Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

Vol.22, No.2 Feb., 2024

文章编号: 2095-4980(2024)02-0176-05

大入射角双极化频率选择表面设计

孙立军1,李明峻1,卫能1,李春1,刘小明*1,2

(1. 芜湖赛宝信息产业技术研究院,安徽 芜湖 241002; 2. 安徽师范大学 物理与电子信息学院,安徽 芜湖 241002)

摘 要: 频率选择表面(FSS)在多频接收系统中具有广泛的应用,并在不少情形下需要大角度入射和分极化接收。采用十字金属线和贴片设计了一款双极化工作的FSS,能够实现在45°角入射的情况下,透射(55±5)GHz、同时反射(33±5)GHz的信号;且透射的(55±5)GHz信号为垂直极化,反射的(33±5)GHz信号为平行极化,实现了双频带和双极化接收。利用印制电路板技术对该FSS进行样品加工,采用自由空间法进行测试。测试结果与仿真结果具有很好的吻合度。

关键词: 频率选择表面; 双极化; 大角度; 低损耗

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022038

Design of dual-polarization Frequency Selective Surface for large-angle incidence

SUN Lijun¹, LI Mingjun¹, WEI Neng¹, LI Chun¹, LIU Xiaoming^{*1,2}
(1.Wuhu CEPREI Information Industry Technology Research Institute, Wuhu Anhui 241002, China;
2.School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu Anhui 241002, China)

Abstract: Frequency Selective Surface(FSS) has been widely used in many multi-channel receiving systems, where large angle incidence and multi-polarization receiving are required in many cases. A frequency selective surface is designed using a cross-dipole combined with a square patch to transmit (55 ± 5) GHz and reflect (33 ± 5) GHz signals. The signal for (55 ± 5) GHz is in perpendicular polarization, and for (33 ± 5) GHz it is in parallel polarization. The prototype is fabricated using Printed Circuit Board(PCB) technology and measured by free space method. It is demonstrated that good agreement with simulation is obtained.

Keywords: Frequency Selective Surface; dual polarization; large-angle; low loss

频率选择表面(FSS)是多频辐射计系统中的关键器件之一,其主要作用是实现空间分频接收,即透射一部分频率的信号,反射另外一部分频率的信号^[1]。透射信号和反射信号进入到不同的接收机,且透射信号和反射信号的极化可能也有所不同。因此,FSS 同时具有滤波和合路器的功能,这种功能使多个通道能共享同一个主反射面,同类的辐射计系统包括 MSU-B^[2]、ALAM 天文望远镜^[3]以及中国的风云四号卫星^[4]。这些系统中使用的 FSS 都是小角度入射。小角度入射的优点在于系统更紧凑,同时 FSS 的设计更加容易。但对于一些应用,由于系统布局的限制,必须大角度入射,如 MARSHALS 探测器^[5],FSS 的设计就是一个难点。大角度入射的主要难点在于带宽不容易做大,参数的敏感性大,从而造成加工容错性差,角度稳定性不好。

目前 FSS 采用的基本单元为常用的偶极子型或贴片型^[6-8],这两种结构加工简单,设计方便,但主要缺点在于带宽不大,或不容易实现大角度入射。其他一些设计,如单纯的打孔结构,在大角度入射时同样存在带宽不足的问题^[9-10];或者,有些尽管能满足大角度入射,但没法满足透射为 TE 模、反射为 TM 模的要求^[11];还有些设计存在加工复杂,成本高的问题^[12]。

对此,本文设计了一款大角度入射FSS。该设计是一款双频辐射计系统的模型设计,双频辐射计系统要求45°角入射,同时带宽达到10 GHz,且透射信号为垂直极化,反射信号为平行极化。因此,该器件的基本单元是

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871003); 芜湖赛宝信息产业技术研究院科研基金资助项目(WS202101001)

*通信作者:刘小明 email:xiaoming.liu@ahnu.edu.cn

十字金属加贴片结构,因为贴片结构具有小型化的优点,十字金属开槽具有带通特性。最终的设计满足大角度 入射的要求,并实现了在45°角入射的情况下透射(55±5) GHz、同时反射(33±5) GHz的信号。

1 接收机系统结构及指标要求

双频接收机的结构示意图如图 1 所示。输入信号透射到反射面后聚焦,在信号到达焦点前放置了频率选择表面。信号经过频率选择表面后分成两部分,一部分透射波(50~60 GHz)为垂直极化,另一部分反射波(28~38 GHz)为水平极化。通常情况下选择高频部分作为透射,低频部分作为反射。其主要原因是如果选择低频部分作为透射,则很容易产生高次谐波或寄生通带,不容易在高频部分实现反射;如果选择高频部分作为透射,则比较容易在低频实现反射。

角锥喇叭的口面约为10个波长,根据高斯波束近似理论[13],喇叭的等效高斯波束的束腰 w_0 约为4个波长,即 w_0 =4 λ (λ 为自由空间的波长)。FSS离高频喇叭50 mm,根据

$$w = w_0 \left[1 + \left(\lambda z / \pi / w_0^2 \right)^2 \right]^{0.5} \tag{1}$$

可得两个频段的中心频率在 FSS 处的束腰半径 w 分别为 32 mm 和 22 mm。式(1)中,z 为传播距离。当 FSS 的投影宽度等于束腰宽度的 3 倍时,边缘信号为 $-20~\mathrm{dB}$,满足大部分的接收要

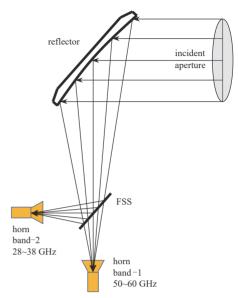


Fig.1 Schematic diagram of the dual-band receiving system 图 1 双颗接收机的结构示意图

求。因此,取FSS的高为100 mm,长为140 mm。当FSS斜45°排列时,两个方向都满足边缘信号为-20 dB。

2 仿真设计

2.1 单元结构及仿真模型

由于第二个频段的带宽为 10 GHz,相对带宽为 18.2%,接近于宽带 FSS,因此,单层结构无法满足带宽要求。另外,单元结构本身必须具备一定的带宽才能在双层结构中形成更大带宽。因此,单元结构选择了贴片加十字金属结构。十字金属结构具有带通特性,贴片有利于增大带宽。

最终的设计如图 2 所示。该设计采用了双层 PCB 板结构,每层 PCB 板的两面都设置了完全相同的单元结构。 PCB 板之间为空气缝隙, PCB 采用 Rogers RT5880 材料,介电常数为 2.2,损耗正切为 0.000 9。仿真模型采用单元结构,设置为周期性边界条件,在 CST 软件中的模型如图 2 所示。单元尺寸大约为半波长,由于通带的频率位于 55 GHz,因此半波长在 2.7 mm 左右。通过优化仿真,可以得到满足要求的设计,最终设计参数如表 1 所示,表 1 中的参数与图 2 中标识一一对应。

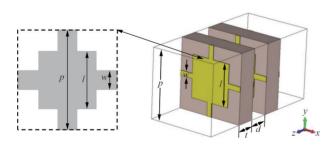


Fig.2 Unit cell and its simulation model 图 2 单元结构及其仿真模型

表 1 单元结构的主要参数 Table 1 Main parameters of the unit cell

parameters	value
p/mm	2.8
l/mm	1.7
w/mm	0.2
t/mm	0.787
d/mm	1.6

选取的参数中线宽为 0.2 mm, 相对于其他参数比较小。原则上可以选择更小的值, 但会给加工精确度带来 更高的要求; 如果选择更大的值, 会造成其他性能指标的下降。因此, 参数的选择需要根据具体设计进行折中。 根据最小参数对加工影响的常规结论, 该参数的加工精确度决定了器件的精确度。

对表面电流进行仿真分析,仿真结果如图 3 所示,选取 TE 模(对应于垂直极化)和 TM 模(对应于水平极化)为结果展示。由图 3 可以看出,TE 模的电流分布呈现单谐振分布,而 TM 模的电路呈现多谐振分布。在后面的仿真

结果中,这一现象也将在反射系数和传输系数得到印证。需要说明的是,在仿真过程中,对0°~45°入射角进行了仿真,仿真中发现入射角度越大,越难满足指标要求,但本文设计的结构能够满足45°入射时的指标。

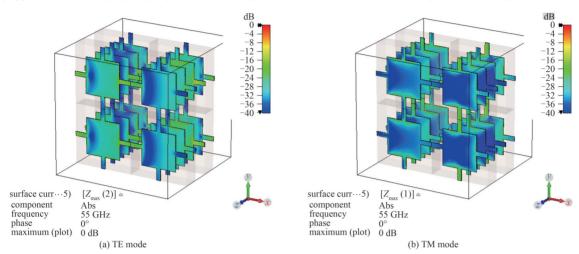


Fig.3 Current distribution of the unit cell for TE and TM modes 图 3 TE和TM模式下单元结构的电流分布

2.2 参数研究

为研究各参数对 FSS 的影响,利用 CST 对参数进行分析,分析结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,参数 p 决定了中心频率,但在±0.1 mm 的误差内,带宽满足要求;参数 l 为贴片的边长,对中心频率影响不大,对带内波纹具有一定的影响;参数 w 为线宽,影响较大,在±0.05 mm 的误差范围内仍能够满足设计要求;参数 d 为 2 个基底的距离,可以发现,该参数对性能的影响很小。由此说明,如果加工工艺在±0.05 mm(即±50 μ m)范围内,FSS 的性能不会过多受加工误差的影响。同时,对不同角度入射情况进行仿真分析,如图 5 所示。从图中结果可知,45°入射是性能最难实现的,但在本文的工作中,仍能满足设计指标的要求。

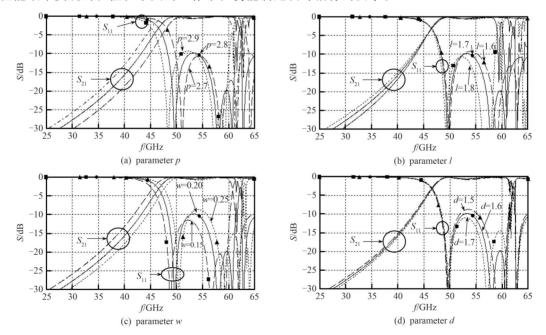


Fig.4 Results for parametric study 图 4 参数分析结果

3 加工测试

采用高精确度蚀刻工艺加工,加工精确度在±20 μm范围内。根据参数研究可知,该加工精确度完全满足设计指标要求。整个样品尺寸长为47个单元,为140 mm;宽度为32个单元,为100 mm。介质基板采用相对介电常数为2.2的Rogers RT5880板材,这种板材具有低损耗的特性。四周预留定位孔以便于测试过程中固定。2个极

板之间采用环形圈垫片进行固定。四周螺钉加上螺母加固,如图 6 所示。加工的样品在工业显微镜(SuperEye)进行检视表征,显微镜下经过校准后测试的各参数的精确度都在 20 μm 以内。

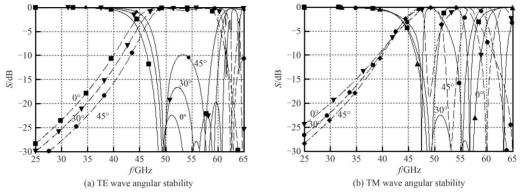


Fig.5 Characteristics of TE and TM waves at different angles 图 5 不同角度下 TE 波和 TM 波的特性

采用自由空间法进行测试,测试架构如图7所示。将样品固定在样品支架上,样品周围铺设吸波材料以减少杂波干扰。将矢量网络分析仪(AV3672D)连接到发射喇叭和接收喇叭(工作频率50~75 GHz)。实验分为以下几个步骤:

- 1) 采用标准 SLOT(Short-Line-Open-Thru)方法校准连接喇叭的同轴线:
- 2) 将金属板对准喇叭天线作为背景测量,即做全反射测量,将背景测量的信号记为 $S_{21 \text{ metal}}$;

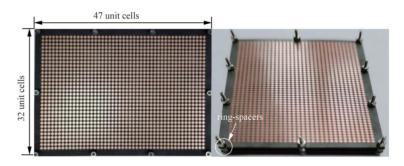


Fig.6 Fabricated prototype 图 6 加工的实物图

- 3) 将样品正面对准喇叭天线进行测量,得到样品的信号,记为 $S_{21 \text{ sample}}$;
- 4) 计算反射系数: $R = S_{21 \text{ sample}} S_{21 \text{ metal}}$;
- 5) 对于传输测量,将空气直接作为背景测量,背景测量信号记为 $S_{21 \text{ ar}}$;
- 6) 将样品正面对准喇叭天线进行测量,得到样品的信号,记为 $S_{21 \text{ sample}}$,计算传输系数 $T = S_{21 \text{ sample}} S_{21 \text{ air}}$ 。

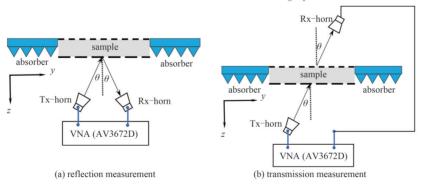


Fig.7 Measurement setup 图 7 测量方案图

最终的测量结果如图 8 所示。对于 TE 波,要求(55±5) GHz 范围内为通带,(33±5) GHz 范围内为阻带。从测量结果看,通带的损耗大约为 1 dB 左右,相比于仿真的 0.5 dB 略有增大。而在阻带,传输系数与仿真结构比有所增加,说明反射系数有所减小。但该频段的传输系数都在-18 dB 以下,完全满足指标要求。对于 TE 波,要求(33±5) GHz 范围内为阻带(反射带),(55±5) GHz 范围内不作要求,则(33±5) GHz 范围内的传输系数必须在-10 dB 以下。测量结果在-11 dB 以下,满足指标要求。因此,在(33±5) GHz 范围内,TE 波和 TM 波都有良好的反射效果;而(55±5) GHz 范围对 TE 波具有良好的透射效果,满足透射分量取 TE 波、同时反射分量取 TM 波的要求,达到设计的工作模式要求。需说明的是,低频段测试结果与仿真结果的差别要大一些,原因是低频段的信号强度弱一些,更容易受噪声干扰。

4 结论

设计了一款用于 28~38 GHz、50~60 GHz 的双极化大角度入射 FSS,并对 FSS 进行了加工测试。在 28~38 GHz 频率范围内,实现了 TM 波反射;在 50~60 GHz 频率范围内,实现了 TE 波透射。入射角度实现了 45°,插入损耗为 1 dB 左右。该设计可用于双频双极化微波探测系统。

参考文献:

- [1] 刘小明,俞俊生,陈晓东. 太赫兹波段频率选择表面的设计与测试
 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(6): 853-858. (LIU
 Xiaoming, YU, Junsheng, CHEN, Xiaodong, Design, and measurement of terahertz
 - Xiaoming, YU Junsheng, CHEN Xiaodong. Design and measurement of terahertz frequency selective surface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):853–858.) doi:10.11805/TKYDA201506.0853.
- [2] SAUNDERS R W, HEWISON T J, STRINGER S J, et al. The radiometric characterization of AMSU-B[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995,43(4):760-771.) doi:10.1109/22.375222.
- [3] GONZALEZ A, UZAWA Y, FUJII Y, et al. ALMA band 10 tertiary optics[J]. Infrared Physics & Technology, 2011,54(6):488–496. doi:10.1016/j.infrared.2011.07.007.
- [4] 张志清,陆风,方翔,等. FY-4卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017,34(4):8-19. (ZHANG Zhiqing,LU Feng,FANG Xiang,et al. Application and development of FY-4 meteorological satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2017,34(4):8-19.) doi:10.19328/j.cnki. 1006-1630.2017.04.002.
- [5] OLDFIELD M, MOYNA B, ALLOUIS E, et al. MARSCHALS: development of an airborne millimetre wave limb sounder[J]. Proceedings of SPIE, 2001(4540):221-228. doi:10.1117/12.450663.
- [6] YU Junsheng, LIU Shaohua, XU Liang, et al. Study of a two-layer dichroic for quasioptical network [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010,52(4):900-904. doi:10.1002/mop.25075.
- [7] YANG Xiaofan, ZENG Yonghu, LIU Xiaoming, et al. Low-loss frequency selective surface for multi-band THz transmission measurement [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020,62(5):1860–1865. doi:10.1002/mop.32246.
- [8] MUNK B A. Frequency selective surfaces:theory and design[M]. New York:John Wiley, 2000.
- [9] 李贝贝,姚崇斌,谢振超,等. 太赫兹准光学馈电网络研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(6):939-943. (LI Beibei, YAO Chongbin, XIE Zhenchao, et al. Research progress in terahertz quasi-optical feed network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(6):939-943.) doi:10.11805/TKYDA201906.0939.
- [10] DICKIE R,CAHILL R,FUSCO V,et al. THz frequency selective surface filters for earth observation remote sensing instruments[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(2):450–461. doi:10.1109/TTHZ.2011.2129470.
- [11] LIU Xiaoming, WANG Yumin, ZHANG Tao, et al. A compact multiband quasi-optical system for plasma detection[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(6):4916-4924. doi:10.1109/TAP.2020.2970126.
- [12] 吕明云,祝明,王焕青,等. 复杂曲面 FSS加工系统研究[J]. 航空学报, 2005,26(4):524-527. (LYU Mingyun,ZHU Ming,WANG Huanqing, et al. Digital machining system of complex curved-surface FSS[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4):524-527.) doi:10.3321/j.issn:1000-6893.2005.04.030.
- [13] GOLDSMITH P F. Quasioptical systems: Gaussian beam quasioptical propagation and applications[M]. New York: IEEE Press, 1998.

作者简介:

孙立军(1979-),男,硕士,高级工程师,主要研究 方向为可靠性与环境试验技术.email:52270348@qq.com.

李明峻(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向 为产品质量与可靠性分析及评价技术.

卫 能(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向为机器人及智能装备产品质量与可靠性、环境适应性和电磁技术.

-10 TM_S -20 $TM S_{2}$ -30 TE S. TE S-40 25 30 40 45 35 50 55 60 65 f/GHz

Fig.8 Measured results 图 8 测量结果

李 春(1986-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向 为电磁兼容检测及技术.

刘小明(1983-),男,博士,教授,主要研究方向为 太赫兹科学与技术、微波技术以及生物电磁技术.