

学校编码: 10384
学号: 33120131152834

分类号密级
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**基于有源频率选择表面的超宽频率可重构
电控扫描天线的研究**

**Research On Active Frequency Selective Surface Based Ultra
Broadband Tunable Electronically Steerable Antenna**

徐旭辉

指导教师姓名: 柳清伙 教 授

张 凉 博士后

专 业 名 称: 电磁场与微波技术

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席:

评 阅 人:

2016 年 5 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

近年来无线通信迅猛发展,所使用的设备也逐步向多功能化,超宽带化转变。这种发展趋势使得有限的频谱资源越来越紧张,同时在同一系统中使用数量众多的天线时也带来了电磁兼容问题。基于有源频率选择表面(AFSS)的电扫描天线作为智能天线的一种,能够根据需要改变自身的辐射特性以适应复杂的电磁通信环境。因而在解决上述遇到的问题时,与传统天线相比,这种新体制的天线具有明显的优势。然而,到目前为止这种天线还未见有实现超宽带的报道。

本论文研究了一种超宽频率可调方向图可重构的电扫描天线。天线由放置在中心的优化后的双锥天线和包裹在其四周的有源频率选择表面条带构成。传统双锥天线在频率变高时会出现波束分裂的现象,为了克服这个问题本研究采用了优化后抛物面锥形结构设计并采用 3D 打印加工电镀的方法成功实现了实物加工。实测结果表明在频带 0.5 GHz 到 2.5 GHz 内,双锥天线的回波损耗均低于-7 dB,且方向图有很好的 consistency。同时,设计并实现了超宽可调的有源频率选择表面条带的单元,其工作频带为 0.7 GHz 到 2.4 GHz。在这个可调范围内,其阻带深度均超过-10dB。电扫描天线的实际工作频带为有源频率选择表面工作带宽与优化后的双锥天线工作带宽的重叠部分即 0.7 GHz 到 2.4 GHz。最后,为了更好的控制这一天线,本研究在 orbit 远场测试系统的基础上搭建了一套采用遗传算法的优化系统。利用该系统对天线全频带实现了高增益和低零深的优化与测量。在高增模式时天线的增益均在 4.4 dBi 以上,且额外增加的增益均在 4 dB 以上,在 1.3 GHz 时,这一值甚至达到 6.495 dB。在低零深模式时零深可以超过-50 dBi。

通过本研究,设计并成功实现了多模式、超宽带范围内,全向电控可扫的电控扫描天线。从而进一步拓展了这种基于有源频率选择表面的电控扫描天线的应用范围。

关键词: AFSS; 超宽带; 可重构; 电扫描天线; 遗传算法

厦门大学博硕士学位论文摘要库

ABSTRACT

With the rapid development of the wireless communication, the communication equipment change to more functional and ultra broadband gradually in the recent years. This trend makes the limited spectrum become more and more nervous and using numbers of antennas in the same system also brings electromagnetic compatibility problem at the same time. The electronically steerable antenna based on active frequency selective surface (AFSS), as a kind of smart antenna, can according to the need to change the radiation characteristic of its own to adapt to the complex electromagnetic communication environment. Thus, to solve the above problems, the antenna with new system has an obvious advantages compared with the traditional antenna. However, there is no report about this kind antenna that has realized the ultra-wideband ability.

This paper studies a kind of ultra-broadband frequency adjustable and pattern reconfigurable electronically steerable antenna. The antenna is consist of an optimized biconical antenna placed in the center and the AFSS stripes around it. For traditional biconical antenna, the beam splitting occurs when the frequency become high. In order to overcome this problem, this study adopt an optimized parabolic taper structure design. The optimized antenna is implemented by using the method of 3D printing technology and electroplating material process. The measured results show that the return loss is below -7 dB within the band 0.5 GHz to 2.5 GHz and the pattern has a good consistency. At the same time, an AFSS tripe unit with the working band from 0.7 GHz to 2.4 GHz is also designed and implemented. The depth of the stop band is more than -10dB during the whole adjustable range. The working band of the electronically steerable antenna is the overlapping of the optimized biconical antenna's working band and the AFSS's working band, which is 0.7 GHz to 2.4 GHz in this case. Finally, in order to control the antenna better, this study build an optimized system by using genetic algorithm based on the orbit far field test system. The high-gain model and deep-null model were optimized and measured during the

whole bandwidth by using the system. The gain of the antenna is above 4.4 dBi at the high-gain model, besides, the additional gain is more than 4 dB, and the value even reached 6.495 dB. The null is deeper than -50dBi at the deep-null model.

Through this study, an omnidirectional scanning electronically steerable antenna with more model, ultra-broadband adjustable is designed and implement successfully. This work will further expand the application range of this kind electronically steerable antenna based AFSS.

Key Words: AFSS; ultra broadband; reconfigurable; electronically steerable antenna; genetic algorithm

目录

| | |
|--|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究现状 | 2 |
| 1.3 本论文的研究意义及主要内容 | 6 |
| 第二章 基于有源频率选择表面电扫描天线工作原理的研究 | 9 |
| 2.1 天线的结构 | 9 |
| 2.2 天线的工作原理 | 10 |
| 2.2.1 有源频率选择表面的工作原理 | 13 |
| 2.2.2 有源频率选择表面的设计 | 14 |
| 2.2.3 全向天线的作用及选择 | 19 |
| 2.3 天线的可调带宽 | 22 |
| 2.4 小结 | 23 |
| 第三章 基于有源频率选择表面的超宽频率可重构电控扫描天线的设计 | 25 |
| 3.1 天线结构 | 25 |
| 3.2 双锥天线的设计 | 26 |
| 3.2.1 双锥天线的工作原理 | 26 |
| 3.2.2 优化的双锥天线的设计 | 29 |
| 3.2.3 优化后的双锥天线的加工 | 30 |
| 3.2.4 仿真与实测结果 | 33 |
| 3.3 超宽可调有源频率选择表面的设计 | 35 |
| 3.3.1 超宽可调有源频率选择表面的结构 | 35 |
| 3.3.2 变容二极管的选择 | 36 |
| 3.3.3 仿真与实测结果 | 38 |
| 3.4 控制电路的设计与加工 | 41 |

| | |
|-------------------------|-----------|
| 3.5 小结 | 43 |
| 第四章 测量结果 | 45 |
| 4.1 实验环境的搭建..... | 45 |
| 4.1.1 实验系统的搭建..... | 45 |
| 4.1.2 实验测量方法简介..... | 46 |
| 4.2 高增益和低零深模式的测量结果..... | 49 |
| 4.2.1 高增益模式测量结果..... | 49 |
| 4.2.2 低零深模式的测量结果..... | 52 |
| 4.3 天线 S11 的测量结果..... | 54 |
| 4.4 连续可调性的测量结果..... | 55 |
| 4.5 小结 | 56 |
| 第五章 结论与展望 | 57 |
| 参考文献:..... | 59 |
| 致谢 | 65 |

Table of Contents

| | |
|--|-----------|
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 The research background..... | 1 |
| 1.2 The research status | 2 |
| 1.3 The research significance and the main content | 6 |
| Chapter 2 The principle of the electrically steerable antenna based on AFSS..... | 9 |
| 2.1 The structure of the antenna | 9 |
| 2.2 The principle of the antenna | 10 |
| 2.2.1 Principle of the AFSS..... | 13 |
| 2.2.2 The design of the AFSS | 14 |
| 2.2.3 The role and the choice of the omnidirectional antenna | 20 |
| 2.3 The tunable bandwidth of the antenna | 22 |
| 2.4 Summary..... | 23 |
| Chapter 3 The design of the ultra broadband tunable electronically steerable antenna based on AFSS..... | 25 |
| 3.1 The structure of the antenna | 25 |
| 3.2 The design of the optimized biconical antenna | 26 |
| 3.2.1 Principle of the biconical antenna | 26 |
| 3.2.2 The design of the optimized biconical antenna | 29 |
| 3.2.3 The process of the optimized biconical antenna | 30 |
| 3.2.4 The result of the simulation and measurement | 33 |
| 3.3 The design of the ultra tunable bandwidth AFSS..... | 34 |
| 3.3.1 The structure of the AFSS | 35 |
| 3.3.2 The choice of the varactor | 36 |
| 3.3.3 The result of the simulation and measurement | 38 |
| 3.4 The design and measurement of the control circuit | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 3.5 Summary..... | 42 |
| Chapter 4 The result of the measurement | 45 |
| 4.1 The construction of experimental environment | 45 |
| 4.1.1 The construction of the environmental environment | 45 |
| 4.1.2 A brief introduction of experiment measurement method | 46 |
| 4.2 The measured results of the High-gain model and the deep-nulling model | |
| 49 | |
| 4.2.1 The measured result of the high-gain model..... | 49 |
| 4.2.2The measured result of the deep-nulling model..... | 52 |
| 4.3 The measured result of the S11 of the antenna | 54 |
| 4.4 The measured result of continuously steerable ability | 55 |
| 4.5Summary..... | 56 |
| Chapter 5 Summary of the thesis and future work..... | 57 |
| References | 59 |
| Acknowledgement..... | 65 |

第一章 绪论

1.1 研究背景

近年来,随着智能手机等无线通信终端日渐普及,人们日常生活越来越依赖于无线通信。这对有限的无线通信频谱资源提出了巨大的挑战^[1-5]。因此,提高系统容量,增加系统功能,拓宽系统通信带宽,使宝贵的频谱资源和有限的空间资源得到有效合理的应用已成为现代通信的一个发展方向。此外,现代综合信息系统都肩负着多种功能,多个子系统集成在一个平台上的趋势也是越来越明显。而天线作为无线通信系统中举足轻重的一部分,其数量必然会增加^[6, 7]。在单个系统中集成数量众多的天线,不仅会增加无线通信系统的复杂性,而且还会使得各个子系统之间电磁干扰严重,难以实现电磁兼容。

为了克服这些问题,研究者提出了频率可调方向图可重构天线^[8]。这类天线作为智能天线的一种,能够根据需求实时地更换天线的工作模式,使之与环境相适应。因此,这种天线能够有效的现代通信系统多功能的需求,并且能同时做到对整个系统的约束达到最小。电扫描天线作为可重构的天线一种,由于其低廉的成本与高效灵活的重构性能,成为天线领域近年来研究的一个热点。“电扫描”(Electronically Steerable)天线是一类无移相器的波束形成天线。这个概念,为了区别和移相器的“相控”(Phased Control),强调其是非相控的而提出的。也有学者将之称为“电调”(Electronically Tunable)天线^[9],或者可重构(Reconfigurable)天线^[10-15]。自从电扫描天线这个概念提出以后,基于各式各样辐射机制的电扫描天线屡见报道。有基于开关模式的电扫描天线^[16, 17]。有基于可电调介质的电扫描天线^[18]。有基于加载变容二极管的电扫描天线^[19, 20]。有基于电控表面的电扫描天线^[9, 13, 21-30]。这些电扫描天线所采用的电控器件与原理不同,解决方案也不同,但它们都能够实现方向图的重构,有的甚至还可以控制极化方向和谐振频率,即同时实现频率的重构。

在众多的电扫描天线中,基于有源频率选择表面的电扫描天线由于其自身小体积、轻重量、低成本和灵活高效的频率方向图可重构性而备受学者关注。这种电扫描天线不仅能够实现频率的重构,还可以实现方向图的重构。改变有源频率选择表面条带的工作状态,就可以使天线工作在不同频点的高增益或者低零

深的模式下,这种性能使得这种天线在基站无线通信,测向系统和雷达通信等领域都有着巨大的发展前景。

1.2 研究现状

基于有源频率选择表面的电扫描天线的发展是伴随有源频率选择表面的发展而发展起来的。有源频率选择表面是在无源频率选择表面的基础上发展而来的。频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是一种能够对电磁波进行反射或者透射的二维周期表面结构。理想的频率选择表面本身并不吸收电磁波的能量。最初的频率选择表面是经典的无源频率选择表面。这种频率选择表面在加工之后就不能再改变频率选择表面的电器性能。因此,这种频率非可重构的频率选择表面不能很好的适应外界变化的电磁环境,从而不能最大限度的发挥出其优势。为了克服这一问题,在 20 世纪 80 年代左右提出了可重构频率选择表面这一崭新的概念^[31]。但是,受限于当时科学技术的水平与军事保密的原因,这种新型材料并没有得到广泛的利用。直到近年来,随着科学技术的进步,尤其是计算机与 PCB 加工技术的发展及军事保密的开放,有源频率选择表面才得以飞速发展。将有源频率选择表面利用到天线技术中去则是近年来的智能天线领域研究的一个热点。虽然这种体制的电扫描天线发展的历史并不长,但是取得的成果却是十分惊人的。

可重构频率选择表面的谐振特性的改变主要有三种方式^[32]。一种是使用电磁性可变的介质作为介质基底,只要改变介质的特性就可以改变有源频率选择表面的谐振特性,这种形式的有源频率选择表面控制方式比较复杂,而且成本昂贵。第二种就是对于多层频率选择表面而言,可以通过控制不同层间的耦合方式来改变频率选择表面的谐振性,这种结构由于只在多层结构时才有效,因此应用范围并不广,很少被用于电扫描天线。第三种就是在无缘频率选择表面的结构中加入有源器件,通过控制有源器件来实现频率选择表面谐振特性。

尽管基于有源频率选择表面的电扫描天线所采用解决方案各式各样,但总体来说可以根据所采用实现频率重构的方式将其大致分为两大类。第一类是基于可调介质的电扫描天线。第二类就是采用无缘频率选择表面的结构中加入有源器件的有源频率选择表面的电扫描天线。这类基于有源频率选择表面的天线又可以根

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.