

1999 年上海大学博士学位论文 7

用于有源集成的微带天线单元 与双极化阵列

作者: 高式昌

专业: 电磁场与微波技术

导师: 钟顺时



21

上海大学出版社

1999 年上海大学博士学位论文

用于有源集成的微带天线单元 与双极化阵列

作 者：高式昌

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 (1999)

Microstrip Antenna Elements and Dual-Polarized Arrays for Active Integration

Candidate: Gao ShiChang

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：（工作单位职称）

鲍家善 （上海大学，教授）

委员：

安同一 **徐得名**

林炽森 **张文俊**

王朔中 **黄柳桃**

导师：

钟顺时

评阅人名单:

林为干	电子科技大学	610000	院 士
鲍家善	上海大学物理系	201800	教 授
焦培南	中国电波传播研究所总工办	453003	研究员

评议人名单:

安同一	华东师范大学电子系	200000	教 授
徐得名	上海大学通信工程系	201800	教 授
张文俊	上海大学通信工程系	200000	教 授
王朔中	上海大学通信工程系	200000	教 授
王子华	上海大学光纤所	201800	研究员
吴 健	中国电波传播研究所所长办	453003	研究员

答辩委员会对论文的评语

高式昌同学的论文“用于有源集成的微带天线单元与双极化阵列”结合无线通信发展的需求，从理论上和实验上对几种适合于有源集成的微带天线单元与阵列进行了较深入的研究，取得了一些创新性的成果。选题对国民经济和国防建设具有重要的理论意义和实用价值。论文的主要贡献有：

1. 利用谱域积分方程法，分析了口径耦合的矩形贴片天线、分条贴片天线和具有任意斜缝的微带缝隙天线。研究了输入阻抗和谐振频率等与天线结构参数间的关系。

2. 发展了一种理论方法，即“扩展的多端口网络法”，对薄基片的微带天线阵列进行分析，理论与实验结果吻合。

3. 研制了五种高隔离度的双极化微带天线面阵，其中两副 2×2 元阵具有高于40dB的隔离度；一副6GHz的 4×4 元阵具有36dB的隔离度，可与单一电控相移器件相结合，用来形成线极化至圆极化的极化捷变。

论文立论正确，理论推导严谨，计算与实验结果吻合较好。文字流畅。表明作者具有坚实宽广的理论基础和深入系统的专业知识，具有独立从事科学研究的能力。论文已达到博士学位论文水平。

答辩中回答问题正确。

答辩委员会表决结果

答辩委员会经无记名投票,一致同意通过高式昌同学的论文答辩,并建议授予工学博士学位.

答辩委员会主席: **鲍家善**

1999年6月11日

摘 要

本论文从理论和实验上对几种适合于有源集成的微带天线单元和具有高隔离度的双极化微带天线阵列进行了较深入的研究. 研究工作包括: 三种适合于有源集成的微带天线单元的全波分析和参数研究; 四种具有高隔离度的双极化微带天线阵的分析与设计 and 用于实现极化捷变的 16 单元微带天线阵列的研究等.

首先, 本文利用谱域积分方程法, 分别对口径耦合的矩形贴片天线、口径耦合分条贴片天线和具有任意斜缝的微带缝隙天线进行了全波分析和参数研究. 分别建立了这几种天线的积分方程, 并通过大量的数值计算, 研究了各参数变化对各天线的输入阻抗和谐振频率的影响, 得出了一些对天线设计有指导意义的结论.

然后, 研制出两种具有高隔离度的双极化微带天线四单元方阵. 提出了两种实现双极化微带天线的新途径, 即利用双端口角馈(包括串行角馈和并行角馈两种)的方形贴片实现双极化, 并设计出新的双极化阵列的共面微带馈线网络. 为了工程中对双极化微带天线阵进行分析和设计, 提出了一种理论方法, 即“扩展的多端口网络法”(EMNM), 它将传统的多端口网络模型与空腔模型相结合, 并利用分片法和补片法, 从而对天线阵和馈线网络分别处理后再合并. 实际制作了两副 2×2 的双极化天线阵, 实验表明这两副阵列均具有较高的隔离度.

进一步, 将该方法推广到更大规模的双极化微带天线阵的

设计中, 研制出两种具有高隔离度、低交叉极化的 16 单元双极化微带天线阵, 给出了理论和实验结果.

最后, 研制了一种用于由单一电控相移器件实现极化捷变的 16 单元微带天线面阵. 提出了该 16 单元的高隔离度、低交叉极化的双极化天线面阵的设计方案, 使其可能与电控的移相电路结合, 实现变极化. 基于 EMNM, 给出了该面阵的分析和设计. 实际制作了一个 6GHz 的 4×4 元天线阵列, 测试结果表明该阵列确实具有较高的隔离度.

关键词 微带天线, 天线阵列, 双极化, 积分方程, 数值分析

Abstract

In this dissertation, both theoretical and experimental studies on several microstrip antenna elements and dual-polarized antenna arrays suitable for active integration are presented. The research work includes the full-wave analysis and parametric study on the aperture-coupled rectangular patch antenna, the aperture-coupled gridded patch antenna and the microstrip slot antenna with arbitrarily inclined slot; the analysis and design of several dual-polarized microstrip antenna arrays with high isolations, and the microstrip array for polarization-agile applications, etc.

At first, using the spectral-domain integral equation method, the aperture-coupled rectangular patch antenna, the aperture-coupled gridded patch antenna and the microstrip slot antenna with inclined slot are numerically analyzed respectively. The integral equations for these antennas are founded, and the numerical results illustrate the effects of various parameters on the input impedances and the resonant frequencies of these antennas. Many conclusions are drawn, which are useful for practical design applications.

Next, two kinds of 2×2 dual-polarized microstrip antenna arrays are successfully designed. Two novel ways of realizing dual-polarized antennas are proposed, i.e., the square patch with dual serial-corner feeding and that with dual parallel-corner feeding. New coplanar feedline networks for the dual-polarized arrays are also proposed. By combining the multiport network model, the cavity model, the segmentation and desegmentation techniques, a theoretical method,

named as EMNM (the extended multiport network method), is developed, which is used for the analysis and design of dual-polarized arrays. Two kinds of 2×2 dual-polarized microstrip arrays are fabricated and measured. The measured results of both arrays demonstrate high isolation between two input ports, as predicted by the theory.

Then, this method of design is applied to larger dual-polarized microstrip antenna arrays with high isolation. Two 16-element dual-polarized microstrip antenna arrays are designed, manufactured and measured, showing high isolation and low cross-polarization. Both theoretical and experimental results are presented.

Finally, a 16-element microstrip antenna array is developed, which is for realizing the polarization-agile array controlled by one phase-switching circuit. A configuration is proposed for the 16-element dual-polarized microstrip antenna array, which can be used to realize polarization agility after being integrated with the phase-switching circuit. Based on the EMNM, the array is analyzed and designed. The measured results of the 4×4 dual-polarized array at 6.0GHz validate the theory. This array is demonstrated to achieve high isolation between two input ports.

Key words microstrip antenna, antenna array, dual polarization,
Integral equation, numerical analysis

目 录

第一章 引言	1
1.1 历史背景	1
1.2 微带天线的特点和分类	3
1.3 微带天线的分析方法	4
1.4 有源微带天线	8
1.5 双极化和极化捷变微带天线	10
1.6 本论文的研究内容与主要贡献	13
第二章 微带天线单元的全波分析	16
2.1 引言	16
2.2 口径耦合矩形微带贴片天线	19
2.3 口径耦合分条贴片天线	37
2.4 具有任意倾斜缝隙的微带缝隙天线	47
2.5 结 论	52
第三章 具有高隔离度的双极化微带天线阵列的 分析和设计	54
3.1 引言	54
3.2 串行角馈双极化微带天线阵	56
3.3 并行角馈双极化微带天线阵	70
3.4 两种具有高隔离度的 16 单元双极化微带 天线阵列	78

3.5 结 论	91
第四章 用于实现极化捷变的微带天线阵列研究	93
4.1 引 言	93
4.2 用于实现极化捷变的微带天线面阵的设计	94
4.3 理论与实验结果	98
4.4 结 论	103
第五章 结束语	104
参考文献	106
致 谢	118

第一章 引言

1.1 历史背景

天线作为一种接收和发射电磁波的设备，是无线通信和雷达系统中的一个关键部件。它是自由空间和传输线的接口，通常称为“电子眼”或“电子耳”。在广阔的天线领域中，微带天线是比较年轻、非常富有生命力的一种天线^[1]。由于微波集成电路技术的发展和移动通信技术、空间技术等对低剖面天线的迫切需求，微带天线在理论和技术上得到了迅速的发展。目前微带天线已在民用和军用的各个领域得到了广泛的应用。

虽然Deschamps早于1953年就提出了微带天线^[2]，但一直到70年代初，微带天线才引起众多学者们的重视^[3-11]。1979年在美国新墨西哥州大学举行了微带天线的专题国际会议^[12]，1981年IEEE天线与传播汇刊上登载了微带天线特刊^[13]，两本最早的微带天线专著相继问世^[14,15]。Dubost也完成了关于微带振子天线和阵列的研究专著^[16]。80年代中微带天线无论在理论与实用的深度和广度上都获得了进一步的发展：出现了许多新的理论分析方法和新的结构形式，如电磁耦合、口径耦合微带天线等^[17-20]；提出了许多方法来改进微带天线的性能，如利用堆叠式结构展宽频带、单馈实现双频段或圆极化、双馈实现双极化等^[21-26]。1989年出版的由James和Hall主编的“微带天线手册”一书，汇集了这一时期国际上许多微带天线专家的研究成果^[27]。文献[28]是一本微

带天线的CAD专辑，它选编了许多重要的学术论文。文献[29,30]系统地介绍了微带天线的基本理论和应用技术。国内于1991年出版了一本优秀的高等学校的微带天线教材^[31]。90年代中移动通信技术发展极其迅速，它促进了微带天线技术的进一步发展和应用的更加广泛化。除了继续涌现出各种新形式的微带天线和新的分析方法外，还出现了一个十分活跃的研究领域，即有源微带天线。文献[32-34]中对有源微带天线的发展做了综述性的报导。

电磁频谱是现代无线通信中最宝贵的资源之一。随着通信事业的迅速发展，人们愈来愈迫切需要更有效地利用频谱资源，以增加通信容量，这点对于目前频谱已经很紧张的卫星通信领域来说尤为突出^[35]。另外，在城市内的陆地移动通信中，由于地形、环境异常复杂，存在多径传播效应，因此移动台的接收信号产生多径衰落，导致系统性能的严重恶化^[36]。为满足通信中对系统容量、覆盖面积和通信质量等方面的要求，人们提出了很多方法，双极化天线技术便是其中非常有效的一种方法^[37]。它可以实现频率复用，即使通信容量增加一倍；利用它进行极化分集接收，则可以很有效地抗多径传播效应，从而提高通信系统的性能。许多实际应用也迫切需要天线具有极化捷变的功能。例如，国际通信卫星INTELSAT VII号上的4GHz多波束天线发射右旋圆极化波，形成两个东、西“半球波束”；同时发射左旋圆极化波，形成两个照射通信密集地区的“区域波束”^[38]。这四个波束都工作于4GHz频段而互不干扰，从而实现了四重频谱复用，增加了通信容量。这时，如果便携式的卫星通信天线具有极化捷变的功能，则通过改变其极化，可选择接收不同的信号。双极化天线和极化捷变天线在合成孔径雷达成象系统、高速公路车辆防撞系统、全球定位系统、电子侦察和电子对抗系统等领域中也有广泛的应用。

本论文工作是国家自然科学基金资助项目“有源微带天线研究”（批准号69671012）的一部分。

1.2 微带天线的特点和分类

与其他微波天线（如喇叭、反射面天线、波导缝隙天线和线天线等）相比，微带天线有以下优点：

- 1) 造价低；
- 2) 低剖面，体积小，重量轻；
- 3) 易与有源微波电路集成，且制做方便；
- 4) 可与汽车、导弹等载体表面共形；
- 5) 便于实现多种功能，如圆极化、双极化或双频段等。

微带天线的主要缺点是：

- 1) 频带窄；
- 2) 效率低；
- 3) 馈线网络和表面波产生寄生辐射。

现已有许多途径来克服或减少上述缺点，如采用低介电常数的厚基片、附加寄生辐射单元的共面结构或堆叠式结构和利用宽频带阻抗匹配电路可大大展宽微带天线的工作频带^[39-45]。一个新的简便方法是在贴片上开缝^[46]。采用泡沫基片可以避免表面波寄生辐射的影响，从而提高了方向图的性能^[27]。为进一步提高微带天线的性能，目前已发展了一些新的介质基片，如旋磁介质基片、高温超导基片和光电带宽空隙结构(PBG)等^[47-49]。根据辐射单元形式的不同，微带天线可分为微带贴片天线、微带缝隙天线、微带振子天线和微带线型天线等，其中以微带贴片天线最为常见^[50-52]。根据贴片天线馈电方式的不同，可分为微带线边馈、同轴线底馈、电磁耦合、槽线馈电、共面波导和口径耦合