

文章编号:1005-6122(2008)03-0040-04

# 加载式混合分形天线及其应用\*

肖光国, 朱守正

(华东师范大学无线电物理系, 上海 200062)

**摘要:** 将分形几何应用于天线设计可以产生具有多频段或小型化特征的分形天线。传统的多频段分形天线 Sierpinski 垫片天线由于是有限次迭代生成的, 它存在截取效应低端谐振频率比值几乎是其几何相似性因子的两倍, 从而限制了其实际应用。本文提出了一种 Koch 分形加载 Sierpinski 垫片天线, 该天线采用了新型加载技术并充分利用 Koch 分形的空间自填充能力, 结果表明它有比传统 Sierpinski 垫片天线低得多的高端谐振频率, 从而实现了小型化的多频段 Sierpinski 垫片天线。

**关键词:** Koch 分形, Sierpinski 垫片天线, 混合分形, 多频段天线

## Loaded Hybrid Fractal Antenna and Its Application

XIAO Guang-guo, ZHU Shou-zheng

(Department of Radio Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Fractal geometry can be applied to antenna design to achieve multi-band or miniaturized fractal antennas. Traditional multi-band fractal antenna-Sierpinski gasket antenna can be obtained through a finite number of iterations with a result of truncation effect, leading to a ratio of lower resonant frequencies almost twice of its geometry similarity factor, which limits its practical application. A Koch fractal loaded Sierpinski gasket antenna is proposed in this paper, it adapts new loading technology and makes full use of the space-filling capability of Koch line. The results indicate that this loaded hybrid fractal antenna has much smaller upper resonant frequencies than traditional Sierpinski gasket antenna, making the miniaturized multi-band Sierpinski gasket antenna come true.

**Key words:** Koch fractal, Sierpinski gasket antenna, Hybrid fractal, Multi-band antenna

## 引言

分形天线是一种新型天线, 它将分形几何应用到天线的设计中, 完全不同于传统意义上的欧几里得天线。分形结构内在的自相似特性可以转变为分形天线的多频段特征, 典型的如 Sierpinski 垫片天线, 其空间自填充性则可以转变为天线的小型化特征, 如 Koch 分形天线。文献[1]首次提出了多频段分形天线 Sierpinski 垫片单极子天线, 其几何相似因子为 2, 结果发现分形结构的自相似特性可以转化为分形天线的多频段电磁工作特性。然而实际制作的传统的 Sierpinski 垫片天线不可能是数学意义上无穷次迭代的产物而是经有限次迭代生成的, 它本身存在截取效应, 虽然高端谐振频率之比接近于几

何相似因子, 但低端的谐振频率的比值却远远大于其几何相似因子, 大约是 3.5<sup>[1,2]</sup>。此后针对分形天线的多频段应用, 人们展开了大量的研究, 包括几何相似因子不为 2 的自仿射 Sierpinski 垫片天线, 并且分析了不同馈电方式对天线性能的影响, 但是低端谐振频率之比还是维持在 3.5 左右<sup>[3,4]</sup>。这极大地限制了 Sierpinski 垫片天线的多频段应用, 特别是当要利用其高端谐振点时, 因为, 此时会造成一个比较大的天线系统。因此, 扰动传统的 Sierpinski 垫片天线结构以获得小型化多频段性能就成为了一个新的研究热点。

本文提出了一种新型 Koch 分形加载 Sierpinski 垫片天线, 并对它的单极子和偶极子形式分别进行了讨论, 与同等高度的传统 Sierpinski 垫片天线相

\* 收稿日期: 2006-12-11; 定稿日期: 2007-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(60571064), 天线和微波国家重点实验室基金(514370201)

比,它充分利用了 Sierpinski 垫片天线的多频段特征和 Koch 分形天线小型化特征,能工作在三个频段,低端工作频段比值稍大于几何相似因子 2,而高端谐振频率比值还小于几何相似因子,从而实现了一种小型化的多频段分形天线。

## 1 Koch 分形加载 Sierpinski 垫片单极子天线

为了进行下一步的探讨,首先分析一下 Koch 分形的形成过程,Koch 分形将一个直线段分成等长的三段,并用同样长度的两段来代替中间的一段,连续进行  $N$  次这样的迭代就可产生  $N$  阶 Koch 分形。Koch 分形的分形维数是  $1.262(\log 4/\log 3)$ ,每迭代一次 Koch 分形的长度将增大为原来的  $4/3$ ,相对于维数为 1 的欧氏几何线型结构,Koch 分形有更强的自填充能力,用在天线设计中可实现更大的电流有效路径,从而降低谐振频率,实现天线的小型化<sup>[5,6]</sup>。本文所要探讨的 Koch 分形加载式混合分形单极子天线如图 1(c)、(d)所示,其中图 1(c)为 1 阶 Koch 分形加载,图 1(d)则采用 2 阶 Koch 分形加载。相似的天线结构可参见文献[7,8],如图 1(b)所示,暂且将其称为普通加载 Sierpinski 垫片天线。这三种加载天线高度一致,同为 18.2mm,底部都是高度为 12mm 的 1 阶 Sierpinski 垫片,而顶部是宽度为 0.3mm 的加载线元。为便于比较,这里还列出了传统 2 阶 Sierpinski 垫片天线,其形成过程就是连续 2 次在等边三角形中去掉一个倒立的缩放因子为  $1/2$  的三角形,如图 1(a)所示。所有天线都印制在厚度为 0.2mm、长宽分别为 108.7mm 和 46.6mm 的 Rogers RO4003 介质基底上(介电常数为 3.38,损耗角正切为 0.0027),并且全部采用长度为 88.7mm 的微带线在天线底端馈电,微带线宽度设计成具有  $50\Omega$  的特征阻抗。

## 2 结果和分析

所有天线都采用 Ansoft 公司的三维全波高频电磁场仿真软件 HFSS 进行计算,仿真得出的  $S_{11}$  参数如图 2 所示,天线的所有谐振频率都归纳在表 1 中。

表 1 单极子天线的谐振频率

	M1	M2	M3	M4
$f_1$ (GHz)	2.3	2.4	2.3	2.3
$f_2$ (GHz)	9.0	5.6	5.4	5.3
$f_3$ (GHz)	17.9	10.2	9.8	9.3
$f_2/f_1$	3.91	2.33	2.35	2.30
$f_3/f_2$	1.99	1.82	1.81	1.75

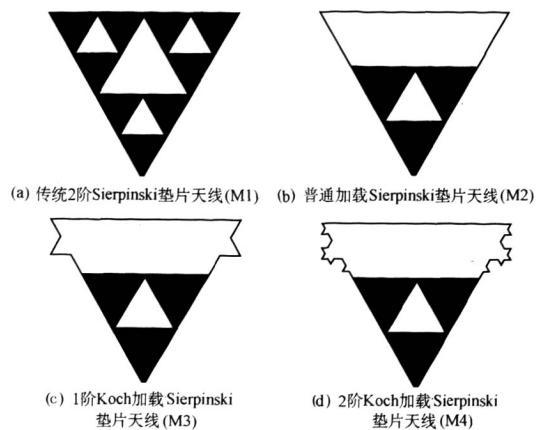


图 1 单极子天线结构(黑色代表金属辐射单元)

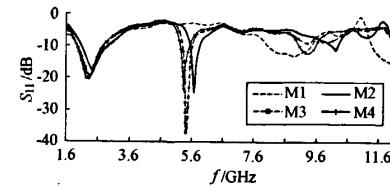


图 2 单极子天线反射系数

可以看到所有加载式天线都有三个谐振点,虽然只能观察到传统 2 阶 Sierpinski 垫片天线低端的 2 个谐振点,但其第 3 谐振点经过计算也总结在表 1 中。所有天线的第 1 个谐振频率几乎相同,这说明加载并不能对天线的低频行为产生影响,第 1 谐振点似乎只与天线的总高度有关。从第 2 个谐振点开始,加载式分形天线明显地要比传统的 Sierpinski 垫片天线要低,差值幅度已达到了 3GHz。传统 2 阶 Sierpinski 垫片天线由于截取效应的存在,其低端谐振频率比值  $f_2/f_1$  已达到 3.91,远远高于其几何相似性因子 2,而所有加载式天线该比值只是稍大于该几何相似性因子。值得注意的是,Koch 分形加载 Sierpinski 垫片天线的  $f_2$  比普通加载 Sierpinski 垫片天线要低一些,而 2 阶 Koch 加载比 1 阶 Koch 加载还要低。这是因为 Koch 分形相对于普通的线元加载它能有效地延展电流集聚区域天线边沿的长度从而增加电流的有效路径长度,而 2 阶 Koch 分形有着比 1 阶 Koch 分形更长的边沿长度。传统的 Sierpinski 垫片天线的高端谐振频率比值  $f_3/f_2$  接近于其几何相似性因子 2,加载式天线大约是 1.8,两者十分接近,可见加载并没有明显地改变天线高端谐振频率比值。可以观察到加载式天线特别是 Koch 加载式天线的第 3 谐振点比传统的 Sierpinski 垫片天线低

很多,其中2阶Koch分形加载Sierpinski垫片天线与2阶Sierpinski垫片天线第3谐振点相差了8GHz。虽然加载式天线在结构上已失去了自相似性,但其各个谐振点处的辐射方向图却极其相似,由于这不是本文所要讨论的重点,因此不作详细探讨。

### 3 Koch分形加载Sierpinski垫片偶极子天线

将图1中的微带线馈电单极子天线改为对应的偶极子形式,此时可在馈点处采用平衡馈电,馈点间隙设定为0.92mm,如图3所示。介质基底的长度和宽度已减为40mm和30mm,相对于上述的单极子天线它有着更小的尺寸。下面来分析一下它的性能,同样采用HFSS仿真,结果如图4所示,所有偶极子天线的谐振频率列于表2中。对照表1可以发现,偶极子形式的天线与其对应的单极子天线有几乎相同的谐振频率,这是因为在单极子天线形式中,微带馈电线的地比较大,给单极子天线提供了一个完好的镜像,这样单极子天线就能产生与其偶极子形式相似的电磁行为。进一步研究发现,微带馈电线地的大小对单极子天线的性能有一定的影响,地是频率不变的,它在天线的每个工作频点都会有一个相应的但却不同的电尺寸,从而对不同频点处天线性能产生不同的影响,表现形式是在高端谐振点辐射方向图会有旁瓣出现。另外,不是所有的单极子天线都可以转变为偶极子形式而且不影响其谐振频率,这和地的大小有关。同样也可以观察到加载式Sierpinski垫片偶极子天线(特别是Koch分形加载)在降低天线高端谐振点上有很大的优势,从而进一步证实了将加载特别是Koch分形加载应用到传统Sierpinski垫片天线时,可以在不影响天线多频段工作特性的前提下进一步使天线小型化。

表2 偶极子天线的谐振频率

	D1	D2	D3	D4
$f_1$ (GHz)	2.3	2.3	2.3	2.2
$f_2$ (GHz)	9.0	5.8	5.5	5.5
$f_3$ (GHz)	17.8	10.1	9.9	9.3
$f_3/f_1$	3.91	2.52	2.39	2.50
$f_3/f_2$	1.98	1.74	1.80	1.69

### 4 结语

作为一种新型天线,分形天线因其自身的特点而有着极大的研究价值和应用价值。国外针对分形天线已进行了大量的研究,其中有美国Fractal An-

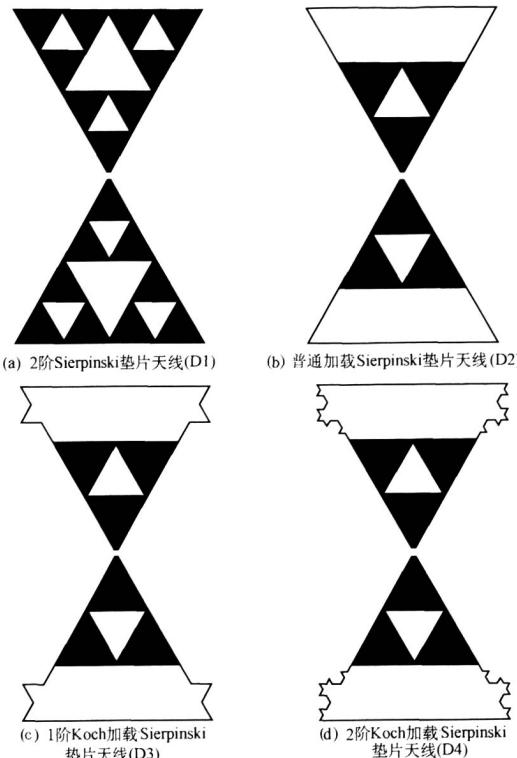


图3 偶极子天线结构

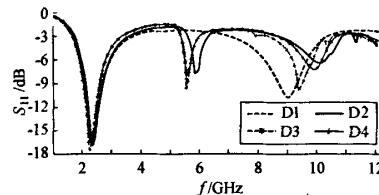


图4 偶极子天线反射系数

tenna Systems公司和西班牙UPC大学以及Fractus公司,而且取得了一定的成果,有些已经申请了专利。本文将Koch分形加载在传统Sierpinski垫片天线的顶端形成混合分形天线,充分地利用Koch分形的空间自填充能力,极大地降低了传统Sierpinski垫片天线的高端谐振频率,实现了更加小型化的多频段Sierpinski垫片天线,在无线设备要求日益小型化的今天有着实际的应用价值。

### 参考文献

- [1] Puente C, Romeu J, Pous R, Garcia X, Benitez F. Fractal multi-band antenna based on sierpinski gasket. Electron Lett[J], 1996, 32(1):1~2
- [2] Puente C, Romeu J, Pous R, Cardama A. On the behav-

- ior of the sierpinski multi-band fractal antenna[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1998, 46(4): 517 ~ 524
- [3] Puente C, Romeu J, Bartolome R, Pous R. Perturbation of the sierpinski antenna to allocate operating bands[J]. Electron Lett, 1996, 32(11): 2186 ~ 2188
- [4] Song C T P, Hall P S, Ghafouri-Siraz H. Sierpinski monopole antenna with controlled band spacing and input impedance[J]. Electron Lett, 1999, 35(6): 1036 ~ 1037
- [5] Soler J, Romeu J. Dual-band sierpinski fractal monopole antenna[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2000. 1712 ~ 1715
- [6] George F Tsachtsiris, Constantine F Soras, Manos P. Karaboikis, Vassilios T Makios. Analysis of a modified sierpinski gasket monopole antenna printed on dual band wireless devices[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2004, 52(10): 2571 ~ 2578
- [7] Puente C, Romeu J, Pous R, Ramis J, Hijazo A. Small but long Koch fractal monopole[J]. Electronics Letters, 1998, 34(1): 9 ~ 10
- [8] Bialiarda C P, Romeu J, Cardama A. The Koch monopole: a small fractal antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(11): 1773 ~ 1781

**肖光国** 男,1982年生,华东师范大学无线电物理专业在读硕士研究生。研究方向为无线技术和无线通信,目前主要从事MEMS可重构分形天线的研究。

E-mail: sandersxiao@163.com

**朱守正** 男,上海人,华东师范大学无线电物理专业教授,博士生导师,研究方向主要有天线设计、电波传播以及高频数值算法等。

E-mail: szzhu@ee.ecnu.edu.cn

(上接第39页)

## 参 考 文 献

- [1] Laus Finkenzeller著,陈大才编译.射频识别(RFID)技术[M].北京:电子工业出版社,2001
- [2] Werner D H, Ganguly S. An overview of fractal antenna engineering research[J]. Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(1):38 ~ 57
- [3] Sanchez J L, De Haro L. Experiences on multi-band fractal antennas. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001, 4: 58 ~ 61
- [4] Eason S D, Libonati R, Culver J W, Werner D H, etc. UHF fractal antennas. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001, 3: 636 ~ 639
- [5] Krzysztofik W J. Fractal Monopole Antenna for Dual-ISM-Bands Applications[C]. Microwave Conference, 2006. 36th European. 2006. 9:1461 ~ 1464
- [6] Luintel T, Wahid P F. Modified Sierpinski fractal antenna[C]. Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics International Conference, 2005: 578 ~ 581
- [7] Hamzah S A, Zainal M S, Abdullah N, Dahlan Samsul Haimi, Cholan N A. Size Reduction and Multiband Characteristic Using Koch Fractal Dipole[C]. RF and Microwave Conference, 2006, 9:140 ~ 142
- [8] Borja C, Font G, Blanch S, et al. High directivity fractal boundary microstrip patch antenna[J]. Electron Lett, 2000, 36(9): 778 ~ 779
- [9] Vinoy K J, Jose K A, Varadan V K, et al. Hilbert curve fractal antenna: A small resonant antenna for VHF/UHF applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2001, 29(4): 215 ~ 219
- [10] 苏铁青. RFID电子标签印刷现状与发展前景综述[J]. 金卡工程, 2007(1):33 ~ 34
- [11] Rmili H, Mrabet O E, Floch J M, Miane J L. Study of an Electrochemically-Deposited 3-D Random Fractal Tree-Monopole Antenna[J]. Antennas and Propagation, 2007, 55(4):1045 ~ 1050

**赖晓铮** 1979年生,男,博士后。华南理工大学电路与系统专业博士毕业,主要研究方向:纸质基材的RFID标签天线研究。

E-mail: soka@263.net

## 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](http://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](http://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](http://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>