуковой тестер УК1401 [8].

В линейных кабельных сооружениях связи от герметичности кабельных муфт и целостности оболочек кабелей зависит качество связи, стабильность работы аппаратуры систем оперативно-технологической связи, мониторинг рабочей температуры кабелей позволяет выявить предотказное состояние кабелей и предотвратить их возгорание.

Таким образом, для решения задачи мониторинга объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта предлагается при построении сенсорного сегмента на каждой опоре контактной сети установить интеллектуальный ультразвуковой датчик, в кабельные муфты – интеллектуальный датчик контроля влажности и температуры, а если кабель находится под давлением, то и датчик контроля давления.

В качестве устройства летающего сегмента будет использоваться среднеразмерный квадрокоптер общего пользования, задачей которого является облет территории беспроводной сенсорной сети по запрограммированному маршруту. Узлы беспроводной сенсорной сети расположены таким образом, что топология наземной сети имеет вид кластерного дерева, что означает, что все датчики устанавливают соединение и передают данные на свой узел, который, в свою очередь, устанавливает связь с координатором, в нашем случае – с БПЛА.

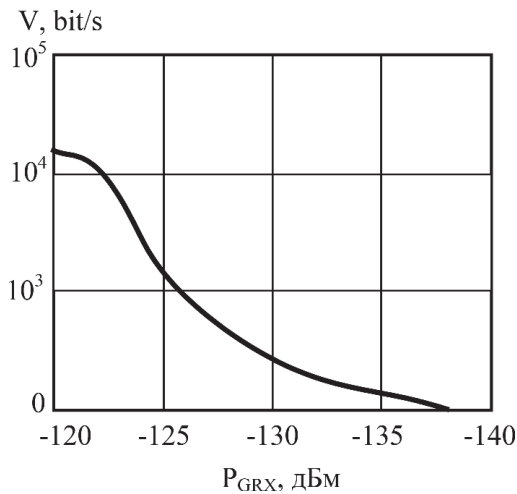


Рисунок 2. График зависимости скорости передачи данных от уровня сигнала p_{GRX}

В рамках данной работы для мониторинга состояния устройств линейных кабельных сооружений, расположенных, как правило, на железнодорожной станции, предлагается использовать протокол ZigBee при реализации наземного сегмента. Этот стандарт применяют в условиях, где важна длительность работы от источников питания, типа батареек и должны выполняться требования по безопасности передачи данных. Протоколы ZigBee позволяют создавать самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся сенсорные сети. К тому же устройства ZigBee-сети благодаря встроенному программному обеспечению обладают способностью при включении питания сами находить друг друга и формировать сеть, а в случае выхода из строя какого-либо из узлов могут устанавливать новые маршруты для передачи сообщений. Для мониторинга состояния опор контактной сети наземный сегмент предлагается реализовать на основе протокола

LoRaWAN, позволяющего передавать данные на большие расстояния.

Для определения основных показателей сети проведем аналитическое моделирование сети LoRa. Так как показатели сети зависят от процессов обработки данных, осуществляемых от сетевого до физического уровней, то проведем аналитическое моделирование физического уровня. На процесс распространения сигнала на физическом уровне влияют условия его распространения, такие как затухание сигнала, замирание в канале и прочие помехи, которые влияют на условия распространения. В процессе моделирования оценим зависимость скорости передачи данных в канале от расстояния между сенсорными узлами.

Уровень сигнала на входе приемника наземного сенсорного узла есть

$$p_{GRX} = p_{FTX} - A(d), \text{ дБм}, \quad (1)$$

где p_{FTX} – уровень сигнала на выходе передатчика БПЛА, дБм [9]; $A(d)$ – зависимость затухания сигнала от расстояния d между сенсором и БПЛА, дБ:

$$A(d) = 20 \lg \left(\frac{4\pi d f}{c} \right), \text{ дБ}, \quad (2)$$

где f – частота сигнала, Гц; c – скорость света, м/с.

На рисунке 2 представлен график зависимости скорости передачи данных от уровня сигнала на входе приемника наземного сенсорного узла. Ввиду того что чувствительность радиоприемного устройства составляет примерно 137 дБм, а затухание определяется по (2), то необходимо учесть высоту установки приемно-передающих антенн. Расстояние прямой видимости определится как

$$d_{\max} = 3,57 \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right), \text{ км}, \quad (3)$$

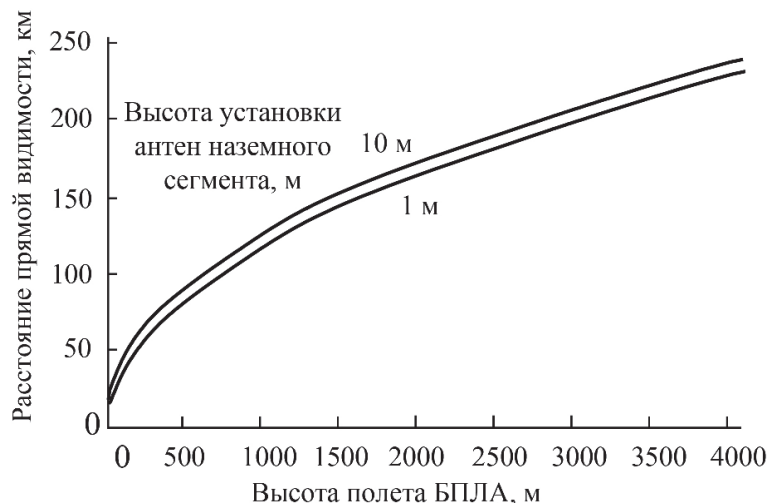


Рисунок 3. Зависимость расстояния прямой видимости от высоты полета БПЛА

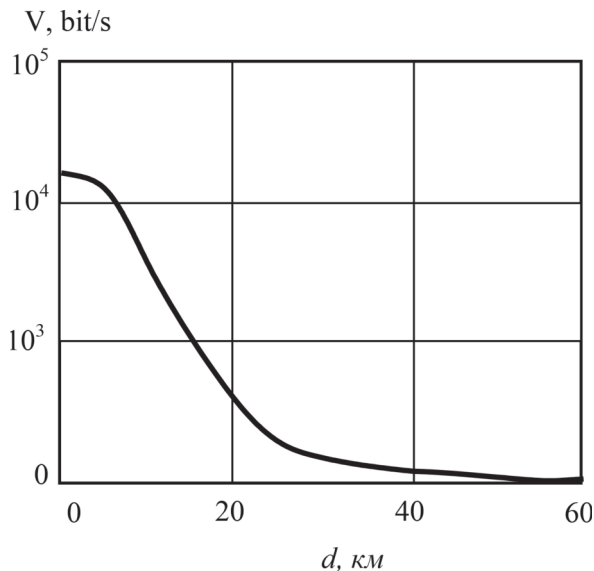


Рисунок 4. Зависимость скорости передачи данных от расстояния d [9]

где h_1 и h_2 – высоты установки антенн на летающем и наземном сегментах.

На рисунке 3 показана зависимость расстояния прямой видимости от высоты полета БПЛА при некоторых заданных высотах расположения антенны-сенсора.

Принимая во внимание выражения (2) и (3), а также вводя эмпирический коэффициент затухания для учета быстрых замираний, построим график зависимости скорости передачи данных от расстояния d , представленный на рисунке 4.

Таким образом, аналитическая модель позволяет оценить различные показатели сети на физическом уровне, установить зависимости скорости передачи данных от мощности сигнала и расстояния между приемными и передающими антеннами.

На рисунке 5 показан пример реализации системы мониторинга объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта с использованием USN-сетей.

Архитектура сети позволяет передавать данные на большие расстояния и состоит из наземного сегмента, включающего множества стационарных сенсорных узлов с радиусом действия 100 м, объединенных в беспроводную сенсорную сеть, а также летающего сегмента:

– FUSN для подсистемы мониторинга состояния опор контактной сети, представленного одним или несколькими БПЛА, осуществляющих сбор данных с сенсоров на базе технологии LoRa, а передачу – либо через сети LTE/WiMax/3G

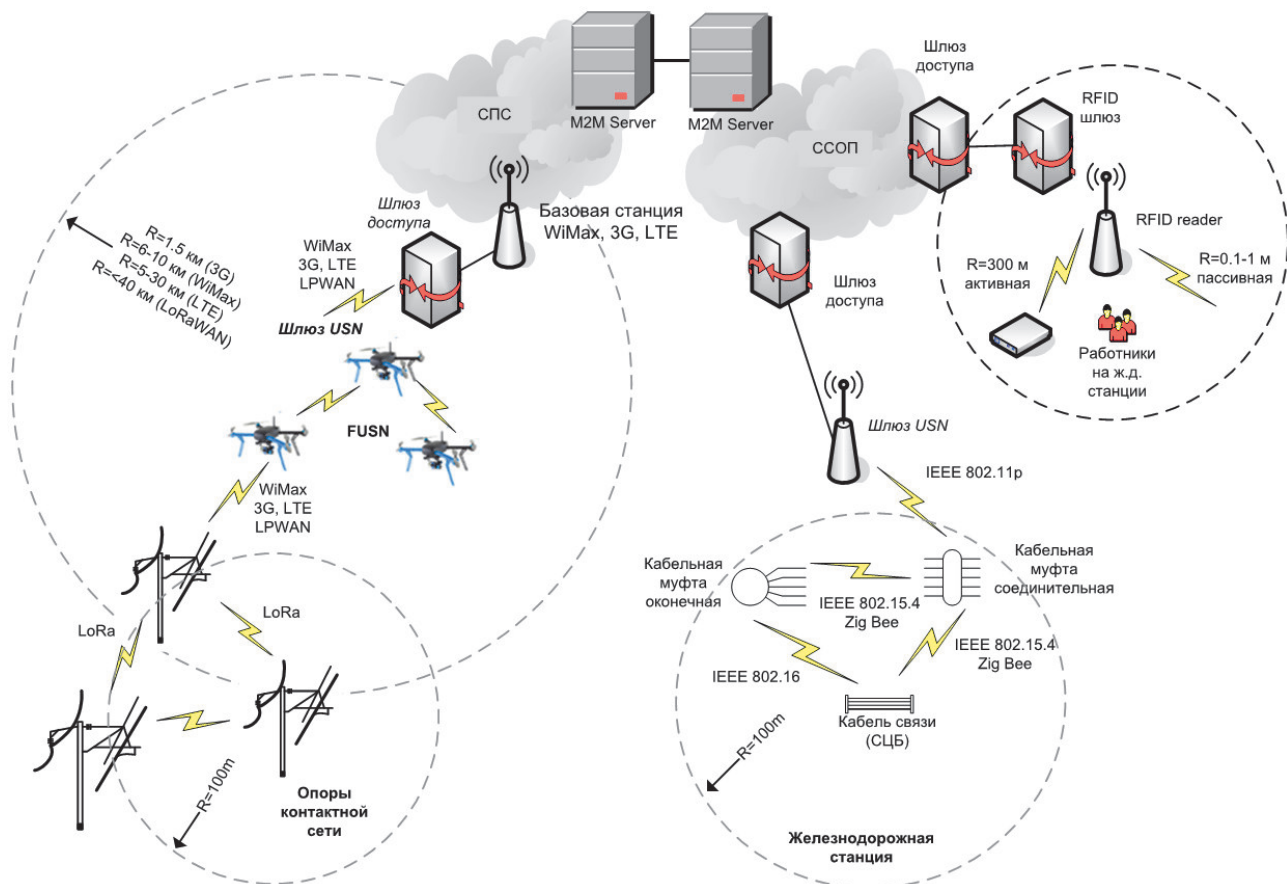


Рисунок 5. Пример реализации системы мониторинга объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта с использованием FUSN-сетей

(оборудование, установленное на БПЛА, является шлюзом [10]), либо через сеть ретранслирующих БПЛА (БПЛА-повторитель), объединенных между собой по радиоканалу с помощью модулей LPWAN [11];

– USN для подсистемы мониторинга устройств линейных кабельных сооружений, осуществляющих сбор по ZigBee (802.15.4), WMAN (IEEE 802.16) и передачу данных через WAVE (IEEE 802.11p);

– базовых станций и шлюзов.

Заключение

Таким образом создание системы мониторинга состояния объектов и устройств железнодорожного транспорта на основе концепции Интернета вещей, технологическую основу которой составляют беспроводные сенсорные сети, является на сегодня актуальной и современной задачей, поскольку позволяет обеспечить создание нового вида сетей связи, входящего в технологическую сеть связи железнодорожного транспорта, всепроникающих сенсорных сетей USN и, в частности, летающих сенсорных сетей FUSN, что позволит в реальном масштабе времени вести контроль состояния объектов инфраструктуры.

Литература

1. Беспроводные распределенные сенсорные сети. URL: http://wiki.laser.ru/index.php/Беспроводные_распределенные_сенсорные_сети (дата обращения: 17.10.2020).
2. Кучерявый А.Е. Интернет Вещей // Электро-связь. 2013. № 1. С. 21–24.
3. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 160 с.
4. Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. Летающие сенсорные сети – новое приложение интернета вещей // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: мат. IV МНТК и НМК СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. СПб.: СПбГУТ, 2015. С. 17–22.
5. Шпенст В.А., Шатунова Н.А. Математические характеристики радиопомех телекоммуникационных каналов промышленных объектов // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 25. С. 3–6.
6. Mochalov V.A. Functional scheme of the flying sensor networks architecture design // ICACT Transactions on Advanced Communications Technology (TACT). 2015. Vol. 4, No. 4. P. 659–663.
7. Указания по техническому обслуживанию опорных конструкций контактной сети. К-146-96. М.: Трансиздат, 1996. 120 с.
8. Ультразвуковые приборы для неразрушающего контроля бетона, горных пород, керамики, пластмасс // Заводская лаборатория ООО Акустические Контрольные Системы. 1998. Т. 6. № 4.
9. Киричек Р.В. Разработка и исследование комплекса моделей и методов для летающих сенсорных сетей: дис. ... д-ра. техн. наук. СПб., 2017. 316 с.
10. Гимранов Р.Р., Киричек Р.В., Шпаков М.Н. Технология межмашинного взаимодействия LoRa // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 2. С. 62–73.
11. Kirichek R., Kulik V. Long-range data transmission on flying ubiquitous sensor networks (FUSN) by using LPWAN protocols // Communications in Computer and Information Science (CCIS). 2017. Vol. 678. P. 442–453.

Получено 10.11.2020

Белоногов Алексей Сергеевич, к.т.н, доцент, доцент кафедры автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС). 443066, Российская Федерация, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18. Тел. +7 927 204-98-99. E-mail: abelonogov@rambler.ru

Шорохов Николай Сергеевич, к.т.н, доцент, доцент кафедры электротехники СамГУПС. 443066, Российская Федерация, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18. Тел. +7 927 754-84-02. E-mail: nik-shorokhov@mail.ru

MONITORING OF THE STATE OF RAILWAY INFRASTRUCTURE OBJECTS BASED ON FUSN TECHNOLOGY

*Belonogov A.S., Shorokhov N.S.
Samara State Transport University, Samara, Russian Federation
E-mail: abelonogov@rambler.ru*

Within the framework of the concept of the concepts «digital railroad» and «intelligent transport networks», a new way of organizing a system for monitoring the state of transport infrastructure facilities is proposed on the example of overhead supports and linear cable structures. The design of the system is based on the platform of ubiquitous sensor networks of the Internet of Things, in particular the «flying ubiquitous sensor networks» class. The main characteristics and features of the construction of flying sensor networks are briefly presented. An analytical model of the LoRa network has been built. Analytical modeling of the physical layer of the network is carried out. An architectural solution for the creation of a system for monitoring the state of railway infrastructure objects is proposed.

Keywords: *Monitoring system, contact system mast, devices of linear cable structures of railways, all- ubiquitous sensor networks, flying ubiquitous sensor networks, Internet of Things, LoRaWAN, ZigBee, ground segment, flying segment, gateway, unmanned aerial vehicle*

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.1.05

Belonogov Aleksey Sergeevich, Samara State Transport University Samara, 18, Perviy Bezimyanniy Alleyway, Samara, 443066, Russian Federation; Associate Professor, Associate Professor of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, PhD in Technical Sciences. Tel. +7 927 204-98-99. E-mail: abelonogov@rambler.ru

Shorokhov Nikolay Sergeevich, Samara State Transport University Samara; 18, Perviy Bezimyanniy Alleyway, Samara, 443066, Russian Federation; Associate Professor, Associate Professor of Electrical Engineering Department, PhD in Technical Sciences. Tel. +7 927 754-84-02. E-mail: nik-shorokhov@mail.ru

References

1. Wireless distributed sensor networks. URL: http://wiki.laser.ru/index.php/Беспроводные_распределенные_сенсорные_сети (accessed: 17.10.2020). (In Russ.)
2. Kucherjavjy A.E. Internet of Things. *Elektrosvjaz*, 2013, no. 1, pp. 21–24. (In Russ.)
3. Gol'dshtejn B.S., Kucherjavjy A.E. *Post-NGN Communication Networks*. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2013, 160 p. (In Russ.)
4. Kucherjavjy A.E., Vladyko A.G., Kirichek R.V. Flying sensor networks – a new application of the Internet of Things. *Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsij v nauke i obrazovanii: mat. IV MNTK i NMK SPbGUT im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha*. Saint Petersburg: SPbGUT, 2015, pp. 17–22. (In Russ.)
5. Shpenst V.A., Shatunova N.A. Mathematical characteristics of radio interference of telecommunication channels of industrial facilities. *Informatsionnye tehnologii i telekommunikatsii*, 2015, no. 25, pp. 3–6. (In Russ.)
6. Mochalov V.A. Functional scheme of the flying sensor networks architecture design. *ICACT Transactions on Advanced Communications Technology (TACT)*, 2015, vol. 4, no. 4, pp. 659–663.
7. Instructions for the Maintenance of the Overhead Catenary Structures. K-146-96. Moscow: Transizdat, 1996, 120 p. (In Russ.)
8. Ultrasonic devices for non-destructive testing of concrete, rocks, ceramics, plastics. *Zavodskaja laboratorija OOO Akusticheskie Kontrol'nye Sistemy*, 1998, vol. 6, no. 4. (In Russ.)
9. Kirichek R.V. Development and research of a complex of models and methods for flying sensor networks: dis. ... doct. tech. sciences. Saint Petersburg, 2017, 316 p.
10. Gimranov R.R., Kirichek R.V., Shpakov M.N. LoRa machine-to-machine communication technology. *Informatsionnye tehnologii i telekommunikatsii*, 2015, no. 2, pp. 62–73. (In Russ.)
11. Kirichek R., Kulik V. Long-range data transmission on flying ubiquitous sensor networks (FUSN) by using LPWAN protocols. *Communications in Computer and Information Science (CCIS)*, 2017, vol. 678, pp. 442–453.

Received 10.11.2020