

基于椭圆孔阵列的频率选择表面研究

郭一凡, 姚夏元

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:针对准光学馈电网络系统对频道分离性能的要求, 研究了一种工作于毫米波、亚毫米波的非介质支持的双层金属椭圆孔阵列频率选择表面。其在反射通道中反射 54 GHz 和 89 GHz 2 个信号的电磁波。在透射通道中, 对 165 GHz 和 183 GHz 2 个通道的信号是透明的。使用模式匹配法仿真分析并设计频率选择表面, 结果表明: 当入射角度为 18° 时, 2 个反射通道中双极化的插入损耗小于 0.1 dB, 2 个透射通道的双极化插入损耗不大于 0.6 dB, 各项指标能满足频率选择表面在通道引入的插入损耗不大于 0.8 dB 的要求。此外, 通过蒙特卡罗法分析加工误差对频率选择表面性能的影响, 根据指标要求给出加工精度的下限, 为实际加工提供数据支持。

关键词: 频率选择表面; 模式匹配法; 蒙特卡罗法; 加工误差; 准光学

中图分类号: TN820.8

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.019

Research on Frequency Selective Surface with Elliptical Aperture Array

GUO Yifan, YAO Xiayuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To meet the requirement of channel separation in quasi-optical feed network system, a double-layer frequency selective surface (FSS) with elliptical aperture array without support layer is designed for millimeter and sub-millimeter wave remote sensing, which is opaque around 54 GHz and 89 GHz in reflection channel and is transparent at 165 GHz and 183 GHz in transmission channel. The FSS is simulated and designed by mode matching method. The simulation results show that the insertion losses of both TE and TM polarizations in two reflection channels are less than 0.1 dB and those in two transmission channels are not more than 0.6 dB when the incident angle is 18 degrees. All simulation data meet the requirement that the insertion loss introduced to the influence of processing error on the channel is not more than 0.8 dB. In addition, the influence of processing error on the performance of FSS is analyzed by Monte Carlo method, and the error threshold is determined according to specifications, providing data support for actual fabrication.

Keywords: frequency selective surface; mode matching method; Monte Carlo method; processing error; quasi-optics

0 引言

世界上很多国家已开始研究干涉式大气垂直探测仪, 例如极轨道的 AMSU-B (高级微波探测系统 B)^[1]、静止轨道的风云四号卫星^[2]等。干涉式大气垂直探测仪可用于探测大气温度、湿度廓线, 在垂直方向上对大气结构实现高精度定量探测。为尽可能多地获取大气信息, 探测仪需同时观测水汽和氧气的不同吸收峰。这些吸收峰是大气分子的谐振频

率, 由分子物理结构决定。为同时监测分布在毫米波、亚毫米波上的通道, 准光学馈电系统应运而生。这个频率范围的电磁场有一定的准直性, 当波导传输损耗较大时, 电磁波将从波导系统中被释放到自由空间, 使用成对的椭球面反射镜控制波束传播^[3]。波导系统中的滤波器已无法适用于准光学馈电系统, 为实现波束分离, 工程师们提出使用频率选择表面取代波导滤波器^[4]。

频率选择表面以导电金属表面上布满周期性的缝隙,或在介质表面上布满周期性的金属贴片为结构特征。结构上的周期性使得不同频率的电磁波可选择性地反射或透射频率选择表面,本质上频率选择表面是一种空间滤波器。频率选择表面的研究起源于光栅的研究,可追溯到 18 世纪 David Rittenhouse 的研究^[5]。但是,早期的研究并未引起太多关注,直到 20 世纪 50 年代计算电磁学和计算机的发展及飞行器隐身需求的推动,相关研究才进入到高速发展的时期。在算法上, Marcuvitz^[6] 提出等效电路模型和传输线理论,对频率选择表面进行准解析的研究。Chen^[7] 提出模式匹配法,这是第一种针对周期结构的计算电磁学算法。随后, Skinner 等^[8] 在矩量法 (MoM) 的基础上提出周期矩量法 (PMM)。随后,时域有限差分^[9]、有限元^[10] 等都发展出对应的周期算法。应用层面也逐渐丰富,如研究用于隐身技术的频率选择表面和空间滤波的双色面。在此基础上,20 世纪 90 年代逐渐出现手性材料、人工磁导体、高阻抗表面等新应用。

本文主要研究作为双色面的频率选择表面,设计基于椭圆孔阵列的频率选择表面以实现双极化四通道电磁波的分组分离,即反射 2 个频率较低的通道和透射 2 个频率较高的通道。频率选择表面使用椭圆形单元结构的原因是实现频率选择表面对横电 (TE)、横磁 (TM) 2 个极化谐振点的相对独立可调。设计中,使用双向不等的非正交延拓周期,可实现 2 个极化谐振点在各自周期晶格上激发的布洛赫波独立可调。在此基础上,通过蒙特卡罗法^[11] 分析频率选择表面对加工精度的要求,为频率选择表面的加工奠定基础。

1 方案设计

1.1 准光学馈电系统描述

这是一个五频段的准光学馈电系统,其中 5 个通道的中心频率为 54、89、165、183、425 GHz。光路可以理解为通过频率选择表面 D1 透射 425 GHz 的通道,其他 4 个通道的信号被反射。然后,使用频率选择表面 D2 将信号按照毫米波和亚毫米波进行分组,透射亚毫米波信号并反射毫米波信号。对于毫米波通道,使用频率选择表面 D3 将 2 个通道分离;

而对于亚毫米波频段,因为两者频率过于接近,使用极化滤波器 P 将 165 GHz 和 183 GHz 两个通道分离。准光学系统示意图如图 1 所示,图中, H 表示平行极化, V 表示垂直极化。

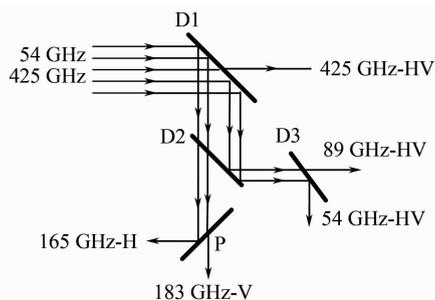


图 1 准光学系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of quasi-optical feed network

1.2 频率选择表面设计

本文设计的是频率选择表面 D2,使用 Chen^[7] 提出的模式匹配法。模式匹配法是利用自由空间的 Floquet 矢量模函数及耦合到波导的本征函数,求解孔径突变面的广义散射矩阵的过程。首先,写出 Floquet 模型在平行四边形阵列中的波函数;然后,使用 Matlab 的 Pdetool 工具箱,求出任意孔径形状波导的本征函数;根据孔径突变面两侧的切向电场和切向磁场的匹配条件,将 Floquet 模型在平行四边形阵列中的波函数和波导的本征函数通过广义散射矩阵建立联系,并求出广义散射矩阵。频率选择表面是由多层结构构成的级联系统,可认为是自由空间→孔径突变面→均匀波导→孔径突变面→自由空间→…→均匀波导→孔径突变面→自由空间。使用矩阵级联的算法可完成求解。

使用模式匹配法设计的频率选择表面入射角为 18° , 双极化的透射通道包含 (165 ± 4) , (183 ± 8) GHz 两个亚毫米波通道,反射通道包含 (54 ± 4) , (89 ± 2) GHz 两个毫米波通道。频率选择表面的具体参数见表 1,示意图如图 2 所示。周期延拓的方式是在椭圆形的短轴方向使用平移延拓,周期为 1.15 mm。椭圆形的长轴方向使用先向上平移延拓 1.3 mm,再水平移动的延拓方式,使水平两圆心连线和斜向两圆心连线的夹角为 75° 。使用椭圆形作为单元的主要原因是,椭圆的长短轴尺度可独立控制不同极化的谐振点,能够消除斜入射 TE、TM 极化谐振点分离的现象。

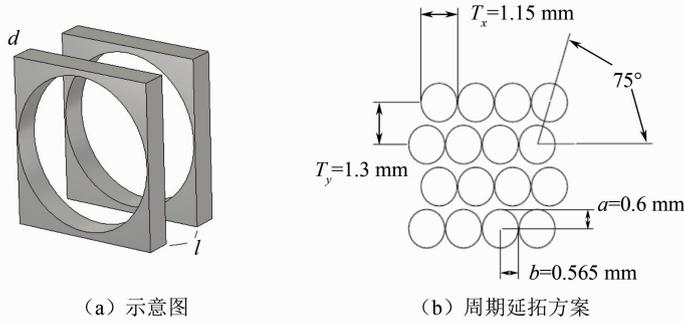


图 2 频率选择表面 D2 的示意图和周期延拓方案

Fig.2 Schematic diagram of FSS D2 and diagrammatic sketch of periodic extension

表 1 频率选择表面 D2 的参数

Tab.1 Parameters of FSS D2 mm

a	T_y	d	b	T_x	l
0.6	1.3	0.2	0.565	1.15	0.4

2 仿真结果

通过模式匹配法仿真可知,频率选择表面是一个高通低阻的滤波器。TE 极化的电磁波在涉及的频率范围内有一个极点,频率为 175.5 GHz。因为入射波和椭圆孔发生谐振,入射波在椭圆孔周围激发的电流将能量耦合到波导孔中,从而产生透射通带。反观 TM 极化,在 150~200 GHz 中有 2 个极点和 1 个零点。2 个极点的频率分别为 171.4 GHz 和 188.4 GHz。频率较低的极点产生的原因和 TE 极化极点一致,都由频率选择表面椭圆孔谐振引起。两者频率的不同造成椭圆长短轴长度的不同, TM 极化表现为椭圆的长轴,而 TE 极化表现为椭圆的短轴,因此 TM 极化的谐振频率略低于 TE 极化的谐振频率。TM 极化频率较高的谐振点是布洛赫波的谐振,该洛赫波由频率选择表面的周期性激发引起。根据 Floquet 模式展开的理论可知, TM 极化的布洛赫波的谐振对应频率选择表面中竖直方向的周期为 T_y , TE 极化也会激发类似的谐振,但频率选择表面水平方向的周期 T_x 尺寸较小,其谐振频率高于 200 GHz。TM 极化还激发了 1 个在 196.6 GHz 附近的零点,谐振点的产生是因为这是一个双层的结构, TM 极化产生层间的法布里-珀罗谐振,谐振方式属于串联谐振,虽然是窄带的谐振,但它会限制频率选择表面的带宽。

图 3 和图 4 分别是本文所设计的频率选择表面的全频带仿真结果、透射通道和反射通道的频率响

应图。从仿真结果上看,透射通道的 2 个极化的插入损耗都不大于 0.6 dB,反射通道的 2 个极化的插入损耗都小于 0.1 dB,各项指标能满足插入损耗不大于 0.8 dB 的要求。

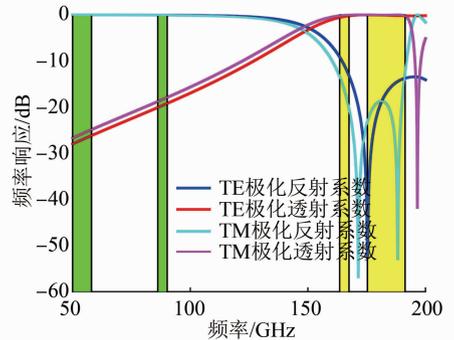


图 3 频率选择表面 D2 的频率响应

Fig.3 Frequency response of FSS D2

3 加工误差分析

加工误差分析是频率选择表面设计过程中的重要环节,是选取合适加工方式的基础。该频率选择表面的结构是在金属板上加工椭圆通孔,使用蒙特卡罗法分析椭圆的长轴 a 、短轴 b 、短轴对应的周期 T_x 和长轴对应的周期 T_y 对频率选择表面性能的影响。因为这 4 个物理量都使用同一种加工工艺实现,因此具有相同的加工精度。可将这 4 个物理量构成以设计值为均值、加工精度为方差的四维高斯分布。基于此分布随机产生 100 组 a 、 b 、 T_x 和 T_y ,并用模式匹配法进行仿真。原先的一条仿真曲线变成一组曲线,如图 5 和图 6 所示。当 4 个加工精度均为 $\pm 6 \mu\text{m}$ 时,认为频率选择表面的性能可满足设计要求。如果将加工精度放松到 $\pm 10 \mu\text{m}$, TM 极化在 192 GHz 处透射系数将无法满足要求。

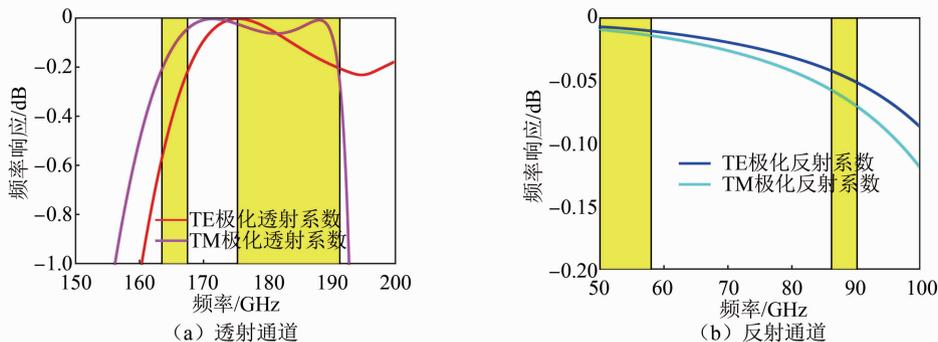


图 4 频率选择表面 D2 不同通道的频率响应

Fig.4 Frequency response of FSS D2 for different channels

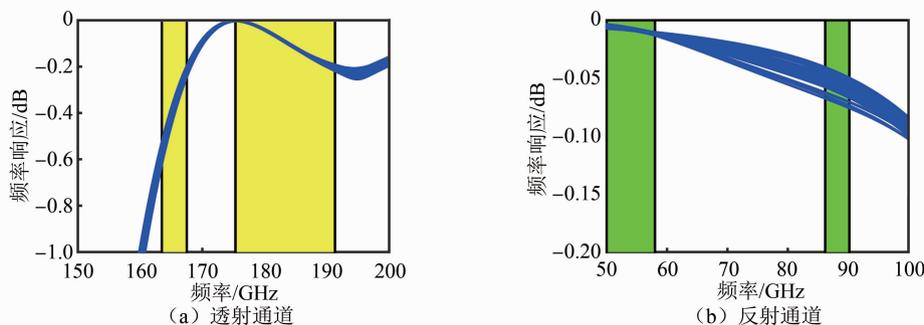


图 5 频率选择表面 D2 不同通道的 TE 极化频率响应的蒙特卡罗法分析

Fig.5 Monte Carlo analysis of TE polarization frequency response of FSS D2 for different channels

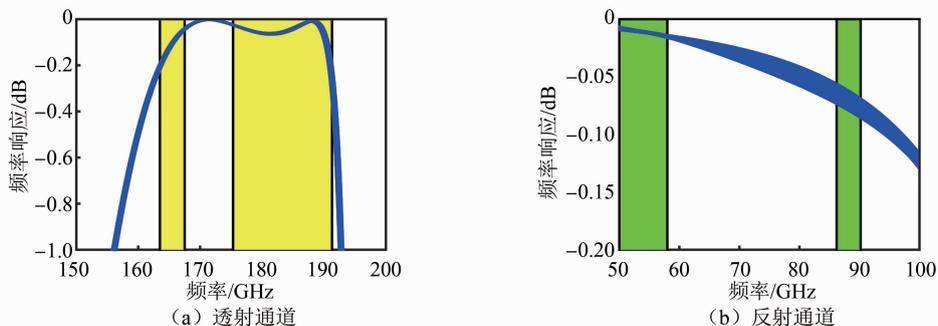


图 6 频率选择表面 D2 不同通道 TM 极化频率响应的蒙特卡罗分析

Fig.6 Monte Carlo analysis of TM polarization frequency response of FSS D2 for different channels

通过蒙特卡罗法的仿真结果明确了加工精度的下限,为加工工艺的选取提供依据。选取的工艺精度要优于 $\pm 6 \mu\text{m}$,电化学腐蚀工艺很难满足要求,建议在加工过程中使用精度更有保障的飞秒激光或分子增长等工艺。如果假设 4 个物理量中有 3 个是准确值,只有 1 个物理量存在误差,使用单一变量的蒙特卡罗法分析,频率选择表面对 4 个物理量要求的严苛程度从高到低依次是 T_x 、 a 、 b 和 T_y ,这是一

个双层的频率选择表面,装配精度也有严格的要求。因加工和装配是两个独立的过程,故加工精度均为 $\pm 6 \mu\text{m}$,以给装配过程留有余地。通过仿真得到 T_x 与 T_y 两个方向的定位误差要求小于 $50 \mu\text{m}$,如果在装配中使用定位销钉,可满足该要求。

4 结束语

本文研究了基于椭圆孔阵列的频率选择表面的

设计过程,使用模式匹配法设计一个可以将四通道信号分组分离的频率选择表面,并使用蒙特卡罗法分析其对加工精度的要求。设计结果满足准光学系统对频率选择表面的要求,可以应用到现有系统中。后续的研究应首先完成频率选择表面的加工,测试其性能,然后完成现有准光学系统,并进行各个链路的测试。同时,目前的设计还有待进一步优化:提高其角度稳定性,扩展椭圆孔阵列频率选择表面的应用范畴。

参考文献

- [1] HEWISON T J, SAUNDERS R W. Measurements of the AMSU-B antenna pattern[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 405-412.
- [2] ZHANG Y F, MIAO J G, ZHAO H B, et al. A five-frequency bands quasi-optical multiplexer for geostationary orbit microwave radiometer[C]// *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'12, Munich; IEEE*, 2012: 4676-4679.
- [3] GOLDSMITH P F. Quasioptical systems: gaussian beam quasioptical propagation and applications[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1998.
- [4] MUNK B A. Frequency selective surfaces: theory and design [M]. New York: Wiley InterScience, 2000.
- [5] MITTRA R, CHAN CH, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1988, 76(12): 1593-1615.
- [6] MARCUVITZ N. *Waveguide Handbook* [M]. New York: McGraw-Hill, 1951.
- [7] CHEN C C. Diffraction of electromagnetic waves by a conducting screen perforated periodically with circular holes[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1971, 19(5): 475-481.
- [8] SKINNER J P, MUNK B A. Mutual coupling between parallel columns of periodic slots in a ground plane surrounded by dielectric slabs[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, 40(11): 1324-1335.
- [9] HARMS P, MITTRA R, KO W. Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(9): 1317-1324.
- [10] VOUVAKIS M N, CENDES Z, LEE J F. A FEM domain decomposition method for photonic and electromagnetic band gap structures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(2): 721-733.
- [11] RENGARAJAN S R, ZAWADZKI M S, HODGES R E, et al. Waveguide-slot array antenna designs for low-average-sidelobe specifications[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2010, 52(6): 89-98.

《上海航天》征稿简则

《上海航天》已列入中国知网、万方、维普、超星等数据库,并被收录为“中国科技核心期刊”,是宣传航天技术发展、展示航天科研成果的重要窗口,也是各上级机关、高等院校、兄弟单位进行学术交流与互通信息的纽带。

一、征稿范围

稿件内容以研究论文与报告、技术交流、专题综述等形式为主,主要刊登有关卫星、火箭、载人飞船、深空探测、导弹等系统及其分系统的预先研究、研制、试验及工程实践等方面的科技论文,反映航天重点专业的新概念、新方法、新技术。栏目包括专家特稿、专业纵论、工程实践、创新与探索、学术争鸣、战略发展与情报研究、产学研园地等。

二、投稿要求

1. 本刊目前仅接收在线投稿,不接收纸质投稿或邮箱投稿。请登陆 <http://shht.ijournal.cn>,进入“作者投稿查稿”注册后投稿。

2. 作者在投稿前须对文章作脱密处理,并在投稿时按要求上传保密审查证明的扫描件。

3. 凡国家、省部级科技进步奖课题论文,自然科学基金项目论文,重点攻关项目论文,需提供项目编号,可提前安排发表。

4. 作者须遵守学术规范与准则,杜绝一稿多投及抄袭、剽窃等学术不端行为。

5. 本刊已被《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库、万方数据库、维普数据库、超星数据库等收录,作者著作权使用费与本刊稿费一次性给付,作者若不同意文章被收录,请在来稿中予以说明,本刊将做适当处理。

三、写作要求

1. 来稿应突出航天理论研究与技术的创新性,兼顾工程应用,应给出相应的理论依据、参数确定原则,论文应注重理论性、新颖性、逻辑性,避免写成技术报告。

2. 来稿内容充实,论点明确,论据充分,层次分明,文字简练,字数一般以 5000~6000 字为宜(情况特殊可超出)。

3. 来稿应包括题目、作者姓名、单位、摘要、关键词、作者简介、正文、参考文献著录。题目一般不超过 20 个汉字。摘要(200~300 字)说明研究目的、方法、结果或结论等,突出创新点及工程应用价值。关键词 5~8 个。参考文献尽量在 10 篇以上,并在正文中标出引用处。请提供题目、作者、单位、摘要、关键词、图题、表题、参考文献的英译文。

4. 作者简介包括姓名、出生年、学历与职称、主要研究

方向、电子邮箱。

5. 正文包括引言、主体、结论或结束语部分。引言说明研究历史、现状、存在问题、选题意义与创新性。主体要求语言简洁、准确无歧义、逻辑完整、结构严谨。结论或结束语对研究内容进行总结,提出展望。

6. 量与单位符合国家标准。每个量符号第一次出现时应给出物理意义说明,同一符号只能表示一个物理量,必要时可用下标区分。一般变量为斜体,矢量、矩阵、张量、向量为斜黑体。单位一般为正体。

7. 公式用公式编辑器输入。仅重要或文中引用的公式才需编号。

8. 正文中给出图表的引文。图数量一般不超过 12 幅,尺寸尽量小于 8 cm。图中文字、数字、符号清楚,横纵坐标的变量名、单位、刻度值准确完整,不同线型或图符有说明。图可在 Word 或 Visio 中修改。表格栏头简化,避免斜线,不能空白;项目栏中文字简练;栏内尽量不要出现公式;单元格内容相同时不能用“同左”、“同右”、“同上”等表述,无内容时要用一字线补齐。图表中的量与单位采用“量/单位”方法标注。

9. 文中外文缩写第一次出现时给出中文全称。

10. 参考文献遵循“最新、关键、必要”的原则,在正文中顺序引述,未公开发表资料不引用。文献著录格式参考国家标准《文后参考文献著录规则》。主要如下:

专著 姓名. 书名[M]. 版本(第 1 版不写). 出版地:出版者,出版年:XX-XX(页)。

期刊 姓名. 题名[J]. 刊名,出版年,卷(期):XX-XX(页)。

报告 姓名. 题名[R]. 报告名称,编号,出版时间。

会议录 姓名. 题名[C]//会议名称. 会议地点(城市):出版者,出版年:起止页码。

标准 标准起草者. 标准名称[S]. 标准发布者,标准号,出版年。

学位论文 姓名. 题名[D]. 出版地:出版者,出版年。

四、联系方式

编辑部地址:上海市闵行区元江路 3888 号技术基础所南楼
邮政编码:201109

联系电话:(021)24181441;(021)24181541

投稿网站:<http://shht.ijournal.cn>

电子邮箱:shht8075b@vip.163.com