

# ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Р. В. Киричек<sup>1</sup>, И. В. Гришин<sup>1</sup>,  
Э. Ф. Хундонугбо<sup>1</sup>, Д. И. Думин<sup>1</sup>

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

## Информация о статье

УДК 004.725.5+004.031.6

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 28.03.16, принята к печати 29.04.16.

**Ссылка для цитирования:** Киричек Р. В., Гришин И. В., Хундонугбо Э. Ф., Думин Д. И. Позиционирование элементов сенсорной сети с использованием беспилотных летательных аппаратов // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 2. С. 26–32.

## Аннотация

**Предмет исследования.** Статья посвящена методу определения местоположения элементов сенсорной сети с использованием беспилотных летательных аппаратов. **Метод.** В качестве метода эмпирического исследования был выбран эксперимент, в ходе которого по описываемому методу были определены позиции узлов сенсорной сети. **Основные результаты.** В статье предложен метод определения местоположения сенсорных узлов сенсорной сети. Рассмотренный метод позволяет повысить точность данных о местоположении каждого узла сенсорной сети, а также построить карту сенсорного поля для последующего оптимального облета. **Практическая значимость.** Предлагаемый метод может быть использован при решении задач сбора и доставки данных с сенсорного поля в сеть связи общего пользования.

## Ключевые слова

летающая сенсорная сеть, FUSN, БПЛА, квадрокоптер, сенсорный узел, датчик, позиционирование.



# METHOD OF POSITIONING ELEMENTS OF A SENSOR NETWORK USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

R. Kirichek<sup>1</sup>, I. Grishin<sup>1</sup>, E. Hundonugbo<sup>1</sup>, D. Dumin<sup>1</sup>

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

## Article info

Article in Russian.

Received 28.03.16, accepted 29.04.16.

**For citation:** Kirichek R., Grishin I., Hundonugbo E., Dumin D.: Method of Positioning Elements of a Sensor Network Using Unmanned Aerial Vehicles // Telecom IT. 2016. Vol. 4. Iss. 2. pp. 26–32 (in Russian).

## Abstract

**Research subject.** The article is devoted to the method of determining the location of elements of a sensor network using unmanned aerial vehicles. **Method.** As a method of empirical research was chosen as the experiment, in which the described method was determined by the positions of the nodes of a sensor network. **Core results.** In the article the method of determining the location of sensor nodes of a sensor network. The considered method allows to improve the accuracy of the location data of each node of the sensor network, as well as to build a map of the touch fields for subsequent optimal flight. **Practical relevance.** The proposed method can be used when solving the tasks of collecting and delivering data from sensor fields in a communication network of General use.

## Keywords

flying sensor network, FUSN, UAV, quadcopter, sensor node, sensor, positioning.

## Введение

В настоящее время беспроводные сенсорные сети находят широкое применение во многих отраслях человеческой деятельности. В частности, такие сети успешно применяются в лесном хозяйстве для своевременного обнаружения пожаров или в горной местности, позволяя предсказывать сходы лавин [1, 2]. Очевидно, что в вышеперечисленных случаях осуществляется развертывание больших сенсорных сетей в труднодоступных местностях. Рациональным решением данной проблемы является инсталляция над заданной местностью сенсорных узлов с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолётного типа [3, 4, 5, 6]. Однако такое недетерминированное размещение требует определения координат этих узлов, что может быть особенно критичным при решении задач, где необходимо точное знание об их местоположении.

## Принцип работы

В ходе развертывания сенсорной сети определяется её топология на основании показателя уровня принимаемого сигнала RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Технические характеристики сенсорных узлов позволяют рассчитать расстояние между двумя приемопередатчиками  $m$  и  $(n, m = 1...N$ , где  $N$ –



количество узлов в сенсорной сети)  $d_{mn}$  с помощью уравнения потерь в тракте передачи [7]:

$$\hat{p}_{m,n}, \text{дБм} = p_t, \text{дБм} + 10\lg(G) + 20\lg\lambda - 20\lg(4\pi) - 20\lg(d_{mn}) + \psi = p_{m,n} + \psi,$$

где  $\hat{p}_{m,n}$  – оценка уровня принимаемого сигнала;  $p_t$  – уровень сигнала на выходе передатчика;  $G$  – коэффициент усиления антенны;  $\lambda$  – длина волны радиосигнала, м;  $\psi$  – гауссовская случайная величина, описывающая неоднородности среды распространения сигнала, определяющая величину отклонения рассчитанных координат сенсорного узла от его истинного местоположения;  $p_{mn}$  – уровень принимаемого сигнала без учета величины  $\psi$  [8].

Переводя значения уровней передаваемого и принимаемого сигналов в мощности, получим выражение для расчета оценки расстояния между сенсорными узлами  $m$  и  $n$ :

$$\hat{d}_{mn} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{tm} G^2}{P_{rn}}},$$

где  $P_{tm}$  – мощность сигнала на выходе передатчика  $m$ -го узла, Вт;  $P_{rn}$  – мощность сигнала на входе приемника  $n$ -го узла, Вт.

С другой стороны величину  $\hat{d}_{mn}$  можно рассматривать как:

$$\hat{d}_{mn} = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 + (z_m - z_n)^2},$$

где  $[x_m, y_m, z_m]$ ,  $[x_n, y_n, z_n]$  – координаты сенсорных узлов  $m$  и  $n$  соответственно.

Живучесть сенсорных сетей обеспечивается избыточным количеством связей между узлами, таким образом, по трём узлам с известными координатами и находящимися в зоне видимости друг друга, методом трилатерации можно рассчитать координаты других узлов, находящихся в зоне их видимости, на основании координат которых рассчитываются координаты следующих узлов и так далее [9].

Однако поскольку  $P_{rn} = \text{dec}(0,1(\hat{p}_{mn})) = \text{dec}(0,1(p_{mn} + \psi))$ , то

$$\hat{d}_{mn} = d_{mn} + \varepsilon_{mn},$$

где  $\varepsilon_{mn}$  – погрешность определения расстояния между узлами  $m$  и  $n$ . Следовательно, рассчитываемые методом трилатерации координаты узла  $n$ ,  $n=1..N$  рассчитываются с погрешностью:  $[x_n + \Delta x_n, y_n + \Delta y_n, z_n + \Delta z_n]$ , которая увеличивается при последующих расчетах координат узлов сенсорной сети, достигая значений десятков и даже сотен метров [10].

Возможным решением данной проблемы является корректировка координат узлов сети с использованием БПЛА.

На ряд сенсорных узлов, разбрасываемых над местностью, предлагается устанавливать светодиоды, работающие в инфракрасном диапазоне. Ввиду ограниченности телесного угла и равновероятностного характера ориентации сенсорного узла при падении, существует вероятность того, что светодиод будет направлен вниз или в сторону и БПЛА не сможет обнаружить данный узел. Установка нескольких светодиодов на узел, таким образом, чтобы при падении



любой стороной вниз, хотя бы один из них был направлен вверх, хоть и решает эту задачу, но не является рациональной с точки зрения энергопотребления и стоимости. Разумнее вносить такие конструктивные изменения в корпус сенсорного узла, которые увеличат вероятность того, что светодиод будет направлен вверх. Например, это может быть смещение его центра тяжести, либо добавление стабилизирующего оперения.

Выбор диапазона обусловлен тем, что в ИК диапазоне меньше мешающих излучений, чем в видимом диапазоне, а также низкой стоимостью и большим разнообразием ИК светодиодов. К тому же, излучая в невидимом для глаза диапазоне, сенсорное поле не будет привлекать к себе внимание.

На БПЛА предполагается устанавливать ИК - камеру направленную вертикально вниз. Зная высоту и характеристики объектива камеры, а именно угол обзора, на получаемое изображение поверхности можно наложить координатную сетку.

Алгоритм определения корректировки координат будет выглядеть следующим образом:

1. БПЛА зависает над сенсорным полем и фиксирует свои координаты, полученные из модуля глобального позиционирования. Точка, являющаяся проекцией БПЛА на плоскость земли, принимается за начало координат.

2. БПЛА отправляет команду по радиоканалу, при получении которой узлы должны ответить миганием светодиода. Каждый сенсорный узел имеет уникальный идентификатор, к которому в рамках данного сенсорного поля можно присвоить число в интервале  $[1..N]$ , где  $N$  – количество узлов на данном поле. Одно из самых очевидных решений заключается в том, чтобы закодировать номер узла в двоичной системе последовательностью, где 1 будет соответствовать включение светодиода, а 0 – его выключение. Комбинация из  $k$  включений и выключений позволяет закодировать  $2^k$  узлов, что позволяет представить номер требуемого количества узлов. При этом формируемая последовательность должна содержать и дополнительные данные, необходимые для учета условий распространения оптического сигнала, а также возможности по его обработке контроллером БПЛА. Способ передачи и обработки данных должен обеспечивать возможность их приема и декодирования при минимальных затратах вычислительных ресурсов контроллера. Приведенный ниже пример иллюстрирует возможные результаты данной операции. Первый кадр рисунка – изначальное изображение, получаемое камерой. В этот момент БПЛА передает узлам команду по радиоканалу на передачу последовательности. На втором кадре все сенсорные узлы обозначают себя и своё местоположение, это является флагом перед передачей.

На последующем этапе обнаружения сенсорные узлы передают данные о своих номерах (идентификаторах).

3. ИК камера регистрирует полученные сигналы и совмещает их с координатной сеткой.

4. В процессе полета БПЛА собираются данные о его крене  $\alpha$ , тангаже  $\beta$  и рыскании  $\gamma$ , получаемые с имеющегося на борту БПЛА гироскопа, а также данные о высоте, получаемые с барометра БПЛА. На основании данных рассчитываются матрицы поворота изображения ИК камеры, на основании которых производится корректировка местоположения узлов, снабженных ИК светодиодом. Матрицы поворота для  $n$ -го определяемого узла рассчитываются:



$$\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_n & -\sin \alpha_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n \end{bmatrix} \mathbf{R}_Y = \begin{bmatrix} \cos \beta_n & 0 & \sin \beta_n \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_n & 0 & \cos \beta_n \end{bmatrix} \mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} \cos \gamma_n & -\sin \gamma_n & 0 \\ \sin \gamma_n & \cos \gamma_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ ,  $\gamma_n$  – крен, тангаж и рыскание БПЛА в точке фиксирования  $n$ -го узла.

5. К уникальному идентификатору сенсорного узла присваиваются скорректированные относительные координаты, по которым определяются абсолютные координаты узла сенсорной сети.

6. По уточненным данным о координатах обнаруженных узлов производится корректировка координат всех сенсорных узлов сети.

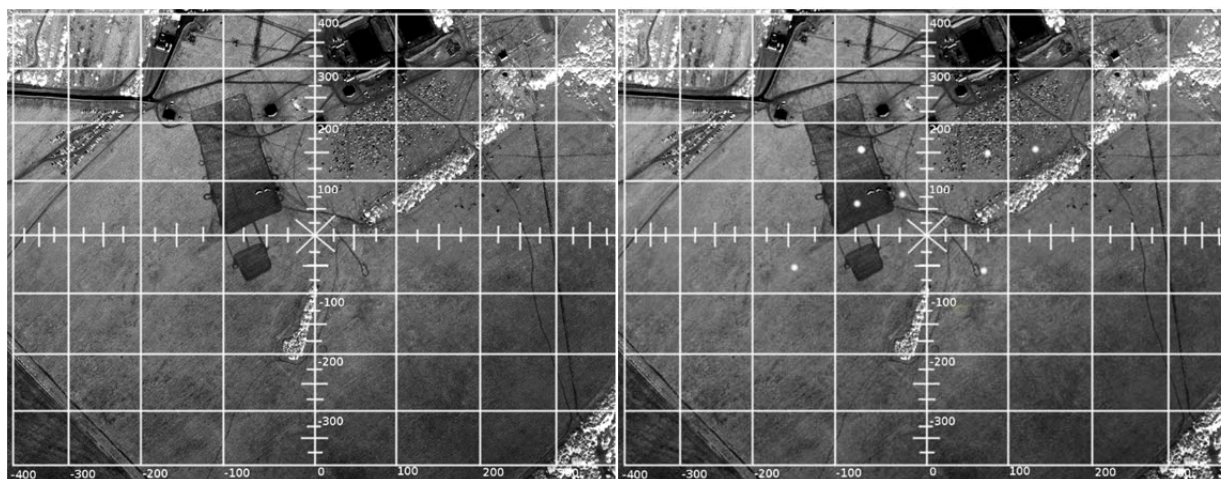


Рис. Фиксация сенсорных узлов ИК камерой БПЛА

## Заключение

В статье предложен метод определения местоположения сенсорных узлов сенсорной сети. Рассмотренный метод позволяет повысить точность данных о местоположении каждого узла сенсорной сети, а также построить карту сенсорного поля для последующего оптимального облета. Таким образом, предлагаемый метод может быть использован при решении задач сбора и доставки данных с сенсорного поля в сеть связи общего пользования.

*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., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб. : Любавич, 2011. 312 с. ISBN 978-5-86983-318-1.
2. 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>
3. 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.



4. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В. Летающие сенсорные сети – новое приложение Интернета Вещей // Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». СПб. : СПбГУТ, 2015. С. 17–22.
5. 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.
6. Koucheryavy A., Vladyko 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.
7. Pathak O., Palaskar P., Palkar R., Tawari M. Wi-Fi Indoor Positioning System Based on RSSI Measurements from Wi-Fi Access Points – A Trilateration Approach // International Journal of Scientific & Engineering Research, 2014. Vol. 5, Iss. 4. pp. 1234–1238.
8. Kirichek R., Grishin I., Okuneva D., Falin M. Development of a Node-Positioning Algorithm for Wireless Sensor Networks in 3D Space // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2016. pp. 279–282.
9. Костык Н. Н., Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В. Сравнение эффективности позиционирования для сетей Bluetooth, WiFi и ZigBee // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 2. С. 53–61. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/2-15.pdf>
10. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов / под ред. Д. Дардари, Э. Фаллетти, М. Луизе. М. : Техносфера, 2012. 528 с. ISBN 978-5-94836-338-7.

## References

1. Koucheryavy, A. E., Prokopiev, A. V., Koucheryavy, E. A. Self-Organizing Networks. SPb. : Lubavich, 2011. 312 p. ISBN 978-5-86983-318-1.
2. 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>
3. Koucheryavy, A. E., Vladyko, 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.
4. Koucheryavy, A. E., Vladyko, A. G., Kirichek, R. V. Flying Sensor Networks – New Application of the Internet of things // 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.
5. Koucheryavy, A. E., Vladyko, A. G., Kirichek, R. V. Theoretical and Practical Directions in the Area of Flying Sensor Network Research // Electrosvyaz'. 2015. No. 7. pp. 9–11.
6. Koucheryavy, A., Vladyko, 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.
7. Pathak, O., Palaskar, P., Palkar, R., Tawari M. Wi-Fi Indoor Positioning System Based on RSSI Measurements from Wi-Fi Access Points – A Trilateration Approach // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2014. Vol. 5, Iss. 4. pp. 1234–1238.
8. Kirichek, R., Grishin, I., Okuneva, D., Falin, M. Development of a Node-positioning Algorithm for Wireless Sensor Networks in 3D Space // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2016. pp. 279–282.
9. Kostyk, I. N., Koucheryavy, A. E., Prokopiev, A. V. Comparison of the Effectiveness of Positioning for Bluetooth, Wifi and ZigBee // Telecom IT. 2015. No. 2. pp. 53–61. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/2-15.pdf>
10. Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques. A Signal Processing Perspective / edited D. Dardari, E. Falletti, M. Luise. M. : Technosphaera, 2012. 528 p. ISBN 978-0-12-382084-6 (English).

**Киричек Руслан Валентинович**

– кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация,  
[kirichek@sut.ru](mailto:kirichek@sut.ru)



- Гришин Илья Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, msp\_sut@list.ru
- Хундобунго Элизе Франк** – аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, franckyrusse@mail.ru
- Думин Дмитрий Игоревич** – студент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, xostmachine@gmail.com
- Kirichek Ruslan** – Ph.D., assistant professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, ruslan.stk@gmail.com
- Grishin Ilya** – Ph.D., assistant professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, msp\_sut@list.ru
- Hundonugbo Elisee Franck** – postgraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, franckyrusse@mail.ru
- Dumin Dumin** – student, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, xostmachine@gmail.com