

文章编号 1005-0388(2011)01-0113-05

# 加短路过孔的谢尔宾斯基毯式分形贴片天线研究

陈德智 朱守正 胡淑欣  
(华东师范大学信息学院, 上海 200241)

**摘要** 在传统谢尔宾斯基(Sierpinski)毯式分形贴片天线的基础上, 加上两个短路过孔, 使天线能够工作于更多的频段, 并且在保持天线体积不变的情况下, 使天线的第一频点降低到原来的一半。对所加短路过孔的位置和直径与天线的工作频点之间的关系进行了研究。使用高频电磁仿真软件(HFSS)仿真软件给出了天线 S11 和方向图的仿真结果, 制作了实际的天线, 给出了 S11 实验结果。实验结果与仿真结果基本吻合。

**关键词** Sierpinski 毯; 分形贴片天线; 短路; 多频段

**中图分类号** TN82

**文献标志码** A

## 1. 引言

随着无线通信技术的发展, 通信终端设备(例如手机)能够提供给用户的功能越来越多, 语音、数据、视频、上网、全球定位等, 几乎无所不能, 服务功能的增多, 需要设备能工作在多个频率; 另一方面, 移动通信由第1代到第4代, 信号频率由 0.9 GHz, 1.8 GHz, 2.5 GHz, 3.4 GHz, 将来可能还会向更高频率发展。考虑新的设备与旧有系统的兼容, 有时也需要设备工作于多个频段。采用扩展频谱方式的无线局域网一般选择的都是 ISM(Industrial, Scientific, Medical)频段, 许多工业、科研和医疗设备的发射频率均集中于该频段。例如美国 ISM 频段由 902~928 MHz、2.4~2.48 GHz、5.725~5.850 GHz 三个频段组成。实际应用的需要, 使得多频/宽频天线的研究日益得到重视。分形天线具有小型化和多频特征, 并且适当修改整体或局部尺寸, 可以很方便地调整工作频率。因此, 特别适合于当前宽带、超宽带通信领域。

所谓分形天线, 是指几何属性上有分形特征的天线。分形的重要性质之一是它具有形状上的自相似特性。其局部与整体、局部与局部都存在这种自相似性。利用这一基本性质制作分形天线, 具有多频段辐射特性<sup>[1-3]</sup>。

另一方面, 基于左右手复合传输线理论而设计的零阶谐振式天线(ZORA)(Zeroth-Order Resonator Antennas), 近年来也广泛引起了人们的兴趣, 出现了不少研究成果<sup>[4-8]</sup>, ZORA 的谐振频率与天线的总尺寸无关, 而只与单个谐振单元的尺寸有关, 在级数为 2 的情况下, ZORA 的谐振频率比同样尺寸的普通贴片式天线要低一半左右。<sup>[6-8]</sup>

本文在传统 Sierpinski 毯式分形贴片天线的基础上, 加上两个短路过孔, 使之形成一个具有分形结构的 ZORA, 从而可以产生出更多的工作频段, 并减小天线的尺寸。仿真及实验结果都表明: 天线工作频段比传统分形天线多, 并且在保持天线的体积不变的情况下, 大大降低了天线的第一频点。另外, 仿真结果还表明: 加短路过孔以后, 天线的相对带宽也较原来宽。

## 2. 理论分析

### 2.1 天线结构及等效电路

#### 2.1.1 Sierpinski 毯式分形贴片天线<sup>[9-10]</sup>

Sierpinski 毯的生成过程如图 1 所示, 0 阶迭代为一个正方形, 把此正方形等分为 9 个小正方形, 并挖去正中间的一个, 就成为 1 阶迭代结构, 在一阶基础上, 把剩余的 8 个小正方形的每一个再等分为 9 个更小的正方形, 并挖去正中间的一个, 于是得到 2

收稿日期: 2010-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助(60571064)

联系人: 朱守正 E-mail: szzhu@ee.ecnu.edu.cn

阶分形结构,依此类推,可得更高阶的分形。用分形地毯作为微带线,即可形成 Sierpinski 毯式分形微带天线。

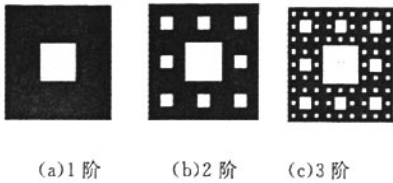


图1 Sierpinski 毯的生成过程

分形贴片天线可以产生对应于0阶分形天线即普通贴片天线的辐射频率,同时可以产生若干较高频率的辐射,从而实现多频段天线<sup>[9-10]</sup>。

### 2.1.2 加短路过孔的贴片天线<sup>[6-8]</sup>

贴片的尺寸是贴片天线的重要指标,为了减小天线的尺寸,可以在贴片天线上加上金属接地的过孔,使贴片与地短路,形成所谓零阶谐振式天线 ZO-RA (Zeroth-Order Resonator Antennas),短路以后,贴片天线的辐射频率可以降低到大约原来贴片天线的一半左右。与此同时,贴片天线原来的辐射谐振频率点仍然是存在的,只不过频率点略有变化<sup>[6-7]</sup>。短路贴片天线的工作原理可以用传输线理论来解释。

如图2(a)所示,在贴片天线上加上两个金属过孔,使贴片与地板短路,则天线的等效电路如图2(b)。

图2(a)中有两个过孔,以左边的过孔为分界,将贴片分成左右两部分,分别对应图2(b)中的左右虚线框。图2(b)中  $L_{P1}$ 、 $L_{P2}$  为贴片的电感,  $C_{P1}$ 、 $C_{P2}$  为贴片与地面之间的电容,  $L_{V1}$ 、 $L_{V2}$  是金属过孔的电感。图2(b)中每个虚线框构成一个谐振器,以左边的为例,其传输系数的模可以表示为

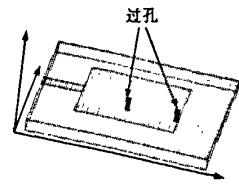
$$H(\omega) = \left| \frac{L_{V1}}{L_{V1} + L_{P1} - \omega^2 L_{V1} L_{P1} C_{P1}} \right| \quad (1)$$

令  $H(\omega)$  的分母为0,可以得到谐振频率为

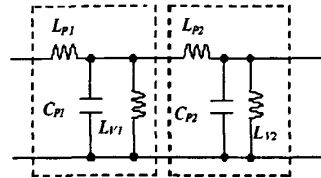
$$\omega = \sqrt{(L_{V1} + L_{P1}) / L_{V1} L_{P1} C_{P1}} \quad (2)$$

调整过孔的位置可以改变  $L_{P1}$ 、 $L_{P2}$ 、 $C_{P1}$ 、 $C_{P2}$ , 调整过孔的直径可以改变  $L_{V1}$ 、 $L_{V2}$ 。

当两个谐振器具有共同谐振频率时,此频率即为天线的辐射频率点。



(a) 短路型贴片天线



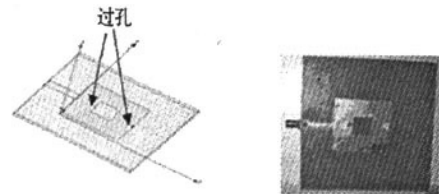
(b) 等效电路

图2

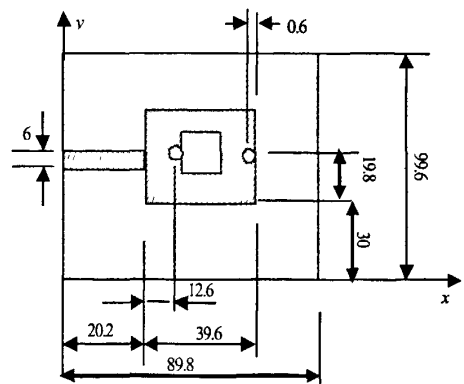
### 2.1.3 加短路过孔的 Sierpinski 毯式分形贴片天线

如前所述,分形天线可以产生多个辐射频率,而将贴片短路又可以另外产生出低于原始贴片的辐射频率,所以可以设想在分形贴片天线上加短路过孔,便可以产生出更多的频段,并减小天线的尺寸。

加短路过孔的 Sierpinski 毯式分形贴片天线如图3所示。



(a) 加短路孔的分形天线 (b) 实物照片



(c) 天线俯视图尺寸

图3

图 3 中的天线,采用的基板介电常数 2.2,损耗正切 0.0009,基板尺寸为 89.8 mm×99.6 mm×2 mm,贴片尺寸 39.6 mm×39.6 mm,馈线宽度 6 mm,长度 20.2 mm,位于分形贴片天线正中间,过孔在纵向位于贴片正中,即与贴片下边缘距离为 19.8 mm,左边过孔与贴片左边缘相距 12.6 mm,右边过孔与贴片右边缘相距 0.6 mm,过孔直径 0.3 mm。

2.2 仿真结果

用 HFSS 软件对天线进行仿真,得到如下结果。

2.2.1 天线辐射频段数增加

仿真可得到天线的 S11 曲线如图 4 所示。

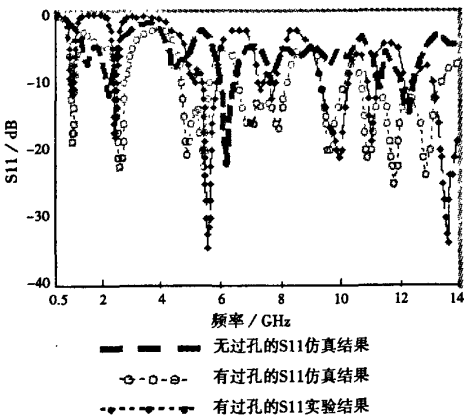


图 4 S11 对比

由图 4 可以看出:未加过孔的天线,S11 在 -10 dB 以下的点有 4 个,分别在 2.5 GHz、6.4 GHz、11.6 GHz、12.4 GHz。而有过孔的分形天线,辐射频段有 6 个,中心点分别为 1.08 GHz、2.7 GHz、5.4 GHz、7.4 GHz、9.8 GHz、11.2 GHz。

特别是在未增加天线尺寸的情况下,天线的第一频点由 2.5 GHz 降低到了 1.08 GHz。

2.2.2 频带较宽

各个频率段的带宽见表 1

表 1 工作频率段的带宽及增益

频率/GHz	1.08	2.7	5.4	7.4	9.8	11.2
相对带宽/%	8.5	10.7	17.4	20.3	6.1	22.3
增益/dB	-2.7	1.6	0.5	3.6	3.3	2.9

2.2.3 各个频率点的增益和方向图

仿真可得各个频率点方向图见图 5,各个频率点的增益见表 1。

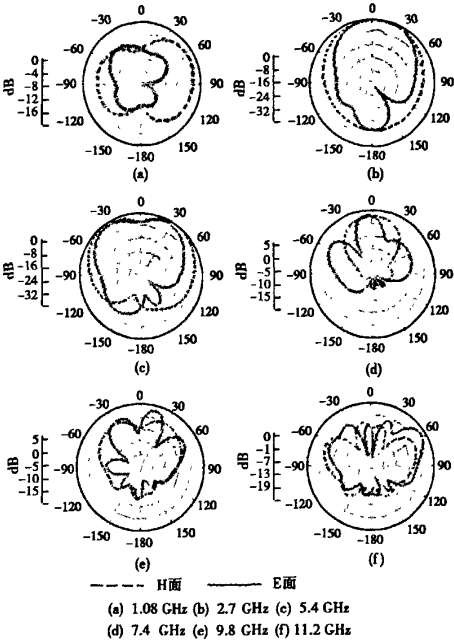


图 5 各个频点方向图

2.2.4 过孔位置及直径的优化

利用 HFSS 仿真软件对过孔位置及直径进行优化,可得如下结果:

①过孔左移

在图 3 中,如果将过孔左移(两孔同时移动),则第一频点会有所升高,如果移动得太多,则第 1 频点消失。以图 3 中的位置为基准,过孔左移的长度 ΔX 与第一频点的关系见表 2。

表 2 孔左移的长度 ΔX 与第一频点的关系

ΔX(mm)	0	2	4	6	8	10
第 1 频点 GHz	1.13	1.15	1.19	1.23	1.24	消失

这是因为根据式(2),过孔左移将使  $L_{P1}$  和  $C_{P1}$  变小,ω 变大。如过移动太多,将使第一频点消失。

②过孔上下移动

在图 3,如果将过孔上下移动,则频率点基本不变,但增益会恶化。

③过孔的直径变化

过孔的直径与其自身电感有关,直径大则电感  $L_v$  小,另一方面,过孔本身具有电容效应,直径大则电容效应明显,过孔直径与第一频点的关系见表 3。

表 3 过孔直径与第一频点的关系

孔直径/mm	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
第 1 频点 GHz	1.08	1.23	1.26	1.30	1.3	1.31

### 2.2.5 二阶分形天线

对二阶分形的天线再加过孔做仿真研究,结果发现:在 14 GHz 以下,天线辐射频段与前述的一阶分形差不多,但二阶分形天线增益较一阶小,二阶分形将在 14 GHz 以上产生辐射频段。

## 3. 实验结果分析

按照图 3 的尺寸,实际制作了天线,并用安捷伦公司网络分析仪 N5230A 测试了 S11 参数,结果如图 4,由图 4 可以看出,天线的辐射频段与仿真结果基本相符,特别是可以清楚看出天线的第一辐射频点为 1.17 GHz,远低于同尺寸的普通 Sierpinski 毯式分形贴片天线。

## 4. 结 论

在传统 Sierpinski 毯式分形贴片天线的基础上,加上短路过孔,可使天线工作于更多的频段,并且在保持天线的体积不变的情况下,将天线的第一频点降低为原来的一半。文中给出了仿真结果和实验结果,二者基本相符。

### 参考文献

- [1] 罗 阳,朱守正,王小玲. 新型 RF-MEMS 可重构分形天线[J]. 电波科学学报,2009,24(5):869-873.  
LUO Yang, ZHU Shouzheng WANG Xiaoling. Novel RF-MEMS reconfigurable fractal antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24 (5): 869-873. (in Chinese)
- [2] 刘 英,龚书喜,傅德民. 分形天线的研究进展[J]. 电波科学学报,2002,17(1):54-58.  
LIU Ying, GONG Shuxi, FU Demin. The advances in development of fractal antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17 (1): 54-58. (in Chinese)
- [3] 王 琪,何庆强. 分形倒 L 天线的研究[J]. 电波科学学报,2008,23(2): 385-388.  
WANG Qi, HE Qingqiang. Analysis and design of fractal inverted-L antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23 (2): 385-388. (in Chinese)
- [4] ZHAO Bo, SHI Ruirong, FERENDECI A M. Zeroth-order resonator antennas using composite right/left-handed microstrip transmission lines [C]//Aerospace and Electronics Conference, 2008. NAECON 2008. IEEE National 16-18 July 2008;154-158.
- [5] LAI A, LEONG K M K H, ITOH T. Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures antennas and propa-

gation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(3): 868-876.

- [6] PARK J H, RYU Y H, LEE J G, et al. A Zeroth-order Resonator Antenna Using Epsilon Negative Metastuctured Transmission Line. Antennas and propagation international symposium [C]//2007 IEEE 9-15 June 2007;3480-3483.
- [7] SANAD H. Effect of the shorting posts on short circuit microstrip antennas [C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium June 1994;794-797.
- [8] ABD-EL-RAOUF H E, SYED S, ANTAR Y M M. Design of small antennas based on DNG metamaterials [C]// IEEE RF and Microwave Conference Dec 2008; 233-236.
- [9] KADIR M F A, JA'AFAR A S, AZIZ M Z A A. Sierpinski carpet fractal antenna [C]//IEEE Applied Electromagnetics Dec 4-6 2007; 1-4.
- [10] RAHIM M K A, ABDULLAH N, ABDUL AZIZ M Z A. Microstrip Sierpinski carpet antenna design [C]// IEEE Applied Electromagnetics Dec 20-21, 2005; 58-61.

### 作者简介



陈德智 (1964—), 男, 江苏人, 华东师范大学信息学院无线电物理专业在职博士生, 目前主要从事天线、左手材料等方面的研究工作。



朱守正 (1949—), 男, 浙江人, 博士, 华东师范大学教授、博士生导师。研究方向为新型天线, 计算电磁学, 超材料及其应用, 无线技术与无线通信等。



胡淑欣 (1974—), 女, 山东人, 现为华东师范大学信息学院无线电物理专业在职博士生。

## Shorted Sierpinski carpet fractal microstrip antenna

CHEN De-zhi ZHU Shou-zheng HU Shu-xin

*(School of Information Science and Technology,*

*East China Normal University, Shanghai 200241, China)*

**Abstract** A kind of shorted Sierpinski carpet fractal microstrip antenna is proposed for multi-frequency and wide-band communication. The high frequency structure simulator(HFSS) simulating results indicate that with two metal via holes applied in the antenna, more frequency bands can be obtained. The lowest radiation frequency of the shorted fractal antenna is decreased to almost half of the non-short antenna. The relation between the position of the via holes and the radiation frequency band is studied. A real shorted antenna is made. The experiment result matches with the simulating one.

**Key words** Sierpinski carpet; fractal microstrip antenna; shorted; multi-band

## 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，一直致力和专注于微波、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>