

分形天线的IFS 实现与特性分析

屠振, 李明星, 张广求

(信息工程大学 河南 郑州 450002)

摘要: 分形最基本的特征就是自相似特性与分数维, 可以很好的用于设计天线。文章讲述了用IFS(迭代函数系统)实现分形天线的过程。并对一些典型的分形天线及分形天线阵列的特性进行了分析。

关键词: 迭代函数系统; 分形; 分形天线; 分形天线阵列

中图分类号: TN820

文献标识码: B

文章编号: 1004-373X (2004) 19-032-03

Characteristic Analysis and IFS Realization of the Fractal Antennas

TU Zhen, LI Mingxing, ZHANG Guangqiu

(Information Engineering University, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: The basic characteristics of the fractal are the self-similarity and the fractional dimension, and can be well applied to design the antennas. This paper tells of the course that the fractal antennas are realized by IFS (iterated function systems). And some typical fractal antennas and fractal antenna arrays are also analyzed in this paper.

Keywords: iterated function systems; fractal; fractal antennas; fractal antenna array

近年来随着超宽带无线通信技术的发展和移动通信的普及, 人们对天线的宽带化和小型化设计提出更高的要求。传统的天线都是建立在欧几里德空间之上的, 占据了一定的空间, 不利于天线的设计。而且大部分都是外露天线, 由一些固定元件构成, 隐蔽性不好, 集成度不高。如果要设计一种在很宽的频带内对每一种电台或波段发出的信号都匹配的天线, 即超宽带天线, 而且要做到天线的小型化, 传统天线是很难完成的。

分形几何是通过迭代产生的具有自相似特性的几何结构, 他的整体与局部之间以及局部与局部之间都具有自相似性, 因此分形是一种与标度无关的几何, 这与宽带天线的频率无关性比较相似。研究发现将分形几何用于天线设计当中, 不论在天线的尺寸方面, 还是在频率特性方面都显现出了传统天线无法比拟的优势。

1 分形天线的IFS 实现

1.1 分形的概念

分形和分形几何的概念最早是由Benoit Mandelbrot于1975年提出的, 他的拉丁词根含义是“破碎的、分裂的”, 用来表示高度不规则物体的集合。一些无法用常规的、传统的几何方法描述的图形, 如天空的云彩、曲折的江河和海岸线、树叶、山峰等, 都可归于分形几何的范畴。这些分形在各个尺度上都有同样程度的不规则性, 即自相似特性。为了描述分形的这种不规则性, 从测度理论出发引入了分数维的概念。分数维是欧氏空间中整数维的推广, 他突破了拓扑维数必须为整数的界限。一些典型的分

形如图1(a~d)所示。

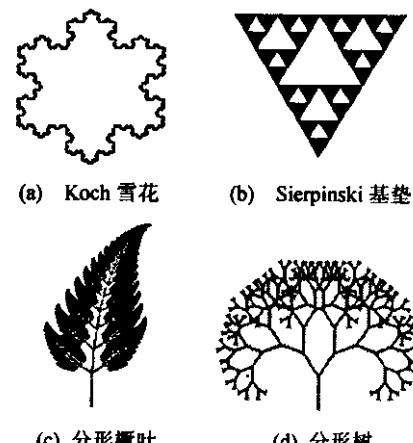


图1 分形图例

1.2 分形天线的IFS 实现过程

用于设计分形天线的分形图形可用IFS(迭代函数系统)来实现^[1]。IFS是美国Georgia理工学院的数学教授M. Barnsley于1985年首先提出的。IFS是描绘分形的强有力的数学方法, 他可以生成很多分形图形, 很好地用来设计分形天线。

下面以Koch曲线为例介绍用IFS迭代生成分形图形的过程。Koch曲线的生成方法是把一条直线段等分成三段, 将中间一段用具有60°夹角的等长的两条直线段来代替, 形成一个生成元, 再把每条直线段用生成元来代替, 如此迭代下去便生成Koch曲线。

首先定义 $R^2 \rightarrow R^2$ 的(二维)仿射变换:

$$W \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}$$

或写为：

$$W(x, y) = (ax + by + e, cx + dy + f), a, b, c, d, e,$$

f 为实数。当有 $z \in R^2$ 时, 上面的仿射变换可写为:

$$W(z) = Az + t$$

其中: $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$; $t = \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}$; 在变换中 A 控制变换的尺寸和旋转, t 控制变换的平移。

如果一个平面上的图形经过仿射变换 W 后, 图形上各点的距离比原有距离小, 即 $r_s(A) < 1$, 则称 W 为收缩仿射变换。把若干个收缩仿射变换的组合 $w = \bigcup_{n=1}^N W_n$ 就称为 IFS。

下面引入收缩仿射变换的不动点原理:

每一个迭代函数系统都定义了一个惟一的分形图形, 这个分形图形称为该迭代函数系统的吸引子 (attractor)。

Koch 曲线的起始图形为一条直线段 L_0 , 他所对应的 IFS 由 4 个收缩仿射变换组成:

$$W_1(x, y) = \left(\frac{1}{3}x, \frac{1}{3}y\right)$$

$$W_2(x, y) = \left(\frac{1}{6}x - \frac{\sqrt{3}}{6}y + \frac{1}{3}, \frac{\sqrt{3}}{6}x + \frac{1}{6}y\right)$$

$$W_3(x, y) = \left(\frac{1}{6}x + \frac{\sqrt{3}}{6}y + \frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{6}x + \frac{1}{6}y + \frac{\sqrt{3}}{6}\right)$$

$$W_4(x, y) = \left(\frac{1}{3}x + \frac{2}{3}, \frac{1}{3}y\right)$$

用 $w = \bigcup_{n=1}^4 W_n$ 对 L_0 进行一系列迭代变换有:

$$L_1 = w(L_0), L_2 = w(L_1), L_3 = w(L_2), \dots$$

如此下去, L_∞ 就是这个 IFS 的吸引子——Koch 分形曲

线。Koch 曲线维数为 $\lg 4 / \lg 3$, 仿射迭代过程如图 2 所示。

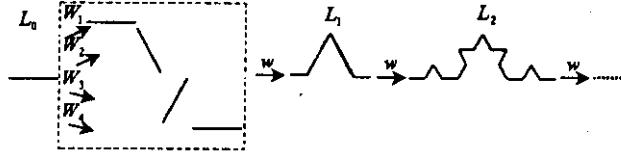


图 2 Koch 曲线的 IFS 迭代生成过程

一旦选择了仿射变换的生成矩阵 A 和 t , 就可以用 IFS 生成各种分形图形。对于 Sierpinski 基垫图和分形树的生成矩阵可参考文献 [1]。

2 分形天线的特性分析

最早的分形天线是由美国科学家 Dr. Nathan Cohen 在 1988 年完成的。自从他在 1995 年发表第一篇有关分形天线的文章以后, 各大科研机构开始对分形天线进行系统研究。分形自身的特性决定了分形天线比传统天线具备两大优势: 减小天线尺寸和增加天线的工作频带。

2.1 分形天线在减小天线尺寸方面的优势

天线本身的尺寸对天线的辐射、阻抗以及频率特性

方面有很大的影响, 所以为了实现一定的工作性能, 天线尺寸都很大。但目前移动通信大多使用电小天线, 对于电小天线, L. J. Chu 和 H. Wheeler 提出了一个基本限制。这个限制使得采用经典的天线设计方法设计出满足性能要求的电小天线很困难。分形的分维具有空间填充性能, 设计出的 Koch 单极、双极天线, 分形树天线以及分形环天线使得天线的尺寸明显减小, 并且接近于电小天线的基本限制, 下面分别进行讨论。

2.1.1 分形单极、双极天线

用 IFS 可迭代生成 Koch 分形曲线和分形树, 用于天线设计, 便可产生 Koch 分形天线和分形树天线 (如图 3 所示)。

对于 Koch 单极天线, 当保持天线高度不变时, 随着迭代次数的增加, 天线的长度以 $4/3$ 的倍数增加, 天线的辐射阻抗增大, 谐振频率降低, 天线的 Q 值也随之降低, 并且都趋于电小天线的最小界限。在 PCS 波段频率 (1900 MHz), 当外部激励源和制作材料相同时, 与传统直立双极天线相比, 迭代一次、两次和三次的 Koch 双极天线 (如图 3(a) 所示) 的尺寸分别降低 16%, 25% 和 30%。并且随着迭代次数的增加, 天线的长度增加, 但天线的高度趋于有限值, 因此可适当选取迭代次数来完成天线的设计。

分形树天线有二维分形树天线 (如图 3(b) 所示) 和三维分形树天线 (如图 3(c) 所示)。二维分形树天线在天线性能改善方面与 Koch 天线相似, 而三维分形树天线不论是天线的尺寸还是天线的 Q 值都减小很多。而且分形树天线类似于对数周期天线, 其阻抗特性具有对数周期性, 随着迭代次数增加, 其频率谐振点也增加, 并且按对数等间距分布。所以分形树天线既实现了天线的小型化又实现了天线的多频带性能。

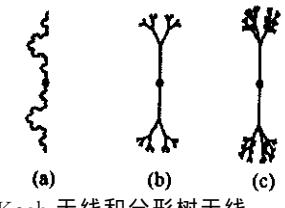


图 3 Koch 天线和分形树天线

2.1.2 分形环天线

环天线是欧式空间中很普遍的一种天线, 广泛应用于测向、广播及通信当中。但他也有自身的缺陷, 大环谐振时要占据巨大的空间, 小环具有很低的输入阻抗。针对这些缺点, 人们提出了分形环天线, 如图 4 所示。

分形环天线可以在很小的体积内无限增大天线的电长度, 使天线的谐振频率降低。例如, 在相同的谐振频率下, 迭代两次的 Minkowski 分形环^[2] 所占的面积仅为方环的 72%。同时天线的输入阻抗随着天线电长度的增大而增加, 使得小环天线更加容易匹配。对于一个直径为 0.083λ 的小圆环天线, 他的输入阻抗为 1.17Ω , 而占据同样面积迭代四次的 Koch 分形环天线的输入阻抗为 26.7Ω 。

2.2 分形天线在增加天线工作频带方面的优势

分形天线的另一个重要特征就是能够增加天线的工作频带。天线的宽频带性能是由于在不同的尺度上保持了结构相似的结果, 随着天线尺寸的增加, 宽带天线保持其特性不变。分形本身具有自相似特性, 满足宽带天线的要求。传统的螺旋天线和对数周期天线都是典型的宽带天线, 同时他们也是分形天线。

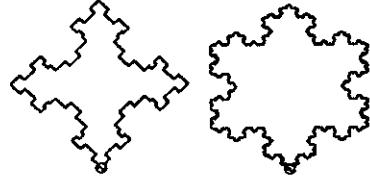


图4 分形环天线

具有多频带特性的Sierpinski 基垫天线^[3]是最典型的一种分形天线。他是将一个等边三角形的三边中点构成的反向三角形依次去掉而生成的, 如图5所示。显然Sierpinski 基垫的整体与局部以及局部与局部之间都具有自相似性。首先, Sierpinski 基垫的外层结构在低端产生了第一个谐振点, 随着迭代次数的增加, 每迭代一次, 便依次在高端增加了一个谐振点, 原谐振点保持不变。在各谐振点上, 天线的频率特性相似, 谐振点之间保持对数等间距, 有 $\lg f_1/\lg f_2 = \lg 2$, 其中: 2 表示为Sierpinski 基垫的收缩因子大小。



图5 Sierpinski 基垫的生成过程

3 Minkowski 分形天线阵列

众所周知, 天线阵列中阵元之间的电磁耦合会改变每个阵元的阻抗特性及辐射特性, 以至影响到整个天线阵的辐射特性, 导致天线阵副瓣的增大。将分形单元应用于天线阵阵元设计, 在保持阵元中心间距相同的情况下, 可增加阵元有效间距, 缩减阵元间耦合度, 提高天线阵的辐射特性。

图6所示为Minkowski 分形环和方环构造天线阵列的结构图。调整天线的尺寸使阵列中的方环和Minkowski 分形环都谐振在1.5 GHz, 得到 $a_1 = 5.48$ cm, $a_2 = 3.4$ cm。同时令单元中心间距为 0.3λ , 显然 $d_1 = 0.52$ cm, $d_2 = 2.6$ cm, 可见Minkowski 分形环的间距比方环增大了4倍。对于两种天线阵的辐射场, 用矩量法做了分析。图7所示为两种天线阵在等幅且依次相位差为 $\pi/2$ 的激励电流作用下的方向图。

从方向图中副瓣的比较可以看出, 标准方环阵列的方向图由于阵元间的互耦得到了很高的副瓣, 而Minkowski 分形环天线阵由于阵元间距离的增大而使副瓣降低。由此可见分

形单元设计的天线阵列的辐射特性得到了有效的提高。

以上的Minkowski 分形天线阵列是将分形单元应用均匀地分布在阵列当中。另外, 还可以将阵列间距按分形集形式布局, 典型的有Cantor 集线性阵列。由于Cantor 集的自相似特性, 生成的线性阵列在满足多频带特性的同时, 也完成了低副瓣的设计。

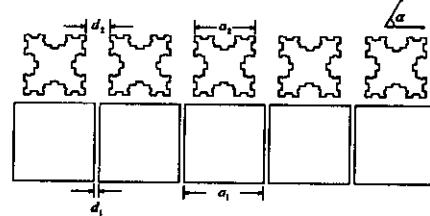


图6 Minkowski 分形环与方环阵列结构示意图

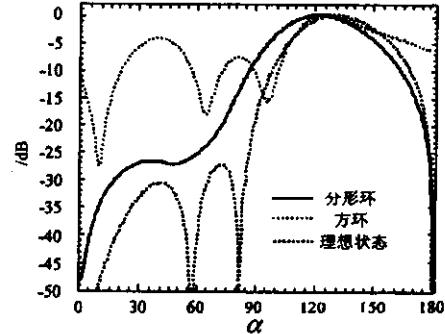


图7 Minkowski 分形环与方环阵列的辐射方向图

4 结语

本文将近几年来分形几何在天线领域的设计实现与研究做了简单的介绍。随着无线通信、卫星通信和移动通信的发展, 分形天线无疑给小型化、宽带化天线的设计带来了新的前景。

目前, 分形天线已经在UHF (862~928 MHz)频带的无线通信设备、adAlive 无线系统设备中和GSM + DCS (900 MHz, 1800 MHz) 双频移动天线系统中得到了应用。但同传统的天线相比, 对分形天线的研究还很有限, 所以对分形天线的进一步深入探讨还有待继续。

参 考 文 献

- [1] Douglas Werner H, and Suman Ganguly. An Overview of Fractal Antenna Engineering Research [J]. IEEE Antennas and Propagation, 2003, 1: 38~57.
- [2] John Gianvittorio P, Yahya Rahmat - Sa mii. Fractal Antennas: A Novel Antenna Miniaturization Technique and Applications [J]. IEEE Antennas and Propagation, 2002, 2: 20~35.
- [3] Puente C, Romeu J, Pous R, et al. Fractal Multiband Antenna Based on the Sierpinski Gasket [J]. IEE Electronics Letters, 1996: 32 (1): 1~2.

作者简介 屠 振 男, 1979 年出生, 电磁场与微波技术专业硕士研究生。主要研究方向为分形天线, 电磁场的数值方法。

万方数据

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>