

文章编号:1005-6122(2006)02-0038-03

# 宽带微带圆环缝隙天线的分析与设计\*

高向军 王光明 张晨新

(空军工程大学导弹学院, 三原 713800)

**摘要:** 对一种宽带微带圆环缝隙天线作了理论和实验研究, 在安装反射板时, 工作带宽( $VSWR < 2$ )达到了12%。并在此基础上设计和制作了一个 $8 \times 8$ 元平面阵列天线, 经过实验测试, 工作带宽( $VSWR < 2$ )达到了16%。这种形式的缝隙天线在卫星通信方面应用前景广阔。

**关键词:** 圆环缝隙天线, 宽带, 阵列天线

## Analysis and Design for Broadband Annular-Slot Microstrip Antenna

GAO Xiang-jun, WANG Guang-ming, ZHANG Chen-xin

(Missile Institute of Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** In this paper, a broadband annular-slot microstrip antenna is analyzed. This antenna achieves 12% bandwidth for  $VSWR < 2$  when a baffle-board is placed. An  $8 \times 8$  element array is designed and tested, which achieves 16% bandwidth for  $VSWR < 2$ . The annular-slot microstrip antenna can be used extensively in satellite communications.

**Key words:** Annular-slot microstrip antenna, Broadband, Array antenna

## 引言

经过近二三十年的发展, 微带天线无论是从理论的深度还是应用的广度上来说, 都已达到一个较高的水平。在微波天线这个领域内, 微带天线已经成为一个独立的整体建立了自己的课题。然而, 微带天线频带窄的突出缺点又限制了它的发展。尤其对于高频阵列天线而言, 如果采用简单的微带贴片天线, 并利用多级功分网络馈电, 不仅无法满足带宽要求, 而且加工造成的误差也限制了它的实际应用。目前, 在高频平面阵列天线方面, 国内外广泛采用的是微带缝隙天线。美国的Collier设计了一个512元的缝隙微带天线阵, 用于接收第VI频段(11.75~12.5GHz)人造卫星电视广播, 带宽达到8.4%( $VSWR < 2$ )<sup>[1]</sup>。在X波段上的一种类似天线, 只有52个缝隙的微带线馈电阵, 所得天线阵增益为21dB, 总效率为45%, 带宽6%( $VSWR < 2.5$ )<sup>[1]</sup>。另外一个用于Ku波段的矩形缝隙阵列天线, 用微带渐变线进行馈电, 带宽可以达到10%( $VSWR < 2$ )<sup>[2,3]</sup>。本文分析了一种新型宽带微带圆环缝隙天

线, 它的带宽( $VSWR < 2$ )可以达到12%。并在此基础上制作并测试了 $8 \times 8$ 元阵列天线, 它的带宽( $VSWR < 2$ )达到了16%。

## 1 微带圆环缝隙天线的分析

微带环缝天线是在介质基片的地板上开一个圆环缝隙, 用开路微带线馈电, 如图1所示。在一无限大导电平板上的环缝, 可看成是面磁流的环形分布, 其为

$$\mathbf{M}(\rho, \phi') = E_a(\rho, \phi') \times \mathbf{n}$$

式中,  $E_a$ 是口面电场;  $\mathbf{n}$ 是垂直于口面的单位矢量。

环缝天线的远场方向图根据电矢量位法计算可以求得, 但是要精确计算环中的场分量有一定的难度。因此作如下的两种近似后, 远区电场的 $\theta$ 和 $\phi$ 分量可简单写成<sup>[1,2]</sup>:

I: 窄缝, 即  $w \ll \lambda$ , 且  $E_{\phi'} = 0$ ,  $E_{\rho} = \text{常数} = E_0$ , 则

$$E_{\theta} = \frac{w k_0}{2} E_0 a \frac{e^{-jk_0 r}}{r} J_1(ak_0 \sin\theta),$$

$$E_{\phi} = 0$$

这种情况下的近似计算, 将求解缝隙内的场分

\* 收稿日期:2004-11-01;定稿日期:2005-01-25

基金项目:国家863计划资助项目(2003AA005044)

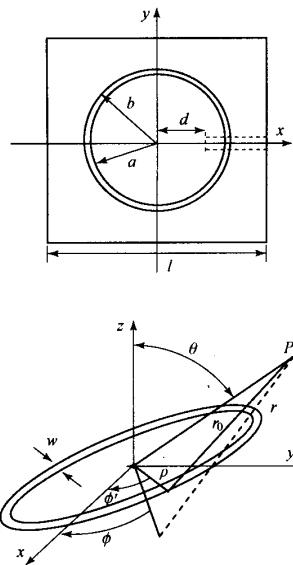


图1 微带圆环缝隙天线的基本结构及其坐标系

布等效为求解环形均匀分布磁流元的场分布,同时假设接地面无限大,并没有考虑边沿绕射场的影响。

II:窄缝,即 $w \ll \lambda$ ,且 $E_{\phi'}=0, E_{\rho}=E_0 \cos n\phi'$ ,则

$$E_{\theta} = \frac{-j^n a w k_0 E_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos n\phi' J_n(ak_0 \sin \theta)$$

$$E_{\phi} = \frac{j^n n E_0 w}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \sin n\phi' \cot \theta J_n(ak_0 \sin \theta)$$

式中 $w$ 为环缝的宽度, $a$ 为环缝的内径。

这种情况下的近似计算,当 $\phi'=0$ (和 $\pi$ )时,环缝内的场主要集中分布在相应的两个区域内,同时由于实际情况中接地面有限,因此,对应边沿处存在较强的边沿绕射。图2表示了由于边沿绕射场的存在,介质基片边沿到圆环缝隙中心距离的不同(分别为 $\lambda/2, \lambda, 3/2\lambda, 2\lambda$ )对远场方向图的影响。

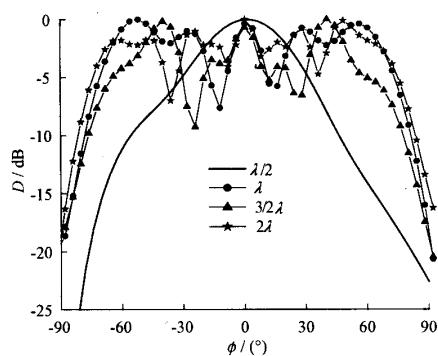


图2 基片边沿距离缝中心的不同对方向图的影响

以上两种情况都是假定环缝的宽度很窄(即 $w \ll \lambda$ ),实际上当环缝的宽度大于 $0.1\lambda$ 时,无论是用匹配带线还是开路带线馈电,环缝天线的阻抗特性都与简单磁流环的阻抗特性相距甚远。同时由于环缝内场分布不均匀,且存在边沿绕射场,故导致环缝天线的远场方向图出现花瓣。因此对它的分析不能再简单利用磁流环等效。通过HFSS软件仿真计算,图3给出了环缝宽度与阻抗匹配之间的关系。

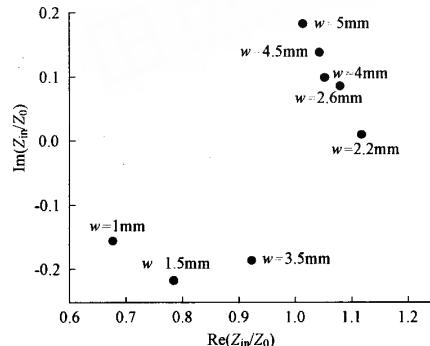


图3 环缝宽度与阻抗匹配的关系

## 2 设计结果

如图1所示,取介质基板的介电常数 $\epsilon_r=2.65$ ,厚度 $h=0.5\text{mm}$ ,尺寸 $l \times l=12 \times 12\text{mm}^2$ 。圆环缝隙的外半径 $b=3.4\text{mm}$ ,内半径 $a=1.2\text{mm}$ , $d=1\text{mm}$ ,用 $75\Omega$ 的开路微带线馈电,并在距离馈电面 $\lambda_0/4=6\text{mm}$ 位置上安放一个反射板。工作于中心频率 $12.5\text{GHz}$ 的微带圆环缝隙天线输入驻波比和远场方向图的计算结果如图4和图5所示。从设计结果可以看出,环缝单元E面方向图两边波瓣不对称,这主要是由于E面馈电结构本身不对称,又因为是宽缝天线,这样环缝内 $\phi'=0, \pi$ 这两个主要区域内的电场分布不均匀且不对称,因此直接导致E面方向图波瓣出现了不对称的情况。

## 3 阵列天线的设计

通过单个圆缝天线单元的计算结果可以看出:它的工作带宽达到了12%,增益达到近9dB。并且由于采用了单层介质板,使制作成本大大降低。根据这个结果设计了 $8 \times 8$ 元阵,采用并联功分馈电,如图6和图7。图8和图9分别给出了 $8 \times 8$ 元平面阵列天线的实验测试结果。

根据 $8 \times 8$ 元阵的测试结果,天线的带宽达到了

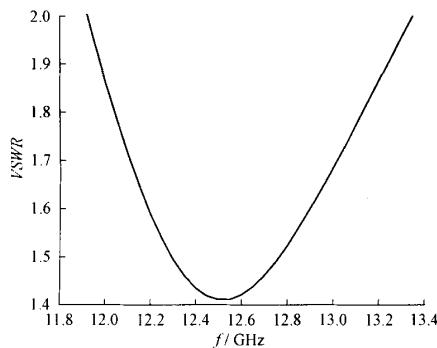


图4 圆环缝驻波比的计算结果

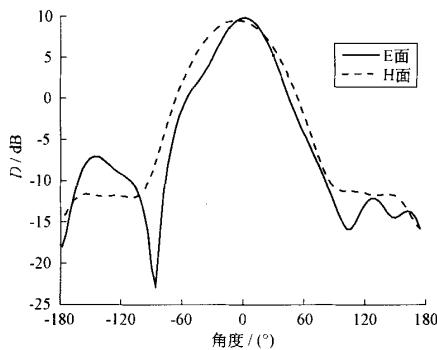


图5 圆环缝方向图的计算结果

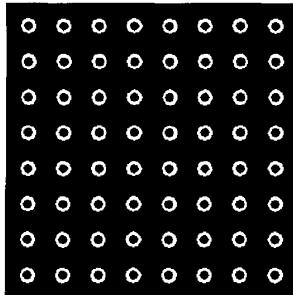


图6 8×8元的正面结构图

16%。和理论计算的结果比较来看,测试结果中天线的远场方向图比较理想,波束宽度10°。

## 4 结论

目前,缝隙天线的研究主要集中在矩形缝隙天线和波导缝隙天线两个方面。对于高频平面阵列天线而言,矩形缝隙天线的带宽如果在采用简单的并联馈电方式情况下要达到指标还存在一定的难度。尤其是矩形窄缝天线要实现宽频带的难度较

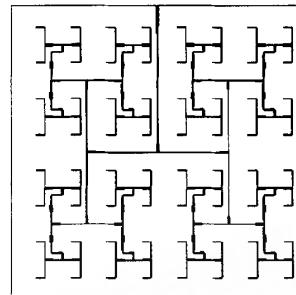


图7 8×8元的反面结构图

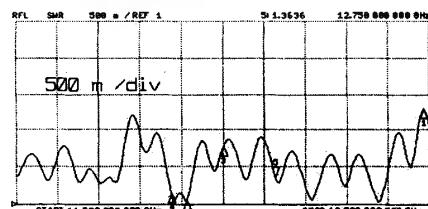
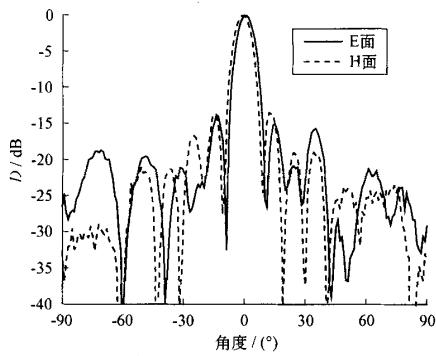


图8 8×8元的实测驻波比

图9  $f=12.5\text{GHz}$  的实测方向图

大<sup>[1,2,4]</sup>,而矩形宽缝天线尽管频带宽<sup>[5,6]</sup>,但关于它各方面技术还不成熟,因此在国内平面微带缝隙阵列天线的实际应用还不是很广泛。本文分析和设计的圆环缝隙天线不仅满足了宽频带的要求,而且在小型阵列的实际测试中也得到了比较满意的结果。然而,对于圆环缝隙天线的理论分析同样还不是很全面,需要进一步的研究和完善。

## 参 考 文 献

- [1] 鲍尔 I J, 布哈蒂亚 P. 微带天线, 北京: 电子工业出版社, 1985
- [2] 林昌禄, 等. 天线工程手册. 北京: 电子工业出版社, 2002. 494~530

(下转第 54 页)

## 5 结束语

本文介绍了电路包络法的基本原理及其应用于多载波调制信号激励时的方法。这种仿真技术把时域积分法和諧波平衡法(或交调波平衡法)结合起来,克服了两者单独应用时的不足。

电路包络仿真中涉及的核心问题依然是非线性方程组求解的问题。普通的数值迭代方法对初始值的依赖性很大,不容易得到全局最优解。引入遗传算法可有效避免这种情况。常规的二进制编码遗传算法用于求解十进制优化问题时,往往存在着频繁的编解码运算,增加问题的复杂度、存贮量和计算时间。本文提出了一种十进制编码遗传算法 DCGA,融合设计了相应的交叉和变异操作,并把混沌过程引入其中以消除种群的早熟状态,加速了种群的收敛过程。在本文所例举的两个实际问题求解中,该算法体现了良好的收敛性。

## 参 考 文 献

- [1] Rizzoli V, et al. General-purpose harmonic balance analysis of nonlinear microwave circuits under multitone excitation. *IEEE Trans on MTT*, 1988, 36(12):
- [2] Ma Hong. Steady state responses of NRD-guide crossbar balanced mixer in mm-wave band. *Int J of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 25(4):
- [3] How-Siang Yap. Designing to Digital Wireless Specifications Using Circuit Envelope Simulation, *Microwave Conference Proceedings, APMC 97*, 1997 Asia-Pacific, vol. 1, 173 ~ 176
- [4] 李正平, 马 洪. 电路包络仿真:一种用于微波通信电路和系统稳态分析的新方法. *通信技术*, 2002, (11): 16 ~ 18
- [5] 马 洪. 近代微波技术. 华中科技大学研究生院, 2004 年 3 月

(上接第 40 页)

- [3] 钟顺时. 微带天线理论与应用. 西安:西安电子科技大学出版社, 1991
- [4] 张 均, 刘克诚, 张贤铎, 等. 微带天线理论与工程. 北京:国防工业出版社, 1988: 191 ~ 200
- [5] Jeong Phill Kim, Wee Sang Park. Analysis and network modeling of an aperture-coupled microstrip patch antenna. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2001, 49(6): 849 ~ 854
- [6] Sze Jia-Yi, Wong Kin-Lu. Bandwidth enhancement of a

- [6] Luo Dianying, Han Zhengzhi. Solving nonlinear equation systems by neural networks. In: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Intelligent Systems for the 21st Century*. 1995. 858 ~ 862
- [7] Nguyen T T. Neural network architecture for solving nonlinear equation systems, *Electronics Letters*, 1993, 29(16): 1403 ~ 1405
- [8] 赵明旺. 基于牛顿法和遗传算法求解非线性方程组的混合计算智能方法. *小型微型计算机系统*, 1997, 18(11): 13 ~ 18
- [9] 金菊良, 杨晓华, 等. 基于实数编码的加速遗传算法. *四川大学学报(工程科学版)*, 2000, 32(4): 20 ~ 24
- [10] 黄友锐. 十进制遗传算法的收敛性分析. *淮南工业学院学报*, 2001, 21(1): 28 ~ 31
- [11] 张 彤, 张 华, 等. 浮点数编码的遗传算法及其应用. *哈尔滨工业大学学报*, 2000, 32(4): 59 ~ 61
- [12] 金 聪. 函数优化中实数型遗传算法的研究. *小型微型计算机系统*, 2000, 21(4): 372 ~ 374
- [13] Kazuhisa Yamauchi, Kazutomi Mori, Masatoshi Nakayama, et al. A microwave miniaturized linearizer using a parallel diode with a bias feed resistance. *IEEE Transaction on MTT*, 1997, 45(12): 2431 ~ 2435

**马 洪:** 男, 1966 年 10 月生, 华中科技大学电子与信息工程系教授, 博士生导师, 武汉光电实验室兼职教授, 博士, 中国电子学会微波分会委员, 湖北省通信学会无线与移动通信专业委员会委员。主要研究方向为天线、微波毫米波电路、无线与移动通信系统等。

E-mail: mahong\_hust@263.net

**李正平** 男, 1977 年 8 月生, 硕士。主要研究方向为天线、射频与微波电路分析与设计。

**陈 勇** 男, 1980 年 7 月生, 华中科技大学电子与信息工程系硕士生。主要研究方向为无线通信。

**何 凌** 男, 81 年 2 月生, 华中科技大学电子与信息工程系硕士生。主要研究方向为无线通信。

microstrip-line-fed printed wide-slot antenna. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2001, 49(7): 1020 ~ 1024

**高向军** 男, 1979 年生, 空军工程大学导弹学院电磁场与微波技术专业博士生, 主要从事电磁散射与辐射的研究。

E-mail: gaoxj111@163.com

**王光明** 男, 1964 年生, 空军工程大学导弹学院教授、博士生导师, 主要从事电磁散射与辐射、天线技术等方面的研究工作。

## 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>