

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 18



# 宽带印刷天线与双极化微带及 波导缝隙天线阵

- 作者：汪 伟
- 专业：电磁场与微波技术
- 导师：钟顺时



2005 年上海大学博士学位论文 18

# 宽带印刷天线与双极化微带及 波导缝隙天线阵

作 者: 汪 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 (2005)

# **Broadband Printed Antennas and Dual-Polarized Microstrip and Waveguide Slot Antenna Arrays**

**Candidate:** Wang Wei

**Major:** Electromagnetic Fields and  
Microwave Techniques

**Supervisor:** Prof. Zhong Shunshi

**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:	<b>李征帆</b>	教授,上海交通大学电子工程系	200030
委员:	<b>安同一</b>	教授,华东师范大学电子系	200062
	<b>徐得名</b>	教授,上海大学通信工程系	200072
	<b>王子华</b>	教授,上海大学通信工程系	200072
	<b>陈随斌</b>	高工,上海航天测控通信研究所	200434
导师:	<b>钟顺时</b>	教授,上海大学通信工程系	200072

评阅人名单:

<b>林为干</b>	院士,电子科技大学电子工程学院	610054
<b>李征帆</b>	教授,上海交通大学通信工程系	200030
<b>焦永昌</b>	教授,西安电子科技大学电子工程学院	710071

评议人名单:

<b>杜彪</b>	研究员,电子第54研究所	610054
<b>金元松</b>	研究员,中国电波传播研究所	453003
<b>林炽森</b>	教授,上海大学通信工程系	200072
<b>王子华</b>	教授,上海大学通信工程系	200072

## 答辩委员会对论文的评语

针对微波成像综合口径雷达、信息战电子对抗系统和无线通信等实际应用的需求,该论文对宽带、双极化平面单元和阵列作了多方面的创新性研究,具有重要的理论与实用价值.主要创新点有:

(1) 对共面波导馈电的宽带单极子印刷天线进行了深入研究,通过对天线结构和几何参数的优化,最后实现了11.2:1的超宽带阻抗特性.

(2) 提出高对称度的双缝耦合双极化微带单元,实测-10 dB反射损失带宽17%,且端口隔离度达到了-40 dB.选用一种高对称度的馈电网络,制成X波段宽带双极化16×16元微带天线面阵.实测两端口-10 dB反射损失带宽大于20.7%,隔离度优于-32 dB,主瓣内交叉极化电平低于-28 dB.

(3) 制成一种很有创新性的宽带单脊波导宽边纵缝天线阵,16元线阵的实测交叉极化低于-40 dB,阻抗带宽为13.4%.

(4) 提出易于加工的切角矩形膜片激励的波导窄边直缝天线阵,并提出了压缩天线厚度技术.最后制成了宽带、高效、低交叉极化的16×16元双极化波导缝隙面阵,在边射和扫描20度时,水平极化和垂直极化波瓣实测交叉极化电平都低于-40 dB,两种线阵的端口隔离度优于-43 dB.

论文条理清晰、层次分明、文笔流畅、工作量大,紧密结

合工程实际,并能从哲理上进行思考,创新性突出,论文高产,表明汪伟同学对该领域有较深刻的了解,也表明该同学已经具有扎实宽广的基础和专业知识,并具有很强的独立科研能力和创新能力.论文已达到博士学位的要求,是一篇优秀博士论文.

答辩中回答问题正确,经无记名投票,一致通过答辩,并建议授予工学博士学位.

## 答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过汪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: **李征帆**

2005年2月23日

## 摘 要

为满足无线通信、微波成像综合孔径雷达和信息战电子对抗系统等国民经济和军事应用的迫切需求,本论文对几种宽带、双极化平面天线单元和阵列作了较深入的研究,提出了多种创新性设计,并完成了实验验证.

作者的主要成果包括下述四个方面:

(1) 研究了电磁场理论和电磁工程中的对称现象,结合实际说明了对称美对工程设计的指导意义.

(2) 提出两种共面波导馈电的印刷单极天线,研究了天线参数的影响,最后实现了阻抗带宽达 11.2 倍频程的超宽带性能.

(3) 系统研究了宽带双极化微带天线单元及天线阵,分析了单元馈电方式和天线阵馈电网络对双极化天线阵端口隔离度和交叉极化电平的影响,并完成了 X 波段宽带双极化微带天线阵的研制,线阵的两个极化端口实测阻抗带宽达 20.7%,隔离度优于  $-32$  dB,主瓣内交叉极化电平低于  $-28$  dB.

(4) 提出一种宽带单脊波导宽边纵缝天线阵,采用新颖的波导馈电方式,实现了该天线阵宽带、横截面压缩、易于加工等优越的性能;同时提出了一种膜片激励波导窄边非倾斜缝隙天线阵,使波导窄边缝隙天线阵的交叉极化电平低至



- 36 dB. 基于以上两种高性能波导缝隙天线阵的成功研制, 制成了  $16 \times 16$  元宽带、高效率、极低交叉极化的双极化波导缝隙天线面阵.

**关键词** 宽带, 印刷天线, 单极天线, 共面波导, 缝隙天线, 微带天线, 双极化, 隔离, 波导缝隙天线, 合成孔径雷达(SAR)

## Abstract

Meeting the urgent needs of national economic and military applications for wireless communications, microwave image synthetic aperture radar (SAR) and electronic warfares systems, this dissertation makes a deeper study on several kinds of broadband dual-polarized planar antenna elements and arrays, then proposes a few of novel designs and completes their experimental verification.

The author's main contribution includes four parts as follows:

Firstly, the symmetry in electromagnetic fields and engineering is summarized. With the practical examples presented, it is illuminated that the symmetry beauty is very helpful for electromagnetic engineering design.

Secondly, two novel CPW-fed (coplanar waveguide) printed monopole antenna are presented. The impedance characteristics and radiation patterns of the antennas with difference sizes of structures are studied. At last, a test antenna with measured impedance bandwidth up to  $11.2 : 1$  is developed.

Thirdly, the broadband microstrip antenna elements and arrays for dual-polarized SAR applications are studied comprehensively. The effects of the feeding approach of

radiation elements and the feed networks of arrays on the radiation performance and isolation between H/V ports are analyzed. The development of a X-band broadband dual-polarized microstrip array is completed. Its measured impedance bandwidth reaches 20.7% and the isolation between two ports less than  $-32$  dB and the cross-polarized level below  $-28$  dB, verifying the validation of the design.

Finally, A symmetric rectangular single-ridged waveguide longitude slot antenna array is proposed. With a novel waveguide dividers used, the array realizes broadband, reduced cross-section size and easy fabrication. As the same time, an edge waveguide untilted slot antenna array is suggested, which has a very low cross polarization level ( $-36$  dB) with easy manufacture configuration. Based on the successful designs of these two arrays, a  $16 \times 16$  broadband dual-polarized waveguide slot antenna array is designed, fabricated and tested, which obtains wide bandwidth, high efficiency and very loss cross-polarization.

**Key words** broadband, printed antenna, monopole, coplanar waveguide (CPW), slot antenna, microstrip antenna, dual-polarization, isolation, waveguide slot antenna, synthetic aperture radar (SAR).

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 宽带印刷单极天线进展 .....	2
1.3 宽带双极化微带天线研究综述 .....	6
1.4 圆极化微带天线综述 .....	16
1.5 宽带波导缝隙天线阵研究 .....	23
1.6 本文数值计算方法 .....	26
1.7 本论文研究内容与主要贡献 .....	36
<b>第二章 电磁工程中的对称问题</b> .....	38
2.1 引言 .....	38
2.2 电磁工程中的对称美 .....	38
2.3 对称美在天线设计中的应用 .....	42
2.4 小结 .....	53
<b>第三章 宽带印刷单极天线</b> .....	54
3.1 引言 .....	54
3.2 共面波导馈电矩形单极天线 .....	56
3.3 共面波导馈电三角形单极天线 .....	66
3.4 阻抗带宽的进一步展宽 .....	69
3.5 小结 .....	71

<b>第四章 宽带双极化微带天线单元</b> .....	72
4.1 引言 .....	72
4.2 双极化角馈微带天线单元 .....	74
4.3 双极化侧馈微带天线单元 .....	78
4.4 方形微带天线交叉极化抑制及端口隔离提高的 理论解释 .....	89
4.5 小结 .....	92
<b>第五章 宽带圆极化贴片天线</b> .....	93
5.1 引言 .....	93
5.2 双缝耦合天线单元 .....	94
5.3 90°电桥设计 .....	96
5.4 圆极化及变圆极化天线单元 .....	105
5.5 小结 .....	110
<b>第六章 宽带双极化微带天线阵</b> .....	111
6.1 引言 .....	111
6.2 双极化微带天线阵的馈电网络 .....	112
6.3 双极化微带天线阵的分析与设计 .....	115
6.4 双极化微带天线面阵的设计 .....	128
6.5 双极化 16×16 平面天线实验阵测试结果 .....	130
6.6 小结 .....	137
<b>第七章 宽带双极化波导缝隙天线阵</b> .....	138
7.1 引言 .....	139
7.2 波导缝隙天线设计方法 .....	140

7.3 宽带单脊波导宽边纵缝天线阵 .....	149
7.4 宽带波导窄边直缝天线阵 .....	176
7.5 宽带双极化波导缝隙面阵 .....	191
7.6 小结 .....	196
第八章 结束语 .....	198
参考文献 .....	201
致 谢 .....	223

# 第一章 绪 论

## 1.1 引言

天线是无线电系统中关键设备之一,是电磁波能量由无线设备到空间的转换器.经过一个多世纪的发展,天线已形式多样、性能各异,广泛应用于通信、广播、雷达、制导、对抗等领域.随着时代的发展,这些电子设备对天线又提出更高的要求,从而促进了天线技术的蓬勃发展.并且天线由单纯的电磁波能量转换器发展成兼做信号处理的系统;天线设计从机械结构实现电气功能发展为机电一体化设计;其制造从常规的机械加工发展成印刷和集成工艺.同时,天线与其他学科的交叉、渗透和结合成为 21 世纪的发展特色<sup>[1]</sup>.

作为印刷天线的重要成员,微带天线由于其独特的结构而具有许多优点:剖面薄、体积小、重量轻,具有平面结构,易于与载体共形,馈电网络可与天线一起制作,适于印刷电路批量生产,能与有源电路集成,便于获得圆极化,容易实现双频段、双极化等多功能等等<sup>[2]</sup>.因此,微带天线成为小型化、集成化天线的主角.宽频带是广大天线工作者孜孜以求的一个目标,尤其是对电子战类天线的应用要求宽带甚至超宽带性能.近年来,人们探索出各式各样的方法来展宽微带天线的工作带宽,并在这方面取得长足的长进,并且在阻抗带宽展宽的前提下,兼顾了天线辐射方向特性和极化特性、双频或多频、小型化等方面的要求<sup>[3]</sup>,对于通信类天线还要求大频率比和可控频率比的双频宽带能力.某些设备为了追求极化分集或收发极化隔离,要求两个极化端口具有很高的极化隔离度.对圆极化天线的新要求,不仅表现在对阻抗带宽的要求,还需要宽的轴比带宽,并且需要在宽的波束范

围内具有良好的轴比特性和保持高的极化纯度。

作为平面天线家族中的另一重要成员,波导缝隙天线自二战以来已获得广泛应用,并且其理论与设计技术已非常成熟。由于其功率容量大、结构简单、易于加工、口径分布容易控制、低损耗和高效率等优点,目前在许多雷达应用中仍占有主流地位。随着设备新需求的提出,例如带宽的拓宽、极化纯度的提高、横截面积的压缩和减轻重量等,对其进一步研究也是很有价值和现实意义的。

由于广大电磁理论工作者的努力,目前建立于数值计算的电磁场分析方法已得到长足的发展,并且方便、通用的电磁仿真软件广泛应用,这对工程应用类的研究设计人员来说是如虎添翼,可以很快地实现和验证自己的创新设计思想。

本论文采用基于电磁场全波分析方法,先后研究了宽带单极印刷天线、宽带双极化微带天线阵、宽带微带圆极化天线和宽带波导双极化天线,通过仿真与实验,验证了一些新的天线设计构想。

## 1.2 宽带印刷单极天线进展

单极天线是一种古老的天线形式,主要应用于通信和广播等领域。随着各种需求,特别是军事保密通信技术中的跳频扩频技术的快速发展,以及电子对抗干扰等应用,对这种结构简单的天线提出了新的挑战。

### 1.2.1 传统单极天线

单极天线最为简单的形式是四分之一波长的导线单极天线,其结构简单且具有良好的辐射特性,但是只能工作在较窄的频带内。展宽其带宽可以采用宽带匹配网络或加载的方法,另外采用一些特殊外形的结构可以得到较宽的带宽,例如圆锥天线、盘锥天线<sup>[4]</sup>和套筒天线<sup>[5]</sup>,以及其他形式旋转对称结构的单极天线<sup>[6]</sup>,如图 1.1 所示。圆锥天线在锥角足够大时,天线的输入阻抗随电高度变化平缓,尤其在



锥角接近  $90^\circ$  时,天线的输入电抗在电长度高度大于四分之一波长后几乎为零,输入电阻接近于  $50\ \Omega$ ,因此可以实现宽带性能. 盘锥天线的宽带特性得益于其特殊的几何结构和非对称的激励方式,它可以看成为上下锥角不同的双锥天线,其上锥角为  $180^\circ$ ,下锥角  $0^\circ\sim 180^\circ$  之间,具有很低的特性阻抗,当下锥角为  $90^\circ$  时,其特性阻抗接近  $50\ \Omega$ . 另一方面,盘锥天线可以看为两个串联的单极天线,合理设计两个单极天线,使两个单极天线的输入阻抗随频率的变化起到互补作用,从而实现展宽带宽. 套筒天线利用其内部结构,获得阻抗变换,使之在几个倍频程内具有良好的驻波特性,较高的增益和基本稳定的方向图. 其他旋转对称结构的单极天线还包括球形天线和改进锥形天线等,这些结构主要是采用在圆锥上部接不同平滑过渡段,使电流的反射系数很小,接近于具有非频变性质的无限长圆锥天线,从而有效地展宽了带宽.

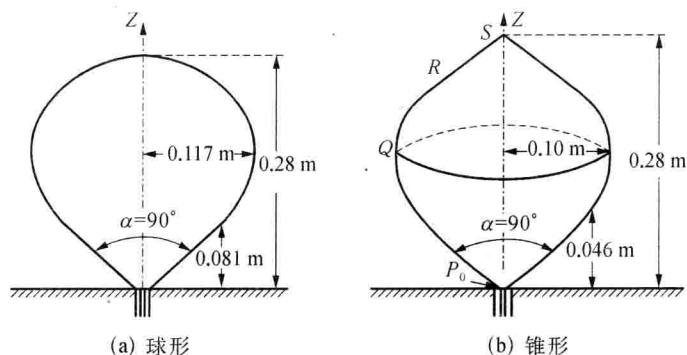


图 1.1 旋转对称结构单极天线

### 1.2.2 平面单极天线

随着固态有源电路的快速发展以及对电子设备轻型化、小型化要求的提高,需要天线方便地与其他电路集成<sup>[7]</sup>,这一需求促进了天线小型化、平面化的发展. 将原来三维结构的天线转换成平面天线是非常普遍的做法. 近来,人们采用这种平面结构代替原来的三维结构