

2001 年上海大学博士学位论文

7

双极化与变极化微带天线的研究

作者：杨雪霞

专业：电磁场与微波技术

导师：钟顺时



上海大学出版社

2001 年上海大学博士学位论文

双极化与变极化微带天线的研究

作者: 杨雪霞
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 (2001)

Study on Dual-Polarized and Polarization-Agile Microstrip Antennas

Candidate: Yang Xuexia

Major: Electromagnetic Field and Microwave
Technology

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： | 李征帆 | 教授，上海交通大学 | 200030 |
| 委员： | 安周一 | 教授，华东师范大学 | 200062 |
| | 徐得名 | 教授，上海大学 | 200072 |
| | 王朔中 | 教授，上海大学 | 200072 |
| | 黄柳桃 | 高工，上海微波设备研究所 | 201802 |
| 导师： | 钟顺时 | 教授，上海大学 | 200072 |

评阅人名单:

| | | |
|------------|------------|--------|
| 谢处方 | 教授, 电子科技大学 | 610054 |
| 李征帆 | 教授, 上海交通大学 | 200030 |
| 朱守正 | 教授, 华东师范大学 | 200062 |

评议人名单:

| | | |
|------------|------------|--------|
| 林为干 | 教授, 电子科技大学 | 610054 |
| 冯正和 | 教授, 清华大学 | 100084 |
| 安周一 | 教授, 华东师范大学 | 200062 |
| 王子华 | 教授, 上海大学 | 200072 |

答辩委员会对论文的评语

双极化、变极化的微带天线系统在现代通信、综合口径雷达和电子对抗等许多系统中具有宽广的应用前景,是当前天线领域的研究热点之一,该论文的选题既有学术意义,又有实用价值。

论文包括以下几方面创新工作:

将平面电路与腔体理论相结合,利用格林函数法求解出边馈和角馈双极化贴片天线的输入阻抗和互阻抗,同时详细分析了各项参数变化对天线性能的影响情况,所得结果对微带天线的工程设计有重要参考价值。

根据平面电路腔体理论和天线阵理论推出双极化贴片天线阵的交叉极化方向图,理论分析与实验结果符合较好。

用 FDTD 法研究了双极化微带贴片天线各参数对单元、阵元性能和阵元间互耦的影响。

完成了新颖的具有极化捷变功能并带有 LNA 的有源微带天线阵的设计与研制,不但扩展了功能,还大大提高了天线的增益,而且改善了电压驻波比的带宽和双极化隔离度。由于一副多元阵列只需一个有源电路,使系统大大简化,这是一项重要创新。

该论文内容丰富,思路正确,分析及实验数据完整。表明作者已具有宽广坚实的基础理论和系统深入的专门知识,有较强的独立从事科学研究的能力。该论文已达到博士学位论文的水平,是一篇优秀的博士论文。答辩中回答问题正确。经答辩委员会认真讨论一致通过该论文答辩,并建议授予博士学位。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过杨雪霞同学的博士学位论文答辩,建议授予博士学位。

答辩委员会主席: **李征帆**

2001年3月27日

摘 要

近年来在现代通信系统,合成口径雷达、电子探测、电子对抗、极化测量等应用中,要求天线具有双极化、变极化功能,而且整个系统需要优化设计,其理论与应用均处于发展之中。本文从理论上和实验上对双极化方形微带贴片天线单元和阵列进行了系统的研究,对独创的极化捷变放大器型有源微带天线阵作了实践与探讨。论文主要包括四部分内容。

首先,用 Green 函数法导出了三种双极化方形贴片天线的输入阻抗和互阻抗表达式,分析了这三种单元的输入阻抗、电压驻波比和隔离度的频率特性。并且详细分析了天线单元的各个设计参数对天线性能的影响,得出一些对工程设计有意义的结果。这样馈电的贴片易于形成阵列结构和有源集成。

其次,导出了双极化贴片天线阵有效的交叉极化方向图表达式,分析了 16 元贴片天线阵的主极化和交叉极化方向图,理论值和实验值相当吻合。

第三,用 FDTD 法研究了微带贴片天线各参数,包括基片相对介电常数和厚度及微带馈线的宽度等对双极化单元天线性能(谐振频率、反射损耗和隔离度等)的影响。并研究了各天线参数对阵元性能指标和相邻阵元传输系数的影响。同时分析了各天线参数与二元阵谐振频率和互耦的关系。

第四,完成了独创的具有极化捷变功能并带有低噪声放大器(LNA)的有源微带天线阵的设计与研制,并进行了一系列实验

研究。该天线在馈电端电控单一有源电路就可实现整个微带天线阵由线极化到圆极化的极化捷变和信号放大。提出了一种切实可行的极化捷变和 LNA 有源电路,有源电路的移相器和 LNA 都用 TOUCHSTONE 软件进行系统优化设计。无源阵与 LNA 相连接后,不但提高了天线的有源增益,而且改善了驻波比带宽和隔离度。移相器和 LNA 有源器件的引入,根据本方案只需一套,却大大扩展了天线的功能和应用,既使天线可方便地接收不同极化波,又使接收天线对给定的增益要求能作到小型化。

关键词 微带天线阵, 有源天线, 极化, 移相器, 低噪声放大器, Green 函数法, FDTD 法

Abstract

Recently, for the applications such as modern communications, synthetic aperture radars (SAR), electronic detection, electronic counterplot, and radar polarimeters, etc., the dual-polarization and polarization-agile functions of antennas are demanded and their optimization designs of systems are required. Their theory and further application are being in the process of developing. In this dissertation, the dual-polarized microstrip antenna elements and arrays of square patches are investigated systematically and experimentally and the proposed polarization-agile active microstrip antennas of amplifier type is realized and studied. Four subjects are included.

Firstly, the analytical expressions for the input and mutual impedance of three dual-polarized square patch antennas fed with different manners are derived. The characteristics of the input impedance, VSWR (voltage standing wave ratio) and the isolation are analyzed. The effects of the design parameters on the characteristics of the antenna are studied with the results suitable for engineering applications. These elements are tended to form array structures and be integrated with active circuits.

Secondly, a set of effective formulas for the cross-polarization radiation patterns of the dual-polarized microstrip array is obtained. The theoretical and experimental results of 16-element arrays are in good agreement.

Thirdly, the FDTD method is applied to study the effects of

structure parameters of the antenna element, such as the relative dielectric constant and thickness of the substrate, the width of the feed line, on the element characteristics including the resonant frequency, reflection loss and isolation. Further more, the transmission coefficient from one element to the next one and the mutual coupling between two elements are investigated.

Finally, a series of experimental studies is made on the proposed polarization-agile active microstrip antenna with a low noise amplifier (LNA). The polarization-agile of the whole array from linear polarization to circular one is achieved by electrically controlling the only active circuit at the feed port. The practical active circuits for the polarization-agile and amplification are presented. The phase shifter and LNA are optimized systematically by the TOUCHSTONE package. As the passive array is interconnected with the LNA, the active gain is enhanced and the VSWR as well as the isolation characteristics are improved. Only one set of shifter and LNA is used in this array, but the functions and applications of the array are expanded significantly, which not only can receive various polarized waves but can be size-minimized to meet the given gain requirement as well.

Key words microstrip antenna array, active antenna, polarization, phase shifter, LNA, Green function method, FDTD method

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第一章 绪 论 | 1 |
| 1.1 双极化微带天线的发展 | 2 |
| 1.2 有源微带天线的发展 | 7 |
| 1.3 本文研究内容和主要贡献 | 21 |
| 第二章 用 Green 函数法分析双极化微带贴片天线 | 23 |
| 2.1 双极化天线的端口等效 | 23 |
| 2.2 边馈双极化微带贴片天线的 Green 函数法分析 | 24 |
| 2.3 角馈双极化微带贴片天线的 Green 函数法分析 | 34 |
| 2.4 双极化微带天线阵 | 45 |
| 2.5 结 论 | 49 |
| 第三章 双极化微带天线单元及阵列方向图的分析 | 50 |
| 3.1 双极化微带天线单元的交叉极化 | 50 |
| 3.2 角馈双极化微带天线阵的方向图 | 61 |
| 3.3 结 论 | 66 |
| 第四章 用 FDTD 分析双极化微带天线单元与阵元互耦 | 67 |
| 4.1 基本原理 | 67 |
| 4.2 用 FDTD 分析双极化贴片单元 | 73 |
| 4.3 用 FDTD 分析双极化贴片阵元 | 79 |
| 4.4 用 FDTD 分析双极化阵元间的互耦 | 85 |

| | |
|---------------------------|------------|
| 4.5 结 论 | 91 |
| 第五章 放大器型变极化有源微带天线阵 | 93 |
| 5.1 引 言 | 93 |
| 5.2 放大器型双极化有源微带天线阵 | 94 |
| 5.3 放大器型变极化有源微带天线阵 | 99 |
| 5.4 结 论 | 106 |
| 第六章 结束语 | 107 |
| 参考文献 | 109 |
| 致 谢 | 123 |

第一章 绪 论

在无线通信和雷达系统中,天线是自由空间和传输线的接口部件.微带天线是许多种天线之中比较新颖而很有发展前途的一类.

微带天线的概念早在 1953 年就由 D.A.Deshamps 教授提出.到 20 世纪 70 年代,由于微波集成技术的发展,以及各种新型介质材料的出现,微带天线的制作得到了工艺保证,而空间技术的发展又迫切需要低剖面的天线元,这时制成了最早的实用微带天线.之后,基于微带天线的许多优点,如重量轻、体积小、平面结构、易共形、易集成以及成本低等等,微带天线得到了广泛的研究、发展和应用.自 20 世纪 80 年代以来,在各种天线年会上微带天线的研究占有很大比例,有关微带天线的专著不断推出^[1-6].

双极化天线是当前通信领域受到关注的一种新型天线,在 1996 年的 IEEE 天线和传播年会上双极化微带天线首次被专门列为一类研讨课题.它在合成孔径雷达中更是早就获得广泛应用.随着通信事业的发展,在许多场合需要功率合成,优化设计通信系统,或者使系统具有多种特殊性能与小型化,因此有源天线的研究和应用成为另一研究热点,微带天线由于其易集成性,成为有源集成天线的首选形式.这些天线的理论和应用都正在不断

发展中。

本论文主要根据国家自然科学基金资助项目“有源微带天线研究”(批准号 69671012)的立项,探讨双极化微带天线的设计与分析 and 新型极化捷变放大器型有源微带天线阵的研制。下面首先介绍双极化和有源微带天线的发展。

1.1 双极化微带天线的发展

1.1.1 双极化天线的特点和应用

双极化天线能同时形成一对极化正交、频率相同的工作模。最初是用来为一个频带提供两条通信通道,在现代通信和信息系领域,其意义已不限于此。其应用可归结为以下几类:

1) 频率复用。对一对正交极化波来说,在理论上是不会相互干扰的,同一频率可以载双倍信息,将通信容量提高一倍^[7-9]。A.C.Ludwig 较早提出用正交极化实现频率复用^[7]。文献[8]介绍了在 C, X, 和 Ku 波段的地面站中的应用。文献[9]研究了双极化天线阵在空分多址(SDMA)通信上的应用,其工作频带为 1850-1990 MHz。

2) 收发一体化。将一对正交极化端口分别用作接收端和发射端,实现双工操作,如用于移动卫星通信的自双工天线阵^[10]。文献[11]研究了一种可以用于短距离通信和雷达系统的二元全双工有源微带天线阵。

3) 极化分集。在城市移动通信中,由于地形环境很复杂,存在多径传播效应,利用双极化天线进行极化分集接收,可以有效抗多径传播效应,从而提高通信系统的性能^[12-14]。

4) 极化捷变。通过引入其它有源或无源器件使天线交替工作于两种线极化^[15-21],若在两线极化端口加 90° 相位差,又可

实现圆极化工作^[22, 23]。

5) 提高系统灵敏度, 如在 SAR(合成口径雷达)成像系统和卫星通信系统中的应用。文献[24]介绍了适于工作在 SAR 上的 92GHz 双极化正交偶极子对阵列, 它在中心频率的双极化隔离度在 20dB 以上。文献[25]描述了辐射双极化波的缝隙波导阵的设计。在文献[26,27]中分别用不同天线单元实现了 C 和 X 波段的双极化微带天线在 SAR 中的应用。文献[28]报道了在 SAR 上, L 和 C 波段的研究成果。ESA(欧洲航天局)的 DRS(数据中继系统)卫星用双极化天线来提高系统灵敏度^[29]。在便携式计算机上用小型化双极化天线, 由于具有垂直和水平极化波束, 因此在计算机终端倾斜放置时仍有较好的通信性能^[30]。

6) 车辆防撞系统、电子侦察、电子对抗和雷达测量系统等应用。文献[31]研究了用于海洋探测雷达的 X 波段正交双极化天线。文献[32]介绍了工作于 76.5GHz 的双极化缝隙耦合微带贴片天线, 它用于车载雷达系统。文献[33]报道了在 X 波段极化测量仪方面的应用。

1.1.2 双极化微带天线的结构

双极化微带天线有两种基本单元形式, 如图 1-1 所示。图 1-1(a)为双馈方形微带贴片天线单元。这是最基本且常用的双极化单

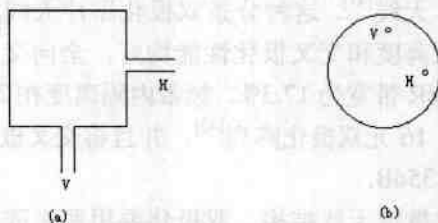


图 1-1 两种双极化单元基本形式

元, 在相邻边同时馈电时激励两个基模 TM_{01} 和 TM_{10} , 它们等幅同相、极化方向相互垂直^[34-38]. 图 1-1(b)为圆形微带贴片天线单元, 利用其基模 TM_{11} . 其周长是一个波导波长, 当两个馈电口相距四分之一波导波长时, 激励两个极化正交模^[39]. 此外还有圆环、三角形等单元形式. 对这些双线极化单元稍加改动还可形成双圆极化单元, 如文献[39].

双极化阵列一般采用以下两种结构:

1) 利用极化正交的两副单极化阵列. 两种正交极化单元分别位于不同层, 每一层实现一种极化. 例如用于移动卫星通信的自双工天线阵^[10], 圆形贴片作为发射天线, 环形贴片作为接收天线, 用缝隙耦合方式对这两个天线馈电. 为了减小面积, 一般采用重叠结构, 每个单元在 $\pm 60^\circ$ 范围有 20dB 的隔离度. R.Pokuls^[27]等研制的双频双极化天线, 则是 C 波段用微带贴片元, X 波段用印刷缝隙元, 阵列采用两层结构.

这种多层结构也可以采用相同天线单元, 一个天线单元辐射一种极化波, 一对天线单元辐射一对正交极化波, 这对天线不在同一层上. G.Dubost 研制的双极化微带天线是蚀刻在不同金属板层的一对微带偶极子^[40]. 测得两端口的隔离度 20dB, 最大方向的交叉极化电平-16dB. J.M.Baracco 等研究了多层结构的微带线馈电的分条贴片天线^[41]. 这种分条双极化贴片天线比普通双极化贴片天线的隔离度和交叉极化性能均好, 全向交叉极化低于-25dB; 2:1 VSWR 带宽为 17.3%, 频带内隔离度在 21.5dB 以上. 他们进而研制了 16 元双极化阵列^[42], 并且将交叉极化和隔离度提高到-30dB 和 35dB.

上述双极化微带天线结构, 双极化要用两组阵列实现, 采用多层结构, 体积较大, 馈电网络比较复杂, 造价高, 而且在