

半圆环嵌套多频印刷天线*

林澍 蔡润南 黄冠龙 王进祥 哈尔滨工业大学

【摘要】文章从多频天线的研究现状出发,提出了具有多频特性的半圆环嵌套天线,通过电磁仿真软件CST Microwave Studio®仿真研究了半圆环的外半径、宽度和嵌套数目对通频带的中心频率、带宽和通频带个数的影响;设计了可工作于2.4GHz、3.5GHz、5.2GHz以及5.8GHz四个频段的共面波导馈电的印刷单极子天线,在此基础上设计了平衡微带线馈电、以嵌套半圆环为辐射单元的对称振子天线,并制作了两种天线实物进行测试,实验结果与仿真吻合较好,验证了设计思路的正确性。

【关键词】多频天线 半圆环嵌套结构 印刷天线 对称振子天线 平衡微带线

1 引言

由于通讯设备的飞速发展,射频终端需要对众多的通讯体制进行兼容,研究者多采用多频和宽带天线覆盖多个频段,因此多频和宽带天线受到了广泛关注。目前的研究主要集中在以下几个方面:

(1) Sierpinski分形垫片^[1-3]。这是一种分形结构,由于分形具有自相似性,相似单元之间可以形成一定比例关系的谐振频点,谐振频点的分布可以是周期性的,也可以是非周期性的,频点之间的比例关系可以进行控制;

(2) 圆盘单极天线等异形单极天线^[4-6]。这类天线具有超宽带特性,目前主要关注其在3.1GHz~10.6GHz内的特性,也可以向低频端拓展,覆盖GSM、WLAN、WiMAX等频段。超宽带天线由于覆盖的频率范围极宽,可能会造成不同系统间干扰,因此有时需要对超宽带天线在某些频段上做出限制,令其不能接收受限频段的信号,称之为陷波^[7-8],此时超宽带天线可认为是多频段天线;

(3) 表面开槽天线^[9-10]。通过在天线的金属辐射体上开槽或者缝隙,改变金属的表面电流分布,实现多频天线的特性。

上述三种多频天线现在多以平面化的印刷天线实现,设计重点是频段的可控性,具体要实现天线频段的数目、各个谐振频点的值、频带宽度以及各个频段的方向图相似等。

本文提出了一种半圆环嵌套结构的多频天线设计方法,频点个数通过嵌套环的个数控制,频点的数值和频带宽度通过嵌套环的外半径控制,各谐振频点与相应环半径具有相似的对应关系,频率可控性良好,天线在主极化方向上的尺寸也较小。

2 半圆环嵌套单极天线的仿真研究

2.1 天线设计思路

半圆环嵌套单极天线来源于半圆盘单极天线,半圆盘单极天线与圆盘单极天线类似,是一种超宽带天线,可以覆盖多个频段,但并不能完全替代多频天线。对半圆盘单极子按照一定规律进行掏空处理,即可得到半圆环单极天线,然后通过半圆环由大到小嵌套形成多频天线。

*基金项目: 黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z09187)。
收稿日期: 2011-03-30

采用电磁仿真软件CST Microwave Studio[®]进行仿真研究。首先建立一个半圆盘单极天线的模型，设定半圆盘单极天线的起始工作频率为2.4GHz，通过仿真得到半圆盘单极子的半径为20mm。应用共面波导馈电，引入的介质材料为FR4板，厚度1.5mm，相对介电常数4.4。然后将半圆盘天线在半径不变的情况下掏空，掏空区域为与外半圆在馈电点相切的半圆，半径为16mm，以破坏半圆盘的表面电流分布，就得到了单一半圆环单极天线。两种天线的反射损耗仿真结果如图1所示：

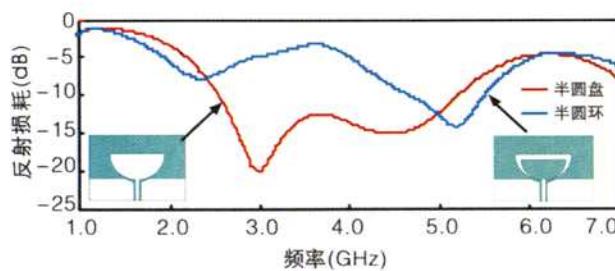


图1 半圆盘和半圆环印刷单极天线的反射损耗

单一半圆环天线不再具有宽带特性，呈现出谐振特性，可以通过仿真研究半圆环的结构尺寸与谐振频率的关系。半圆环内部区域可以继续接入新的尺寸较小的一系列半圆环，从而实现天线的多谐振特性，即多频特性。

2.2 天线结构

根据2.1节的思路，本文提出的天线结构如图2所示，其中黑色部分为天线实体，由厚度为0.035mm的金

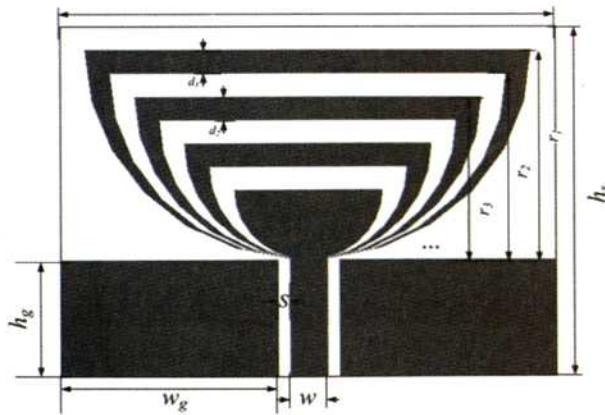


图2 半圆环嵌套单极子印刷天线结构示意图

属片构成，边框内的白色部分为厚度为1.5mm的FR-4介质板，相对介电常数 $\epsilon_r=4.4$ 。天线辐射单元由不同半径的半圆环嵌套得到，采用共面波导馈电。嵌套半圆环数目设为 n （图2中设定 $n=4$ ），嵌套半圆环的半径从外至内为 $r_1, r_2, \dots, r_{2n-1}$ ($r_1 > r_2 > \dots > r_{2n-1}$)，半圆环的设宽度由外至内依次为 d_1, d_2, \dots, d_n 。

2.3 半圆环嵌套单极天线的仿真分析

由于半圆环嵌套单极子天线中含有不同大小的半圆环单元，因此其反射损耗具有多频带的特征。下面分别讨论半圆环的外半径、宽度和嵌套数目对通频带的中心频率、带宽和通频带个数的影响。

（1）半圆环的外半径对通频带的影响

由于天线为多个单极子嵌套而成，因此天线的尺寸

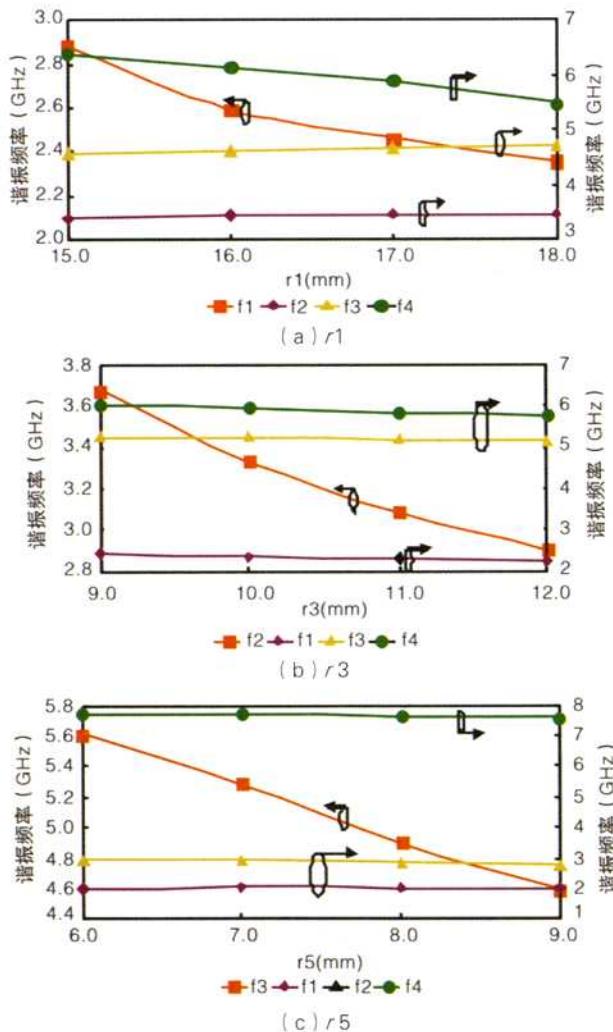


图3 半圆环外半径对各个通频带的影响

是影响天线通频带最重要的因素，天线长度直接影响谐振频率。保持半圆环宽度 d_1 不变， $i=1,2,3$ ，对图2中的前三个谐振单元的外半径 r_1 、 r_3 和 r_5 分别进行仿真研究，每次仅变化一个半径。仿真结果列于图3中。

仿真结果表明，天线实现了多频的效果，在给定的仿真频率区间内（0.5GHz~7GHz）形成了4个通频带。随着第一半圆环外半径 r_1 的增大，天线的第一谐振频率 f_1 和第四谐振频率 f_4 均减小，而第二和第三谐振频率 f_2 和 f_3 则基本不变，说明该结构的天线最外层环对 f_1 和 f_4 影响较大，这与 r_1 和 r_4 的数值大小有关。当天线工作于 f_4 频段时，也会在其它单元上产生感应电流，从而相互影响；如果 $f_4/f_1 > 2$ ，则两者之间将会产生较大的相互影响（图3a）。随着第二环外半径 r_3 的增加，天线的第二谐振频率 f_2 降低，其余谐振频率基本不变，说明 r_3 决定了 f_2 ，而对其它谐振频率影响不大（图3b）。 r_5 的变化引起的影响与 r_3 类似， r_5 仅决定 f_3 （图3c）。

通过以上的仿真可以得到确定 r 值的经验公式：

$$r/\lambda = 0.11 \sim 0.14 \quad (1)$$

其中， r 是谐振环的外半径， λ 是相应谐振频率对应的波长。

当设计第一个环时公式右边取值为0.13~0.14，而设计第二和第三个环时公式右边取值为0.11~0.12。第四个谐振单元的半径用该公式设计会引起较大误差，可以通过仿真及实验的方式进行确定。

（2）半圆环的宽度对通频带的影响

保持天线嵌套半圆环的外径和嵌套数目不变，最外层半圆环宽度 d_1 和次外层半圆环宽度 d_2 各取3个不同值时，各通频带相关参数的仿真结果列于表1：

表1 半圆环宽度取不同值时各通频带参数表

宽度 (mm)	中心频率 (GHz)			相对带宽 (%)		
	f_1	f_2	f_3	BW_1	BW_2	BW_3
d_1	2	1.78	3.52	5.21	4.54	12.08
	5	2.00	3.53	5.36	7.14	13.69
	8	2.23	3.50	5.15	9.75	17.44
d_2	0.5	2.18	2.77	5.05	0.80	14.03
	2.5	2.17	3.08	4.98	1.73	19.01
	4.5	2.16	3.47	4.98	1.83	25.62

仿真结果表明：随着 d_1 的增大，天线在第一通频带

的带宽逐渐增加，并且中心频率提高。 d_2 对第二通频带具有相同的影响规律。

（3）半圆环的嵌套个数对通频带的影响

保持最外层半圆环的外径 r_1 不变，分别令嵌套环个数 $n=2, 3, 4$ ，仿真结果见图4：

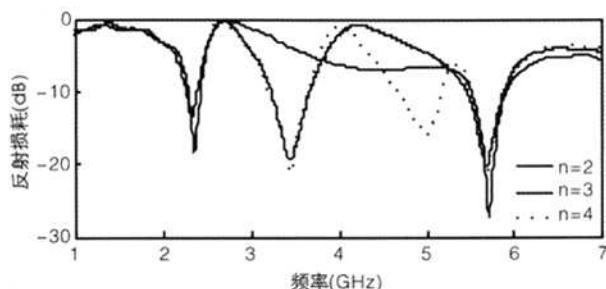


图4 n 取不同值时天线反射损耗仿真结果

仿真结果表明：每增加一个嵌套半圆环，对应的通频带就会增加一个。由于最外层半圆环半径保持不变，因此其所对应的第一通频带中心频率保持不变；而由于内部的半圆环数目增多，因此在相应频率范围内通频带增加，通频带的特性由所对应的半圆环结构参数决定。

综上所述，由于不同尺寸的半圆环谐振于不同频率，因此该半圆环嵌套单极子天线具有多频特性，并且通频带的数目、中心频率和带宽由半圆环的数目、外半径尺寸和半圆环宽度所决定，可根据以上仿真得出的结论设计多频带天线。

3 2.4/3.5/5.2/5.8GHz四频单极印刷天线

根据半圆环嵌套单极天线结构参数对特性参数影响的规律，可以设计出具有2.4GHz、3.5GHz、5.2GHz、5.8GHz四个通频带的天线。首先确定嵌套半圆环的个数为 $n=4$ ，即可形成四个通频带；其次根据式 $r_1/\lambda = 0.13 \sim 0.14$ 初步确定最外层半圆半径 r_1 的初值；再进一步调整各个半圆环的尺寸，使四个通频带的中心频率依次在2.4GHz、3.5GHz、5.2GHz、5.8GHz附近，并满足一定的带宽；最终得到天线的尺寸为： $r_1=18mm$ ， $r_2=12.7mm$ ， $r_3=9.5mm$ ， $r_4=8.4mm$ ， $r_5=6.3mm$ ， $r_6=5.8mm$ ， $r_7=5mm$ ， $w_g=17.5mm$ ， $h_g=10mm$ ， $w_s=40mm$ ， $h_s=30mm$ ， $w=3mm$ ， $s=1mm$ 。

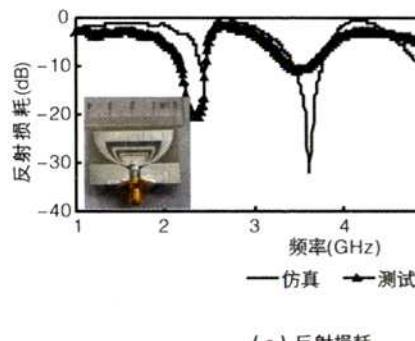
根据以上参数设计并仿真得到该天线的反射损耗和方向图见图5；根据仿真所得到的尺寸制作了天线的实物并进行了测试，结果也列于图5中。

仿真表明，天线的四个通频带分别为：2.39GHz~2.45GHz、3.44GHz~3.74GHz、4.86GHz~5.25GHz及5.54GHz~5.86GHz。测试结果表明，天线具有三个工作频带，仿真结果中的第三和第四通频带由于相距较近而合并为一个通频带，通频带分别为2.20GHz~2.44GHz、3.34GHz~3.61GHz和5.19GHz~6.10GHz，三个通频带的阻抗带宽分别为

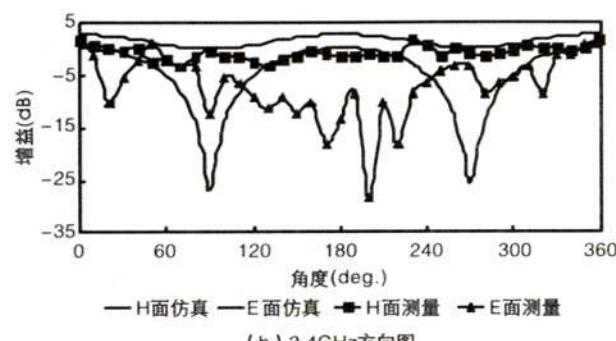
10.34%、7.77%和16.12%，满足WLAN、WiMAX的通讯要求。方向图的仿真与测试结果说明天线在各自的通频带内辐射方向图基本满足H面的全向性，符合全向天线的特点。

4 2.4/3.5/5.2/5.8GHz四频对称振子印刷天线

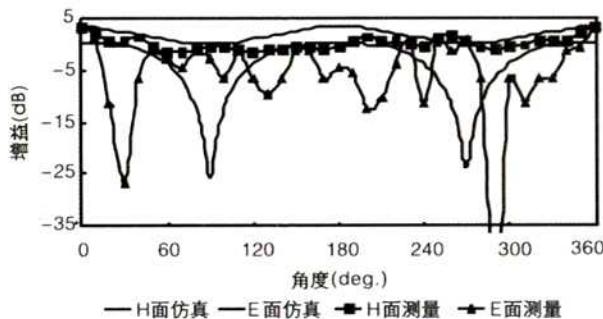
在单极子天线的基础上设计对称振子天线，对称振子天线的馈线为平衡微带线^[11]，印刷于介质板的两侧，通过过孔（半径 $r=0.375\text{mm}$ ）使一端辐射单元的电流相



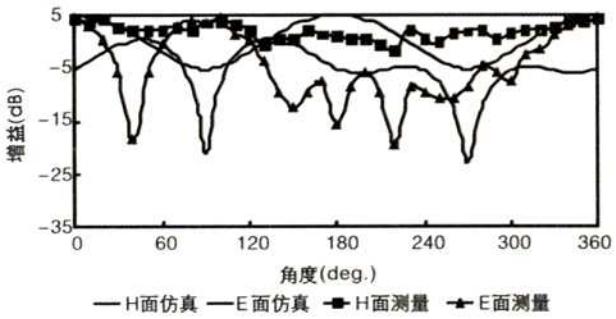
(a) 反射损耗



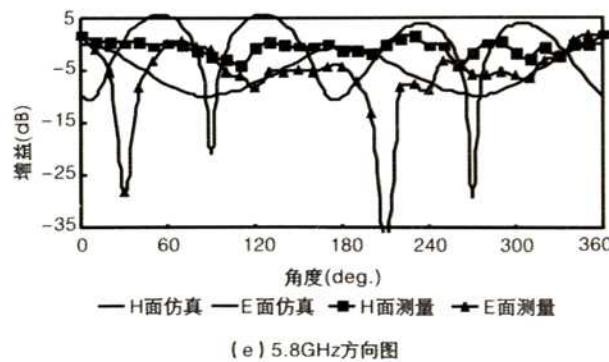
(b) 2.4GHz方向图



(c) 3.5GHz方向图



(d) 5.2GHz方向图



(e) 5.8GHz方向图

图5 半圆环嵌套单极印刷天线的仿真与实验结果

位与另一端辐射单元相位相反。如图6所示,天线的辐射单元为第3节中讨论的半圆环嵌套单元,以实现多频特性,天线的结构尺寸为: $r_1=12.5\text{mm}$, $r_2=9.5\text{mm}$, $r_3=8.5\text{mm}$, $r_4=6.3\text{mm}$, $r_5=6.1\text{mm}$, $r_6=5.6\text{mm}$, $r_7=5.2\text{mm}$, $w_g=4\text{mm}$, $h_g=30\text{mm}$, $w_s=34\text{mm}$, $h_s=39\text{mm}$, $w=4\text{mm}$, $h=10\text{mm}$, $h_t=27\text{mm}$, $l=9\text{mm}$, $w_t=4\text{mm}$ 。仿真和实验结果如图7所示。

与单极印刷天线类似,所制作的对称振子印刷天线实物也实现了多频工作,具有三个工作频带,分

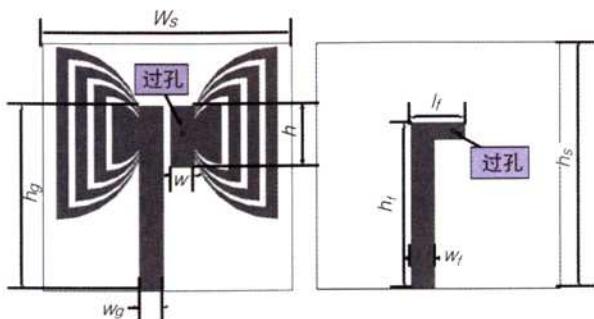


图6 半圆形嵌套对称振子印刷天线结构示意图

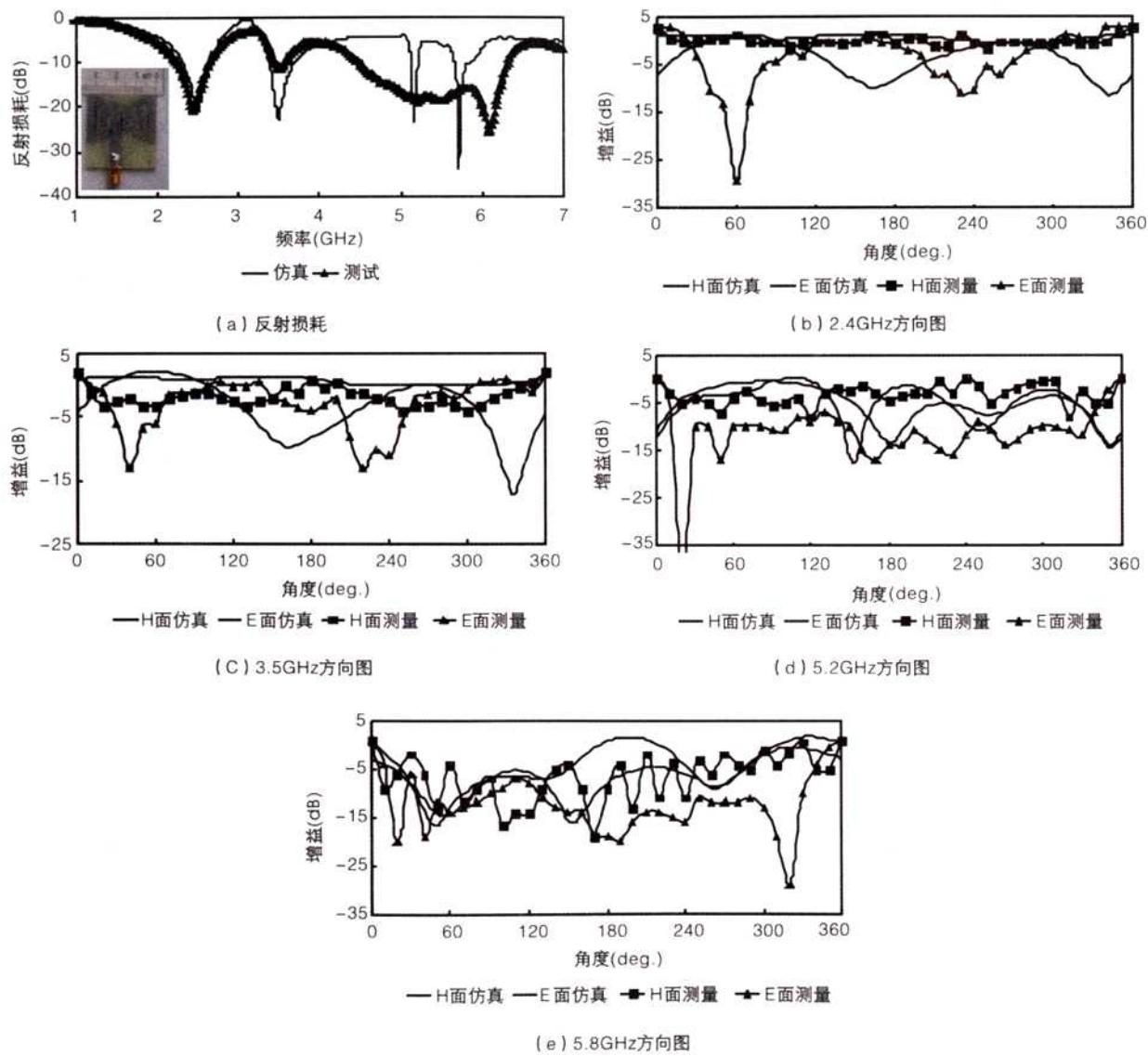


图7 半圆环嵌套对称振子印刷天线的仿真与实验结果

别为：2.25GHz~2.65GHz、3.45GHz~3.58GHz和4.46GHz~6.32GHz，三个通频带的阻抗带宽分别为16.33%、3.70%和34.51%，满足WLAN、WiMAX的通讯要求。

方向图的仿真与测试结果说明天线在各自的通频带内辐射方向图基本满足H面的全向性，其中 f_1 和 f_2 的方向图全向性较好；其余两个频点的方向图由于受到第一、二辐射单元以及馈线的遮挡，不圆度较大，但是也满足通讯要求；在方向图中也标出了天线在各个频点的增益大小，仿真与实验结果吻合较好。整个天线尺寸为34mm×39mm，仅为 $0.28\lambda_1 \times 0.32\lambda_1$ （ λ_1 为第一谐振频率对应波长），在主极化方向上尺寸仅为普通对称振子的60%。

参考文献

- [1] 冯文涛, 张广求, 屠振, 等. Sierpinski分形天线特性分析[J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 79~81.
- [2] Joan Gemio, Josep Parrón Granados, Jordi Soler Castany. Dual-Band Antenna with Fractal-Based Ground Plane for WLAN Applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009(8): 748~751.
- [3] 韩国栋, 顾长青. 加载十字分形缝隙的小型化微带天线[J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 247~251.
- [4] Liang J, Chiau C C, Chen X, et al. Printed circular disc monopole antenna for ultra-wideband applications[J]. Electronics Letters, 2004, 40(20): 1246~1247.
- [5] 何小祥, 邓宏伟. 改进的圆形超宽带印刷单极子天线[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 25(3): 214~218.
- [6] Yangjun Zhang, Nakata T, Miyashita T. A Miniature Circular Disc Monopole UWB Antenna with a Tapered Feed Line and a Circular Ground[C]. 2008 China-Japan Joint Microwave Conference, Shanghai, 2008: 411~414.
- [7] Jung J, Lee H, Lim Y. Compact band-notched ultra-wideband antenna[J]. Electronics Letters, 2008, 44(6): 391~392.
- [8] 吕文俊, 朱洪波. 陷波特性平面超宽带天线的研究进展[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 780~785.
- [9] 关中伟, 吴迪. 一种槽加载三频贴片天线[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2006, 12(4): 359~361.
- [10] Vicente J, Moreira A A. Electro-Textile Printed Slot Antenna over Finite EBG Structure[C]. 2010 International Workshop on Antenna Technology(iWAT), Lisbon, 2010: 1~4.
- [11] Simons R N, Lee R Q, Perl T D. Non-Planar Linearly Tapered Slot Antenna with Balanced Microstrip Feed[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium(AP-S), Chicago, 1992: 2109~2112. ★

【作者简介】



林 浩：博士后，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院讲师，主要从事天线小型化、分形天线等领域的研究。



蔡润南：哈尔滨工业大学电子与信息工程学院，主要研究方向为分形天线技术及超宽带天线。



黄冠龙：哈尔滨工业大学电子与信息工程学院，主要研究方向为天线小型化技术。

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>