

# 一种基于印刷工艺的新型毫米波波导缝隙天线

## A New Type of Millimeter Wave Rectangular Waveguide Slot Antenna Using Print Technology

尹 雷 洪 伟

(东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

Yin Lei, Hong Wei

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096)

**【摘要】** 针对传统的波导缝隙天线和微带贴片天线在毫米波段所存在的缺点, 本文提出利用印刷工艺来制造毫米波波导缝隙天线。与以往的结构相比, 新结构不仅可以提供满足毫米波段应用的精度和较低的成本, 而且可以在一定程度上抑制旁瓣电平。基于这种结构, 本文设计并制作了 Ka 波段的两种波导缝隙天线。实验结果和设计结果吻合, 证明该结构的可行性和有效性。

**关键词:** 印刷工艺, 缝隙天线, 矩形波导

**Abstract:** In view of the drawback of traditional slot and microstrip patch antenna, a new type of rectangular waveguide slot antenna with print technology is presented in this paper. Compared with the previous structure, the later is more precise and of lower cost. Two kinds of slot antennas at Ka-band have been designed and tested. The experimental results show well agreement with designed specifications.

**Key terms:** Print technology, Slot antenna, Rectangular waveguide

## 一、引言

近年来, 波导缝隙阵列由于其低损耗、高辐射效率和性能稳定等一系列突出优点, 而得到广泛应用和研究<sup>[1~4]</sup>。对于传统的波导缝隙阵列而言, 通常运用机械加工手段, 如铣、削等工艺, 直接在波导壁上加工出相应的缝隙阵列。该法难度高, 精度低, 公差在 0.03mm 左右。对于一般较低频段的应用, 这一精度尚能接受, 但是当其应用于毫米波段或更高频率时, 这种加工方法和精度就成为限制缝隙阵列性能的一个重要因素。特别是在超低副瓣的天线设计中, 当要求缝隙长度的误差必须控制在 1% 以下时, 这一问题将更加突出。当然, 运用一些特殊设备, 可提高加工精度, 但无疑将大大增加成本。与此同时, 集成印刷贴片天线近年来也获得了广泛的应用<sup>[5~8]</sup>。由于采用了印刷工艺, 贴片天线的加工过程相当简单, 且加工精度很高。但是由于采用微带电路馈电, 受介质损耗和表面波的影响, 随着频率升高, 贴片天线的损耗将急剧加大, 从而严重影响天线的辐射效率。因此, 如何将上述两种天线各自的优点综合在一起, 同时又可以避免上述问题是本文所关心的焦点。

作者首次将印刷工艺应用于波导缝隙阵列天线的设计,并提出一种新的结构形式。由于采用了印刷工艺,在保留了原有波导缝隙阵列天线所有优点的同时,新的结构简化了制造流程,也满足了应用毫米波段的精度要求。基于这种新结构,分析并设计制作了 Ka 波段两种类型的波导缝隙阵列天线,获得良好的实验结果。

## 二、结 构

对于波导缝隙阵列而言,传统的机械加工方法所带来的问题一般可归结为以下几点:

1 通常情况下,其加工精度一般在  $0.03\text{mm}$  左右,而这一误差在毫米波段或更高波段上往往不能满足  $1\%$  的误差要求。图 1 仿真了在  $0.05\text{mm}$  范围内随机产生的缝隙长度误差对天线方向图的影响。由图可见,在测试频段内(Ka 波段),这一误差将使旁瓣电平由原来的  $-30\text{dB}$  增加到  $-25\text{dB}$  左右。可见,此时由加工所造成的误差已经不能忽略了。

2 原有的加工方法不可能形成理想的矩形槽,而会出现圆角。随着频率的升高,将由此产生越来越明显的频率漂移<sup>[3]</sup>。

3 一般情况下,在进行天线的分析和设计时,往往假设波导壁为零厚度的理想情况而随着频率的升高,波导壁的厚度已经可以和工作波长相比拟。此时运用传统的分析方法将引入较大的模型误差。而如果考虑厚度,则不可避免地使分析、设计的难度和工作量大为增加。

为了解决上述矛盾,考虑如图 2 所示结构,将需要开槽的波导壁完全用带接地板的介质基片来替代,即以接地板为相应的波导壁,而波导壁上的缝隙阵列则可以利用贴片天线的制作工艺——印刷工艺来完成。通过这一改进,使新结构在保留了原有结构所有优点的同时,还具备以下优点:

(1) 和传统方法相比,新结构不仅在工艺流程上获得简化,而且精度高。这使新结构很容易适应毫米波段或以上波段的应用。同时,通过印刷工艺,可得到近于理想的矩形槽,避免由于槽的形状非理想矩形而在高频频段所导致的频率漂移。

(2) 由于介质基片上所覆盖的金属膜厚度非常薄,因此,即使在毫米波段也可以认为其为零厚度,从而可以避免由于考虑波导壁厚而引入的大量附加计算。虽然由于引入介质基片而增加一定的计算量(如要求解天线在分层媒质中的辐射场)。但 M. C. Bailey 和 F. L. Whet-

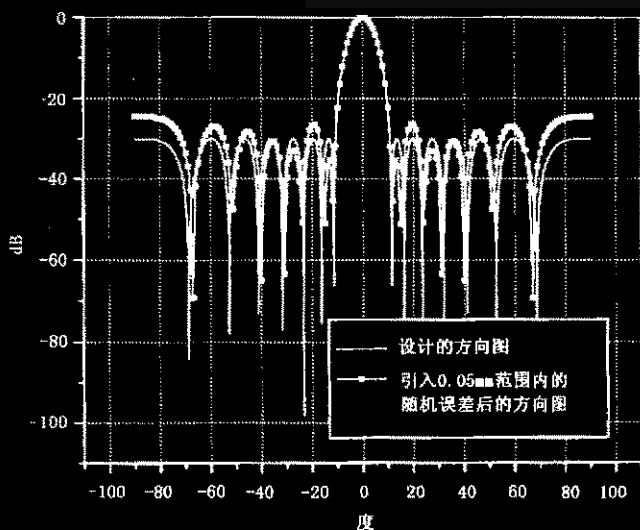


图 1  $0.05\text{mm}$  范围内缝隙长度随机误差对天线方向图的影响

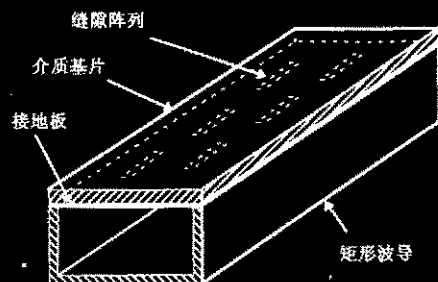


图 2 采用印刷工艺的结构示意图

ten 等人的研究已经表明<sup>[4,5]</sup>,在原有结构(包括缝隙阵列规模,缝隙尺寸等)不变的情况下,介质基片的引入将有效地抑制旁瓣电平。在某些点上可以使旁瓣电平在原有基础上降低 10dB,甚至更低。从而为超低副瓣天线的设计提供了有利的条件。

3 可在介质基片上利用印刷工艺腐蚀出任意的缝隙形式,设计一些原有结构很难达到的特殊要求的天线,如圆极化天线等。

4 对于同一频段不同要求的天线,所需更换的不再是整个波导,而仅仅是替换相应的介质板。这不仅节约了成本,也提高了结构的灵活性。

### 三、实验结果

为验证上述结构的可行性和有效性,运用方向图综合方法<sup>[9~11]</sup>,我们设计制作了工作于 Ka 波段谐振式和非谐振式两种矩形波导宽边缝隙天线。其结构图分别示于图 3(a)、3(b)。

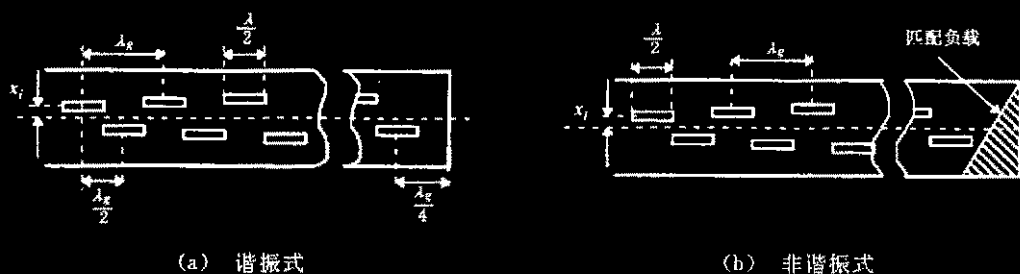


图 3 波导缝隙天线结构示意图

图 4 为相应的实物照片。为设计方便,采用 0.05mm 厚的黄铜膜片代替接地板的介质基片。表 1 为对应天线的设计指标。

表 1 设计指标

	谐振式	非谐振式
旁瓣电平(dB)	-25	-25
增益(dB)	14.0	11.0
频率(GHz)	38.0	38.0
单元数目	14	14
辐射效率		60%

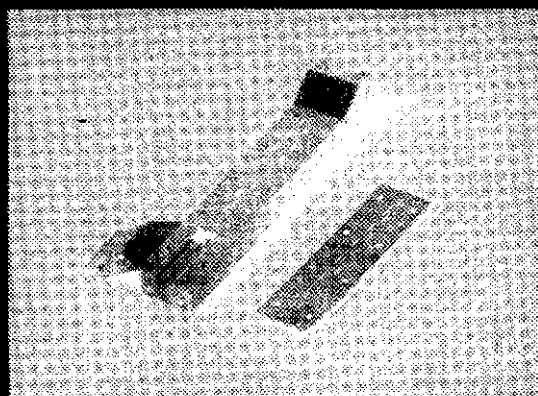


图 4 实物照片

图 5 和图 6 分别给出测试数据和设计数据的比较结果。其中,谐振式和非谐振式天线的实测增益分别为 13.15dB 和 8.08dB。在 36.4GHz 到 38.5GHz 范围内,非谐振式天线驻波比小于 1.7,在中心频率 38.0GHz 处的驻波比为 1.15。实验结果和设计结果吻合。由于测试设备的限制,所能测定的最小电平为 -25.0dB,所以方向图中小于 -25.0dB 的部分只能用一条直线来代替。

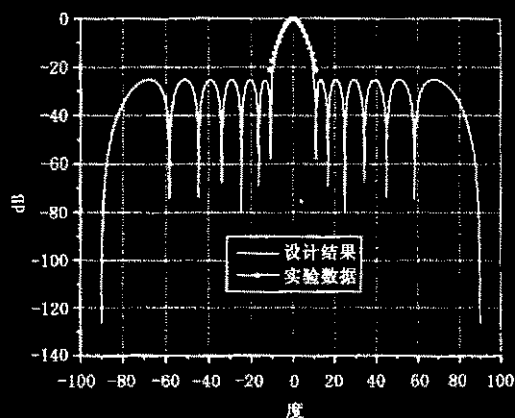


图5 非谐振式设计方向图与实验数据比较

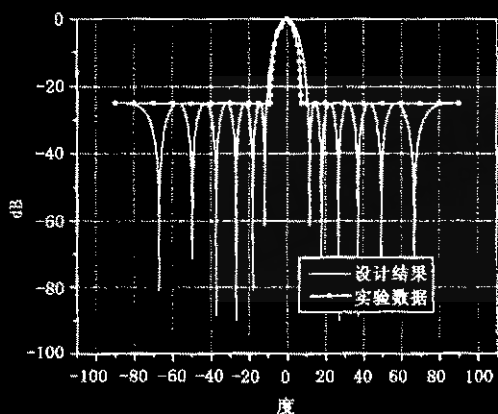


图6 谐振式设计方向图与实验数据比较

## 四、结 论

利用综合波导缝隙天线和贴片天线的优点,本文提出一种基于印刷工艺的新型波导缝隙阵列结构。将覆盖有薄膜的介质基片作为波导壁,在金属薄膜上腐蚀出相应的缝隙阵列,使新结构具有很高的加工精度和灵活性,同时也降低了成本。作者在Ka波段设计并制作了两副波导缝隙阵列天线,实验数据和设计结果吻合,证明新结构的可行性和有效性。

## 参 考 文 献

- [1] G. J. Stern, R. S. Elliott. Resonant length of longitudinal slots and validity of circuit representation; Theory and Experiment. *IEEE Trans. AP*, 1985; 33(11): 1264~1271.
- [2] Robert S. Elliott. Designing slot arrays including internal mutual coupling. *IEEE Trans. AP*, 1986; 34(9): 1149~1154.
- [3] Cheng-Geng Jan. Effects of corners on mutual impedance between edge slots. *IEEE Trans. AP*, 1993; 41(4): 488~492.
- [4] F. L. Whetten, C. A. Balanis. Effects of a dielectric coating on leaky-wave long-slot waveguide antennas. *IEEE Trans. AP*, 1996; 44(3): 1166~1171.
- [5] M. C. Bailey. Design of dielectric-covered resonant slots in a rectangular waveguide. *IEEE Trans. AP*, 1967; 15(9): 594~598.
- [6] Mohammed A. Saad. Efficient method for analysis and design of aperture-coupled rectangular microstrip antennas. *IEEE Trans. AP*, 1993; 41(7): 986~988.
- [7] Min-Hua Ho, Krzysztof A. Michalski, Kai Chang. Waveguide excited microstrip patch antenna-theory and experiment. *IEEE Trans. AP*, 1994; 42(8): 1144~1125.
- [8] S. A. Bokhari, Jean-Francois Zürcher, Juan R. Mosong, Fred E. Cardid. A small microstrip patch antenna with a convenient tuning option. *IEEE Trans. AP*, 1996; 44(11): 1521~1528.
- [9] Robert S. Elliott. *Antenna Theory and Design*. Englewood Cliffs, New Jersey 07632: Prentice-Hall, Inc., 1981.
- [10] Gary A. Thiele, Warren L. Stutzman. *Antenna Theory and Design*. John Wiley & Sons Inc., 1981.
- [11] Thomas A. Milligan. *Modern Antenna Design*. McGraw-Hill Book Company, 1985.

尹 雷 1973年生。1995年于东南大学获硕士学位。现于东南大学毫米波国家重点实验室攻读博士学位。主要研究方向为计算电磁学及其数值方法。

洪 伟 见《微波学报》1999年第3期233页。

## 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>