

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА КАК МОБИЛЬНОГО ШЛЮЗА ЛЕТАЮЩЕЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ АВТОНОМНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

А. Д. Вырелкин¹, А. И. Выборнова¹, А. Е. Кучерявый¹

¹ СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
Адрес для переписки: akouch@mail.ru

Информация о статье

УДК 004.722:629.7.066

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 11.01.16, принята к печати 12.02.16.

Ссылка для цитирования: Вырелкин А. Д., Выборнова А. И., Кучерявый А. Е. Исследование возможности применения БПЛА как мобильного шлюза летающей сенсорной сети для наземных автономных сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 1. С. 29–36.

Аннотация

Предмет исследования. Статья посвящена вопросам срока жизненного цикла наземной беспроводной сенсорной сети, построенной с использованием автономных сенсорных узлов, а также исследованию возможности его увеличения, за счет внедрения сегмента летающей сенсорной сети в виде беспилотного летательного аппарата. **Метод.** В исследовании был применен метод сравнения энергетических затрат на передачу пакетов данных между автономными головными узлами кластеров сенсорного поля и шлюзом для случаев его стационарного и мобильного состояний. **Основные результаты.** В ходе исследования рассмотрена специфика взаимодействия сенсорных узлов поля с подвижным шлюзом, и установлено, что использование летательного аппарата в качестве мобильного шлюза вместо шлюза стационарного позволяет достичь значительной экономии энергии узлов наземной сенсорной сети, что было подтверждено математическим расчётом. Необходимость в разработке и оптимизации энергоэффективных алгоритмов передачи данных внутри сенсорной сети отражает актуальность проделанной работы. **Практическая значимость** данного исследования заключается в возможности уменьшения энергетических и, как следствие, финансовых расходов, затрачиваемых на обслуживание узлов всепроникающей сенсорной сети.

Ключевые слова

беспроводная сенсорная сеть, БСС, летающая сенсорная сеть, ЛСС, жизненный цикл сенсорной сети, головной узел, беспилотный летающий аппарат, БПЛА.



ANALYSIS OF UAV IMPLEMENTATION AS A MOBILE CLUSTER HEAD OF THE GROUND-BASED AUTONOMOUS SENSOR NETWORKS

A. Vyrelkin¹, A. Vybornova¹, A. Koucheryavy¹

¹ SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation
Corresponding author: akouch@mail.ru

Article info

Article in Russian.

Received 11.01.16, accepted 12.02.16.

For citation: Vyrelkin A., Vybornova A., Koucheryavy A.: Analysis of UAV Implementation as a Mobile Cluster Head of the Ground-based Autonomous Sensor Networks // Telecom IT. 2016. Vol. 4. Iss. 1. pp. 29–36 (in Russian).

Abstract

Research subject. The article explores the questions of a lifecycle of ground-based wireless sensor networks with autonomous nodes. The research provides abilities to increase the WSN lifecycle due to usage of unmanned aerial vehicles (UAV) as a mobile gateway (sink) of the autonomous WSN.

Method. In this article we have compared power consumption of the cluster head nodes to transmit packets to the stationary and mobile sensor network gateway. **Core results.** In this research the specificity of cluster head nodes and mobile sink interaction was considered and it was found out that usage of UAV as a mobile gateway allowed to achieve the significant energy savings for the ground network section. Theoretical relevance of the research lies in the necessity of the new energy-efficient protocols and algorithms. **Practical relevance** of this research consists in the energy and therefore cost savings for the maintenance of the wireless sensor network.

Keywords

Wireless Sensor Networks, Flying Sensor Networks, sensor network lifecycle, cluster head, unmanned aerial vehicle.

Введение

В настоящее время новейшие технологии беспроводной связи приобретают колоссальную популярность, во многом обусловленную потребностью автоматизации производственных процессов и их мониторинга. Одним из перспективных направлений является разработка и внедрение нового класса распределённых коммуникационных систем – беспроводных сенсорных сетей (БСС), по следующим направлениям: промышленность, транспортная инфраструктура, коммунальное и сельское хозяйство, охрана объектов и многие другие [1, 2].

Ещё большую актуальность сегодня приобретает разработка и внедрение так называемых летающих сенсорных сетей (ЛСС), в которых беспилотный летательный аппарат (БПЛА) может выступать в качестве устройства для сбора информации, накопленной датчиками за время их автономной работы, а также её доставки до сервера для дальнейшей обработки и хранения [3].

Рассмотрим следующие положения:

а) основные принципы функционирования БСС;



б) основной принцип обмена информации между наземными и воздушными сегментами сенсорных сетей;

в) актуальность использования БПЛА для сбора данных с автономных узлов наземной сенсорной сети;

г) исследование способов рационального распределения нагрузки на узлы сети с целью увеличения их жизненного цикла.

Предложенные методы базируются на моделях, построенных для типового фрагмента наземной БСС.

Модель сети

В качестве модели выберем сенсорное поле с равномерно распределёнными автономными узлами долгосрочного функционирования и кластеризацией на основе базового алгоритма LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [4], позволяющего снизить потребление энергии, необходимой для создания и поддержания кластеров в целях увеличения срока службы беспроводной сенсорной сети. В соответствии с практикой использования алгоритма LEACH доля головных узлов предопределена в количестве 10 % от общего числа сенсорных узлов.

Для простоты расчёта считаем, что энергия, затрачиваемая БПЛА на полёт и обмен данными не ограничена. Параметры модели и их значения приведены в таблице 1. Все сенсорные узлы однородны, т. е. имеют одинаковый радиус действия и начальные энергетические характеристики [5]. Сравниваются два варианта: первый – БПЛА является мобильным шлюзом (рис. 1), и второй – стационарный шлюз находится в центре выбранного фрагмента наземного сенсорного поля (рис. 2).

Таблица 1.

Параметры и их значения для моделирования

Функции и переменные	Величина	Единица измерения
Количество узлов наземных узлов (M)	50	шт
Количество БПЛА	1	шт
Вероятность головных узлов (P_{opt})	10	%
Площадь поля (S)	10 000	м ²
Размер пакета данных (k)	1024	бит

Сенсорные узлы полностью автономны и распределены на плоскости размером 100 x 100 м. Радиус действия сенсорного узла – 20 м, запас энергии в каждом 2 Дж, расход энергии на приём – 50 нДж/бит, на передачу – 50 Дж/бит и дополнительно 100 пДж/бит/м² – энергия, затрачиваемая на усиление сигнала при передаче данных [6].

Необходимо отметить, что БПЛА движется по заранее заданному маршруту, собирая данные с головных узлов наземной БСС. В данном исследовании при расчёте скорость движения БПЛА не учитывается, а учитывается только изменение высоты полёта.



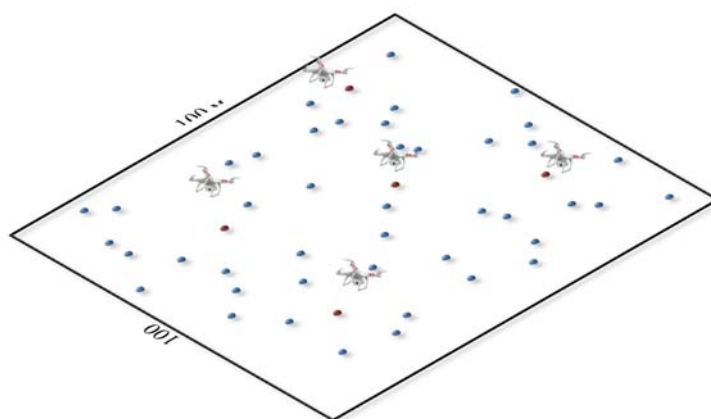


Рис. 1. БПЛА является мобильным шлюзом и собирает информацию непосредственно с головных узлов наземной БСС по заданному алгоритму в различные моменты времени

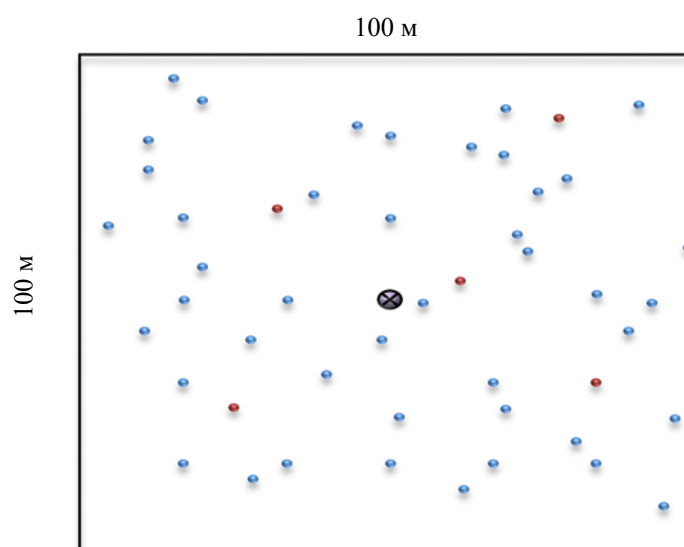


Рис. 2. Головные узлы наземной БСС передают данные стационарному наземному шлюзу

Процесс передачи блока данных в сенсорном поле

На рис. 3 представлен процесс передачи блока данных (пакета) от передающего головного узла (датчика) наземной сенсорной сети к шлюзу. Видно, что энергетические затраты на передачу данных в радиоканал, представляющие собой совокупность электрических сигналов, определённым образом преобразованных в цифровые блоки данных, во многом зависят от размера передаваемых пакетов и дистанции между головным узлом сети и принимающим шлюзом.

Таким образом, расход энергии на передачу данных от головных узлов к шлюзу можно рассчитать по формуле:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + E_{amp} * k * d^2, \quad (1)$$



где E_{Tx} – расход энергии на передачу данных от головных узлов наземной сенсорной сети к шлюзу [мДж/бит], E_{elec} – энергетические затраты передающего датчика [нДж/бит], E_{amp} – энергетические затраты на усиление при передаче [пДж*м²/бит], k – передаваемый пакет данных [Кбит], d – расстояние между датчиками сенсорной сети и шлюзом [м].

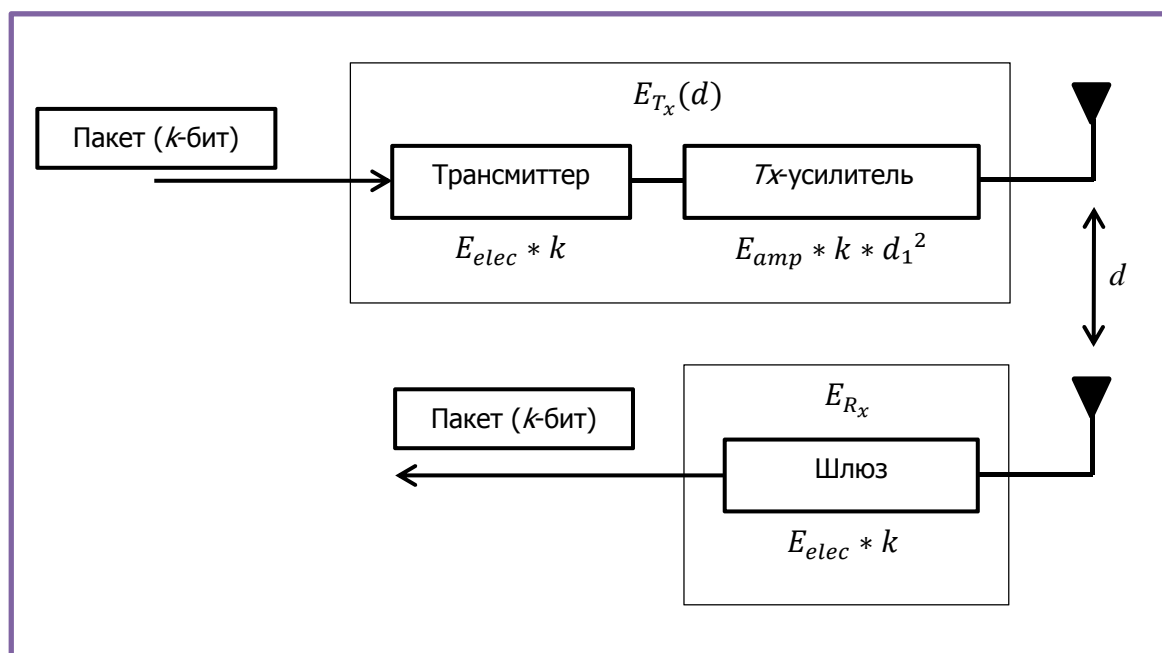


Рис. 3. Процесс передачи блока данных в сенсорном поле

Энергетические затраты на формирование, обработку и преобразование сигналов в блоки данных процессором датчика были рассмотрены в [7]. Энергетические затраты E_{Rx} на приём данных шлюзом не учитываются, так как шлюз или БПЛА потенциально можно снабдить достаточно ёмким источником электроэнергии.

Расчёт энергетических затрат сети

Сравним энергетические затраты на передачу пакетов данных от головных узлов наземного сегмента БСС к шлюзу и затраты на передачу данных от сенсорных головных узлов непосредственно беспилотному летательному аппарату в случае, когда БПЛА выступает в роли мобильного шлюза. Энергетические параметры и их значения приведены в таблице 2.

Рассмотрим среднее расстояние, на которое головному узлу кластера необходимо передать данные в случае, когда шлюз сети неподвижен и находится в центре сенсорного поля.



Таблица 2.

Энергетические параметры и их значения для моделирования

Функции и переменные	Величина	Единица измерения
Первичная энергия на узел (E_0)	2	Дж
Энергетические затраты на передачу данных	50	$\frac{\text{нДж}}{\text{бит}}$
Постоянное усиление (E_{amp})	100	$\frac{\text{пДж}}{\text{бит/м}^2}$

Согласно описанным ранее условиям, узлы распределены на плоскости в соответствии с процессом Пуассона. Исходя из анализа, представленного в [8], функция плотности вероятности расстояния r от произвольной точки плоскости до n -го узла сети в этом случае может быть представлена как:

$$f(r, n) = \frac{2(\pi\lambda)^n \cdot r^{2n-1}}{(n-1)!} e^{-\pi\lambda r^2}, \quad (2)$$

где λ – плотность распределения узлов по плоскости, $\lambda = P_{\text{опт}} \cdot N/S$.

Если принять:

$$x = 2\pi\lambda \cdot r^2, \quad (3)$$

то формула (2) может быть представлена как плотность вероятности распределения χ^2 со степенью свободы $k = 2n$:

$$f(x, n) = \frac{(1/2)^{k/2} \cdot r^{2n-1}}{\Gamma(k/2)} x^{\frac{k}{2}-1} e^{-x/2}$$

Исходя из того, что математическое ожидание распределения χ^2 равно $k = 2n$, и учитывая формулу (3), математическое ожидание расстояния от произвольной точки до n -го узла в Пуассоновском поле таким образом равно:

$$r_n = \sqrt{\frac{n}{\pi\lambda}}.$$

В этом случае среднее расстояние до всех сенсорных узлов, выбранных головными узлами кластера, можно представить, как:

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^{P_{\text{опт}} \cdot N} r_i = \sum_{i=1}^{P_{\text{опт}} \cdot N} \sqrt{\frac{i}{\pi\lambda}}. \quad (4)$$

Учитывая свойство отсутствия памяти Пуассоновского процесса, в качестве произвольной точки можно выбрать центр сенсорного поля. В этом случае для описанной во втором разделе модели БСС среднее расстояние между головными узлами кластеров поля и шлюзом составляет: $\bar{d} = 42,3$ м.

В соответствии с формулой (1) энергия, необходимая для передачи пакета данных от головного узла кластера до неподвижного шлюза в центре поля, с учётом выбранных значений, приведённых в таблице 2, равна $E_I = 242$ мкДж.



На рис. 4 показано изменение энергии, необходимой для передачи данных от головного узла кластера к БПЛА, для случаев полёта беспилотного летательного аппарата на различной высоте.

Как видно из приведённого графика, энергетические затраты на передачу информации от головных узлов кластера наземной БСС до неподвижного шлюза в центре поля гораздо выше, чем при непосредственной её передаче БПЛА, летающего на высоте до 43,2 м.

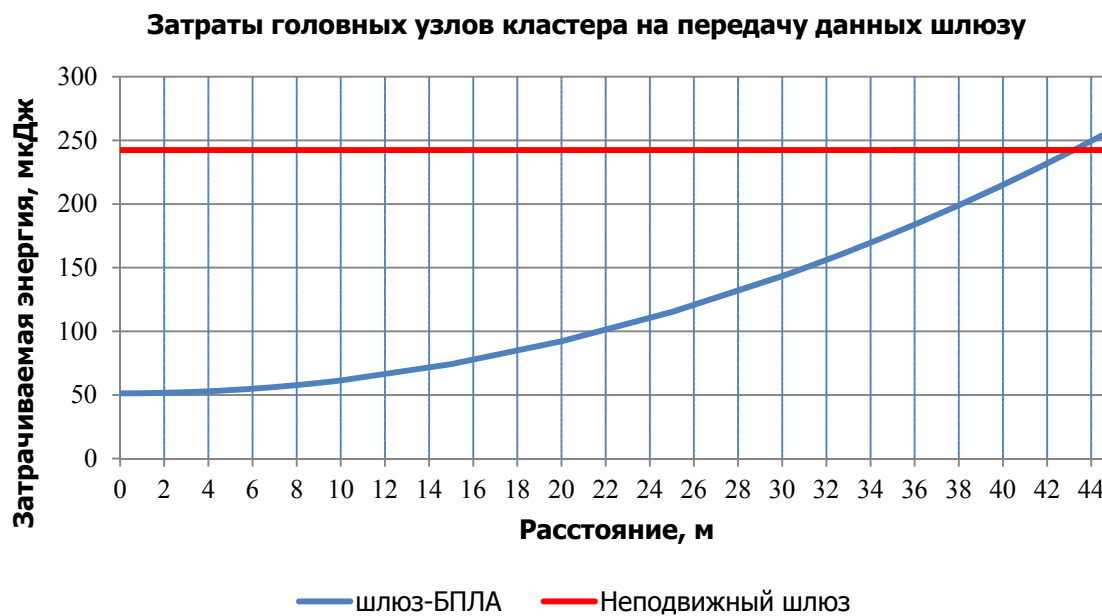


Рис. 4. Энергетические затраты на передачу данных от головных узлов кластера шлюзу

Заключение

1. Использование БПЛА в качестве мобильного шлюза вместо неподвижного наземного шлюза позволяет достичь значительной экономии энергии узлов наземной сенсорной сети.

2. Использование БПЛА в качестве временного головного узла с большой вероятностью позволит достичь более эффективного энергопотребления, затрачиваемого не только на передачу данных между головными узлами кластеров БСС и шлюзами, но и между всеми узлами поля.

Литература

1. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта. М. : ФГУП ЦНИИС, 2008. 296 с.
2. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб. : Любавич. 2011. 311 с.
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. Anatha P. Chandarkasan // Energy Aware Software 2012.
5. Футахи А., Парамонов А. И., Прокопьев А. В., Кучерявый А. Е. Сенсорные сети в гетерогенной зоне системы длительной эволюции // Электросвязь. 2015. № 3. С. 36–39.
6. Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. HICSS 2000, doi: 10.1109/HICSS.2000.926982.



7. Кучерявый А. Е., Вырелкин А. Д., Прокопьев А. В. Исследование возможности применения беспилотного летательного аппарата в качестве временного головного узла кластеров наземной сенсорной сети // Электросвязь. 2015. № 9. С. 27–34.

8. Moltchanov D. Distance distributions in random networks. Ad Hoc Networks. 2012. V. 10. n. 6. pp. 1146–1166.

References

1. Kucheryavy A. E., Paramonov A. I., Kucheryavy E.A. Seti svyazi obshchego pol'zovaniya. Tendencii razvitiya i metody raschyota (Public Communication Network. Trends in the Development and Calculation Methods). Moscow : FGUP CNIIS, 2008. 296 p.

2. Kucheryavy A. E., Prokop'ev A. V., Kucheryavy E. A. Samoorganizuyushchiesya seti (Self-Organizing Networks). SPb. : Lyubavich. 2011. 311 p.

3. Kucheryavy A. E., Vladyko A. G., Kirichek R. V., Paramonov A. I., Prokop'ev A. V., Bogdanov I. A., Dort-Gol'c A. A. Flying Sensor Networks // Elektrosvyaz'. 2014. no. 9. pp. 2–5.

4. Anatha P. Chandarkasan // Energy Aware Software 2012.

5. Futahi A., Paramonov A. I., Prokop'ev A. V., Kucheryavy A. E. Sensor Networks in the Heterogeneous Region of a Long Evolution of the System // Elektrosvyaz'. 2015. no. 3. pp. 36–39.

6. Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. HICSS 2000, doi: 10.1109/HICSS.2000.926982.

7. Kucheryavy A. E., Vyrelkin A. D., Prokop'ev A. V. Study the Possibility of Using Unmanned Aircraft As a Temporary Headend Ground Sensor Network Cluster // Elektrosvyaz'. 2015. no. 9. pp. 27–34.

8. Moltchanov D. Distance Distributions in Random Networks. Ad Hoc Networks. 2012. vol. 10. no. 6. pp. 1146–1166.

Вырелкин Александр Дмитриевич – студент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, vyrelkin@spbgut.ru

Выборнова Анастасия Игоревна – кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, a.vybornova@gmail.com

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

Vyrelkin Alexander – student, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, vyrelkin@spbgut.ru

Vybornova Anastasia – Ph.D., assistant professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, a.vybornova@gmail.com

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

