

УДК 004.725

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С ПОПОЛНЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Е.А. Бакин<sup>а</sup>, Н.В. Апанасенко<sup>а</sup>, И.С. Иванов<sup>а</sup>, М.Н. Шелест<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Адрес для переписки: [jenyb@vu.spb.ru](mailto:jenyb@vu.spb.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 05.05.17, принята к печати 10.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-670-676

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Бакин Е.А., Апанасенко Н.В., Иванов И.С., Шелест М.Н. Алгоритм управления антенной системой базовой станции для сенсорной сети с пополняемыми источниками энергии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 670–676. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-670-676

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрены вопросы электронного управления движением луча в антенной системе на базовой станции сенсорной сети. Специфика рассматриваемой задачи заключается в наличии на узлах сети модулей сбора внешней электромагнитной энергии (харвестеров) для пополнения автономных источников питания. Алгоритм управления лучом, осуществляющим подзаряд сенсоров, напрямую определяет стабильность функционирования системы в целом. **Метод.** Предложенный метод оптимизации диаграммы направленности учитывает как характеристики существующих прототипов харвестеров, так и возможности адаптивного управления амплитудно-фазовым распределением антенны. Метод основан на преобразовании исходной оптимизационной задачи к задаче квадратичного программирования с последующим применением алгоритма аппроксимации полиэдрами. Эффективность предлагаемого решения проанализирована методом имитационного моделирования. **Основные результаты.** В серии вычислительных экспериментов показано, что применение рассматриваемого метода позволяет значительно снизить мощность излучаемой базовой станцией электромагнитной энергии. В малых сетях (три оконечных устройства) требуемая мощность излучения может быть снижена на 4,7 дБ по сравнению с изотропным излучением. В крупных сетях (тридцать шесть оконечных устройств) получено снижение мощности излучения на 1,8 дБ. **Практическая значимость.** Алгоритм может найти применение при проектировании и поддержании работы сенсорных сетей, для которых характерно статичное расположение оконечных устройств и в которых поддержание постоянного электропитания является критическим процессом.

### Ключевые слова

сенсорная сеть, пополняемые источники энергии, многоантенная передача, синтез диаграммы направленности

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы УМНИК (договор № 7009ГУ2015 от 03.08.2015).

## BEAMFORMING ALGORITHM FOR BASE STATION IN SENSOR NETWORK WITH ENERGY HARVESTING

Е.А. Bakin<sup>а</sup>, N.V. Apanasenko<sup>а</sup>, I.S. Ivanov<sup>а</sup>, M.N. Shelest<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: [jenyb@vu.spb.ru](mailto:jenyb@vu.spb.ru)

### Article info

Received 05.05.17, accepted 10.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-670-676

Article in Russian

**For citation:** Bakin E.A., Apanasenko N.V., Ivanov I.S., Shelest M.N. Beamforming algorithm for base station in sensor network with energy harvesting. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 670–676 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-670-676

### Abstract

**Subject of Research.** We consider beamforming issues for a base station multiple antenna system in a sensor network. The feature of the considered task lies in equipment of network nodes with energy harvesters for accumulation of electromagnetic energy for a battery charge. Hence, beamforming algorithm influences significantly on general system stability. **Method.** We propose a method for antenna pattern optimization that considers both characteristics of existing prototypes of harvesters and

adaptive adjustment of antenna amplitude-phase components. This method is based on a reduction of the initial optimization problem to a quadratic optimization problem with consequent application of polyhedral approximation. An efficiency of the proposed approach is analyzed via simulations. **Main Results.** In series of computational experiments we have discovered, that an application of the considered method brings to a significant reduction of a base station transmitted electromagnetic power. Thus, for small networks (three nodes) the gain may achieve up to 4.7 dB in comparison with isotropic radiation, for large networks (thirty six nodes) it is up to 1.8 dB. **Practical Relevance.** The considered algorithm may be applied in development and operation support of sensor networks with nodes located statically while a constant and reliable power management is a crucial process.

#### Keywords

sensor network, energy harvesting, multi-antenna transmission, radiation pattern synthesis

#### Acknowledgements

This research was financially supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in course of UMNik program (contract No. 7009GU2015 dated 03.08.2015).

### Введение

Как известно, продолжительность работы источника питания (ИП) оконечных устройств является важным фактором при проектировании и развертывании беспроводных сенсорных сетей (БСС). Так, продолжительность работы батареи одного узла может определять работу сети в целом [1]. Замена ИП в устройствах БСС может являться весьма дорогостоящей, а подчас и невыполнимой процедурой, что делает элементы питания в таких системах критическим элементом. Кроме того, как было отмечено в [2], организация процесса резервирования в подобных сетях может значительно повлиять на надежность функционирования системы в целом.

Одним из возможных способов увеличения продолжительности работы ИП сенсора является пополнение уровня энергии за счет внешних, физически удаленных источников электромагнитного излучения. Элементы сбора электромагнитной энергии, расположенные на сенсорах, называются харвестерами [3]. Источником энергии, в частности, может являться базовая станция сети (БС). Технические возможности современных БС позволяют сформировать узкую диаграмму направленности (ДН) за счет оснащения многоантенной системой (МАС), что позволяет организовать более эффективный подзаряд ИП.

За последнее время появилось большое количество работ с описанием прототипов и возможных схем использования систем с пополняемыми источниками энергии [1–4]. Также рассматривается специфика применения передатчика БС в качестве основного источника энергии для харвестеров [5–7]. Повышение эффективности пополнения энергии за счет формирования сложной ДН в МАС БС ранее рассматривались в работах [8–10]. К недостаткам указанных работ можно отнести упрощенную процедуру учета КПД харвестера, а также отсутствие изменения диаграммы во времени (как правило, диаграмма выставляется статично).

Настоящая работа направлена на частичное устранение указанных пробелов. В ней будут рассмотрены вопросы динамического управления МАС с учетом новых моделей харвестеров, построенных по последним экспериментальным данным.

### Базовая модель системы

Согласно принятой модели, сенсорная сеть состоит из  $K$  автономных устройств (сенсоров) и базовой станции, оснащенной многоантенной системой (МАС). МАС выполнена по стандартной схеме пассивной фазированной антенной решетки, в которой общий сигнал распределяется по  $N$  излучателям с внесением заданного усиления и фазового сдвига (рис. 1). На рисунке  $g_i$  обозначает коэффициент усиления по напряжению для  $i$ -го антенного элемента,  $\varphi_i$  – фазовый сдвиг.

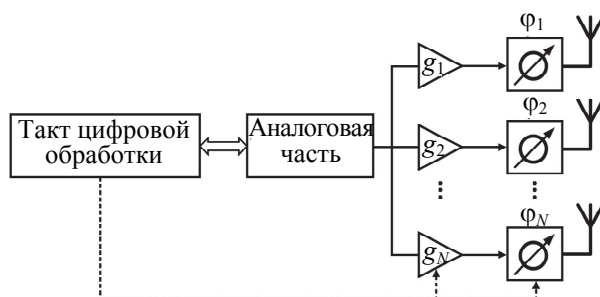


Рис. 1. Структурная схема передающей части базовой станции

Каждый сенсор содержит источник питания (аккумуляторный элемент или ионистор), уровень энергии в котором может пополняться за счет внешних электромагнитных полей (типовая схема сенсора изображена на рис. 2). Постоянным источником такого поля служит передатчик БС мощности  $P_{\text{ТХ}}$ . Благодаря МАС базовая станция может осуществлять формирование сложной диаграммы направленности, учитывающей местоположения сенсоров и их потребности в подзарядке.

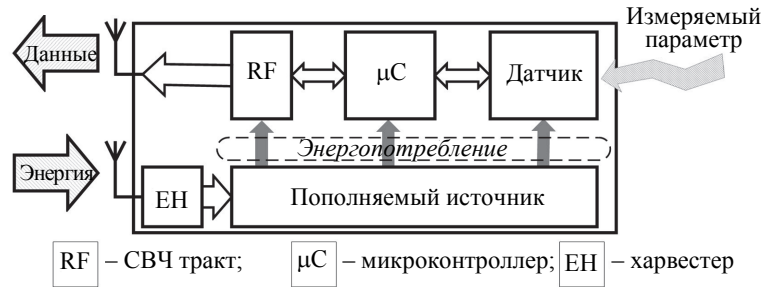


Рис. 2. Структура сенсора, оснащенного пополняемым источником энергии

Введем систему координат с центром в точке расположения БС. Пусть в данной системе координаты излучателей описываются векторами  $\mathbf{c}_i = (x_i, y_i, z_i), i = \overline{1, N}$ , а углы направления на устройства сенсорной сети – двухкомпонентным вектором  $(\theta_k, \phi_k), k = \overline{1, K}$ . Для нахождения фазового набегу между излучателем  $i$  и сенсором  $k$  воспользуемся стандартным преобразованием:

$$\tilde{\mathbf{c}}_{i,k} = (\tilde{x}_{i,k}, \tilde{y}_{i,k}, \tilde{z}_{i,k}) = \mathbf{R}_k^y \mathbf{R}_k^z \mathbf{c}_i.$$

Здесь  $\mathbf{R}_k^y$  и  $\mathbf{R}_k^z$  – операторы преобразования координат:

$$\mathbf{R}_k^y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) & 0 & \sin(\theta_k) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_k) & 0 & \cos(\theta_k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_k^z = \begin{bmatrix} \cos(\phi_k) & -\sin(\phi_k) & 0 \\ \sin(\phi_k) & \cos(\phi_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда фазовый набег можно определить как первую координату вектора  $\tilde{\mathbf{c}}_{i,k}$ , отнесенную к длине волны:

$$\Delta\phi_{i,k} = \frac{\tilde{x}_{i,k}}{\lambda}.$$

Обозначив через  $L_{i,k}$  затухание в канале между излучателем  $i$  и сенсором  $k$  и через  $D_{i,k}$  – коэффициент усиления антенны излучателя в направлении сенсора, введем вектор комплексных коэффициентов передачи между элементами антенной решетки и сенсором:

$$\dot{\mathbf{L}}_k = (L_{1,k} D_{1,k} e^{-j\Delta\phi_{1,j}}, L_{2,k} D_{2,k} e^{-j\Delta\phi_{2,j}}, \dots, L_{N,k} D_{N,k} e^{-j\Delta\phi_{N,j}})^T.$$

Если в МАС амплитудно-фазовое распределение (АФР) определяется вектором  $\dot{\mathbf{A}} = (g_1 e^{j\phi_1}, \dots, g_N e^{j\phi_N})$ , то средняя мощность, пополняющая источник энергии сенсора  $k$ , находится из следующего выражения:

$$P_k^{RX} = \eta_k \left\| \dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{L}}_k \right\|^2. \quad (1)$$

где  $\eta_k$  – КПД преобразователя сенсора  $k$ . Здесь и далее индекс  $RX$  будет использован для стандартного обозначения принятой мощности,  $TX$  – излученной. Если диаграмма направленности антенны БС проходит циклически через  $M$  состояний, задаваемых АФР  $\dot{\mathbf{A}}_1, \dots, \dot{\mathbf{A}}_M$ , то

$$P_k^{RX} = \sum_{m=1}^M \alpha_m \eta_k \left\| \dot{\mathbf{A}}_m \dot{\mathbf{L}}_k \right\|^2, \quad (2)$$

где  $\alpha_m$  – доля времени, проводимого МАС в состоянии  $m$ . Пользуясь введенной моделью, можно выполнить постановку различных оптимизационных задач, две из которых приводятся в следующем разделе.

### Оптимизация диаграммы направленности антенны БС

Одной из актуальных задач, возникающих при управлении БС, является снижение средней мощности ее излучения  $P_{TX}$ . При этом необходимо, чтобы каждый сенсор получал требуемую мощность подзаряда. Тогда на базе выражения (2) может быть сформулирована оптимизационная задача:

$$\begin{cases} P_{TX} = \sum_{m=1}^M \alpha_m \left\| \dot{\mathbf{A}}_m \right\|^2 \rightarrow \min \\ \sum_{m=1}^M \alpha_m \eta_k \left\| \dot{\mathbf{A}}_m \dot{\mathbf{L}}_k \right\|^2 \geq P_k^0, k = \overline{1, K} \end{cases}. \quad (3)$$

Здесь  $P_k^0$  – уровень мощности, необходимый сенсоры  $k$  для штатного функционирования. Искомые величины являются вектора  $\dot{\mathbf{A}}_1, \dots, \dot{\mathbf{A}}_M$  и коэффициенты  $\alpha_1, \dots, \alpha_M$ . Сведем выражение (3) к стандартной оптимизационной задаче в действительных аргументах. Введем следующие вспомогательные обозначения:

1.  $\mathbf{B}_m = \sqrt{\alpha_m} \begin{pmatrix} \text{Re } \dot{\mathbf{A}}_m & \text{Im } \dot{\mathbf{A}}_m \end{pmatrix};$
2.  $\mathbf{\Lambda}_k = \eta_k \begin{pmatrix} \text{Re } \dot{\mathbf{L}}_k & \text{Im } \dot{\mathbf{L}}_k \\ -\text{Im } \dot{\mathbf{L}}_k & \text{Re } \dot{\mathbf{L}}_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Re } \dot{\mathbf{L}}_k^T & -\text{Im } \dot{\mathbf{L}}_k^T \\ \text{Im } \dot{\mathbf{L}}_k^T & \text{Re } \dot{\mathbf{L}}_k^T \end{pmatrix}.$

Тогда несложно показать, что задача (3) может быть переформулирована следующим образом:

$$\begin{cases} P_{TX} = \sum_{m=1}^M \mathbf{B}_m \mathbf{B}_m^T \rightarrow \min \\ \sum_{m=1}^M \mathbf{B}_m \mathbf{\Lambda}_k \mathbf{B}_m^T \geq P_k^0, k = \overline{1, K} \end{cases}.$$

Наконец, введя  $\mathbf{B}_\Sigma = (\mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_M)$  и  $\mathbf{\Lambda}_k^\Sigma = \mathbf{\Lambda}_k \otimes \mathbf{E}_{[M]}$  (здесь символ  $\otimes$  обозначает кронекеровское произведение,  $\mathbf{E}_{[M]}$  – единичную матрицу размера  $M \times M$ ), получим окончательную запись оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} P_{TX} = \mathbf{B}_\Sigma \mathbf{B}_\Sigma^T \rightarrow \min \\ \mathbf{B}_\Sigma \mathbf{\Lambda}_k^\Sigma \mathbf{B}_\Sigma^T \geq P_k^0, k = \overline{1, K} \end{cases}. \quad (4)$$

Как видно, полученное выражение соответствует классической задаче квадратичного программирования (ЗКП). В настоящее время существует несколько классов эффективных алгоритмов численного решения ЗКП, среди которых стоит отметить метод внутренней точки [11], метод доверительных областей [12], а также метод аппроксимации полиэдрами [13]. Согласно последним исследованиям, метод, приведенный в [13], обеспечивает большую точность, нежели остальные, поэтому в дальнейшем, при имитационном моделировании системы, выбор был остановлен на нем.

Систему (4) также можно переформулировать в содержательную двойственную задачу: для заданной средней мощности излучения БС максимизировать гарантированную мощность подзаряда для каждого из сенсоров:

$$\begin{cases} P^0 \rightarrow \max \\ \mathbf{B}_t \mathbf{\Lambda}_k^\Sigma \mathbf{B}_t^T \geq P^0, k = \overline{1, K} \\ \mathbf{B}_\Sigma \mathbf{B}_\Sigma^T \leq P_{TX}^{\max} \end{cases}. \quad (5)$$

Отметим, что общие методы решения систем (4) и (5) эквивалентны. Извлечение векторов  $\dot{\mathbf{A}}_1, \dots, \dot{\mathbf{A}}_M$  и коэффициентов  $\alpha_1, \dots, \alpha_M$  из полученных  $\mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_M$  может осуществляться различными способами. На практике целесообразно поддерживать постоянную мощность, т.е.  $\|\dot{\mathbf{A}}_1\| = \dots = \|\dot{\mathbf{A}}_M\|$ .

### Учет реальной характеристики КПД преобразователя

Как указывалось во введении, в существующих работах анализ функционирования сенсорных сетей, БС которых оснащена МАС, производится без учета ряда важных особенностей КПД реальных образцов харвестеров. В частности, применяемое, как правило, выражение (1) не учитывает тот факт, что КПД харвестера зависит от входной мощности [1–4]. В работе [14] приводится аппроксимирующая зависимость, связывающая полезную (накапливаемую) мощность и мощность сигнала на входе харвестера (в децибелах):

$$P_H^{dB} = H(P_{RX}^{dB}) = \begin{cases} P_L + \Delta P \ln(P_{RX}^{dB} - P_{\min}), & P_{RX}^{dB} > P_{\min} \\ -\infty & P_{RX}^{dB} \leq P_{\min} \end{cases}. \quad (6)$$

Здесь  $P_H^{dB}$  – накапливаемая харвестером мощность (в дБ/мВт),  $P_{RX}^{dB}$  – мощность сигнала на входе харвестера (в дБ/мВт),  $P_{\min}$  – порог срабатывания харвестера,  $P_L$  – общие потери,  $\Delta P$  – масштабный коэффициент.

Для случая  $M = 1$  с учетом (6) получим следующий вариант ЗКП (4):

$$\begin{cases} P_{TX} = \mathbf{B}_\Sigma \mathbf{B}_\Sigma^T \rightarrow \min \\ H(10 \lg \mathbf{B}_i \mathbf{A}_k^\Sigma \mathbf{B}_i^T) \geq 10 \lg P_k^0, k = \overline{1, K} \end{cases}$$

Применив обратное преобразование к функции  $H(x)$ , получим:

$$\begin{cases} P_{TX} = \mathbf{B}_\Sigma \mathbf{B}_\Sigma^T \rightarrow \min \\ \mathbf{B}_i \mathbf{A}_k^\Sigma \mathbf{B}_i^T \geq 10^{\left(\frac{P_{\min} + \exp[\Delta P^{-1}(10 \lg P_k^0 - P_L)]}{10}\right)}, k = \overline{1, K} \end{cases} \quad (7)$$

Видно, что (7) также относится к классу ЗКП, а значит, оптимизация диаграммы направленности МАС БС с учетом реальных параметров харвестера может быть осуществлена без существенного увеличения вычислительных затрат.

### Результаты моделирования

В численном эксперименте была промоделирована базовая станция со следующими тремя МАС:

1. МАС1 с одним излучающим элементом (система обладает изотропной диаграммой направленности);
2. МАС2 с тремя излучающими элементами, расположенными в вершинах равностороннего треугольника с длиной стороны  $\lambda/2$ ;
3. МАС3 с тремя излучающими элементами, расположенными в вершинах равностороннего треугольника с длиной стороны  $\lambda$  (модель соответствует устройству Cisco Aironet 1600 Series Access Point [15]).

Излучающие элементы всех рассмотренных МАС являются диполями, ориентированными строго вертикально. Таким образом, сечение диаграммы направленности излучающего элемента в вертикальной плоскости совпадает с графиком функции  $r(\varphi) = \sin \varphi$ , а сечение в горизонтальной плоскости образует круг. Коэффициент усиления в горизонтальной плоскости вертикально ориентированного диполя равен 2,15 дБ [16].

Затухания  $L_{n,k}$  ( $n = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}$ ) вычислялись согласно ITU-модели [17]. Мощность, необходимая для поддержания работы сенсора, была выбрана в соответствии с  $P_k^0 = -20$  дБ/мВт [13].

Установим два сенсора в горизонтальной плоскости и разнесем их на угол  $2\pi/3$ . Расстояние до первого сенсора равно 3 м, до второго – 4 м.

МАС1 формирует круговую диаграмму направленности, рассеивая подводимую мощность изотропно. МАС2 фокусирует главный лепесток на удаленный сенсор, ближний сенсор попадает в боковой лепесток, излучение в котором обеспечивает достаточный уровень мощности, превышающий минимальный порог. МАС3 формирует два узконаправленных луча, в которых уровень мощности в направлении сенсоров – минимально необходимый (рис. 3).

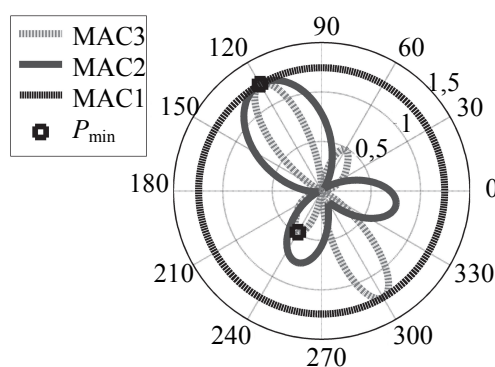


Рис. 3. Сформированные диаграммы направленности

Таким образом, при использовании узконаправленных диаграмм удается эффективно распределить суммарную излучаемую мощность (таблица).

Тип МАС	МАС1	МАС2	МАС3
Средняя излучаемая БС мощность, Вт	1,25	0,5	0,36

Таблица. Сравнение эффективности МАС

Распределим в горизонтальной плоскости 36 сенсоров случайным образом, так что  $\phi_k \sim U(0, 2\pi)$  – азимут сенсора,  $d_k \sim U(2, 5)$  – расстояние до сенсора в метрах (здесь  $\sim U(a, b)$  обозначает равномерное распределение в диапазоне  $[a, b]$ ). Проведем статистический эксперимент: оценим среднюю мощность излучения ( $P_{cp}$ ) для каждого типа МАС, изменяя число состояний за цикл  $M$  от 1 до 4 (рис. 4).

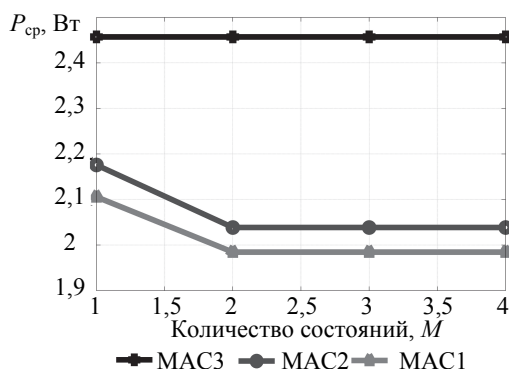


Рис. 4. Зависимость средней мощности излучения от числа состояний

Средняя мощность излучения MAC1 определяется самым удаленным сенсором, так как диаграмма направленности – круговая. Очевидно, что увеличение количества состояний  $M$  не имеет смысла.

Средняя мощность излучения при использовании MAC2 и MAC3 уменьшается при увеличении числа состояний в цикле  $M$  с 1 до 2. Общая тенденция заключается в разделении цикла на два примерно равных временных интервала и разделении множества сенсоров на две примерно равные группы. С точки зрения суммарной мощности излучения выгоднее в каждый временной интервал фокусироваться только на одной группе сенсоров. Эффект от дальнейшего увеличения  $M$  незначителен.

### Заключение

В работе предложен подход к управлению диаграммой направленности на базовой станции сенсорной сети, основанный на динамическом изменении амплитудно-фазового распределения многоантенной системы базовой станции. Рассмотренное решение позволяет дополнительно снизить энергопотребление передатчика по сравнению со стандартными многоантенными системами, в которых диаграмма направленности формируется статично, исходя из известного местоположения устройств сети. При этом для достижения максимального эффекта достаточно ввести всего два состояния амплитудно-фазового распределения. Предложенный алгоритм синтеза распределения хорошо обобщается на случай более реалистичного учета потерь в харвестере.

Дальнейшим развитием работы может стать анализ эффективности предложенных решений в условиях априорной неопределенности о местоположении узлов сети. Также представляет интерес совместное решение задач пополнения источников энергии в сенсорах и балансировки потока сообщений об измеренных параметрах на базовую станцию [18].

### Литература

1. Visser H.J., Vullers R.J.M. RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: principles and requirements // *Proceedings of the IEEE*. 2013. V. 101. N 6. P. 1410–1423. doi: 10.1109/JPROC.2013.2250891
2. Богатырев А.В., Богатырев В.А. Надежность функционирования кластерных систем реального времени с фрагментацией и резервированным обслуживанием запросов // *Информационные технологии*. 2016. Т. 22. № 6. С. 409–416.
3. Nishimoto H., Kawahara Y., Asami T. Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks // *Proceedings of IEEE Sensors*. 2010. P. 1282–1287. doi: 10.1109/ICSENS.2010.5690588
4. Dolgov A., Zane R., Popovic Z. Power management system for online low power RF energy harvesting optimization // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. 2010. V. 57. N 7. P. 1802–1811. doi: 10.1109/TCSI.2009.2034891
5. Liu L., Zhang R., Chua K.C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2013. V. 12. N 1. P. 288–300. doi: 10.1109/TWC.2012.113012.120500
6. Varshney L.R. Transporting information and energy simultaneously // *Proc. IEEE Int. Symp. on Information Theory, ISIT*. Toronto, Canada, 2008. P. 1612–1616. doi: 10.1109/ISIT.2008.4595260
7. Ding Z., Perlaza S.M., Esnaola I., Poor H.V. Power allocation strategies in energy harvesting wireless cooperative networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014. V. 13. N 2. P. 846–860. doi: 10.1109/TWC.2013.010213.130484
8. Zhang R., Ho C.K. MIMO broadcasting for simultaneous wire-

### References

1. Visser H.J., Vullers R.J.M. RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: principles and requirements. *Proceedings of the IEEE*, 2013, vol. 101, no. 6, pp. 1410–1423. doi: 10.1109/JPROC.2013.2250891
2. Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A. The reliability of the cluster real-time systems with fragmentation and redundant service requests. *Informatsionnye Tekhnologii*, 2016, vol. 22, no. 6, pp. 409–416.
3. Nishimoto H., Kawahara Y., Asami T. Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks. *Proceedings of IEEE Sensors*, 2010, pp. 1282–1287. doi: 10.1109/ICSENS.2010.5690588
4. Dolgov A., Zane R., Popovic Z. Power management system for online low power RF energy harvesting optimization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 2010, vol. 57, no. 7, pp. 1802–1811. doi: 10.1109/TCSI.2009.2034891
5. Liu L., Zhang R., Chua K.C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 288–300. doi: 10.1109/TWC.2012.113012.120500
6. Varshney L.R. Transporting information and energy simultaneously. *Proc. IEEE Int. Symp. on Information Theory, ISIT*. Toronto, Canada, 2008, pp. 1612–1616. doi: 10.1109/ISIT.2008.4595260
7. Ding Z., Perlaza S.M., Esnaola I., Poor H.V. Power allocation strategies in energy harvesting wireless cooperative networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, vol. 13, no. 2, pp. 846–860. doi: 10.1109/TWC.2013.010213.130484

- less information and power transfer // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2013. V. 12. N 5. P. 1989–2001. doi: 10.1109/TWC.2013.031813.120224
9. Xing C., Wang N., Ni J., Fei Z., Kuang J. MIMO beamforming designs with partial CSI under energy harvesting constraints // *IEEE Signal Processing Letters*. 2013. V. 20. N 4. P. 363–366. doi: 10.1109/LSP.2013.2247999
10. Ju H., Zhang R. A novel mode switching scheme utilizing random beamforming for opportunistic energy harvesting // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014. V. 13. N 4. P. 2150–2162. doi: 10.1109/TWC.2014.030314.131101
11. Boyd S., Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 730 p.
12. Yuan Y. Recent advances in trust region algorithms // *Mathematical Programming*. 2015. V. 151. N 1. P. 249–281. doi: 10.1007/s10107-015-0893-2
13. Zheng X.J., Sun X.L., Li D. Convex relaxations for nonconvex quadratically constrained quadratic programming: matrix cone decomposition and polyhedral approximation // *Mathematical Programming*. 2011. V. 129. N 2. P. 301–329. doi: 10.1007/s10107-011-0466-y
14. Bakin E.A., Ivanov I.S., Shelest M.N., Turlikov A.M. Analysis of energy harvesting efficiency for power supply of WBAN nodes in heterogeneous scenarios // *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT*. Lisbon, Portugal, 2016. P. 111–118. doi: 10.1109/ICUMT.2016.7765342
15. Cisco Aironet 1600 Series Access Point. Data Sheet. URL: [http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1600-series/data\\_sheet\\_c78-715702.pdf](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1600-series/data_sheet_c78-715702.pdf) (accessed: 10.06.2017)
16. Ротхаммель К., Кришке А. *Антенны*. Т. 1. Минск: Наш город, 2001. 416 с.
17. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and the radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz. *ITU-R Recommendations P.1238-5*. Geneva, 2001.
18. Bogatyrev V.A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2000. V. 34. N 6. P. 51–57.
8. Zhang R., Ho C.K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, vol. 12, no. 5, pp. 1989–2001. doi: 10.1109/TWC.2013.031813.120224
9. Xing C., Wang N., Ni J., Fei Z., Kuang J. MIMO beamforming designs with partial CSI under energy harvesting constraints. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 363–366. doi: 10.1109/LSP.2013.2247999
10. Ju H., Zhang R. A novel mode switching scheme utilizing random beamforming for opportunistic energy harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 2150–2162. doi: 10.1109/TWC.2014.030314.131101
11. Boyd S., Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 730 p.
12. Yuan Y. Recent advances in trust region algorithms. *Mathematical Programming*, 2015, vol. 151, no. 1, pp. 249–281. doi: 10.1007/s10107-015-0893-2
13. Zheng X.J., Sun X.L., Li D. Convex relaxations for nonconvex quadratically constrained quadratic programming: matrix cone decomposition and polyhedral approximation. *Mathematical Programming*, 2011, vol. 129, no. 2, pp. 301–329. doi: 10.1007/s10107-011-0466-y
14. Bakin E.A., Ivanov I.S., Shelest M.N., Turlikov A.M. Analysis of energy harvesting efficiency for power supply of WBAN nodes in heterogeneous scenarios. *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT*. Lisbon, Portugal, 2016, pp. 111–118. doi: 10.1109/ICUMT.2016.7765342
15. Cisco Aironet 1600 Series Access Point. Data Sheet. Available at: [http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1600-series/data\\_sheet\\_c78-715702.pdf](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1600-series/data_sheet_c78-715702.pdf) (accessed: 10.06.2017)
16. Rothammel K., Kriskhe A. *Antennenbuch*. Berlin, 1966.
17. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and the radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz. *ITU-R Recommendations P.1238-5*. Geneva, 2001.
18. Bogatyrev V.A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2000, vol. 34, no. 6, pp. 51–57.

## Авторы

**Бакин Евгений Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, jenyb@vu.spb.ru

**Апанасенко Николай Викторович** – аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, n.apanasenko@vu.spb.ru

**Иванов Илья Сергеевич** – ведущий программист, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, ilya.ivanov@vu.spb.ru

**Шелест Мария Николаевна** – инженер II категории, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, maria.shelest@vu.spb.ru

## Authors

**Evgeny A. Bakin** – PhD, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, jenyb@vu.spb.ru

**Nikolay V. Apanasenko** – postgraduate, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, n.apanasenko@vu.spb.ru

**Ilya S. Ivanov** – leading software developer, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, ilya.ivanov@vu.spb.ru

**Maria N. Shelest** – second rank engineer, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, maria.shelest@vu.spb.ru