

文章编号 1005-0388(2010)03-0603-05

# 基于分形概念的方向图可重构 蝶形天线设计

王安国 王 鹏 刘 楠 董加伟

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘 要** 可重构天线作为一种新型天线, 与传统天线相比, 具有体积小、功能多样、易于实现分集应用等特点, 成为近年来研究的热点。应用了分形概念, 通过对三阶 Hilbert 曲线进行几何变换, 设计出一种新型的方向图可重构蝶形天线。给出了仿真与测试的回波损耗和辐射方向图。结果显示: 天线在  $xoy$  平面上的两个主波瓣分别偏转了  $88^\circ$  和  $60^\circ$ , 天线方向图对  $xoz$  平面发生反向偏转。

**关键词** 可重构天线; 方向图; 分形; Hilbert 曲线; 蝶形

**中图分类号** TN82

**文献标志码** A

## 1. 引 言

随着大容量、超宽带、多功能的综合通信系统的发展, 使得在同一平台上搭载的信息子系统的数量增加, 而作为信息出入通道的天线必然也相应地增加, 从而增加了综合信息系统的成本、重量, 并且天线之间的电磁干扰也是非常严重的。可重构天线正是为了克服信息发展过程中的这些“瓶颈”而提出的<sup>[1-2]</sup>。

早在 80 年代, 人们就已经提出了可重构天线的概念, 目前随着高性能、低功耗的微电子机械 (MEMS) 开关的研究进展, 可重构天线的研究得以进一步开展。可重构天线按功能主要分为: 频率可重构、极化可重构、方向图可重构以及同时实现两种或几种特性的可重构<sup>[3]</sup>。方向图可重构天线能根据通信环境的变化实时改变发射和接收天线的方向图, 可以有效避免噪声干扰, 提高系统增益和安全性, 其在可重构天线的研究中占有重要地位。

近年来国内外学者对方向图可重构天线做了大量研究<sup>[4-7]</sup>。文献[4]介绍了一种简单的方向图可重构天线, 通过控制开关的状态, 可使天线工作在两种模式: 单极子和带反射器的偶极子模式, 从而天线能辐射全向和定向的方向图。在文献[5]中作者设计了一种矩形螺旋方向图可重构天线, 通过运用高阻

表面技术 (high-impedance surface) 使天线的厚度得到进一步降低, 通过改变螺旋上四个开关的组合状态可以使天线的方向图实现对空间的良好覆盖。由于分形结构天线的众多优势<sup>[8]</sup>, 很多学者把分形概念运用到可重构天线的设计之中<sup>[6-7]</sup>。文献[6]和[7]讨论了典型的三阶 Hilbert 曲线方向图可重构天线, 在天线特定位置加载开关, 通过改变开关的通断状态, 来达到控制天线方向图的目的。但是上述天线都有一个共同缺点: 阻抗带宽过窄, 不能满足现代无线通信系统的需要。

通过对三阶 Hilbert 曲线进行变换, 设计出一种新型蝶形结构方向图可重构天线。由仿真和测试结果可知: 该天线拥有较宽的阻抗带宽。通过改变开关的状态, 天线的方向图关于  $xoz$  平面发生了偏转, 实现方向图可重构。

## 2. 天线设计原理与结构

Hilbert 曲线是一条经典的分形曲线, 它所具有的空间填充能力, 非常适合于分形天线的设计。Vinooy 等人详细讨论了 Hilbert 曲线在设计紧凑型谐振天线中的应用, 结果发现: Hilbert 分形天线的尺寸可以减小到  $\lambda/10$ , 但性能与  $\lambda/2$  偶极子相似<sup>[9-10]</sup>。Zhu 等人研究了馈电位置对 Hilbert 分形天线输入阻抗的影响, 结果表明: 中心馈电的辐射阻抗很小,

收稿日期: 2009-06-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助 (2007CB310605)

联系人: 刘楠 E-mail: nan.liu@126.com

但恰当地选择偏向馈电点,总能提供大约  $50\ \Omega$  的输入阻抗<sup>[11]</sup>。图 1 就是典型的 Hilbert 曲线的迭代生成过程。

所设计的蝶形结构天线是三阶 Hilbert 曲线通过几何演变而来。Hilbert 曲线内部被填充为金属贴片,从而构成贴片天线。蝶形结构天线的几何演变过程如图 2 所示。

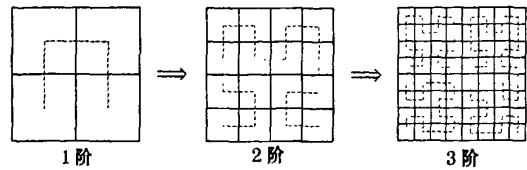


图 1 Hilbert 曲线的迭代生成过程

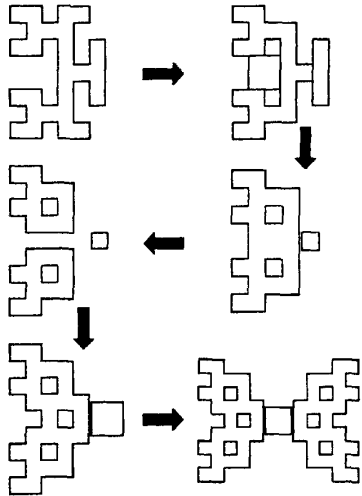


图 2 Hilbert 曲线演变为蝶形天线的示意图

由天线设计原理可知,通过对三阶 Hilbert 曲线的几何演变,设计出蝶形结构天线,其结构示意图如图 3 所示。

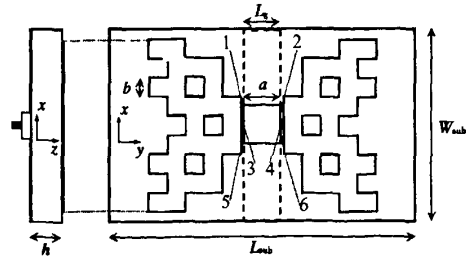


图 3 蝶形结构天线的结构示意图

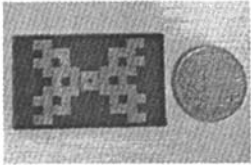
图 3 为蝶形结构天线的俯视图和侧视图。天线

由一系列边长为  $b$  的小正方形贴片所组成,它们是构成天线的基本单元。天线沿  $xoz$  平面对称分布,成蝶形结构。中心贴片(边长为  $a$  的正方形贴片)作为主辐射贴片,放置在  $L_{sub} \times W_{sub}$  的介质板的几何中心,背面接  $50\ \Omega$  同轴馈电。主辐射贴片通过左边开关(1、3、5)和右边开关(2、4、6)分别与两边的寄生贴片相连接。通过转换开关的通断状态,主辐射贴片可以选择性地馈电给左边或右边的寄生贴片,从而改变天线表面电流的分布,使天线的主波瓣辐射方向发生偏转,实现方向图可重构。天线接地板采用部分接地技术,整个天线通过  $L_g \times W_{sub}$  的接地板与地相连,相比传统的完全接地结构,此方法可在不增大天线体积的情况下增加天线的阻抗带宽。

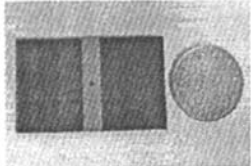
天线被印制在聚四氟乙烯介质板(厚度为  $h$ ,介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ )的上表面,部分接地板被印制在介质板的下表面。天线的结构尺寸列于表 1 中。利用电磁仿真软件 HFSS 对天线的几何参数进行了优化设计。在仿真中用通断的铜片代替 MEMS 开关(1、2、3、4、5、6)。仿真结果表明:辐射体和接地板的形状直接影响天线的谐振频率和带宽性能。天线实物如图 4 所示。

表 1 蝶形天线的结构尺寸(单位 mm)

参数	$L_{sub}$	$W_{sub}$	$L_g$	$a$	$b$	$h$
尺寸	50	30	6	6	3	2



(a) 正面



(b) 背面

图 4 天线实物图

### 3. 仿真测试结果与分析

仿真时天线  $S_{11}$  值小于  $-10\ \text{dB}$  的带宽为  $2.72\ \text{GHz}$ ( $3.16 \sim 5.88\ \text{GHz}$ ),相对带宽  $60\%$ ,天线在谐

振点 5.28 GHz 时的回波损耗为 -45 dB。测试采用 Agilent E5071B 型网络分析仪,仿真与测试结果如图 5 所示。

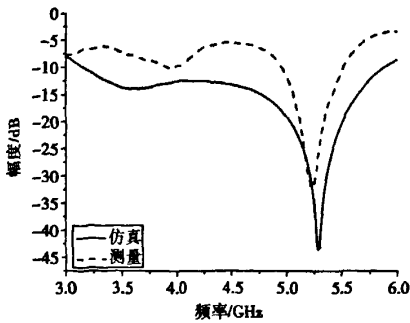


图 5 仿真和测试的  $S_{11}$  参数曲线比较

如图 6 所示:随着  $L_g$  取值的增加,天线的频率特性发生相应的变化。当  $L_g=5$  mm 时,天线谐振频率升至 5.35 GHz ( $S_{11}=-33$  dB),带宽为 2.85 GHz;当  $L_g=7$  mm 时,天线谐振频率降至 5.21 GHz ( $S_{11}=-45$  dB),带宽为 2.61 GHz;当  $L_g=6$  mm 时,天线谐振频率为 5.28 GHz ( $S_{11}=-45$  dB),带宽为 2.72 GHz;由于  $L_g$  的变化,导致  $L_g$  上分布电流变化,造成对天线带宽的影响。考虑到天线在谐振点处的匹配性能以及宽频带要求,选取  $L_g=6$  mm。

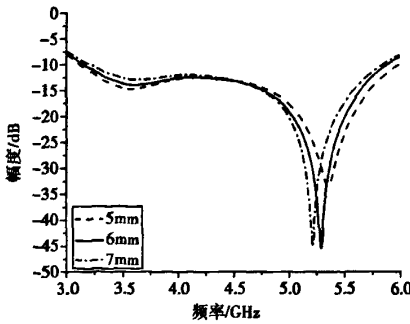


图 6 接地板宽度对天线回波损耗的影响

图 7 显示了不同接地方式对天线带宽的影响。当天线完全接地时,天线带宽仅为 90 MHz,带宽性能差;当天线部分接地时,带宽性能得到很大提高。结果显示:天线在不增加体积的情况下展宽了频带,满足天线向小型化、宽频带方向发展的要求。

图 8 显示了天线在谐振频率 5.28 GHz 时仿真与测试的二维方向图( $xoy$  平面)。由图可知:天线的主波瓣沿  $xoz$  平面发生反向偏转,下面以辐射方向角  $\Phi$  来量度天线主瓣最大方向的变化。如图 8

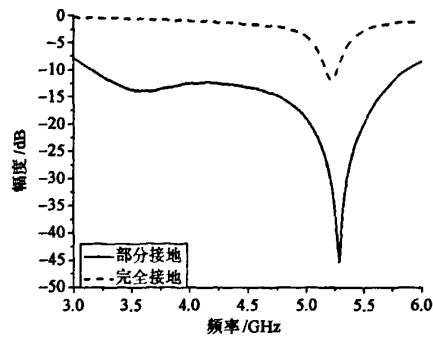
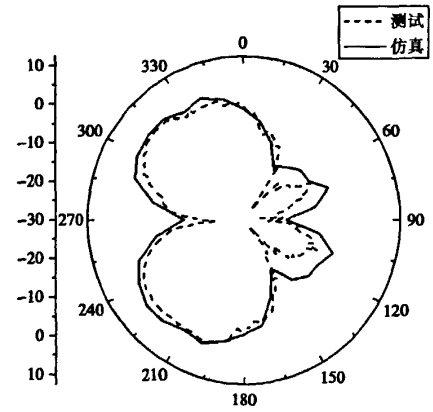
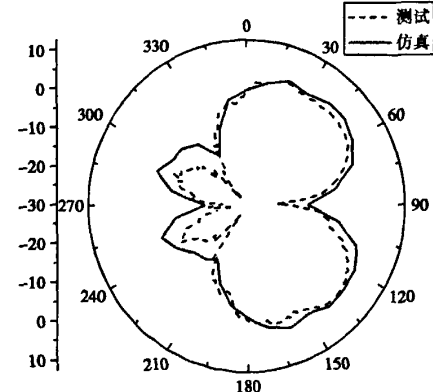


图 7 接地方式对天线带宽的影响



(a) 开关 1、3、5 导通 2、4、6 断开



(b) 开关 2、4、6 导通,1、3、5 断开

图 8 仿真和测试的二维辐射方向图

所示:(a) 天线主瓣最大方向  $\Phi$  分别为  $200^\circ$  和  $316^\circ$ ,这两个方向上的半功率带宽分别为  $52^\circ$  和  $54^\circ$ 。(b) 天线主瓣最大方向  $\Phi$  分别为  $44^\circ$  和  $140^\circ$ ,这两个方向上的半功率带宽分别为  $50^\circ$  和  $52^\circ$ 。结果显示:在  $xoy$  平面上天线的两个主波瓣分别偏转了  $88^\circ$  和  $60^\circ$ 。通过控制开关 1~6 的通断状态,天线的表面

电流分布随之改变,天线的主波瓣辐射方向发生了相应偏转。天线以较小的尺寸在宽频带范围内实现了方向图的重构。测试和仿真结果吻合较好,说明天线实际性能满足设计要求。

图9为天线在工作频带内的增益计算值,最高增益达到5.5 dB,最小增益为2.2 dB。

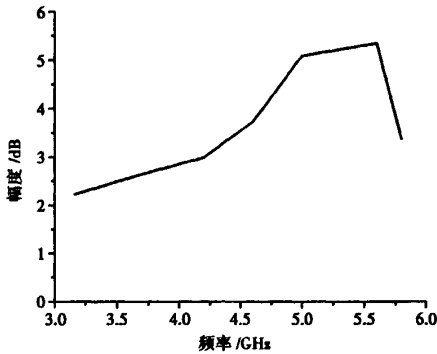


图9 天线增益计算值

#### 4. 结论

提出了一种小型方向图可重构平面天线。在结构上采用 Hilbert 曲线的演变结构与部分接地方式。通过数值计算确定了天线的几何尺寸并分析了天线表面电流的分布。对天线实物的频率带宽和方向图进行了测量。结果显示:通过对开关通断状态的转换,天线的主波瓣方向能在宽频带内实现反向偏转。同时天线的尺寸小,具有便于电路集成的平面结构,是一种有实用价值的小型方向图可重构天线。

#### 参考文献

- [1] 肖绍球,王秉中. 微带可重构天线的初步探讨[J]. 电波科学学报,2002,17(4):386-390.  
XIAO Shaoqiu, WANG Bingzhong. Preliminary research on microstrip reconfigurable antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(4): 386-390. (in Chinese)
- [2] 杨雪松,王秉中. 可重构天线的研究进展[J]. 系统工程与电子技术,2003,25(4): 417-421.
- [3] 王安国,张佳杰,王 鹏. 可重构天线的研究现状与发展趋势[J]. 电波科学学报,2008,23(5): 997-1002.  
WANG Anguo, ZHANG Jiajie, WANG Peng. Recent research and developing trends of reconfigurable antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 997-1002. (in Chinese)
- [4] KANG W S, PARK J A, YOON Y J. Simple reconfigurable antenna with radiation pattern[J]. Electronics Letters, January 2008, 44(3): 182-183.
- [5] DEO P, MEHTA A, MIRSHEKAR-SYAHKAL D, et al. An HIS-based spiral antenna for pattern reconfigurable applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8:196-199.
- [6] VINOY K J, JOSE K A, VARADAN V K, et al. Hilbert curve fractal antennas with reconfigurable characteristics [C]//Microwave Symposium Digest, Mary 2001 IEEE MTT-S International, May 2001: 381-384.
- [7] YANG X S, WANG B Z, ZHANG Y. A reconfigurable Hilbert curve patch antenna [C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium July 2005: 613-616.
- [8] 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): 55-58.  
LIU Ying, GONG Shuxi, FU Demin. The advances in development of fractal antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(1): 55-58. (in Chinese)
- [9] Vinoy K J, Jose K A, Varadan V K, et al.. Resonant Frequency of hilbert curve fractal antennas[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium July 2001:648-651.
- [10] ANGUERA J, PUENTE C, SOLER J. Miniature monopole antenna based on the fractal hilbert curve [C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium June 2002:546-549.
- [11] ZHU J H, HOORFAR A, ENGHETA N. Bandwidth, cross-polarization, and feed-point characteristics of matched hilbert antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003,2: 2-5.

## 作者简介



王安国 (1958—),男,山西人,天津大学电子信息工程学院教授,博士,中国电子学会高级会员。在国内外学术刊物与会议上发表学术论文 50 余篇。主要研究方向为:通信系统理论、天线理论与设计、射频电路分析与设计。



刘楠 (1983—),男,天津人,天津大学电磁场与微波技术专业硕士生,主要研究方向为:可重构天线的设计。



王鹏 (1985—),男,天津人,天津大学电磁场与微波技术专业硕士生,主要研究方向为:可重构天线的设计。

## Design of a pattern reconfigurable butterfly antenna based on fractal concept

WANG An-guo WANG Peng LIU Nan DONG Jia-wei

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Nowadays the reconfigurable antenna as a new type has become the hot spot in antenna fields. Compared with the traditional antenna, it is small, versatile and easy to implement the application of diversity. The concept of fractal is used to design a novel pattern reconfigurable antenna which has a shape of butterfly shape, which is obtained through the geometry transformation of third-order Hilbert curve. The performance of return loss and radiation pattern of both simulation and measurement are also illustrated. The results show that two main lobes of the antenna proposed deflect  $88^\circ$  and  $60^\circ$  in the  $xoy$  plane respectively. It is found that the pattern achieves reverse deflection with respect to the  $xoz$  plane.

**Key words** reconfigurable antenna; pattern; fractal; Hilbert curve; butterfly

## 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>