

文章编号: 2095-4980(2023)02-0139-04

## 一种十频段准光学馈电网络

姚崇斌, 李贝贝, 谢振超, 李向芹, 钱志鹏

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 针对毫米波亚毫米波探测仪对准光学馈电网络的需求, 基于 GRASP 软件设计了一套 23~425 GHz 10 频段准光学馈电网络。采用平面折返镜实现双层准光学馈电网络设计, 有效控制系统结构包络; 通过极化栅网和频率选择面(FSS)分离通道, 对通道指标进行仿真分析。采用平面近场方法对准光馈电网络辐射性能进行测试, 测试结果满足指标要求。

**关键词:** 准光学馈电网络; 辐射性能测试; 辐射计; 频率分离系统

中图分类号: TN925<sup>+</sup>.91

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022199

## A ten frequency bands quasi optical feed network

YAO Chongbin, LI Beibei, XIE Zhenchao, LI Xiangqin, QIAN Zhipeng

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of millimeter and sub millimeter wave radiometer for quasi optical feed network, a 23~425 GHz ten channels quasi optical feed network is designed by GRASP software, using flat plane to achieve a double layers quasi optical feed network and reduce the size, using polarization grids and Frequency Selective Surfaces(FSS) to separate different channels. Through simulating the specifications of each channel, the test results are consistent with the simulation results.

**Keywords:** quasi optical feed network; radiation performance measurement; radiometer; frequency separation system

星载微波辐射计应用十分广泛, 可用于大气探测、海洋观测和对地观测微波遥感等方面。为实现多频段、多极化和多通道复合探测, 星载微波辐射计采用准光学馈电网络进行频率分离, 该技术可避免传统多频复用微波辐射计将各频段馈源喇叭偏焦阵列排布带来的波束变形和波束偏焦等缺点<sup>[1]</sup>。在准光学馈电网络中, 各频段接收馈源均位于焦点处, 对系统辐射性能影响较小, 同时解决了馈源阵列带来的偏焦问题。本文对准光学馈电网络设计方法进行总结, 设计了一种十频段准光学馈电网络系统, 频段跨度达到二十倍频程, 并对系统性能进行了测试。

### 1 准光学馈电网络基本组成及设计方法

#### 1.1 准光学馈电网络基本组成

准光学馈电网络将准光学器件如频率选择面(FSS)、极化栅网和曲面反射镜等, 按照一定空间位置关系排列, 实现多频段同时馈电方式。其主要设计思想借鉴了光学系统设计思路, 让电磁波以高斯波束的形式在自由空间中传播。频率选择面实现不同频段电磁辐射信号按频率分离的功能; 极化栅网实现信号垂直极化和水平极化分离的功能; 曲面镜实现改变波束传播方向、完成波束汇聚与扩散以及波束与馈源喇叭匹配功能<sup>[2-4]</sup>。最终, 馈源喇叭将电磁信号转换至波导系统, 并馈送至不同频段的接收机。

#### 1.2 准光学馈电网络设计方法

首先根据指标要求进行频率分离方案及部件布局设计, 然后根据设计对频率选择面、极化栅网等准光部件参数进行分配<sup>[5-6]</sup>, 最后再依据各部件参数在 GRASP 中建立仿真模型, 选用 PO+PTD 算法对各通道性能进行仿真分析。具体设计步骤如下:

### 1) 分离方案设计

依据指标要求的工作频段和极化要求, 选用极化栅网或频率选择面进行频率分离设计<sup>[7-8]</sup>。主要原则: a) 根据准光学馈电网络插入损耗指标要求, 对插入损耗大的频段最先分离, 如 425 GHz 和 380 GHz 等; b) 透射损耗相对较大, 每个频段透射形式频率分离次数尽可能少; c) 合理利用极化栅网进行分离。频段相近, 频率选择面难以分离的频段, 优先采用极化分离。

### 2) 布局设计

采用平面镜或椭球镜改变光路传播方向和波束聚束, 实现紧凑型准光布局设计。在进行光路布局时应考虑以下几个要素: a) 频率选择面及反射镜应尽可能小角度入射, 避免波束发生畸变; b) 平面镜将部分频段折返, 实现双层结构设计, 使布局更紧凑; c) 椭球面反射镜缩小传播波束口径, 减小频率选择面和极化栅网尺寸, 降低研制难度; d) 多频段共用椭球面反射镜使准光入口处各频段束腰位置一致。

### 3) 部件参数分配

依据系统损耗、驻波比等指标要求, 合理分配极化栅网、频率选择面和馈源喇叭等部件参数。

### 4) 仿真优化

在 GRASP 中建立电性能仿真模型, 对各通道电性能进行仿真分析及电性能-结构设计迭代优化。

## 2 十频段准光学馈电网络设计

毫米波亚毫米波探测仪准光学馈电网络工作于 23 GHz, 31 GHz, 54 GHz, 89 GHz, 118 GHz, 166 GHz, 183 GHz, 229 GHz, 380 GHz 和 425 GHz, 共 10 个工作频段, 如图 1 所示。

从频段分布可以看出, 380 GHz, 425 GHz 与 229 GHz 及其他频段相隔较远, 因此首先采用高通 FSS1 将 380 GHz, 425 GHz 与 229 GHz 及其他频段信号分离; 对于 380 GHz 以上高频段, 通过低通 FSS4 将 425 GHz 信号分离。在分离 23~229 GHz 时, 由于 166 GHz, 183 GHz 和 229 GHz 频率相近, 采用高通 FSS2 将 23~118 GHz 与 166~229 GHz 频段信号分离; 之后采用高通 FSS5 将 166~183 GHz 与 229 GHz 频段信号分离; 采用极化栅网 P1 将 166 GHz 和 183 GHz 信号分离。对于 23~118 GHz, 采用高通 FSS3 将 23~54 GHz 与 89~118 GHz 频段信号分离, 再通过极化栅网 P2 分离 89 GHz 和 118 GHz 频段信号; 23~54 GHz 采用低通 FSS6 分离 23 GHz, 31 GHz 信号; 对反射的 54 GHz 信号, 采用极化栅网 P3 进行 54 GHz 异极化分离备份。由于空间包络限制, 23 GHz, 31 GHz 由接收机频率分离和接收。准光学馈电网络分离方案如图 2 所示。

根据准光学馈电网络设计原则及频率分离方案, 在其包络限制内布局光路。采用共用金属材质椭球镜进行聚束, 平面镜进行折层设计, 实现双层紧凑布局。共有 10 个椭球镜、3 个平面镜、3 个极化栅网、6 个频率选择面和 10 个馈源喇叭, 结构模型如图 3 所示。

准光学馈电网络光路布局设计完成后, 还需通过高精度仿真软件验证各频段通道电气性能。通过 GRASP 仿真软件仿真计算各频段输出波束在束腰参考零位处电场幅度, 远场变换得到各通道输出波束远场方向图, 获得波束宽度。仿真模型及结果如图 4 和表 1 所示, 可以看出, 在

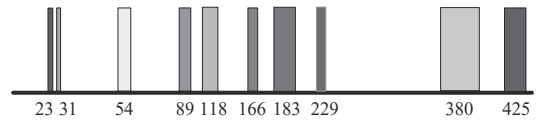


Fig.1 Frequency distribution of quasi optical feed network  
图 1 准光学馈电网络探测频段分布图

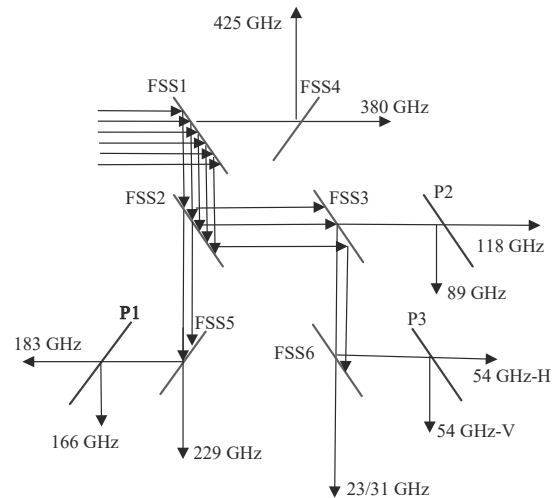


Fig.2 Separation scheme of quasi optical network  
图 2 准光学馈电网络频率分离方案图

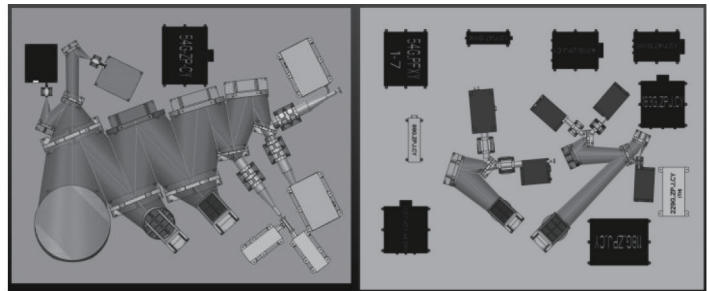


Fig.3 Mechanical model of quasi optical network  
图 3 准光学馈电网络结构模型图

23~425 GHz 范围的 10 个频段，耦合系数均优于 99.7%，驻波均优于 1.15:1，极化隔离均优于 25 dB，插入损耗均在 0.9~1.25 dB 之间，仿真结果满足指标要求。

表1 准光学馈电网络各通道仿真结果表

Table1 Simulation results of quasi optical

$f/\text{GHz}$	-15 dB half beamwidth/(°)	coupling coefficient /%	standing wave ratio	cross polarization /dB	insertion loss /dB
23.800	4.17	99.70	$\leq 1.15$	25.00	1.25
31.400	3.62	99.76	$\leq 1.15$	26.08	1.25
54(H)	4.07	99.85	$\leq 1.15$	30.08	0.95
54(V)	4.03	99.84	$\leq 1.15$	29.91	0.95
89.000	3.51	99.69	$\leq 1.15$	25.01	1.10
118.750	3.04	99.73	$\leq 1.15$	26.10	1.10
165.500	2.83	99.73	$\leq 1.15$	25.75	1.05
183.310	2.60	99.76	$\leq 1.15$	26.15	1.05
229.000	2.21	99.79	$\leq 1.15$	27.33	1.30
380.197	1.36	99.79	$\leq 1.15$	26.93	1.10
424.763	1.66	99.70	$\leq 1.15$	30.68	0.90

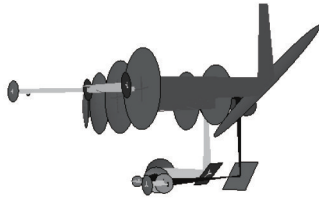


Fig.4 GRASP model of quasi optical network  
图4 准光学馈电网络 GRASP 模型图

### 3 准光学馈电网络研制与测试

#### 3.1 准光学馈电网络研制

双层光路布局决定了整体结构可为“双平行板单面安装”或“单板双面安装”。从保证相对位置关系、厚度方向结构尺寸、装调工艺性以及成本等方面综合考虑，选择“单板双面安装”方式。准光学馈电网络主体结构如图 5 所示，准光部件分布于安装底板的两侧。

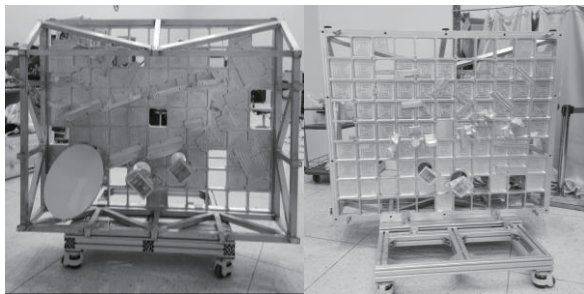


Fig.5 Quasi optical network  
图 5 准光学馈电网络图

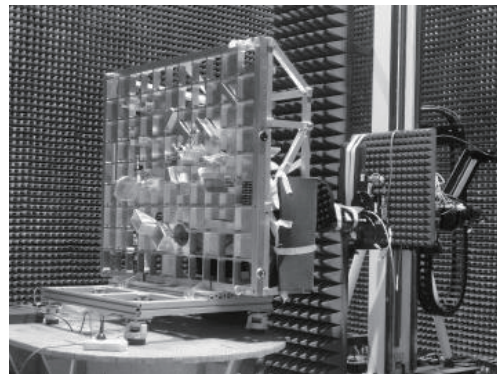


Fig.6 Quasi optical network measurement  
图 6 准光学馈电网络测试图

#### 3.2 准光学馈电网络测试

通过近场扫描方法测试准光学馈电网络辐射性能。利用近远场变换获得远场方向图，再得到其  $E$  面和  $H$  面上相对最大辐射方向电平下降到 15 dB 处 2 点间的夹角。测量时，在距离被测物体数个波长距离处，使用探测器在一个平面上对被测物体电磁场幅度和相位扫描采样，获得近场电平分布。

图 6 为准光学馈电网络测试暗室环境图。对准光学馈电网络 380 GHz 和 425 GHz 通道辐射性能进行测试(如图 7 所示)，380 GHz 通道 -15 dB 半波束宽度为 1.23°，425 GHz 通道 -15 dB 半波束宽度为 1.51°，与仿真值相比，降低约 8%。具体分析原因：除测试系统约 2% 的测试误差外，还有以下因素导致波束宽度变化：a) 频率选择面、极化栅网等功能器件仿真时均为理想设计，但实际产品存在加工误差，其表面平面度直接影响准光系统辐射性能；b) 真镜面为理想且不存在形位、形面误差，但实际加工过程中，椭球镜、平面镜等器件存在加工误差，导致准光出射波束变化。

### 4 结论

本文从工程实际出发，对准光学馈电网络系统设计方法进行分析。设计一套双层结构 23~425 GHz 准光学馈

电网络, 通过 380 GHz 和 425 GHz 准光口面辐射性能测试对系统性能进行了验证, 结果满足指标要求。本文设计的准光学馈电网络具有布局紧凑, 传输损耗小, 满足毫米波亚毫米波探测仪多频段和多极化需求。

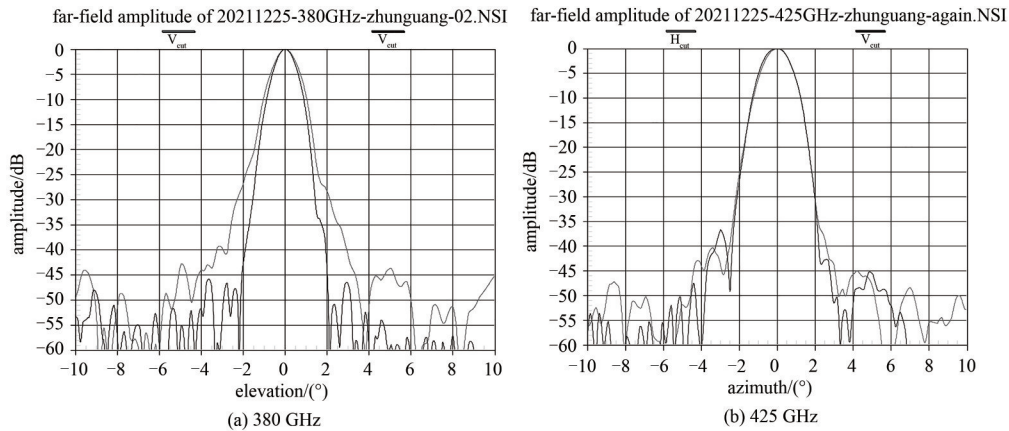


Fig.7 380 GHz and 425 GHz far-field patterns of the antenna

图 7 380 GHz 和 425 GHz 远场测试方向图

#### 参考文献:

- [1] 谢振超,李秀伟,姚崇斌,等. 地球静止轨道微波辐射计技术[J]. 上海航天, 2018,35(2):20–28. (XIE Zhenchao,LI Xiuwei,YAO Chongbin,et al. Research on geostationary orbit microwave radiometer technology[J]. Aerospace Shanghai, 2018,35(2):20–28.)
- [2] 窦文斌. 毫米波准光理论与技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2006. (DOU Wenbin. Millimeter wave quasi-optical theory and techniques[M]. Beijing:Higher Education Press, 2006.)
- [3] GOLDSMITH P F. Quasi-optical systems:Gaussian beam quasioptical propagation and applications[M]. New York:IEEE Press, 1998.
- [4] 俞俊生,陈晓东. 毫米波与亚毫米波准光技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2010. (YU Junsheng,CHEN Xiaodong. Millimeter and submillimeter wave quasi-optical technology[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2010.)
- [5] 刘佳,万继响,施锦文,等. 准光学馈电系统设计与分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):180–183. (LIU Jia,WAN Jixiang,SHI Jinwen,et al. Design and analysis of the quasi-optical feed system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):180–183.)
- [6] 刘晓明,俞俊生,陈晓东. 毫米波及太赫兹准光学技术:理论、应用与发展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(7):631–652. (LIU Xiaoming,YU Junsheng,CHEN Xiaodong. Quasi-optical technology in the millimeter and terahertz wave ranges: theory, applications and development[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(7): 631–652.)
- [7] 俞俊生,陈晓东,苗俊刚,等. 用于空间遥感的一种毫米波双通道准光系统[J]. 中国空间科学技术, 2010(4):58–63. (YU Junsheng,CHEN Xiaodong,MIAO Jungang,et al. Dual path quasi-optical system for space remote sensing[J]. Chinese Space Science and Technology, 2010(4):58–63.)
- [8] 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.)

#### 作者简介:

姚崇斌(1967–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波遥感载荷 .email:yaocbgs@126.com.

李贝贝(1990–), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为准光学馈电网络.

谢振超(1982–), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为微波辐射计.

李向芹(1986–), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波辐射计、天馈系统设计.

钱志鹏(1990–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星载荷结构设计.