

# Применение фрактальной графики в радиотехнике

Е. И. Елисеев

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

emelrobot@yandex.ru

Н. Н. Кузьмина

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

natku@list.ru

**Аннотация.** Антенны являются неотъемлемой частью современного мира. Поиск новых решений в данной сфере актуален и необходим. Данная статья рассматривает фрактальные антенны, их особенности и свойства. Также в ходе исследования были разработаны и изготовлены две фрактальные антенны и были произведены измерения силы сигнала этих антенн. Были применены две различных технологии: изготовление антенны из цельного проводника и изготовление методом травления. В ходе работы было установлено, что фрактальные антенны при наименьших габаритах обладают лучшими свойствами по сравнению со штыревыми антеннами.

**Ключевые слова:** радиотехника, антенна, фрактал, программирование, травление меди, печатная плата, рекурсия, рекурсивный алгоритм

## I. ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ «ФРАКТАЛ»

Фрактал – (лат. fractus – дроблённый, сломанный, разбитый) – математическое множество, обладающее свойством самоподобия, то есть однородности в различных шкалах измерения. Самоподобной геометрической фигурой (телом) мы будем называть фигуру, которую можно разрезать на конечное число одинаковых фигур, подобных ей самой. Наиболее известными являются: Снежинка Коха (рис. 1, фигура 1), Ковёр Серпинского (рис. 1, фигура 2), Фрактал Мандельброта (рис. 1, фигура 3), Бином Ньютона, Множество Жюлиа, Фигура Лихтенберга, Дерево Пифагора, Кривая Пеано, Рекурсивная кривая Пеано (рис. 1, фигура 4).

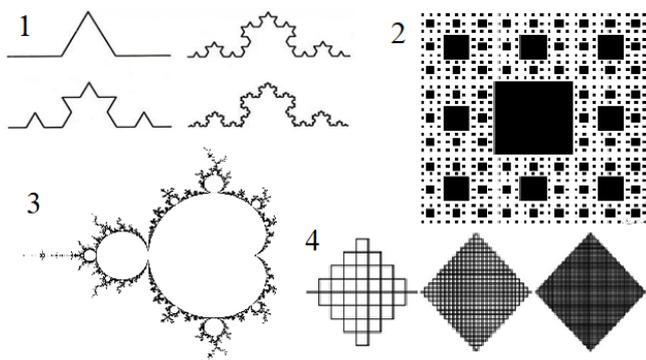


Рис. 1. Примеры фракталов

## II. ФРАКТАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Фрактальные антенны – относительно новый класс электрически малых антенн (ЭМА), принципиально отличающийся своей геометрией от известных решений.

Фрактальная антенна (рис. 2) – это антенна, активная часть которой имеет вид самоподобной кривой или какой-либо другой подобно делящейся или состоящей из подобных сегментов фигуры. Данный тип антенн появился сравнительно недавно, и принципиально отличается от известных, стандартных и общепринятых решений.

Впервые на практике для антенн эти принципы применил в 90-е года XX века американский инженер Натан Коэн, который изготовил первую фрактальную антенну и исследовал особенности данных антенн. В дальнейшем выяснилось, что при помощи фракталов можно значительно уменьшить размеры конструкции, и расширить полосу рабочих частот, т. е. можно создать широкополосную антенну. Уменьшение размеров позволило создавать малогабаритные устройства с достаточно мощными приёмопередатчиками, работающими в частотах 2,4 ГГц по стандартам: Wi-Fi, Bluetooth, GSM. Также была отмечена отличная работа фрактальных антенн в телевизионном диапазоне и в качестве микроволнового излучателя. Но, фрактальные антенны сложной формы мало распространены в повседневной жизни, так как патентом на производство и внедрение фрактальных систем в антенной промышленности владеет весьма ограниченное количество компаний.

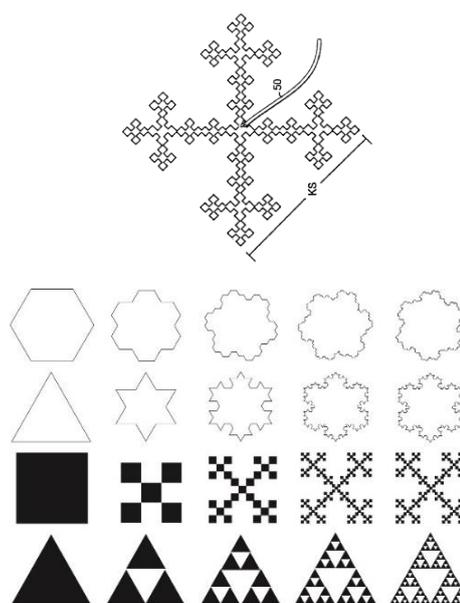


Рис. 2. Примеры фрактальных антенн

### III. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ФРАКТАЛОВ

Так как фракталы – это математические множества, то они могут быть созданы с помощью средств программирования. Рассмотрим программирование фрактала «Снежинка Коха» (рис. 3) с помощью языка Python и модуля Turtle, предназначенного для создания геометрических фигур. Кривая Коха представляет собой прямую, разделённую на три равных отрезка, вместо среднего помещается равносторонний треугольник без основания, стороны которого в свою очередь могут представлять собой кривые Коха. Таким образом для изображения данного, как и любого другого, фрактала используется рекурсивный алгоритм.

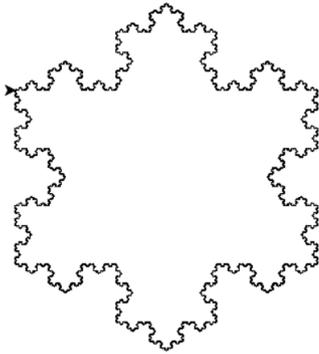


Рис. 3. «Снежинка Коха» в Python

### IV. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ АНТЕНН

Истинные фрактальные антенны мало распространены в мобильной технике, но усечённую кривую Пеано можно встретить почти в каждом современном носимом устройстве, и во многих платах разработки, таких как Esp32, Esp8266, NRF24L01. В данной статье мы рассмотрим разработку и создание двух полноценных фрактальных антенн типов «Ковёр Серпинского» и «Снежинка Коха», с достаточно хорошей глубиной рекурсии. Так как антенны будут применяться для сетей частотой 2,4 ГГц, то длина проводника будет больше или равна половине длины волны, рассчитанной по формуле  $\lambda=c/v$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $c$  – скорость света,  $v$  – частота радиоволны. Для наших антенн длина волны равна 0,125 м, откуда следует, что длина антенн будет больше или равна 0,0625 м.

Ранее было рассмотрено программирование «Снежинки Коха» рекурсивным методом. Так как эта антенна представляет собой замкнутую фигуру, то удобнее всего будет изготавливать её из медной проволоки толщиной 0.75 мм<sup>2</sup>, рекурсивно изгибая по шаблону (рис. 4, слева). Готовая антенна представлена на рис. 5, в центре изображения.

Антенна типа «Ковёр Серпинского» была изготовлена с помощью метода фотолитографии. Исходя из приведённых ранее расчётов, сторона «Ковра Серпинского» будет равна 0,0625 м. Для создания трафарета в графическом редакторе строится модель антенны нужной длины по формулам:  $x_i = \frac{x_{i-1} + 2x_A}{3}$ ,  $y_i = \frac{y_{i-1} + 2y_A}{3}$ , где  $x_A$ ,  $y_A$  – координаты ближайшей точки-аттрактора. Готовый трафарет представлен справа на рис. 4.

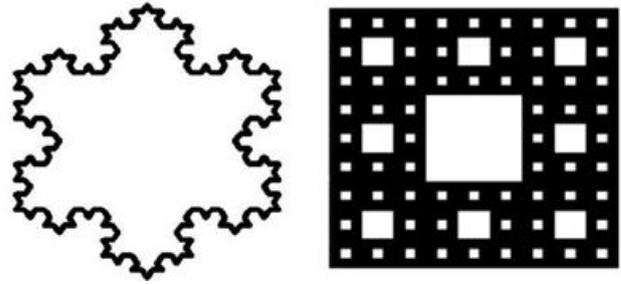


Рис. 4. Трафареты «Ковёр Серпинского» и «Снежинка Коха»

Следующим этапом является фотолитография. На струйном принтере печатается трафарет для фотолитографии. На подготовленную подложку из текстолита с двухсторонним слоем меди наклеивается плёнка фоторезиста и на неё переносится трафарет. Далее засвечивается фоторезист и смывается в растворе NaOH. Следующим этапом идут травление в растворе FeCl<sub>3</sub> и промывка платы от остатков фоторезиста в воде. В конце припаиваются провода от антенного разъёма (рис. 5, снизу).

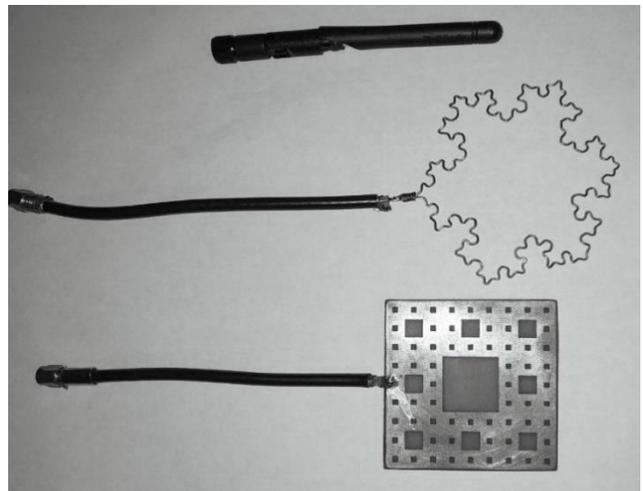


Рис. 5. Антенны. Сверху вниз: маленькая штыревая, «Снежинка Коха», «Ковёр Серпинского»

В качестве точки доступа Wi-Fi был выбран коммутатор D-Link.

Для снятия характеристик антенн использовался анализатор Tektronix NetTek Analyzer Y350C. Антенны подключались через разъем SMA-RP с кабелем сопротивления 50 Ом. Мощность маршрутизатора стандартная (10 mW).

В ходе работы проводились измерения в полосе пропускания сети Wi-Fi 24002484 МГц с помощью анализатора. Измерялись показатели двух штыревых антенн, отличающихся по длине, и двух фрактальных антенн. В результате установлено, что длинная штыревая антенна обладает максимальной чувствительностью в среднем  $-1.068 \text{ db*mv}$ , а короткая штыревая – в среднем  $-1.050 \text{ db*mv}$ . Антенна в виде «Ковра Серпинского» показала результат в среднем  $0.39 \text{ db*mv}$ , а антенна в виде «Снежинки Коха» – в среднем  $0.155 \text{ db*mv}$ . Из полученных данных можно сделать вывод, что фрактальные антенны обладают лучшими свойствами, чем штыревые антенны. Экранированная антенна в форме «Ковра Серпинского» показала предсказуемое

усиление сигнала по сравнению с неэкранированной «Снежинкой Коха».

Дополнительно проводились измерения силы сигнала антенны от Wi-Fi роутера. Короткая и длинная антенны показали -29 dbm и -33 dbm соответственно, антенна в виде «Ковра Серпинского» имеет силу -43 dbm, а в виде «Снежинки Коха» – -45 dbm. Как видно из полученных данных, фрактальные антенны обладают лучшими характеристиками, чем штыревые антенны.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы были определены понятия фрактала, фрактальной графики и фрактальных антенн. Так как фракталы – математические множества, то они могут создаваться с помощью несложных рекурсивных алгоритмов и формул. Говоря о фрактальных антеннах, необходимо учитывать усложнение конструкции и расчётов по сравнению со штыревыми антеннами, но несмотря на это, фрактальные антенны обладают множеством плюсов. Из практического опыта, приведённого выше, можно

подтвердить следующие свойства фрактальных антенн: сложная конструкция, небольшие габариты, сильный сигнал и простота экранирования. Эти свойства фрактальных антенн позволяют изготавливать плоские фрактальные антенны без необходимости вынесения их за корпус, что подходит для микроэлектроники, носимых устройств и космических аппаратов. Таким образом, фрактальные антенны – перспективная область развития радиокommunikационных систем, с возможностью применения в различных сферах техники.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Соколов И.М. Фракталы // Квант. 1989. №5. С. 6-13.
- [2] Епифанов Е. Красота повтора // Популярная механика. 2009. №3.
- [3] Слюсар В. Фрактальные антенны принципиально новый тип "ломаных" антенн // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. С. 78-83.
- [4] Фрактальные антенны [Электронный ресурс] / URL: <https://bloganten.ru/fraktalnye-antenny>
- [5] Фрактальная wi-fi антенна [Электронный ресурс] / URL: <https://bloganten.ru/fraktalnaya-wifi-antenna>