

DOI: 10.17725/rensit.2020.12.313

Фрактальная ректенна для сбора энергии в Wi-Fi диапазоне**Смирнов А.В., Горбачев И.А., Горбунова А.В., Фионов А.С., Колесов В.В., Кузнецова И.Е.**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская Федерация*E-mail: andre-smirnov-v@yandex.ru, iliyagor36@gmail.com, gorbunova.av97@mail.ru, fionov@cplire.ru kev@cplire.ru, kuziren@yandex.ru**Поступила 01.10.2020, рецензирована 12.10.2020, принята 20.10.2020***Аннотация:** Рассмотрены результаты моделирования фрактальной ректенны методом конечных элементов, с центральной частотой 5 ГГц. Построены диаграммы направленности. Проведено сравнение результатов моделирования с образцом реальной антенны, созданной на основании расчётов. Показана возможность использования разработанной фрактальной ректенны для сбора электромагнитной энергии Wi-Fi сетей нового поколения.**Ключевые слова:** метод конечных элементов, фрактальная ректенна, сбор РЧ энергии**УДК 621.396.67****Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования № 0030-2019-0016 и частично поддержана Советом по грантам Президента Российской Федерации (Проект № МК-1503.2020.8).**Для цитирования:** Смирнов А.В., Горбачев И.А., Горбунова А.В., Фионов А.С., Колесов В.В., Кузнецова И.Е. Фрактальная ректенна для сбора энергии в Wi-Fi диапазоне. *РЭНСИТ*, 2020, 12(3):313-318. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.313**Fractal rectenna for collecting energy in the Wi-Fi range****Andrey V. Smirnov, Iliya A. Gorbachev, Alena V. Gorbunova, Alexander S. Fionov, Vladimir V. Kolesov, Iren E. Kuznetsova**Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>
Moscow 125009, Russian Federation*E-mail: andre-smirnov-v@yandex.ru, iliyagor36@gmail.com, gorbunova.av97@mail.ru, fionov@cplire.ru kev@cplire.ru, kuziren@yandex.ru**Received October 01, 2020; peer reviewed October 12, 2020; accepted October 20, 2020***Abstract:** Evaluation of the results of modeling a fractal rectenna by the finite element method, with consideration of the central 5 GHz. Directional diagrams are plotted. The simulation results are compared with a sample of a real antenna created on the basis of calculations. The possibility of using the developed fractal rectenna for collecting electromagnetic energy of new generation Wi-Fi networks is shown.**Keywords:** finite element method, fractal rectenna, RF energy collection**UDC 621.396.67****Acknowledgements:** This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education No. 0030-2019-0016 and was partially supported by the Grants Council of the President of the Russian Federation. (Project No. МК-1503.2020.8).**For citation:** Andrey V. Smirnov, Iliya A. Gorbachev, Alena V. Gorbunova, Alexander S. Fionov, Vladimir V. Kolesov, Iren E. Kuznetsova. Fractal rectenna for collecting energy in the Wi-Fi range. *RENSIT*, 2020, 12(3):313-318. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.313.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (314)
 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА (315)
 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (316)
 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (317)
- ЛИТЕРАТУРА (317)

1. ВВЕДЕНИЕ

Немногим более 20 лет назад была сформулирована концепция интернета вещей (Internet of Things или IoT). IoT представляет собой сеть физических объектов, которые содержат встроенные технологии для связи и распознавания или взаимодействия с их внутренними состояниями или внешней средой [1]. В качестве примера IoT устройств можно рассмотреть беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Network или WSN). WSN представляет собой сенсорную сеть, состоящую из множества различных типов датчиков, связанных друг с другом с помощью беспроводных каналов, способных собирать и обмениваться информацией [2]. В качестве основных требований к сенсорным устройствам, включаемым в WSN, следует отнести такие параметры как низкая стоимость, малые габариты, надежность, экологичность и самое важное – малое потребление энергии [3].

Последнее требование связано с тем, что организация подачи электропитания сенсорной сети (состоящей, к примеру, из сотен сенсорных элементов) классическим способом, с помощью проводов или используя небольшие накопители энергии (аккумуляторные батареи), является технически сложной, экономически неэффективной задачей,

к тому же потенциально наносящей существенный вред экологии. Решением проблемы питания сенсорных элементов подобной сети является переход к беспроводным технологиям передачи энергии.

Современная урбанизированная среда включает в себя внушительное число различных радиопередатчиков, вышек сотовой связи, цифрового телевидения, Wi-Fi передатчиков, репитеров, усилителей, роутеров и прочих устройств, работающих в радиочастотном и микроволновом диапазонах. Возможность сбора и накопления энергии электромагнитного излучения является хорошим решением для питания микроощных электронных устройств, вписывающихся в концепцию интернета вещей.

На практике возможны два варианта сбора энергии: с широкой полосы частот или на одной, центральной частоте. Первый случай лучше подходит для городского IoT пространства, второй – для удаленных от городов систем мониторинга окружающей среды, где фоновое радиоизлучение присутствует только вблизи релейных линий.

Важным параметром в сборе электромагнитной энергии является эффективность её преобразования в постоянный ток. Высокую эффективность преобразования показывают микрополосковые ректенны [4]. Преобразователь представляет собой выпрямляющую антенну или ректенну (**rectifying antenna**), после которой установлен детектирующий элемент (выпрямитель).

Важным этапом создания элементов современной электронной базы, является этап моделирования. Современные методы моделирования позволяют существенно ускорить процесс оптимизации геометрических параметров устройств, осуществить подбор материалов и физических параметров для достижения максимальной эффективности проектируемого устройства.

В данной работе рассматриваются результаты моделирования ректенны методом конечных элементов с помощью моделирующей среды *Comsol Multiphysics* на основе геометрического фрактала Н-дерево (или Т-разветвление), с центральной частотой 5 ГГц. Фрактал имеет хаусдорфову размерность 2, и приходит сколь угодно близко к каждой точке в прямоугольнике. Фрактал Н-дерево часто используется в антенных микрополосковых решетках для того, чтобы радиосигнал к каждой

индивидуальной микрополосковой антенне приходил с одинаковой задержкой распространения. Полученные результаты сравниваются с изготовленным экспериментальным образцом ректенны.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Моделирование ректенны осуществлялось методом конечных элементов. Так, начальный размер базового элемента структуры нулевой итерации составлял 40×40 мм, тогда как базовый элемент фрактала 1-ой итерации уже 20×20 мм и, соответственно, 2-ой итерации 10×10 мм. Модели антенн также представлены на **Рис. 1**. На рис. 1 представлены геометрический фрактал (а), 3D модель моделируемой ректенны, построенной на его основе (б), и используемая при моделировании сетка. В качестве материала антенны использовались материалы постоянные стандартного стеклотекстолита FR4, покрытого тонким слоем меди.

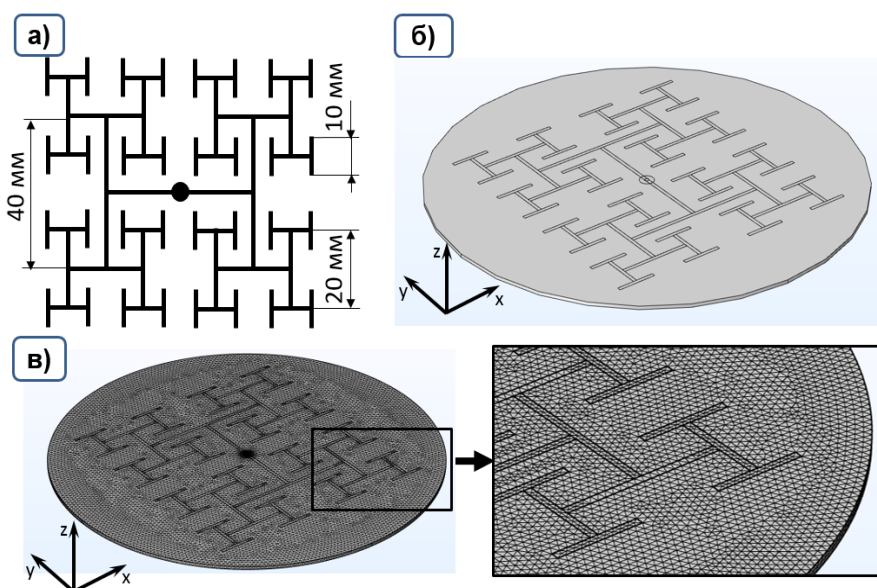


Рис. 1. Геометрический фрактал Н-дерево во 2-й итерации (а), 3D модель ректенны, используемая для моделирования.

Ректенна подключается через коаксиальный вывод в своем основании в центре металлического диска, диаметр и толщина которого равны соответственно 60 и 1 мм. Заземляющий электрод (медь) располагался на тыльной стороне диска. Напряжение, подаваемое на коаксиальный порт, расположенный в центре диска, равнялось 1 В.

На основании результатов моделирования была создана фрактальная ректенна. В качестве материала использовался двусторонний фольгированный стеклотекстолит толщиной 1 мм. Из пластины стеклотекстолита вырезался диск диаметром 60 мм. На одну из сторон диска наносился слой позитивного фоторезиста S1813SP15 толщиной 2 мкм с помощью настольной центрифуги для нанесения резистов Sawatec SM-180-BT (Швейцария). После этого структура выдерживалась 30 мин при температуре 90°C, и затем на слое фоторезиста создавался рисунок, соответствующий проведённым выше расчётам, с помощью безмасочной фотолитографической установки Smart

Print (Microlight 3D, Франция). Далее ненужная часть фоторезиста удалялась проявителем П-236А-МФ, а излишняя часть меди стравливалась хлорным железом. Остатки фоторезиста удалялись ацетоном.

На **Рис. 2а** представлено изображение лицевой части пластины с сформированной на ней ректенной. С тыльной стороны (**Рис. 2б**) ректенны припаивался стандартный SMA разъем для подключения к прибору. Для изучения S параметров ректенны использовался векторный анализатор цепей Anritsu VectorStar MS4644A (Япония). Измерения проводились в специально подготовленной безэховой камере, внутренняя часть которой была покрыта радиопоглощающим материалом MOX 1/50. Подключение ректенны к измерительному прибору осуществлялось с помощью фазостабильного кабеля.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На **Рис. 3** представлены графики частотной зависимости S11-параметров, полученных в результате моделирования

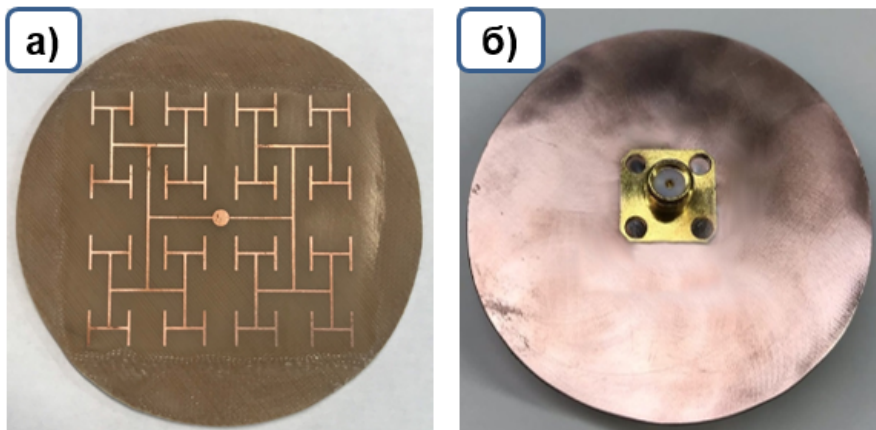


Рис. 2. Изображение лицевой (а) и тыльной (б) стороны образца ректенны.

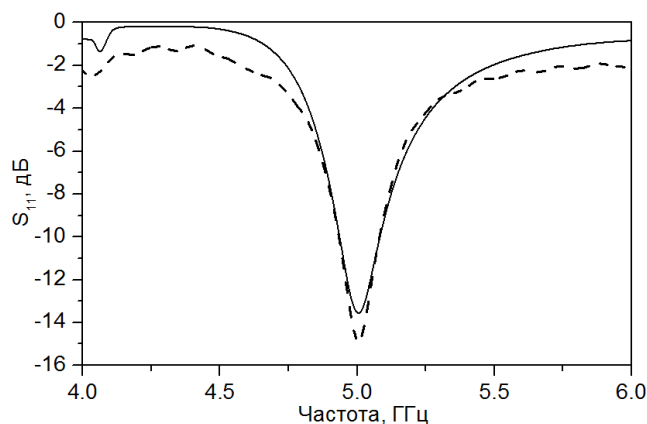


Рис. 3. Частотная зависимость S_{11} -параметров смоделированной и реальной ректенны. Сплошная линия – моделирование, прерывистая – экспериментальные данные.

и в результате эксперимента. На **Рис. 4** представлена 3D модель диаграммы направленности ректенны.

Из сравнения S-параметров видно, что рассмотренная модель достаточно адекватно отображает реальное устройство.

Модель диаграммы направленности позволяет позиционировать ректенну оптимальным образом при наличии информации о реальной электромагнитной обстановке на местности.

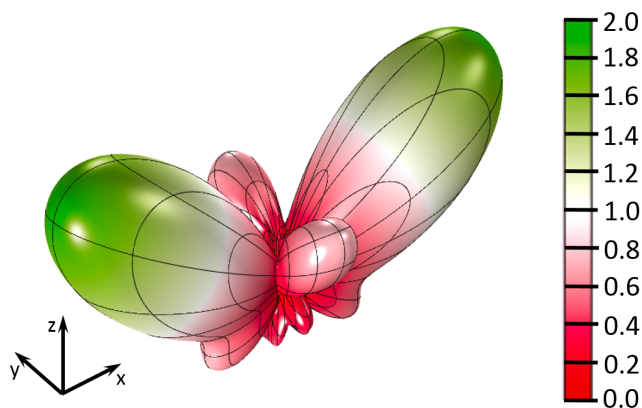


Рис. 4. 3D модель диаграммы направленности ректенны.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом показано, что малогабаритная ректенна на основе простого фрактала с небольшим заполнением имеет в основной полосе частот коэффициент усиления порядка 14 дБ и может применяться в качестве входной антенны в системах мирозенгетики [5].

Практическое применение ректенн весьма широко – от передачи электроэнергии радиоволнами СВЧ диапазона до питания микромощных потребителей различного функционального назначения.

В частности, интерес к таким устройствам вызван возможностью их применения, например, для беспроводной передачи энергии на малые беспилотные летательные аппараты, а также для обеспечения энергией различных сенсорных систем в микроробототехнике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, Marimuthu Palaniswami. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*. 2013, 29(7):1645-1660.
2. Andrea Zanella, Nicola Bui, Angelo Paolo Castellani, Michele Zorzi. Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, 2014, 1(1):22-32.
3. Farooqui M.F., Atif Shamim. 3D Printed Disposable Wireless Sensors with Integrated Microelectronics for Large Area Environmental Monitoring. *Advanced Materials*

Technologies, 2017, 2(8):1700051.

4. Huan Mei, Xuexia Yang, Bing Han, Guannan Tan. High-efficiency microstrip rectenna for microwave power transmission at Ka band with low cost. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(15):1648-1655.
5. Колесов В.В., Решетиллов А.Н. Микроэнергетика: системы с накоплением энергии для микроэлектронных устройств. *Радиотехника*, 2015, 8:66-72.

Смирнов Андрей Владимирович

к.ф.-м.н.

Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия
andre-smirnov-v@yandex.ru

Горбачев Илья Андреевич

к.х.н.

Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125090, Россия
ilyagor36@gmail.com

Горбунова Алёна Вячеславовна

м.н.с.

Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125090, Россия
gorbunova.av97@mail.ru

Фионов Александр Сергеевич

к.т.н.

Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125090, Россия
fionov@cplire.ru

Колесов Владимир Владимирович

к.ф.-м.н., с.н.с.

Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125090, Россия
kvv@cplire.ru

Кузнецова Ирэн Евгеньевна

д.ф.-м.н., проф. РАН

Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125090, Россия
kuziren@yandex.ru