

文章编号: 2095-4980(2020)02-0180-04

准光学馈电系统设计与分析

刘 佳, 万继响, 施锦文, 张新刚, 江文剑

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

摘要: 针对遥感卫星对于多频段、多极化探测的应用需求, 设计了一套毫米波辐射计天线前端准光学馈电系统, 可以实现54 GHz和183 GHz两个频段、H/V双线极化、4个通道同时接收电磁辐射信号, 完成地球大气温湿度的有效探测。通过对馈电网络进行仿真建模和分析计算, 可以验证馈电系统的输出参数完全满足设计指标要求, 最后通过对原理样机各通道远场辐射参数的实验测试, 包括照射半张角、交叉极化水平、波束效率等, 测试与仿真结果一致, 有效地验证了准光学馈电系统设计方案的合理性与可行性。

关键词: 准光学馈电系统; 远场辐射方向图; 照射半张角; 波束效率

中图分类号: TN925⁺.91

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018282

Design and analysis of the quasi-optical feed system

LIU Jia, WAN Jixiang, SHI Jinwen, ZHANG Xingang, JIANG Wenjian

(Academy of Space Information Systems, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Aiming at the application of remote sensing satellite for multi-band and multi-polarization detection, a quasi-optical feed system which is the important device of millimeter-wave radiometer antenna on satellite is designed. This feed system can respectively receive the electromagnetic signals at 54 GHz and 183 GHz to complete the effective detection of earth atmospheric and humidity. Each frequency band has H/V polarization. The quasi-optical feed system is constructed and simulated. The simulated results can meet the requirements on antenna system. The far-field radiation parameters of prototype, like taper angle, cross-polarization, beam efficiency, are measured. The measured results demonstrate that the proposed feed-system has a good performance and its feasibility and rationality are verified.

Keywords: quasi-optical feed systems; far-field radiation pattern; taper angle; beam efficiency

过去十年, 风云系列卫星在轨成功应用, 有力提升了国家气象观测、环境灾害预警和海洋动态感知等领域的技术水平与应用能力, 也标志着中国航天技术在微波遥感领域取得了跨越式的发展。发展新型遥感卫星, 提高对地观测能力, 是中国航天技术未来发展的重点研究方向。其中, 天线产品作为载荷系统前端最为核心的硬件设备, 是载荷正常工作的重要保证, 天线的性能指标以及功能特性直接关系着载荷的应用能力, 是任务成败的关键。针对未来新型遥感载荷对于多频段、多极化的探测需求, 本文设计了一套毫米波辐射计天线前端准光学馈电系统, 可以实现 54 GHz 和 183 GHz 两个频段、H/V 双极化、4 个通道同步接收电磁波辐射信号。其中 54 GHz 频率通道为典型氧分子吸收窗口, 用来作为测量地球表面大气温度分布, 183 GHz 频率通道用于测量地球表面大气湿度分布^[1-2]。

1 设计目标

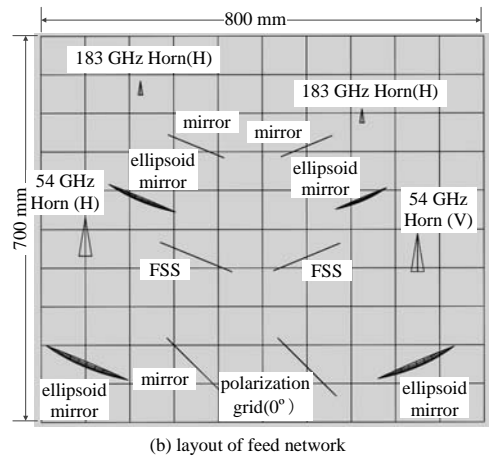
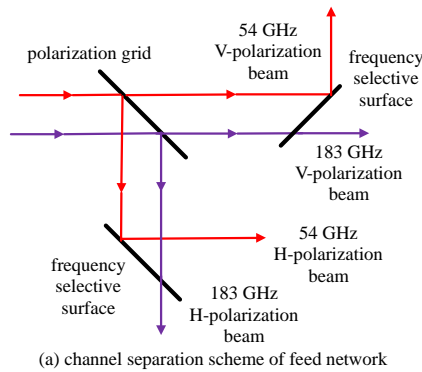
准光学馈电系统是辐射计天线系统实现多频率、多极化工作的核心组件, 馈电网络的设计直接决定天线系统的辐射性能^[3-4]。本设计准光学馈电系统采用四通道馈电, 分别实现 54 GHz 和 183 GHz 双频段、H/V 双线极化同时工作。根据静止轨道星载毫米波辐射计的遥感应应用要求^[5-7], 天线前端准光学馈电系统设计指标要求见表 1。

收稿日期: 2018-09-07; 修回日期: 2019-04-09

作者简介: 刘 佳(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事准光学馈电网络设计、太赫兹天线设计以及星载多波束天线设计等方面工作。
email: liuj_504@126.com

2 准光学馈电网络模型设计

准光学馈电网络采用 4 通道多工器结构设计，利用极化线栅对天线接收到的电磁波信号进行极化分离，其中垂直极化分量完全透射，水平极化分量完全反射，极化线栅的分布方向为水平方向。然后每个极化分量通道各用一个频率选择表面将 54 GHz 和 183 GHz 频率分量进行分离，其中 183 GHz 频率分量完全透射，54 GHz 频率分量完全反射。最后，各频率信号由相应通道喇叭馈源进行接收。准光学馈电系统通道分离方案以及空间布局设计见图 1。为了保证天线子系统的正常工作，馈电系统的 4 个通道均采用共相位中心设计。此外为了更好地降低系统的交叉极化水平，准光学馈电组件均采用小角度波束入射角设计^[8-9]。其中极化线栅和平面镜采取 45° 波束入射，频率选择表面 (Frequency Selective Surface, FSS) 和椭球面反射镜采取 22.5° 波束入射。



3 馈电系统仿真与分析

按照图 1 中馈电网络的布局设计进行仿真建模，通过分析计算可以得到各频率通道的远场辐射特性，仿真结果见图 2。

馈电网络的 4 个频率通道输出主极化波束轮廓均表现出良好的高斯特性，副瓣电平可以达到 -50 dB 以下。馈电网络主要电性能具体参数仿真结果见表 2。从表 2 中所统计的馈电网络主要电仿真参数仿真结果可以明显看出，4 个频率通道的照射半张角与表 1 中设计要求基本一致，最大偏差约为 0.08°。此外，馈电网络输出也表现出非常高的交叉极化水平，交叉极化电平均可以达到 -30 dB 以下，满足设计指标要求。

4 原理样机的加工与测试

4.1 关键馈电组件研制

1) 极化线栅：方案中极化线栅采用等间隔钨丝排列的平面周期结构^[10]，主要用于系统极化特性的分离，边框采用不锈钢材料框体，产品加工实物及性能见图 3 和图 4。由图 4 中可以明显看出，极化栅网的传输特性和反射特性均达到 99% 以上，且具有非常高的极化隔离度，不会引入较大的插入损耗。

表 1 馈电网络主要参数设计指标

item	requirement	
center frequency/GHz	54	183
frequency band/GHz	≥8	≥16
taper angle/(°)	4.2	4.2
taper/dB	-15	-15
polarization	H/V	H/V
beam efficiency/%	≥90	≥90
XPD/dB	≤-30	≤-30

Fig.1 Design scheme of feed network

图 1 馈电网络设计方案示意图

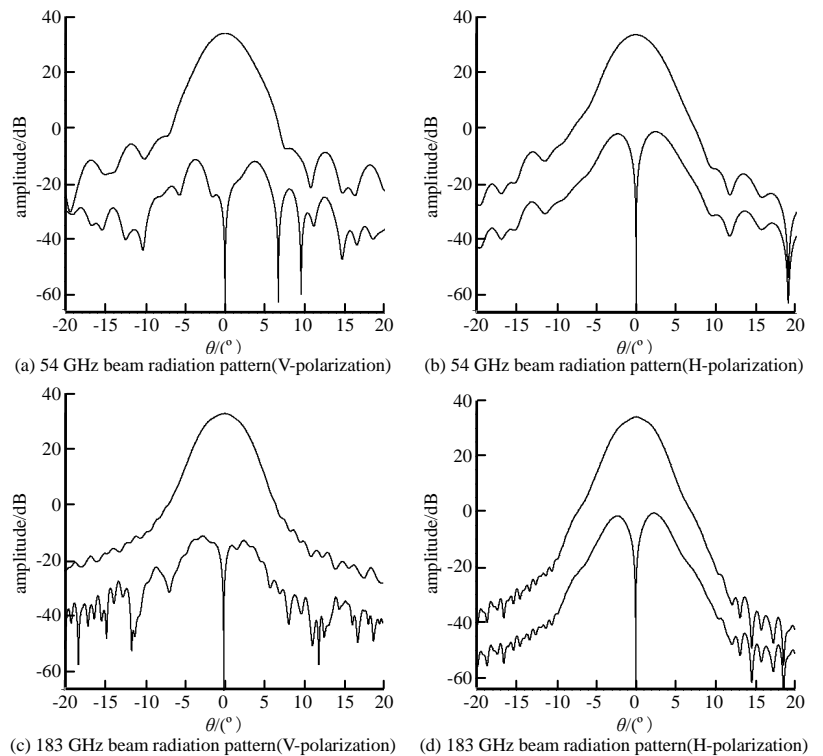


Fig.2 Far-field radiation pattern of each frequency channel

图 2 馈电网络各频率通道远场辐射特性

2) 频率选择面: 方案中 FSS 选取圆形穿孔单层平板结构形式, 单元周期采用六边形排列方式^[11], 孔间距为 0.2 mm, 采用钛合金材料基底, 产品实物及性能见图 5 和图 6。由图 6 可以明显看出, 频率选择表面的传输特性和反射特性均达到了 97% 以上, 其中反射率大于 1 的情况是由于测试误差以及系统误差引起的。

表 2 准光学馈电网络主要电性能仿真结果

frequency/GHz	taper angle/(°)		XPD/dB	
	simulation	requirement	simulation	requirement
54(H)	4.27	4.2	-32	-30
54(V)	4.23	4.2	-42	-30
183(H)	4.17	4.2	-33	-30
183(V)	4.28	4.2	-41	-30

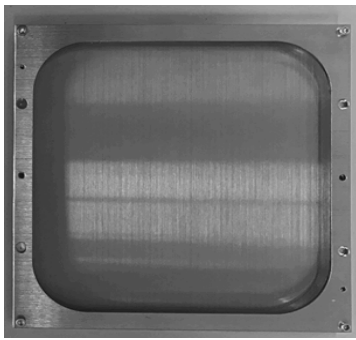
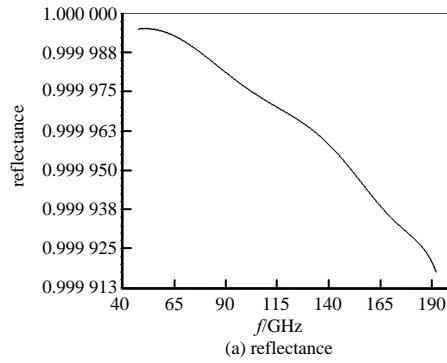
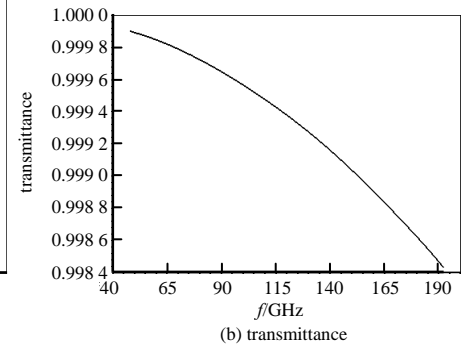


Fig.3 Product of wire grid
图 3 极化栅网产品实物图



(a) reflectance



(b) transmittance

Fig.4 Performance of wire grid
图 4 极化线栅的性能指标

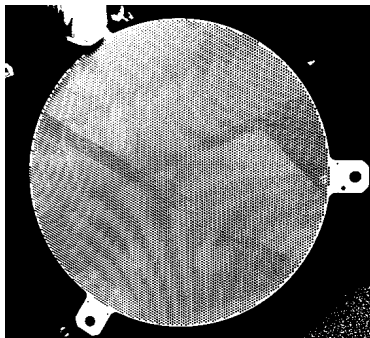
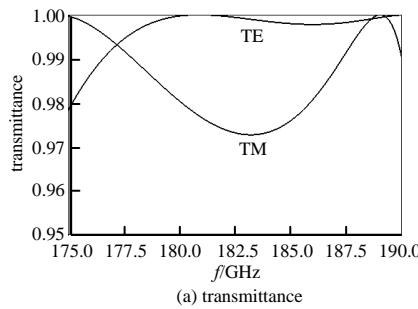
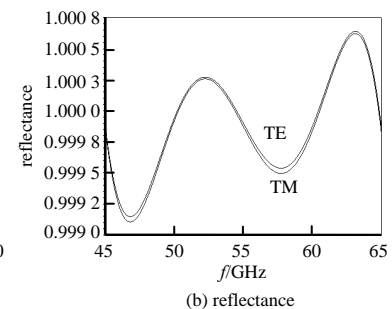


Fig.5 Product of frequency selective surface
图 5 频率选择面产品实物图



(a) transmittance



(b) reflectance

Fig.6 Performance of frequency selective surface
图 6 频率选择面的性能指标

4.2 原理样机研制

为了更进一步验证该系统的正确性和可行性, 完成了原理样机的研制并进行了实验测试, 原理样机暗室测试照片见图 7。

分别对馈电系统的 4 个通道进行了平面近场扫描, 通过傅里叶变换可以获得通道的远场辐射特性, 测试结果见图 8(备注: 交叉极化没有测试)。

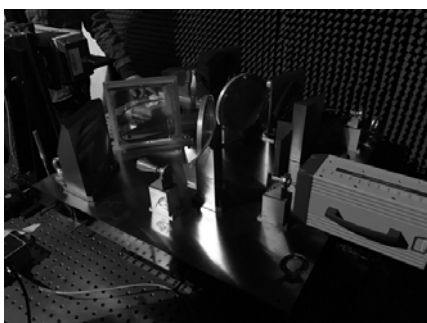
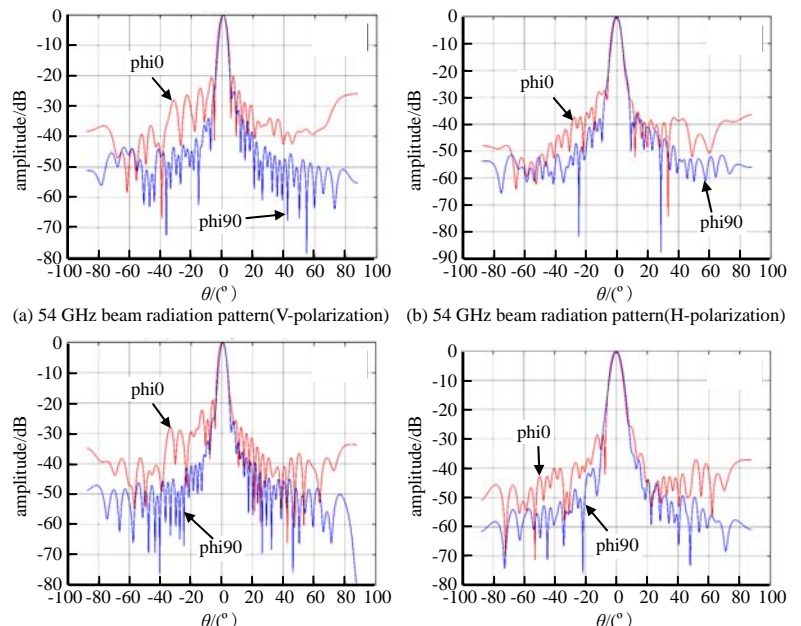


Fig.7 Darkroom test photo of feed network
图 7 原理样机暗室测试照片



(a) 54 GHz beam radiation pattern(V-polarization) (b) 54 GHz beam radiation pattern(H-polarization)
(c) 183 GHz beam radiation pattern(V-polarization) (d) 183 GHz beam radiation pattern(H-polarization)
Fig.8 Far-field radiation pattern measurement results of feed network
图 8 馈电网络各频率通道远场测试结果

由图 8 测试结果可以明显看出, 天线系统输出主极化波束轮廓均表现出良好的高斯特性, 表 3 为所统计的馈电系统各通道照射半张角、主波束效率测试值与仿真值对比统计。可看出, 馈电系统各通道波束特性与仿真结果一致, 照射半张角偏差不超过 10%, 且波束效率(天线方向图 2.5 倍 3 dB 波束宽度能量占天线辐射总能量的比例)均在 98% 以上^[12]。表明馈电系统具备良好的辐射特性, 完全满足星载毫米波辐射计天线多频段、多极化工作需求。

5 结论

本文详细介绍 54 GHz 和 183 GHz 双频段双极化准光学馈电系统的设计方法与仿真结果, 通过对馈电网络核心技术指标的测试, 可以验证该系统设计的合理性和可行性, 可满足星载毫米波辐射计天线的设计需求。结合目前国内外的主要研究趋势, 下一阶段将着重针对更高频段、更多通道, 以及小型集成化馈电系统开展进一步的研究, 同时考虑天线产品的空间环境适应特性, 并由原理样机转向工程样机的研制。

参考文献:

- [1] GASIEWSKI A J. Numerical sensitivity analysis of passive EHF and SMMW channels to tropospheric water vapor, clouds and precipitation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992,30(5):859–870.
- [2] SAMUEL Gulkisa, MARK Allena, CHARLES Backusa, et al. Remote sensing of a comet at millimeter and submillimeter wavelengths from an orbiting spacecraft[J]. Planetary and Space Science, 2007,55(9):1050–1057.
- [3] BRACKENA C,O’SULLLVANA C,DONOHOE A,et al. Optical and quasi-optical analysis of system components for a far-infrared space interferometer[C]// Proceedings of SPIE–The International Society for Optical Engineering. San Francisco,CA,United States:[s.n.], 2015,9362:93620N–1.
- [4] ROLF Jørgensen,GILBERT Padovan,PETER de Maagt,et al. A 5-frequency millimeter wave antenna for a spaceborne limb sounding instrument[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001,49(5):703–714.
- [5] WU D L,PICKEET H M, LIVERSEY N J. Aura MLS THz observations of global cirrus near the tropopause[J]. Geophysical Research Letters, 2008,35(15):L15803.
- [6] LIU H,WU J,ZHANG S,et al. Conceptual design and breadboarding activities of Geostationary Interferometric Microwave Sounder(GIMS)[C]// 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town,South Africa:[s.n.], 2009:III1039–III1042.
- [7] FRANK C De Lucia,DOUGLAS T Petkie, HENRY O Everitt. A double resonance approach to submillimeter/ terahertz remote sensing at atmospheric pressure[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009,45(2):163–170.
- [8] GOLDSMITH P. Quasi-optical systems:Gaussian beam quasi-optical propagation and applications[M]. New York:IEEE Press, 1998.
- [9] MURPHY J A,WITHINGTON S. Perturbation analysis of Gaussian-beam-mode scattering at off-axis ellipsoidal mirrors[J]. Infrared Physics & Technology, 1996,37(2):205–219.
- [10] 李彬,王振占,张升伟,等. 一种大口径微波/毫米波极化线栅研制的新方法[J]. 电波科学学报, 2015,30(3):565–570. (LI Bin,WANG Zhenzhan,ZHANG Shengwei,et al. A new method to fabricate large aperture free-standing polarized wire grids at microwave/millimeter wavelengths[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015,30(3):565–570.)
- [11] 樊振宏,陈明,汪书娜,等. 有限周期频率选择面的电磁特性分析[J]. 电波科学学报, 2009,24(4):724–728. (FAN Zhenhong,CHEN Ming,WANG Shuna,et al. Electromagnetic analysis of finite periodic frequency selective surfaces[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009,24(4):724–728.)
- [12] 王新彪,李靖,张升伟,等. 毫米波/亚毫米波临边探测仪准光技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4):641–648. (WANG Xinbiao,LI Jing,ZHANG Shengwei. Quasi-optical technology in millimeter/sub-millimeter limb sounder[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):641–648.)

表 3 天线主要电性能指标的测试结果

frequency/GHz	-15 dB taper angle/(°)		beam efficiency/%	
	simulation	measurement	simulation	measurement
54(H)	4.27	4.50	99.2	98.7
54(V)	4.23	4.40	99.5	99.1
183(H)	4.17	4.50	99.3	98.9
183(V)	4.28	4.26	99.2	98.7