

宽带和共形印刷天线的研究

作者：牛俊伟

专业：电磁场与微波技术

导师：钟顺时



上海大学出版社

· 上海 ·

2004 年上海大学博士学位论文

宽带和共形印刷天线的研究

作 者： 牛俊伟

专 业： 电磁场与微波技术

导 师： 钟顺时

上海大学出版社

• 上 海 •

Shanghai University Doctoral Dissertation (2004)

Study on the Broadband and Conformal Printed Antennas

Candidate: Niu Junwei

Major: Electromagnetic Fields and
Microwave Techniques

Supervisor: Prof. Zhong Shunhi

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：安同一	教授，华东师范大学电子工程系	200030
委员：金荣洪	教授，上海交大电子工程系	200030
徐得名	教授，上海大学通信工程系	200072
王子华	教授，上海大学通信工程系	200072
陆 彪	研究员，上海航天局 804 研究所	200082
导师：钟顺时	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

林为干	院士, 电子科技大学	610054
杨铨让	教授, 东南大学无线电工程系	210096
安同一	教授, 华东师范大学电子工程系	200062

评议人名单:

周良明	教授, 西安电子科技大学	710071
杜 彪	研究员, 信息产业部电子 54 所	050081
王子华	教授, 上海大学通信工程系	200072
马哲旺	教授, 上海大学通信工程系	200072

答辩委员会对论文的评语

宽带和共形印刷天线是当前国际上天线的研究热点课题之一,该论文选题先进,提出了一类新型的宽带印刷天线设计,对大曲率圆柱共形天线作了理论与实验研究,其成果已被 SCI 和 EI 检索.该研究在民用和军用上都具有理论意义和实用价值.论文的主要贡献有:

(1) 设计了两种共面波导馈电的宽带印刷缝隙天线,通过引入共面波导线性渐变馈电方式,成功地将天线的-10dB 反射损耗带宽展宽,达 40%.理论与实验结果吻合良好.

(2) 为将特定的共面波导馈线与给定尺寸的同轴接头相接,提出了一种共面波导间的过渡连接,研究了渐变尺寸的影响,并对这种过渡连接及其适用情况作了分析,具有实际应用意义.

(3) 对小曲率半径有限长度圆柱体上共形蝶形微带天线作了系统研究.

首先解决了用 Ansoft HFSS 8.0 对该天线的建模和准确求解问题,其次得出其谐振频率、阻抗带宽和方向图等特性的仿真结果和变化规律,为今后进一步深入研究该类天线打下了基础,第三,实际制作了小曲率半径的实验单元和二元阵天线,完成了实验比较.

综观全文,思路正确,条理清晰,层次分明,文笔流畅,计算与实验数据完整且吻合较好.表明作者具备扎实的基础知识,具有较强的独立从事科研的能力和创新能力.该论文已达到博士学位论文的水平,是一篇理论结合实际的博士论文.答辩中回答问题正确.

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过牛俊伟同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位.

答辩委员会主席: **安同一**

2004年3月8日

摘 要

通信系统的迅速发展带来了天线的繁荣,在众多的天线类型中有两种天线极具研究前景和实用意义,已成为当前国际研究的前沿之一. 其一是宽带印刷天线,这种天线由于频带宽能覆盖多个通信频段,因此可以减少通信系统所需天线的数目,进而降低系统造价、减轻重量,并有利于系统的电磁兼容;另一种是共形印刷天线,它可满足飞行器等高速运动物体的空气动力学要求,并具有可靠、耐用和美观的优良特性. 本论文提出了几种新型的宽带印刷天线设计,并对圆柱共形印刷天线作了一些创新性的研究,给出了实验验证. 论文主要包括以下内容:

首先,对宽带印刷天线和共形微带天线的研究现状进行了综述,并介绍了用于分析这些天线的时域有限差分法、矩量法和有限元法等数值计算方法,给出了上述三种方法的比较.

其次,基于对共面波导的研究,通过对共面波导至辐射缝隙的过渡区进行渐变,给出了两种新型宽带印刷缝隙天线设计,对不同渐变形式下天线的阻抗特性和方向图进行了研究,讨论了渐变段对于天线特性的影响. 在理论计算的基础上,制作了实验模型天线,仿真结果和实验结果吻合良好,二副天线的-10 dB 反射损失带宽分别达 37%和 40%.

第三,提出了一种共面波导间的过渡连接(CPW-CPW 变换),这种变换在保持共面波导特性阻抗不变的前提下改变其具体尺寸,可用来将上述印刷缝隙天线或其它特定的共面波导馈线与给定尺寸的同轴接头相连接. 研究了不同的渐变角对过渡变

换传输特性的影响, 给出实际应用中可以采用的渐变角范围. 进而分析了采用共面波导变换段对宽带印刷缝隙天线性能的影响.

第四, 研究了小曲率半径有限长度圆柱体上共形蝶形微带天线的特性. 为了精确计算这种结构复杂的共形微带天线, 对天线的建模和准确求解问题进行了研究. 然后给出了不同曲率半径下的柱面共形蝶形微带天线反射损失和方向图的仿真结果, 得出其变化规律. 实际制作和测试了小曲率半径柱面共形微带天线的单元和二元阵列天线, 仿真结果与实测结果相当吻合. 结果表明, 小曲率半径圆柱面不仅会对天线的方向图造成强烈影响, 而且会改变天线的输入阻抗, 随曲率半径的减小, 天线的谐振频率下降, 阻抗带宽变窄. 因此, 将平面微带天线的设计应用于小曲率半径圆柱面时必须加以修改.

关键词 印刷天线, 缝隙天线, 共面波导, 共面波导间渐变连接, 柱面共形天线, 蝶形微带天线, 宽频带, 方向图

Abstract

Rapid development in communication systems has led to the prosperity of antennas, among which two important types of antennas are promising and valuable for applications and have been the international research frontiers. One is broadband printed antennas, which can cover multi communication bands, thus the number of antennas used in the communication systems can be reduced greatly. As a result, the costs, weight, and problems with electromagnetic compatibility and safety aspects in the systems will be decreased. The other is conformal printed antennas, which can satisfy aerodynamic constraints of high speed aircrafts and vehicles and are reliable, durable and aesthetical. In this dissertation, several novel designs of broadband printed antennas are presented, in addition, the characteristics of conformal printed antennas are studied and the experimental verifications are given. The dissertation will include the following contents.

Firstly, a survey on the broadband printed antenna and conformal microstrip antenna is presented. Then, the numerical methods such as Finite-Difference Time-Domain Method (FDTD), Method of Moments (MoM) and Finite Element Method (FEM) are introduced in details, which are used to analyze the novel antennas. Further more, the above three methods are compared.

Secondly, based on the study of coplanar waveguide (CPW), by linearly tapering the connection area between the CPW feed line and the radiation slots, we get two new designs of broadband printed slot antennas. The impedance characteristics and radiation patterns of the slot antennas with different size of tapers are presented and discussed. For their test antennas, simulated results agree well with the measured ones, and the impedance bandwidth of -10 dB return loss reaches 37% and 40% respectively.

Thirdly, a CPW-CPW transition is presented, which changes the size of CPW while keeping the characteristics impedance of CPW unchanged and can be used to connect the printed antenna above or other CPW feed line to a given size coax. Then, the influence of different tapered angles on the propagation characteristics of the transition is analyzed, and the reasonable range of the tapered angle for application is given. Moreover, the performances of broadband printed slot antennas with CPW-CPW transitions are analyzed.

Lastly, bow-tie microstrip antennas (BMA) conformal to cylinders with small radius are studied. In order to simulate this complicated antenna accurately, how to set up the antenna analysis model and the solving details are presented. Then, both the radiation patterns and the return loss of the antenna with different cylinder curvature radius and length are calculated. The one-element BMA and two-element BMA array conformal to cylinders with small radius and finite length are fabricated and measured. Theoretical results are compared with experimental results, showing good

agreement. It is observed that not only the radiation patterns are changed, but also the resonant frequency is lowered and the impedance bandwidth is reduced significantly when cylinder radius decreased. Therefore, the planar microstrip antenna should be modified when to be mounted on the surface of a cylinder with small curvature radius.

Key words printed antenna, slot antenna, CPW, CPW-CPW transition, cylindrical conformal antenna, bow-tie microstrip antenna, broadband, radiation pattern

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 宽带微带天线的研究	2
1.2 宽带印刷缝隙天线的研究	11
1.3 共形微带天线的研究	18
1.4 本论文的研究内容和主要贡献	25
第二章 天线分析的数值方法	25
2.1 引 言	27
2.2 时域有限差分法	27
2.3 矩量法	41
2.4 有限元法	44
2.5 结 论	49
第三章 共面波导馈电的宽带印刷缝隙天线	52
3.1 引 言	52
3.2 共面波导馈电的宽带蝶形印刷缝隙天线	53
3.3 共面波导馈电的大带宽印刷缝隙天线	62
3.4 共面波导特性阻抗的计算	71
3.5 共面波导间过渡连接	77
3.6 共面波导间渐变连接对印刷缝隙天线性能 的影响	86
3.7 结 论	96
第四章 柱面共形微带天线	98

4.1 引 言	98
4.2 平面宽带微带蝶形天线	99
4.3 用 HFSS 进行共形天线建模的研究	102
4.4 小曲率半径柱面共形蝶形微带天线	110
4.5 结 论	122
第五章 复杂几何体上的共形印刷天线	124
5.1 引 言	124
5.2 柱面扇形共形蝶形微带天线	125
5.3 结 论	133
第六章 结束语	135
参考文献	138
致 谢	155

第一章 绪 论

天线作为自由空间电磁波和电路信号的转换器,在无线通信系统中起着关键性的作用.随着移动通信事业的发展,对天线提出了越来越高的要求.以汽车为例,一部配置优良的汽车至少拥有五副天线,分别用于广播、移动电话、卫星导航、自动驾驶控制和遥控开锁等.众多的天线会增加汽车系统的造价,并会对电磁兼容产生不利影响.在不降低系统性能的前提下,拓展天线带宽以覆盖多个通信频段是减少天线数目的有效手段.因此,对宽带印刷天线的研究是很有必要的^[1,2].

不仅研究如何展宽印刷天线的频带是一个亟待解决的问题,对共形天线的研究也是当今的一个热点.上述的汽车工业不仅对天线的带宽有需求,而且要求天线形式简单、结构可靠、外形美观.共形天线正具有这样的优点,非常适合作为车载通信天线使用^[3].

不仅在汽车领域存在这样的需求,在其他领域的情况也是如此.航空航天一直是国家高科技发展的桥头堡,在卫星、火箭、飞机等各种飞行器上都可以看到共形天线的身影.共形天线有稳定的结构,能适应恶劣的太空环境要求.而且由于天线和飞行器表面共形,可满足空气动力学的要求^[4].

而且,共形天线的触角已经深入到日常生活中的方方面面.对于消防队员、森林护林员、边境巡逻和军事人员而言,将天线

安置在头盔上是一个极佳的选择.但通常使用的用于便携战术通信的传统鞭状天线带宽不够,而且鞭状天线易于损坏,且有明显的视觉轮廓会暴露使用者的位置.头盔共形天线是解决这个问题的最佳选择^[5~8].

综上所述,拥有上面两者优点的宽带共形印刷天线有极大的研究价值和广阔的市场应用前景.例如,在汽车工业领域,宽带共形印刷天线可以满足汽车对天线系统的苛刻要求;在航空航天领域,采用宽频带技术的共形印刷天线可以减轻飞行器的载荷,以降低极其昂贵的航天发射费用;在军事领域,宽带共形印刷天线能为军事行动带来更大的隐蔽性和安全性.

但对共形印刷天线的分析远比接地板为平面的印刷天线复杂,这使得共形天线的研究远远滞后于平面印刷天线.而且,为了降低共形印刷天线研究的复杂度,人们采用了各种近似方法.这些方法通常只能求解某些特殊的问题,而且往往由于建模的简单化,从而导致不能精确计算共形印刷天线的特性.本文采用全波分析方法,首先对平面印刷天线进行研究,得到几种新型宽带印刷天线.然后,研究小曲率圆柱面上宽带共形印刷天线的特性.最后,给出复杂几何体上共形印刷天线的研究成果.

本论文得到了国防科技重点实验室基金资助(00JS07.6.1QT0605).

1.1 宽带微带天线的研究

作为印刷天线的重要成员,微带天线具有低剖面、低成本、易共形、易集成等优点,得到了广泛地应用.但其固有的窄带特性一直困扰着天线设计工程师.许多学者致力于展宽微带天线的频带,提出了各种各样的解决方法.本节简要介绍研究进展.

1.1.1 采用厚基片

微带天线是一种谐振式天线，它的谐振特性犹如一个高 Q 并联谐振电路，导致其阻抗频带窄。对于薄微带天线，其馈线驻波比不大于 ρ 的相对带宽的计算公式为

$$BW = \frac{\rho - 1}{\sqrt{\rho Q}} \times 100 \% \quad (1.1)$$

这说明，通过降低等效谐振电路的 Q 值，可以展宽微带天线频带。由于因辐射引起的 Q 值近似反比于基片厚度，所以采用厚基片可以有效地展宽微带天线的阻抗带宽^[9-11]。图 1.1 和图 1.2 给出了两种新颖的展宽微带天线频带的方法^[12,13]，天线贴片和接地板之间填充空气，可以将空气层视为介电常数为 1 的厚介质基片，而且基片的厚度是变化的。这种天线设计方法具有很大的灵活性，克服了传统印刷微带天线很难改变基片厚度的缺点。前者

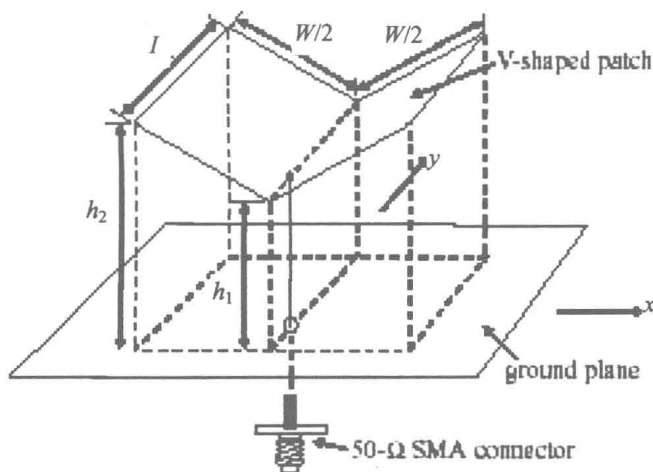


图 1.1 宽带 V 形微带天线