

文章编号: 2095-4980(2019)06-0939-05

## 太赫兹准光学馈电网络研究进展

李贝贝, 姚崇斌, 谢振超, 李向芹, 姜丽菲

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 准光学馈电网络是一种多重复合电磁波信号分集传输方法, 在射电天文、大气遥感、气象探测等方面应用日趋广泛。概括了准光学馈电网络的设计方法, 介绍了现阶段国内外准光学馈电网络研究进展, 分析了太赫兹准光学馈电网络发展重点。对准光学器件的研究和准光系统的高精确度集成测试将是今后发展重点。

**关键词:** 准光学馈电; 太赫兹; 辐射计; 星载应用

**中图分类号:** TN925<sup>+</sup>.91

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201906.0939

## Research progress in terahertz quasi-optical feed network

LI Beibei, YAO Chongbin, XIE Zhenchao, LI Xiangqin, JIANG Lifei

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

**Abstract:** Quasi-optical feed network can transmit multiple signals, which has been used in radio astronomy, atmosphere remote sensing and meteorological sounding. This paper describes the quasi-optical design method, introduces the research progress in quasi-optical feed network and analyzes the development priority of terahertz quasi-optical. The research of quasi-optical components and high precision integration and test of quasi optical system will be the key point of future development.

**Keywords:** quasi-optical; terahertz; radiometer; spaceborne application

随着电磁波的应用不断向亚毫米波及太赫兹波段的更高频段范围拓展, 其发展应用受到了多方面限制<sup>[1]</sup>。首先, 随着频率升高, 各种类型的传输线, 如波导、微带等都存在尺寸小, 损耗大, 承受功率小, 加工难度大及价格昂贵等不足。其次, 亚毫米波及太赫兹波段的光学特性逐渐显现, 电磁场的传统研究方法暴露出一定的局限性, 需要借鉴部分光学理论进行完善补充。准光学技术在民用科研领域的应用主要集中在射电天文、大气遥感、气象探测等方面, 准光系统以其兼容毫米波与光波频域范围的独特优势, 设计灵活多变的技术特点, 成为多重复合电磁波信号高效分集传输的最佳方案。在微波辐射计领域, 准光学馈电网络技术成为常用的频率分离方法之一<sup>[2]</sup>。

### 1 太赫兹准光学馈电网络技术

#### 1.1 准光学馈电网络

传统的多频复用系统是将各频段馈源喇叭偏焦阵列排布, 即把各个频段的馈源喇叭按照设计的位置关系排列在天线反射面的焦平面上, 该方式不能真正实现各频段波束共瞄准线, 且当通道数增大时, 馈源喇叭阵列的设计排列会变得困难。并且在太赫兹频段内, 传统波导会引入较大损耗。准光学馈电网络是将准光学器件, 如频率选择表面、极化栅网、曲面反射镜等, 按照一定的空间位置关系排列并能够实现多频段同时馈电的方式。其主要设计思想是让电磁波以高斯波束的形式在自由空间中传播, 采用频率选择表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, 并利用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。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, 准光学馈电网络具有传输效率高、插入损耗小以及共焦共视轴等优点。

#### 1.2 准光学馈电网络设计准则

准光学馈电网络的评价指标通常有工作频段及带宽、-15 dB 半波束宽度、驻波比、插入损耗、高斯模耦合

系数等。通过这些指标，可以约束准光系统在天线焦点处的出射波束。在微波辐射计中，通常准光系统作为天线馈电部分，所以也可以用天馈系统的-3 dB 波束宽度作为评价指标<sup>[3-4]</sup>。

在设计多极化多频段的准光学馈电网络系统时，需要遵循一定的准光学馈电网络设计准则：a) 确定频率分离的方案；b) 确定每个频率通道所需准光学器件；c) 根据尺寸要求，设计一个初步布局方案；d) 根据天线参数，计算每个频率通道在天线处的束腰半径；e) 以 d)中的束腰半径作为输入参数，计算通道波束沿传播方向的变化；f) 检查束腰位置、损耗、遮挡等要求是否达到；对于不满足要求的，做相应优化；g) 根据整体布局，分配每一个准光学器件的指标参数<sup>[5]</sup>。

## 2 太赫兹准光学馈电网络应用现状

现阶段国内外准光学馈电网络技术发展迅速，下面介绍几个典型的准光学馈电网络。

### 2.1 极轨星载准光学馈电网络技术

目前在轨运行的遥感卫星中，采用准光技术设计实现的辐射计包括美国极轨气象卫星 NOAA 系列的 AMSU-B 和搭载于欧洲极轨气象卫星 METOP 系列的微波湿度探测仪 (Microwave Humidity Sounder, MHS)等。

1) AMSU-B: 探测频率包括 89 GHz,150 GHz 和 183 GHz，主要技术指标见表 1。AMSU-B 的波束分离见图 1<sup>[6]</sup>，准光系统按照由高频到低频的顺序逐步分离。

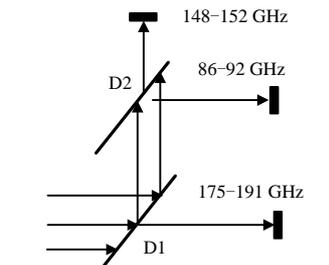


Fig.1 Separation scheme of AMUS-B  
图 1 AMSU-B 频率分离方案

2) MHS: MHS 探测频率为 89 GHz,157 GHz,183 GHz 和 190 GHz，其主要技术指标见表 2。MHS 的频率分离方案采用由低频到高频的顺序，逐步分离各频段的波束，其波束分离方案见图 2。

3) 微波湿度计: 微波湿度计搭载于 FY-3 气象卫星，用于探测全球大气湿度的垂直分布、水汽含量和降雨量等气象信息。图 3 中 FY-3A,B 星搭载的微波湿度计工作于 150 GHz 和 183.31 GHz 这 2 个频段，通过独立的反射面天线，使用极化栅网将接收到的信号分离为垂直极化和水平极化。FY-3C,D 星搭载的微波湿度计工作于 89 GHz,118.75 GHz,150 GHz 和 183.31 GHz 频段。其中 89 GHz, 118.75 GHz 共用一个反射面，采用极化栅网将 2 个频率极化分离。150 GHz 和 183.31 GHz 频段采用相同方式，共用另外一个反射面<sup>[7-8]</sup>。

### 2.2 静止轨道毫米波亚毫米波探测仪

静止轨道微波探测仪具有对快速变化的台风、暴雨等灾害性天气系统的全天候、全天时的定量监测预警能力。由于毫米波亚毫米波探测仪工作频段高，因此采用准光学馈电网络馈电方案。图 4 中工作频率范围为 54~425 GHz，技术指标见表 3，其中 54 GHz 有垂直极化和水平极化 2 个通道。

表1 AMSU-B的主要技术指标  
Table1 Specification of AMSU-B

frequency band/GHz	3 dB beam width/(°)	beam efficiency/%	insertion loss/dB
87.6-90.4	0.99-1.21	≥95	≤1.4
148.8-151.4	0.99-1.21	≥95	≤1.4
175.31-191.31	0.99-1.21	≥95	≤1.4

表2 MHS主要技术指标  
Table2 Specification of MHS

frequency/GHz	bandwidth/GHz	polarization	3 dB beam width/°	insertion loss/dB
89	2.5	V	0.99-1.21	≤0.8
157	2.5	V	0.99-1.21	≤0.8
183.31	7.0	V	0.99-1.21	≤0.8
190.31	2.2	V	0.99-1.21	≤0.8

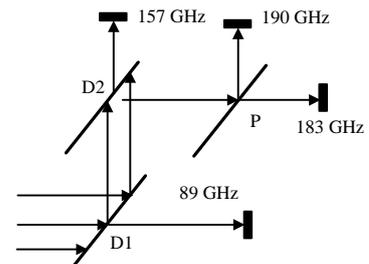


Fig.2 Separation scheme of MHS  
图 2 MHS 频率分离方案

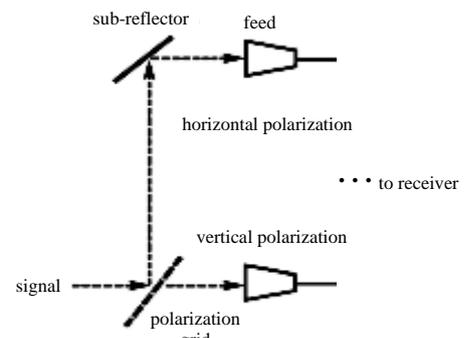


Fig.3 Polarization grid of MWHS  
图 3 微波湿度计极化栅网

静止轨道毫米波亚毫米波探测仪有 54 GHz,89 GHz,118 GHz, 166 GHz,183 GHz 和 425 GHz 共 6 个频段。馈电网络在 1 200 mm × 1 000 mm × 350 mm 空间内实现 54~425 GHz 的 6 个频段复合馈电, 各频段均使用频率选择表面进行频段分离, 具备扩展为双极化的条件。为保证系统灵敏度, 要求各频段插入损耗小, 设计低频率选择表面入射角式布局, 各频率选择表面入射角度小于 20°。由于频率选择表面插入损耗随入射角度减小而降低, 从而保证了各频段链路插入损耗满足要求<sup>[9]</sup>。研制产品见图 5, 天馈仿真结果见表 4, 仿真结果满足指标要求。

表3 毫米波亚毫米波探测仪准光学馈电电子系统的指标要求  
Table3 Specification of millimeter and sub-millimeter sounders

channel	frequency/GHz	bandwidth/GHz	-15 dB half beam width/(°)	polarization	insertion loss/dB	coupling coefficient/%
54	54	8	3.20-3.91	H	0.7	≥92
54	54	8	3.20-3.91	V	0.7	≥92
89	88.2	4	2.70-3.30	V	1.2	≥92
118	118.75	12	2.37-2.89	H	1.2	≥92
166	165.5	6	2.16-2.64	V	1.4	≥92
183	183.31	16	1.98-2.42	H	1.4	≥92
425	424.763	10	1.26-1.54	H	1.3	≥92

### 3 准光学馈电网络发展重点及静止轨道技术验证

#### 3.1 准光学馈电网络技术发展

太赫兹准光技术以高斯波束理论为基础, 综合了光学与电磁学的相关知识。其系统中包含的功能器件如极化栅网、频率选择表面、聚焦与反射器件等, 种类繁多, 实现方式多样。准光学系统的设计受器件性能约束, 在系统实现阶段对容差设计及加工安装精确度要求极为严苛。对准光学器件的研究和准光系统的高精确度集成测试将是今后发展重点。

1) 频率选择表面: 频率选择表面在准光系统中实现频率分离功能。一般而言, 频率选择表面有 2 种实现形式, 见图 6: 一种为波导型周期孔槽阵列的金属平板, 另一种为贴片型频率选择表面。贴片型的频率选择表面允许波束以较大的人射角入射, 通常为 45°, 大的人射角易于光路的布局, 也容易实现紧凑的光路布局。但介质底板会引入一定的插入损耗, 制约了贴片型频率选择表面的使用。波导型频率选择表面对于入射角要求较为严格, 但其反射损耗和传输损耗较小<sup>[10]</sup>。

2) 极化栅网: 极化栅网对电磁波的极化分离取决于金属丝的直径以及金属丝的间距, 工作波频率越高, 金属丝的直径与间距越小。太赫兹极化栅网的丝径和丝间距在十几微米至几百微米范围内, 且要求加工精确度为微米级<sup>[11]</sup>。

极化栅网常规加工方法有光化学腐蚀和直接缠绕法。其中直接缠绕法具有较高的精确度, 工艺相对稳定, 是现阶段比较常用的极化栅网加工方法。直接缠绕法主要基于高精度金属线间距控制技术与高精度金属丝固定技术, 通过搭建微细间距金属栅网缠绕平台, 控制金属线间距, 并运用高精度金属丝固定技术, 进而完成极化栅网制造。极化栅网损耗较小, 现阶段极化栅网主要受限于口径大小, 故大口径高精度极化栅网是今后的发展重点。

3) 馈源喇叭: 馈源喇叭常用机加工和电铸加工等工艺。现阶段适用于准光系统的高性能馈源喇叭加工工艺是电铸方法。电铸工艺按照设计好的波纹喇叭内腔尺寸加工铝芯, 然后放入电铸溶液中, 表面电铸铜到一定的厚度, 在腐蚀掉铝芯、内腔表面镀金后, 即完成波纹喇叭制造。该工艺技术对铝芯尺寸精确度及表面光洁度要求较

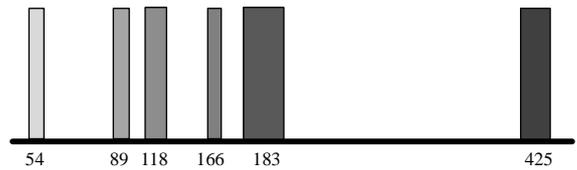


Fig.4 Frequency band of millimeter and sub-millimeter sounder  
图4 探测仪探测频段示意

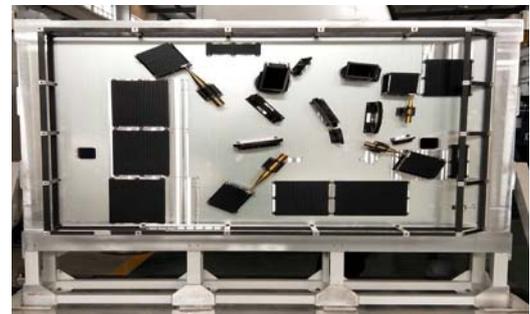


Fig.5 Quasi optical of millimeter and sub-millimeter sounder  
图5 毫米波亚毫米波探测仪准光系统

表4 毫米波亚毫米波探测仪天馈仿真结果

Table4 Simulation results of millimeter and sub-millimeter sounders

frequency band/GHz	beam width/(°)	beam efficiency/%
54	0.09	95.83
54(backup)	0.09	95.15
89	0.06	98.00
118	0.05	97.78
166	0.04	97.96
183	0.04	98.08
425	0.03	98.20

高，加工精确度高，但成本高，周期长。现阶段有微细电解线切割加工技术和精密电铸技术相结合的工艺适用于生产高频段馈源喇叭，见图 7，该方法采用微米尺度线电极，结合高频脉冲电流技术，使微细电解的加工间隙缩小到微米尺度，具有无内应力，表面质量好，成型精确度高等特点<sup>[12-13]</sup>。

4) 高精度集成测试：准光学馈电网络在系统实现阶段对容差分析及加工安装精确度要求极为严苛，图 8 为准光学馈电系统的集成测试过程。通常一个准光学馈电网络系统有多个准光器件，其相对位置对系统总体性能如波束指向、波束宽度等有重要影响。高精度集成和装调一体化、测调一体化技术是太赫兹准光学馈电网络技术的发展重点。

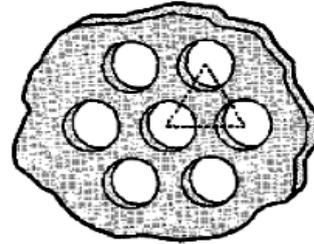


Fig.6 Frequency selective surface  
图 6 频率选择表面



Fig.7 Feed horns  
图 7 馈源喇叭产品



Fig.8 Quasi optical integration  
图 8 准光学馈电网络集成测试

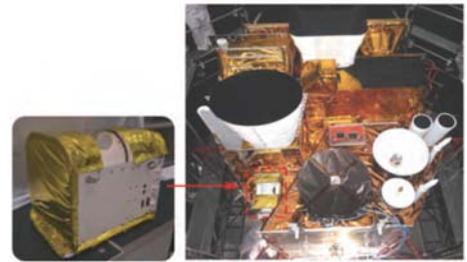


Fig.9 Microwave detection payload  
图 9 微波探测载荷装载于 FY-4 A 星

### 3.2 准光学馈电网络技术在轨验证

微波探测试验载荷是世界首个将准光学馈电网络技术运用于静止轨道的载荷，于 2016 年 12 月 20 日搭载于 FY-4 A 星发射成功。图 9 中该探测试验载荷具有 183.31 GHz 和 425 GHz 双通道，其中 183.31 GHz 通道为垂直极化通道，425 GHz 为水平极化通道。由于该载荷探测频段达到 425 GHz，采用极化栅网进行频率分离后由馈源喇叭将信号馈送至对应接收机。技术指标及在轨测试结果见图 10 及表 5，微波探测试验载荷验证了地球静止轨道准光学频段分离技术<sup>[14]</sup>。

### 4 结论

准光系统涵盖的技术方向众多且多处于前沿，包括电磁场数值计算、光学分析、新工艺新材料、系统集成技术等，对基础技术的研究发展具有重要的牵引作用。近年来，国内太赫兹准光学馈电网络应用技术有了很大进展，对于要求多极化、多波束、高频段探测仪，可以优先选择采用准光学馈电网络技术。

### 参考文献：

[1] 周胜利,张存林. 太赫兹遥感技术综述[J]. 航天返回与遥感, 2009,30(4):32-35. (ZHOU Shengli,ZHANG Cunlin. Summary of THz remote sensing technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009,30(4):32-35.)

[2] 姚崇斌,徐红新,赵锋,等. 微波无源遥感有效载荷现状与发展[J]. 上海航天, 2018,35(2):1-12. (YAO Chongbin,XU Hongxin, ZHAO Feng,et al. Current status and future of microwave radiometer[J]. Areospace Shanghai, 2018,35(2):1-12.)

[3] 王元源,李春花,袁晶. 毫米波/亚毫米波准光馈电系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(3):1535-1540. (WANG Yuan yuan,LI Chunhua,YUAN Jing,et al. Design of millimeter/sub-millimeter wave quasi-optical feed system[J]. High Power Laser and Particle Beam, 2013,25(3):1535-1540.)

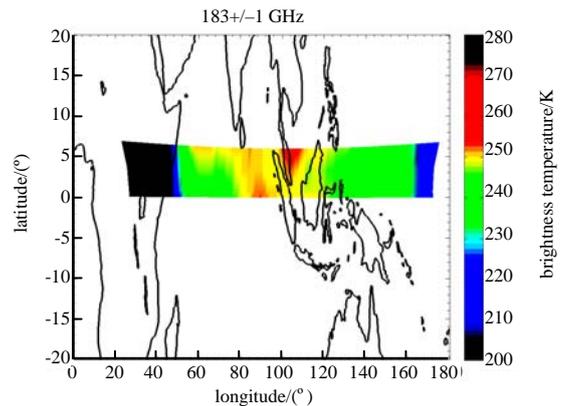


Fig.10 183 GHz channel bright temperature  
图 10 183 GHz 1 通道亮温图

表5 微波探测试验载荷灵敏度测试结果

Table5 Sensibility test results of microwave detection payload		
	specification/K	test results(on orbit)/K
183 GHz channel 1 sensitivity	≤0.6	0.40
183 GHz channel 2 sensitivity	≤0.6	0.29
183 GHz channel 3 sensitivity	≤0.6	0.28
425 GHz channel 1 sensitivity	-	1.86
425 GHz channel 2 sensitivity	-	1.42

- [4] GOLDSMITH P. Quasi optical systems: Gaussian beam quasi optical propagation and applications[M]. New York: IEEE Press, 1998.
- [5] 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.)
- [6] MARTIN R J, HALL W J. Quasi optical triplexing feed for AMSU-B radiometer[C]// Eighth International Conference on Antennas and Propagation. Colchester, UK: [s.n.], 1993: 930–933.
- [7] 张升伟, 李靖, 姜景山, 等. 风云3号卫星微波湿度计的系统设计与研制[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 199–207. (ZHANG Shengwei, LI Jing, JIANG Jingshan, et al. Design and development of microwave humidity sounder for FY3 meteorological satellite[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(2): 199–207.)
- [8] 张瑜, 张升伟, 王振占, 等. FY-3 卫星大气湿度微波探测技术发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 52–61. (ZHANG Yu, ZHANG Shengwei, WANG Zhenzhan, et al. Technology development of atmospheric humidity sounding of FY-3 satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(4): 52–61.)
- [9] 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.)
- [10] 林彬彬. 频率选择表面的仿真、加工与测试研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. (LIN binbin. Research on simulation, fabrication and test of frequency selective surfaces[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2015.)
- [11] HONG Jiakai, HE Guoyu. On the design of polarization grids for application in CATR[C]// Proceedings of 2002 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Beijing, China: [s.n.], 2002: 840–842.
- [12] 谢苏隆, 叶长利, 于飞. 高性能馈源喇叭综述[J]. 空间电子技术, 2014(4): 11–18. (XIE Sulong, YE Changli, YU Fei. Novel short backfire antenna of high aperture efficiency for dual polarization application[J]. Space Electronic Technology, 2014(4): 11–18.)
- [13] 刘小明, 于海洋, 王海, 等. 多模式超高斯馈源的设计与分析[J]. 上海航天, 2018, 35(2): 97–102. (LIU Xiaoming, YU Haiyang, WANG Hai, et al. Design and analysis of multi-mode super Gaussian feed[J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(2): 97–102.)
- [14] 谢振超, 徐红新, 安大伟, 等. 微波辐射计静止轨道遥感试验技术[J]. 上海航天, 2018, 35(2): 49–59. (XIE Zhenchao, XU Hongxin, AN Dawei, et al. Remote sensing technology of experimental microwave radiometer in geostationary orbit[J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(2): 49–59.)

#### 作者简介:



李贝贝(1990–), 女, 江苏省宿迁市人, 工程师, 主要从事辐射计馈电系统、准光学馈电网络系统设计, email: libeibe1990@163.com.

姚崇斌(1967–), 男, 上海市人, 学士, 研究员, 主要研究方向为微波辐射计系统总体设计.

谢振超(1978–), 男, 上海市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事辐射计系统设计工作.

李向芹(1986–), 女, 安徽省宣城市人, 硕士, 工程师, 主要从事辐射计天线设计工作.

姜丽菲(1983–), 女, 长春市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事辐射计总体设计.

#### 勘 误:

2019年第2期第260页第7行:

$L_{\text{eff}}=1\ 120\ \text{nH}$

更改为:

$L_{\text{eff}}=1\ 120\ \text{pH}$