

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.427

## Использование аддитивных технологий для создания широкополосных антенн с фрактальной геометрией

Смирнов А.В., Фионов А.С., Горбачев И.А., Шамсутдинова Е.С., Кузнецова И.Е., Колесов В.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>  
Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: [andre-smirnov-v@yandex.ru](mailto:andre-smirnov-v@yandex.ru), [fionov@cplire.ru](mailto:fionov@cplire.ru), [ilyagor36@gmail.com](mailto:ilyagor36@gmail.com), [sbes1996@bk.ru](mailto:sbes1996@bk.ru), [kuziren@yandex.ru](mailto:kuziren@yandex.ru), [kvv@cplire.ru](mailto:kvv@cplire.ru)

Поступила 24.11.2021, рецензирована 30.11.2021, принята 06.12.2021

**Аннотация:** Представлены результаты исследования частотной зависимости  $S_{11}$ -параметров образцов антенн с фрактальной геометрией, созданных с помощью технологии 3D печати, с последующим нанесением проводящего медного покрытия методом гальванизации. Показано, что изменяя размерность фрактала на разных итерациях, сдвигая и разделяя резонансные частоты, можно гибко формировать рабочие полосы антенн в любом частотном диапазоне и любой ширины. Разработанные конструкции могут быть использованы при создании широкополосных ректенн.

**Ключевые слова:** фрактал, фрактальная размерность, аддитивные технологии, ректенны  
**УДК 621.396.67**

**Благодарности:** Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (ГЗ № 0030-2019-0016), при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект № МК-1503.2020.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-23042 МК).

**Для цитирования:** Смирнов А.В., Фионов А.С., Горбачев И.А., Шамсутдинова Е.С., Кузнецова И.Е., Колесов В.В. Использование аддитивных технологий для создания широкополосных антенн с фрактальной геометрией. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(4):427-434. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.427.

## Using Additive Technologies to Create Broadband Antennas with Fractal Geometry

Andrey V. Smirnov, Alexander S. Fionov, Ilya A. Gorbachev, Elizaveta S. Shamsutdinova, Iren E. Kuznetsova, Vladimir V. Kolesov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>  
Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: [andre-smirnov-v@yandex.ru](mailto:andre-smirnov-v@yandex.ru), [fionov@cplire.ru](mailto:fionov@cplire.ru), [ilyagor36@gmail.com](mailto:ilyagor36@gmail.com), [sbes1996@bk.ru](mailto:sbes1996@bk.ru), [kuziren@yandex.ru](mailto:kuziren@yandex.ru), [kvv@cplire.ru](mailto:kvv@cplire.ru)

Received November 24, 2021, peer-reviewed November 30, 2021, accepted December 06, 2021

**Abstract:** The paper presents the results of a study of the frequency dependence of the  $S_{11}$  parameters of antenna samples with fractal geometry, created using 3D printing technology, followed by the deposition of a conductive copper coating by galvanization. It is shown that changing the dimension of the fractal at different iterations, shifting and dividing the resonant frequencies, it is possible to flexibly form the working bands of

antennas in any frequency range and any width. The developed designs can be used to create broadband rectennas.

*Ключевые слова:* fractal, fractal dimension, additive technologies, rectenna

UDC 621.396.67

*Acknowledgments:* Work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state order # 0030-2019-0016), supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (Project No. МК-1503.2020.8) and the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 18-29-23042 МК).

*For citation:* Andrey V. Smirnov, Alexander S. Fionov, Iliia A. Gorbachev, Elizaveta S. Shamsutdinova, Iren E. Kuznetsova, Vladimir V. Kolesov. Using additive technologies to create broadband antennas with fractal geometry. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, 13(4):427-434. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.427.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (428)
2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА (429)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (431)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (432)

## ЛИТЕРАТУРА (433)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С момента получения патента на первый фотополимерный принтер в 1986 году, технология аддитивной печати (или 3D печати) получила существенное развитие. За последние 5-7 лет появилось большое количество доступных коммерческих продуктов на рынке 3D технологий. Это связано с существенным удешевлением технологии и возникновении её различных вариаций. Одним из важных преимуществ технологии является возможность создания деталей сложной геометрической формы в одном технологическом цикле, без изготовления дополнительной оснастки. 3D печать позволяет существенно увеличить гибкость производства и уже зарекомендовала себя для изготовления не только корпусов приборов, но и для создания функциональных частей электроники, микроволновых схем и антенн [1-3].

Однако, пригодность технологии для создания широкополосных антенн требует дальнейших исследований. В случае создания антенн материал должен обладать хорошими проводящими свойствами.

Существующие образцы проводящих пластиков, используемые для 3D печати, ими не обладают. Поэтому для создания экспериментальных образцов антенн с использованием аддитивных технологий требуется создание проводящего покрытия. Металлизация поверхности может проводиться различными методами: вакуумнонапыление (магнетронное, катодно-дуговое), гальваника, токопроводящая краска. Вакуумное напыление позволяет получить равномерное плотное металлическое покрытие, однако в случае деталей сложной формы обладает недостатком в виде эффекта тени. Токопроводящая краска не обладает хорошими показателями электропроводности, поэтому перспективным вариантом является использование технологии гальванизации [4,5].

В современном мире интенсивно развивается концепция беспроводных сенсорных систем, состоящих из сотен и тысяч миниатюрных автономных сенсорных элементов. Одним из вариантов обеспечения электроэнергией таких элементов являются системы сбора фоновой электромагнитной энергии на основе ректенн [6-8]. Главным критерием применимым к таким ректеннам является широкий частотный диапазон работы. Благодаря которому обеспечивается достаточный уровень энергии, несмотря на небольшую её плотность на одной,

конкретной частоте. Критерию широкодиапазонности отвечают ректенны в основе которых лежат элементы фракталов.

В отличие от традиционных методов, когда синтезируются гладкие дипольные антенны, в основе теории синтеза фрактальных антенн заложена идея реализации характеристик излучения с повторяющейся структурой на произвольных масштабах [9]. Это дает возможность создавать новые режимы во фрактальной электродинамике. Сложная структура фрактальных антенн обеспечивает такие чрезвычайно важные свойства как широкополосность и многодиапазонность [10].

Принцип построения распространенного Н-фрактала начинается с фигуры в виде буквы Н, у которой вертикальные и горизонтальные отрезки равны. Затем к каждому из 4 концов фигуры присоединяется ее копия, уменьшенная в два раза. К каждому концу (их уже 16) присоединяется копия буквы Н, уменьшенная уже в 4 раза. И так далее. В пределе получится фрактал, который визуально почти заполняет некоторый квадрат. В нем Н-фрактал всюду плотен. То есть в любой окрестности любой точки квадрата найдутся точки фрактала. Н-фрактал полностью заполняет свой квадрат (англ. space-filling curve). Поэтому его фрактальная размерность равна 2 [11]. Суммарная длина всех отрезков в идеальной фрактальной структуре бесконечна. В антенной технике древовидные структуры типа Н-фрактала применяются в случае, если нужно, чтобы в сложной схеме большое число элементов получило один и тот же сигнал одновременно.

Будучи помещены на конце штыревой антенны, древовидные элементы способствуют увеличению широкополосности и некоторому укорочению антенны при неизменной частоте за счёт длины своих ветвей.

Главным преимуществом Н-дерева является его свойство эффективно заполнять пространство. Это свойство проявляется как в двумерном, так и в трёхмерном варианте.

В настоящей работе рассматривается процесс создания ректенн, на основе геометрического фрактала Н-дерево методом 3D печати на фотополимерном принтере, с последующим нанесением проводящего медного покрытия методом гальванизации.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На Рис. 1а представлены базовые структуры, используемые для построения 3D моделей. На Рис. 1б представлены изображения смоделированных древовидных ректенн, используемые для создания 3D моделей. Создание макетов антенн осуществлялось при помощи технологии SLA (лазерная стереолитография) на фотополимерном 3D-принтере Anycubic photon S с источником УФ-излучения длиной волны 405 нм. Разрешение печати составляло 50 мкм в плоскости  $xu$  и 10 мкм по оси  $z$ . Использовалась фотополимерная смола Anycubic Grey 405 nm UV Resin. Фотополимеризация смолы осуществлялась

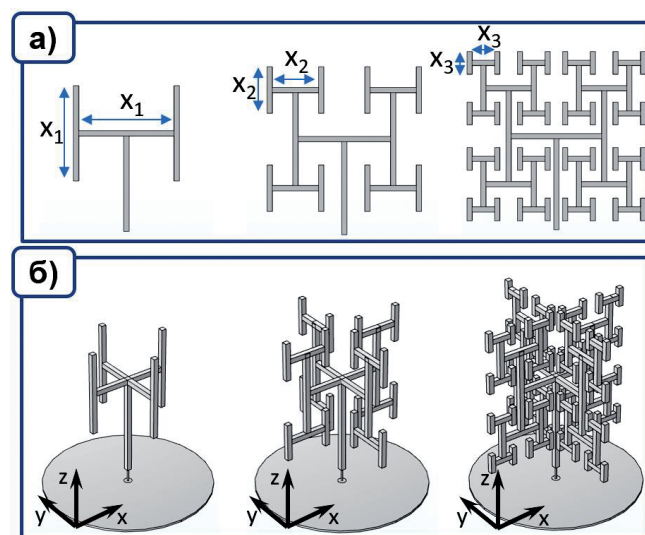
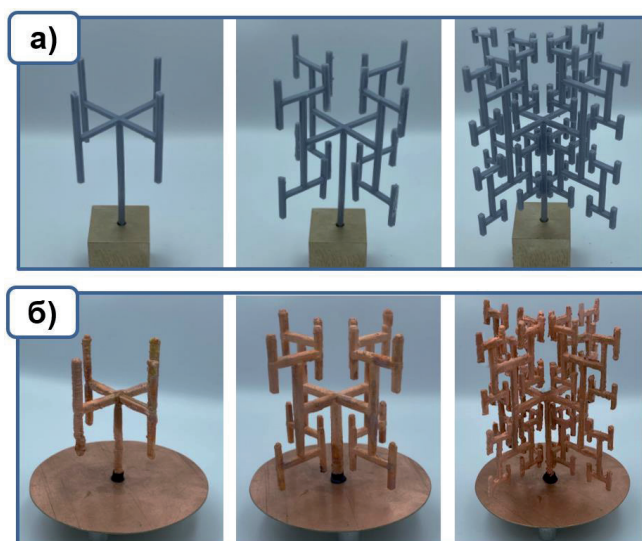


Рис. 1. Изображение: (а) базовой структуры, лежащей в основе антенны ( $x_1 = 40$  мм,  $x_2 = 20$  мм,  $x_3 = 10$  мм); (б) моделей, используемых для моделирования диаграммы направленности и 3D печати.

послойно, толщина одного слоя составляла 50 мкм, время засветки – 110 с для первых 5-ти слоев и 10 секунд для последующих. По окончании процесса формирования модель отделяли от металлического столика, промывали в растворе смеси ацетона (ХЧ) и изопропилового спирта (ХЧ) с соотношением компонентов 1:1 по массе. После чего помещали в УФ-камеру на 3 часа для дополнительной полимеризации под действием УФ-излучения с длиной волны 405 нм. На **Рис. 2а** представлены фотографии образцов древесных ректенн, полученных в результате 3D печати.

Нанесение на антенну проводящего медного покрытия осуществлялось классическим методом гальванизации. Для этого поверхность антенны предварительно покрывали токопроводящим графитовым лаком Solins GRAPHITE. Для приготовления раствора электролита брали 1 л чистой дистиллированной воды, 180 г меди сернокислой (Ч), 25 г серной кислоты и 10 мл этилового спирта (ХЧ). В качестве анода использовали медную пластину толщиной 3 мм, расположенную по периметру емкости с электролитом, катодом выступала модель,



**Рис. 2.** Фотографии: (а) 3D моделей, полученных в результате печати; (б) собранных экспериментальных образцов антенн, после нанесения медного покрытия методом гальванизации.

помещенная в центре емкости. Плотность тока составляла 0.15 А/дм<sup>2</sup> на первом этапе – формирования проводящего слоя на всей поверхности модели (6 часов) и 0.5 А/дм<sup>2</sup> на втором этапе – наращивания толщины на всей поверхности модели (20 часов).

Построение диаграмм направленности, соответствующих напряженности поля в дальней зоне, для рассматриваемых в работе моделей, осуществлялось путем моделирования методом конечных элементов.

Исследовались частотные зависимости коэффициента отражения (параметр  $S_{11}$ ) в коаксиальном тракте, нагруженном на антенну.

Измерения проводились в трактах двух типов:

- N-типа, при этом использовали векторный анализатор цепей (VNA) Tektronix 506 A, диапазон частот 1...6 ГГц;
- K-типа, при этом использовали векторный анализатор цепей (VNA) Anritsu, диапазон частот 1...30 ГГц.

Указанные типы трактов имеют волновое сопротивление 50 Ом и различаются размерами коаксиальной линии, типом соединителей (N-типа и K-типа соответственно) и широкополосностью – предельной верхней рабочей частотой, на которой еще сохраняются приемлемые параметры согласования (11 ГГц для тракта N-типа и 45 ГГц для тракта K-типа). Повышение предельной частоты достигается за счет применения коаксиальной линии меньших размеров [12].

Процесс измерения включал в себя калибровку анализатора в используемом диапазоне частот, подключение исследуемого объекта к измерительному тракту и запись частотной характеристики параметра  $S_{11}$ .

Полученные частотные характеристики представлены на **Рис. 3** (VNA Tektronics, тракт N-типа) и **Рис. 5** (VNA Anritsu, тракт K-типа).

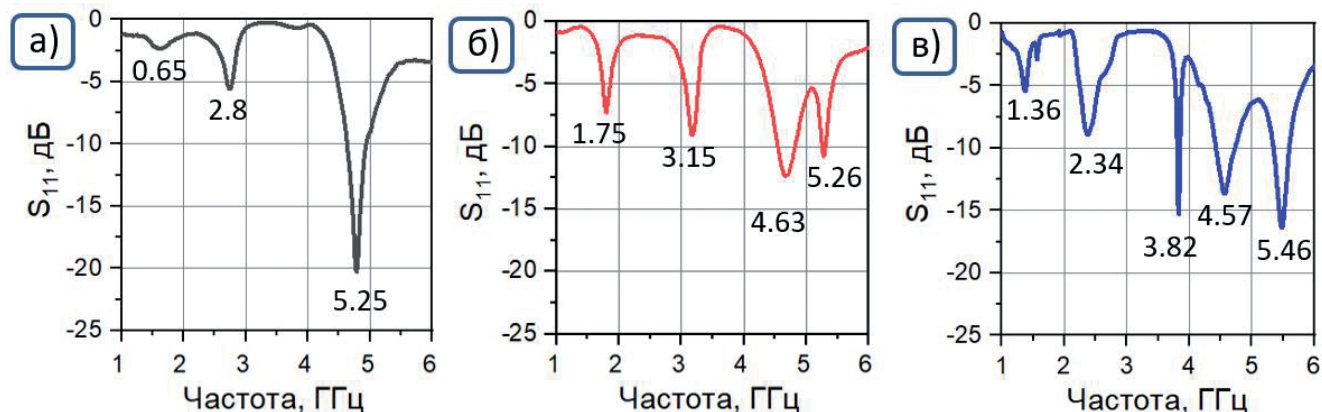


Рис. 3. Частотная зависимость  $S_{11}$  параметров антенн с различной итерацией в диапазоне 1-40 ГГц в тракте N-типа а) 1; б) 2; в) 3.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В различных областях частотного диапазона структура фрактальной антенны работает одновременно и как один проводник, и как совокупность более мелких проводников. Если сигнал передается и принимается на нижней частоте диапазона, то задействуется вся структура целиком. Если используются более высокие частоты, то задействуются мелкие элементы структуры, соответствующие более коротким длинам волн. Количество резонансов увеличивается с увеличением количества итераций фрактала.

Широкополосность фрактальных антенн обеспечивается тем, что их структура работает одновременно и как одно целое,

и как набор антенн меньшего размера. Чем больше количество итераций фрактала, тем более мелкие структуры антенна будет содержать, и тем выше по частоте будут резонансы. Однако, с увеличением итераций падает эффективная длина антенны, отрезки антенны выносятся в другую плоскость поляризации и нередко образуют контртоки, что снижает усиление на каждой конкретной частоте.

На Рис. 4.1 и 4.2 показаны диаграммы направленности для древовидных фрактальных антенн 3-х итераций на основе 3D модели H-фрактала в различных плоскостях и в различных диапазонах частот.

Диаграмма направленности любой фрактальной антенны будет

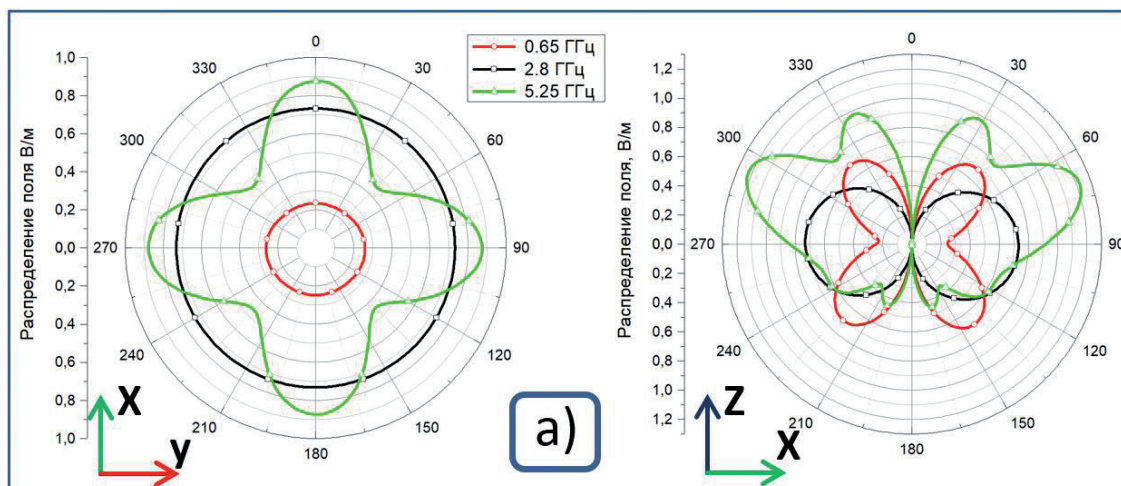


Рис. 4.1. Диаграммы направленности антенны, соответствующие напряженности поля в дальней зоне с итерацией а) 1.

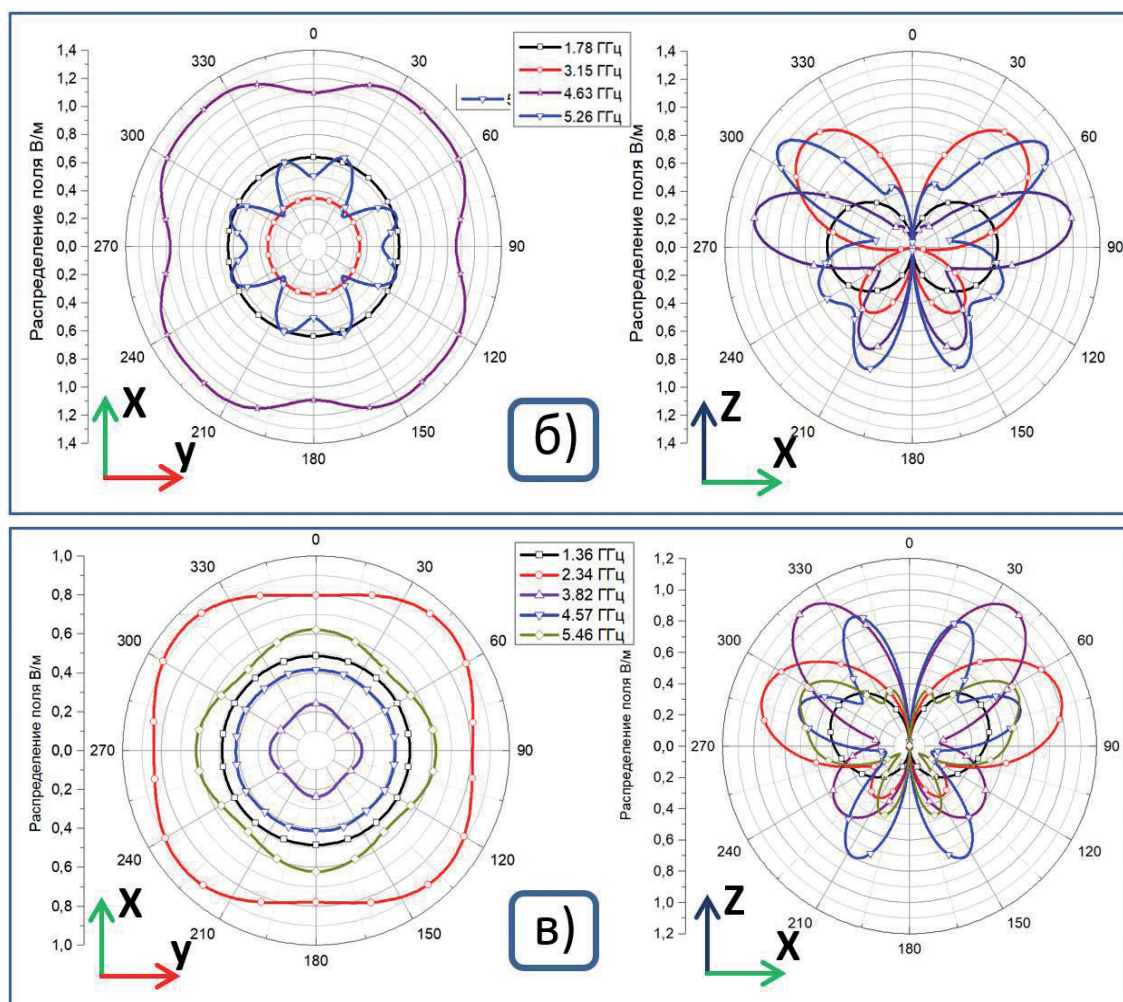


Рис. 4.2. Диаграммы направленности антенн, соответствующие напряженности поля в дальней зоне с итерацией б) 2 и в) 3.

частотозависимой, т.к. на разных частотах будут резонировать разные части структуры, при изменении частоты будут меняться фаза сигнала и сила тока, протекающего через эти структуры. Из рисунков видно, что практически на всех частотных диапазонах диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости равномерна, что обеспечивает прием сигнала со всех направлений.

Низкочастотная (1...6 ГГц) область характеризуется набором добротных пиков, количество которых растет с увеличением порядка итерации фрактальной структуры. Интенсивность пиков по абсолютной величине не превышает 20 дБ. Такая картина наблюдается как на VNA Tektronics (тракт N-типа), так и на VNA Anritsu (тракт K-типа).

В области частот 7.5...30 ГГц наблюдаются полосы, образованные индивидуальными пиками с различной центральной частотой и добротностью. Увеличение порядка итерации приводит к росту интенсивности индивидуальных пиков и расширению общей полосы частот, в которой абсолютное значение параметра  $S_{11} = 10$  дБ и более. Следует отметить, что такое комбинационное расширение частот происходит и в нижней, и в верхней части диапазона.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные электродинамические свойства исследованных фрактальных антенн позволяют сделать вывод о широкополосности и многодиапазонности

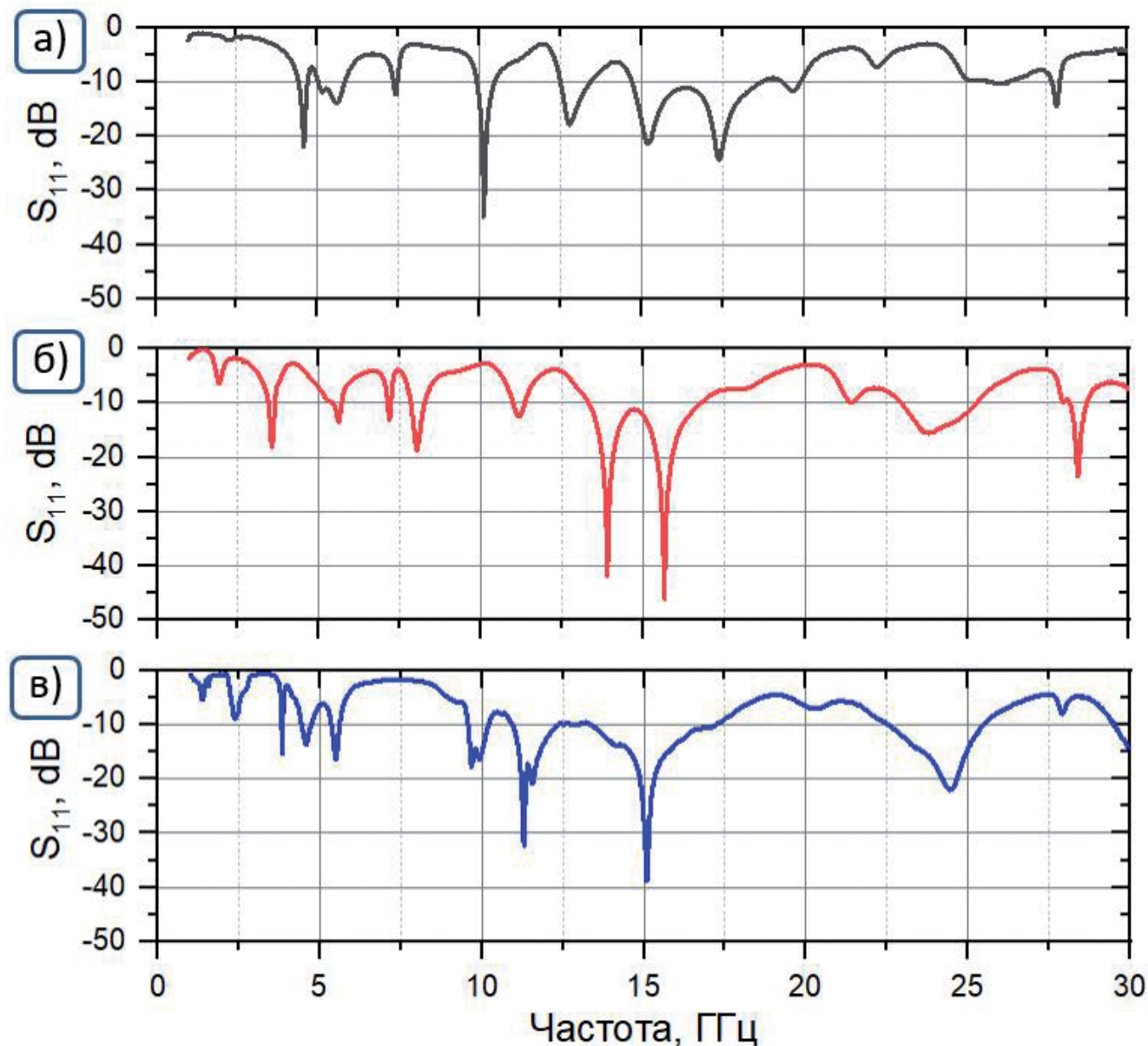


Рис. 5. Частотная зависимость  $S_{11}$  параметров антенн с различной итерацией в диапазоне 1-30 ГГц в тракте К-типа а) 1; б) 2; в) 3.

исследованных фрактальных антенн, а также зависимости числа резонансов от порядка итераций фрактальной кривой. Этот механизм позволяет управлять диаграммой направленности и резонансами антенны, манипулируя размерностью и количеством итераций фрактала. Изменяя размерность фрактала на разных итерациях, сдвигая и разделяя резонансные частоты, можно гибко формировать рабочие полосы антенн в любом частотном диапазоне и любой ширины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Le Sage GP. 3D printed waveguide slot array antennas. *IEEE Access*, 2016, 4:1258-1265.
2. Du G. et al. 3-D printing implementation of an X-band Eaton lens for beam deflection. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15:1487-1490.
3. Gjokaj V, Chahal P, Kempel LC, Rothwell E. A novel 3D printed half-width microstrip leaky-wave antenna. *Proc. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 1249-1250. San Diego, CA, USA, 9-14

- July 2017. IEEE Publ., 2017. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072667.
4. Zhang S, Cadman D, Vardaxoglou JYC. Additively manufactured profiled conical horn antenna with dielectric loading. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(11):2128-2132.
  5. Angel K. et al. Selective electroplating of 3D printed parts. *Additive Manufacturing*, 2018, 20:164-172.
  6. Колесов ВВ, Решетилов АН. Микроэнергетика: системы с накоплением энергии для микроэлектронных устройств. *Радиотехника*, 2015, 8:66-72.
  7. Смирнов АВ, Горбачев ИА, Горбунова АВ, Фионов АС, Колесов ВВ, Кузнецова ИЕ. Фрактальная ректенна для сбора энергии в Wi-Fi диапазоне. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2020, 12(3):313-318. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.313.
  8. Смирнов АВ, Горбачев ИА, Горбунова АВ, Колесов ВВ, Кузнецова ИЕ. Моделирование фрактальной ректенны методом конечных элементов для сбора рч энергии в wi-fi диапазоне. *Математические методы в технике и технологиях-ММТТ*, 2020, 12-1:28-31.
  9. Потапов А.А. *Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки*. М., Университетская книга, 2005, 848 с.
  10. Belyaev RV, Vorontsov GM, Kislov VYu, Kolesov VV, Krupenin SV, Popov AM, Ryabenkov VI. Complex chaotic discrete signals in telecommunications, radar, and navigation systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2006, 51(9):1052-1063; doi: 10.1134/S1064226906090063.
  11. Kaloshin V, Saprykina M. An example of a nearly integrable Hamiltonian system with a trajectory dense in a set of maximal Hausdorff dimension. *Communications in mathematical physics*, 2012, 315(3):643-697.
  12. Джуринский КБ. *Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ*. М., Техносфера, 2006, 216 с.
- Смирнов Андрей Владимирович**  
к.ф.-м.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
andre-smirnov-v@yandex.ru
- Фионов Александр Сергеевич**  
к.т.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
fionov@cplire.ru
- Горбачев Илья Андреевич**  
к.х.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
iliyagor36@gmail.com
- Шамсутдинова Елизавета Сергеевна**  
м.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
shes1996@bk.ru
- Кузнецова Ирен Евгеньевна**  
д.ф.-м.н., проф. РАН  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
kuziren@yandex.ru
- Колесов Владимир Владимирович**  
к.ф.-м.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
kvv@cplire.ru.