

文章编号: 2095-4980(2024)09-0967-08

星载太赫兹微波辐射计发展现状及应用展望

王文伟, 钟海文, 王 昊, 李贝贝

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 简要阐述了星载微波辐射计功能特点、主要指标、工作原理和典型系统组成, 结合准光馈电系统和接收机等关键组成以及灵敏度等关键性能指标应用需求, 重点介绍了目前国内外星载太赫兹频段极化栅网、频率选择表面、馈源喇叭、接收机前端等研制水平和应用现状; 比对了关键指标的技术差距, 分析了太赫兹频段产品设计、研制技术难点。针对我国后续星载微波辐射计研制需求, 对关键太赫兹部组件发展趋势和应用需求进行了梳理和展望, 为我国星载无源遥感发展提供借鉴。

关键词: 太赫兹; 微波辐射计; 准光系统; 接收机; 噪声系数; 灵敏度

中图分类号: TP722.6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022176

Status and application outlook of spaceborne terahertz microwave radiometer

WANG Wenwei, ZHONG Haiwen, WANG Hao, LI Beibei,

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

Abstract: The function characteristics, main indicators, working principle and typical system compositions of the spaceborne microwave radiometer are briefly introduced. The development level and application status of current domestic and foreign spaceborne terahertz band polarization grid, frequency selective surface, feed horn, receiver front-end etc, are highlighted by combining with the key components of quasi-optical feed system and receiver, as well as the application requirements on key performance specifications such as sensitivity. The gaps between key specifications are compared. The technical difficulties in product design and development of terahertz frequency are analyzed. In view of the development demand of spaceborne microwave radiometer of China, the development trend and application demand of key terahertz components are prospected, providing reference for the development of spaceborne passive remote sensing in China.

Keywords: terahertz; microwave radiometer; quasi optical; receiver; noise figure; sensitivity

星载微波辐射计应用领域十分广泛, 可用于大气探测、海洋观测、对地观测微波遥感等方面, 在气象、农林、地质、海洋环境监测、军事侦察、天文、医疗及导弹制导等领域已得到广泛应用。相比可见光和红外, 微波探测具有全天时、全天候工作的优点, 将微波遥感、可见光遥感和红外遥感相结合, 可获得更多的信息。由于微波辐射计是被动接收, 且具有穿透云层、小雨、雾和抗太阳辐射等优点, 是气象卫星、海洋卫星和对地观测卫星的重要遥感载荷, 在天气预报、军事气象海洋保障、强对流灾害天气监测等方面发挥了巨大作用, 具有重要的社会及经济效益^[1]。

随着航天产品不断发展以及太赫兹技术持续进步, 为获得较高的空间分辨力, 同时也避开频率越来越高的地面和空间通信信号干扰, 星载微波辐射计向越来越宽的高频段发展, 可获得更多的探测频段和细化探测通道, 有利于更加细致地了解探测对象物理特性, 提高反演精确度。太赫兹技术在空间探测领域具有很大的应用价值, 以大气中的冰云粒子为例, 冰云在大气温度、降水和台风形成中都扮演着极其重要的角色, 冰云的强度、量级等也成为判断天气变化的重要因素。从冰云的辐射特性看, 冰云辐射最强的频段为 118 GHz、183 GHz、380 GHz、425 GHz、683 GHz 和 874 GHz, 利用这些频段的探测仪, 可有效探测冰云粒子的特性和状态。太赫兹冰云探测是未来星载太赫兹探测应用重点领域之一。

收稿日期: 2022-09-18; 修回日期: 2022-10-19

目前国内有多个太赫兹频段星载辐射计系统正在开展研制,最高频段已超过 600 GHz。本文介绍了辐射计中准光馈电系统和接收机组成,给出灵敏度计算公式,重点分析目前国内星载太赫兹频段极化栅网、频率选择表面、馈源喇叭、接收前端等研制水平和应用现状,同时结合后续星载微波辐射计应用需求,对关键太赫兹部组件发展趋势和应用需求进行展望。

1 微波辐射计介绍

自然界中高于绝对零度的所有物质都会向外自发辐射电磁能量,通过对其辐射能量的分析可以获得物体的很多信息。微波辐射计对目标物体自发辐射的微波场景信号在指定频段内进行天线接收、多频段分离、下变频、放大、滤波、检波和积分等处理,可将物体的微波信号转换为与之功率成正比的电压信号。

太赫兹辐射计由天线、准光系统、接收机和信号处理器等部分组成。为提高空间分辨力,天线常采用大口径的反射面天线。准光系统的功能是对由反射面天线传输过来的多频段信号进行频率分离,使不同频段信号进入到对应的接收机中。接收机将各频段亮温信号的功率转换为直流电压信号,从而完成太赫兹频段信号的功率测量。目前星载辐射计常用全功率接收机形式。

灵敏度是辐射接收机最重要的指标之一,是指辐射接收机可以检测到输入信号的最小变化温度,单位为 K。在不考虑接收机增益波动、 $1/f$ 噪声等情况下,灵敏度的计算公式为:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{SYS}}}{\sqrt{B\tau}} = \frac{T_A + T_{\text{REC}}}{\sqrt{B\tau}} \quad (1)$$

式中: ΔT 为辐射接收机的灵敏度; T_A 为天线接收到的目标信号亮温; T_{REC} 为接收机等效噪声温度; B 为接收机内部检波前通道带宽; τ 为积分时间^[2-3]。

根据灵敏度计算公式,检波前带宽越大、积分时间越长则灵敏度越高。在星载遥感应用中,检波前带宽一般根据探测需求(探测频率窗口)选定(通常是固定值),积分时间与空间扫描时分辨力相关(受限于系统应用,一般为毫秒级),灵敏度主要由接收机等效噪声系数决定。

在包含准光系统等插损的情况下,太赫兹频段辐射计接收机等效噪声温度可表示为:

$$T_{\text{REC}} = (L-1)T_p + L(F-1)T_0 \quad (2)$$

式中: L 为准光系统的插入损耗; F 为太赫兹前端的噪声系数; T_p 为准光系统温度; T_0 为环境温度。由式(2)可知,准光系统插入损耗越小,太赫兹前端的噪声系数越小,则接收机灵敏度越高。

2 准光系统

为实现多频段、多极化、多通道复合探测,采用准光学馈电网络进行频率分离,可避免传统多频复用辐射计系统将各频段馈源喇叭偏焦阵列排布所带来的缺点。在准光学馈电网络中,各频段都位于焦点处,对探测仪辐射性能影响较小,同时可解决馈源阵列带来的偏焦问题。准光学馈电网络由准光结构件、关键部组件组成,其中准光结构件包括平面镜、椭球镜、底板等,主要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的功能^[4];关键部组件包括频率选择表面、极化栅网、馈源喇叭等,主要实现对输入信号的频率、极化分离,并馈送至各通道接收机^[5-7]。

现阶段,国外优势单位的准光学频率分离部件设计方法优异,工艺技术先进,性能稳定,星载产品在轨飞行经验丰富。国内研究主要局限于仿真与优化,起步较晚,尚未达到产业化水平,多为实验室研制产品,无星载应用经验,插入损耗等关键指标与国外先进水平有一定差距^[8]。在此主要介绍极化栅网、频率选择表面、馈源喇叭国内外应用现状。

2.1 极化栅网

极化栅网是进行微波信号极化分离的部件,通过金属细丝实现电磁波极化分离。电磁波入射到金属栅网时,若入射波电矢量平行于网线时,则产生反射;入射波电矢量垂直于网线时,则产生透射。极化栅网原理如图 1 所示。其主要功能指标为插入损耗和隔离度,影响因素为金属细丝材料特性、金属丝间距、平面度等。

目前,国外已有太赫兹频段内极化栅网的实物产品,一般可做到丝径 30 μm 、间距 50 μm 左右,高端产品可以达到更高标准。如英国 Thomas Keating(简称 TK)公司采用精密绕丝技术研制的极化栅网金属丝最小直径和间距分别能达到 5 μm 和 10 μm ,该产品已成功用于多个星载产品,损耗小于 0.05 dB,极化隔离度大于 35 dB(如图 2

所示)。

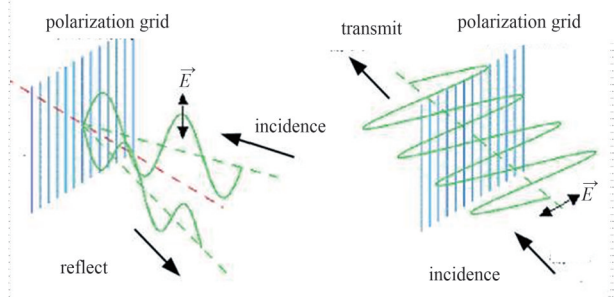


Fig.1 Principle of polarization grid
图 1 极化栅网原理



Fig.2 Spaceborne large size polarization grid(TK product)
图 2 星载大口极化栅网(TK 公司)

中国科学院国家空间科学中心开展了 L 波段至 X 波段极化栅网自主研发；航天 504 所曾进行 23~54 GHz 的极化栅网型号试制，采用绕丝技术工艺；804 所联合广东工业大学和华北电力大学，分别试制了绕丝型和衬底型极化栅网，并用于准光系统中，实现了极化分离功能。国内研制的栅网实物如图 3 所示。

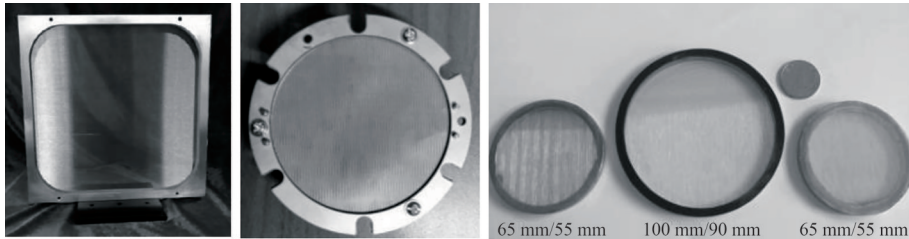


Fig.3 Domestic polarization grid
图 3 国内研制栅网实物

2.2 频率选择表面

频率选择表面是对微波信号进行频段分离的部件，通过金属材料形成周期阵列结构，实现不同频率信号分离，其原理如图 4 所示。主要功能指标为插入损耗，影响因素为周期阵列加工精确度、衬底材料特性等。

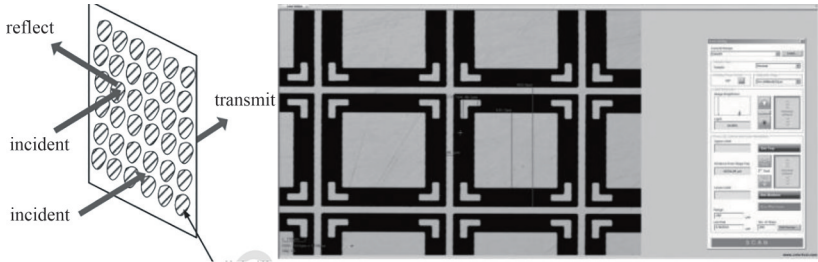


Fig.4 Principle of frequency selective surface
图 4 频率选择表面原理

国外频率选择表面研制技术发展悠久，以英国卡迪夫大学和 TK 公司为代表的研制团队，使用多层网眼频率选择技术实现了十分精准的波长选择，有低通、高通、带通和带阻多种模式，在多种地面和航天项目内应用。TK 公司的薄膜衬底工艺如图 5 所示。

国内方面，长春光学精密机械与物理研究所通过立体打印技术制作曲面频率选择表面，但该类型频率选择表面多用于雷达天线罩领域或隐身技术领域，损耗较大。北京航空航天大学也曾开展频率选择表面研制，多采用电化学腐蚀方法加工，最大加工口径为 100 mm，其产品测试透射损耗值达 0.9 dB，反射损耗值达 0.3 dB，成品如图 6(a)所示。804 所联合上海交通大学采用 UV-LIGA(Ultraviolet Rays, Lithographie, Galvanoformung and Abformung)技术研制了 118~183 GHz 频率选择表面，产品口径为 80 mm，损耗为 0.3 dB，成品如图 6(b)所示。针对某卫星项目应用需求，804 所联合华北电力大学开展了 23~425 GHz 频率选择表面研制。

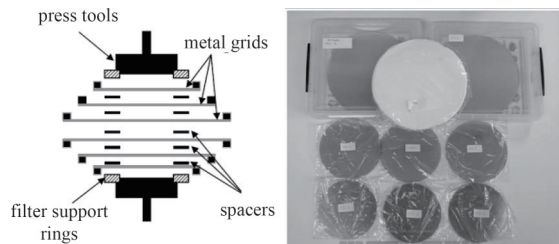
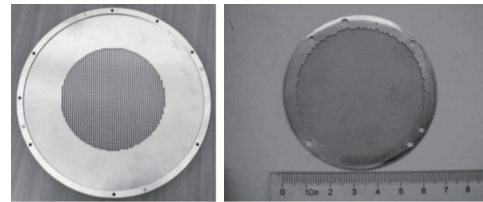


Fig.5 Production process of thin substrate(TK company)
图5 薄膜衬底工艺(TK公司)



(a) electrochemical technology
(b) UV-LIGA technology

Fig.6 FSS products
图6 频率选择表面成品

2.3 馈源喇叭

馈源喇叭是对空间电磁波进行场路转换的部件,探测仪准光网络中的馈源喇叭要求具备超高斯波束特性。其主要功能指标为高斯模耦合系数、插入损耗,影响因素为内部槽齿结构分布、加工精确度等。

英国TK公司生产的馈源喇叭最高可工作于950 GHz,为适用于准光系统的超高斯喇叭,如图7~8所示,采用精密电铸生产工艺进行加工,馈源喇叭具有良好的性能。

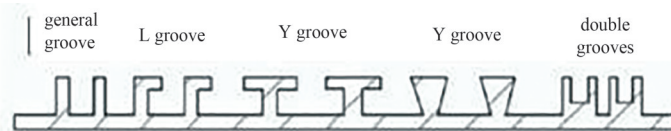
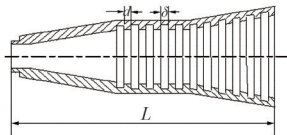


Fig.7 Feed horn(TK company)
图7 馈源喇叭(TK公司)

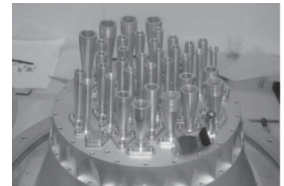


Fig.8 Inner structure of feed horn
图8 馈源喇叭内部结构

国内部分高校,如北京邮电大学、华北电力大学等,对适用于准光的超高斯馈源喇叭开展过研究。804所分别采用电铸工艺(150 GHz、183 GHz、425 GHz)和叠片工艺(642 GHz、2.5 THz)进行馈源喇叭的研制,如图9~10所示。

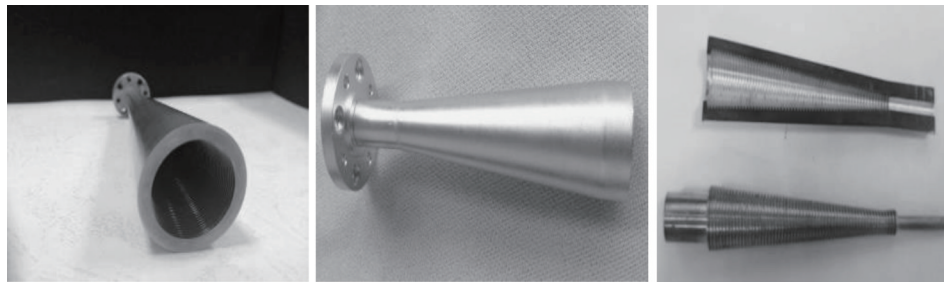


Fig.9 150 GHz、183 GHz feed horns
图9 150 GHz、183 GHz 馈源喇叭



Fig.10 Electroforming mandrel and product of 425 GHz feed horn
图10 425 GHz 高频馈源喇叭电铸芯模、馈源喇叭实物

国内在星载多频段准光学频率分离技术领域相关研究起步较晚,受限于加工工艺,研究主要局限于仿真与优化,关键准光分离部件多为实验室研制产品,对比国外技术水平,目前主要存在以下差距:

1) 关键部组件工作频率偏低：国内设计加工的频率选择表面最高工作频率为 425 GHz(如图 10 所示)，国外 TK 公司极化栅网最高工作频率为 3 THz，频率选择表面最高工作频率为 21 THz；

2) 高频部组件插入损耗偏高：国内设计加工的频率选择表面插入损耗约 1 dB，国外频率选择表面的插入损耗小于 0.3 dB；

3) 加工精确度低：如波纹馈源喇叭国内主要采用传统机械加工方式，最高加工精确度为 10 μm ，国外主要采用光刻、电铸工艺，最高加工精确度优于 2 μm ；

4) 准光部件专业测试系统缺乏：国内对准光部件的测试还缺乏相应的测量系统，测试频率低于 300 GHz，国外准光部件测试最高频率超过 3 THz；

5) 缺乏空间环境应用经验：国内仅有极化分离式双频段准光学馈电网络星载应用，准光学分离部件为进口产品，国外有多套多频段、多极化准光学馈电网络在轨应用，部分产品工作时间超过 10 年。

现阶段国外优势单位的准光学频率分离部件设计方法优异，工艺技术先进，产品在轨运行多年，性能稳定，星载应用经验丰富。准光学系统已成功用于气象、通信等多种卫星载荷，系统性能优异。而国内准光频率分离部件无星载应用经验，插入损耗等指标差距较大。

3 太赫兹接收机

现阶段太赫兹接收机大多采用超外差接收方式，一般由太赫兹射频前端和中频接收机组成，典型组成框图如图 11 所示。目前高频段(200 GHz 以上频段)无成熟可靠的高等级星用低噪声放大器，在射频前端可采用直接混频方式，混频器后级设计中频低噪声放大器，在中频通过多路功分可实现多个通道。根据接收频率准确度指标要求的不同^[9]，混频器的本振信号可由锁相介质振荡器(Phase-locked Dielectric Resonator Oscillator, PDRO)、介质振荡器(Dielectric Resonator Oscillator, DRO)产生，锁相源产生参考信号。

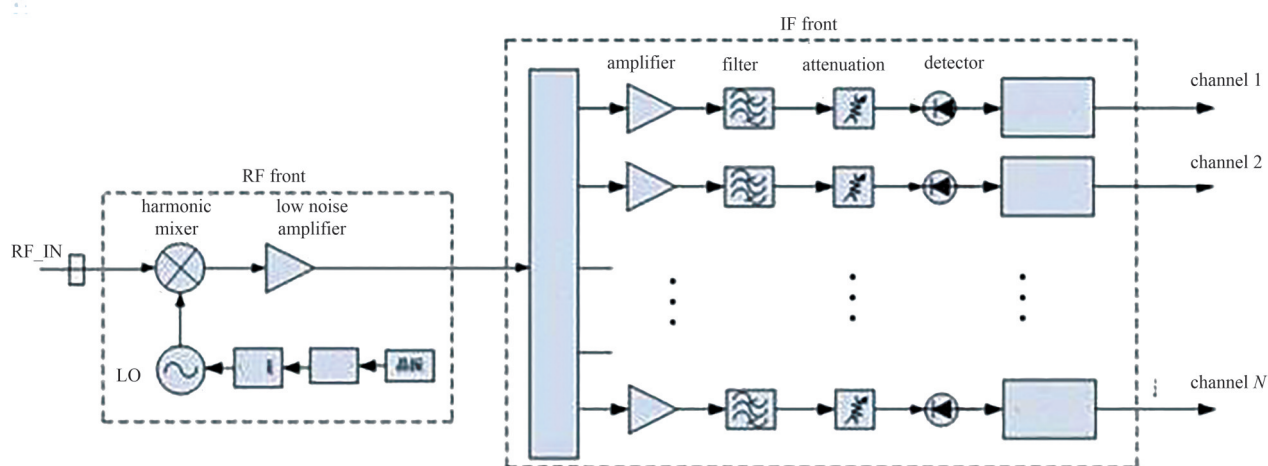


Fig.11 Composition of typical THz receiver

图 11 典型太赫兹接收机组成框图

太赫兹频段接收机最关键指标为射频前端的噪声系数，其主要由混频器(无低噪声放大器)或前端低噪声放大器决定。

国外辐射计理论研究较早，在射电天文、微波成像等方面取得了很多成就，20 世纪 90 年代已开始对太赫兹辐射计技术进行研究。目前国外从事太赫兹前端领域产品研制的有德国 RPG(Radiometer physics GmbH)、美国 JPL(Jet Propulsion Laboratory)实验室、VDI(Virginia Diodes Inc)公司、Millitech、Millivision、爱尔兰 Farran、英国卢瑟福实验室(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)等多家公司和科研机构。VDI 公司研制的 425 GHz 全功率辐射计如图 12 所示，采用超外差形式，本振信号 106.19 GHz 经过二倍频后为分谐波混频器提供驱动，双边带噪声温度约 4 000 K(11.7 dB)^[10]。

国内开展太赫兹频段接收机前端研制的单位和机构主要有 905 所、电科 55 所、13 所、电子科技大学、北京理工大学、天津大学等。各单位在太赫兹领域各有研究侧重点，如 905 所主研方向为探测、成像、通信；电子科技大学优势在固态和真空器件技术；南京大学在信号检测；紫金山天文台较多关注气象及天文观测。

电子科技大学研制了 220 GHz 辐射计前端，如图 13 所示，积分时间为 20 ms，检波前带宽为 5 GHz，灵敏度

为 1.08 K^[11-12]。

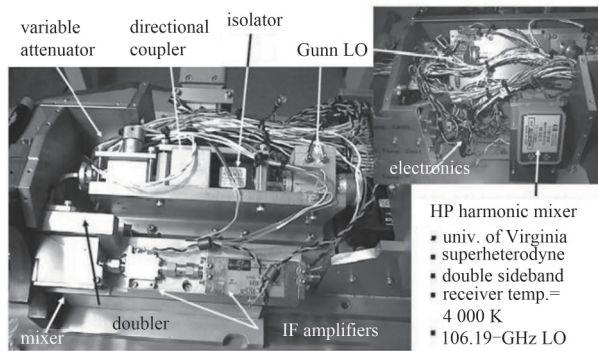


Fig.12 425 GHz radiometer front(VDI company)
图 12 425 GHz 辐射计前端(VDI 公司)

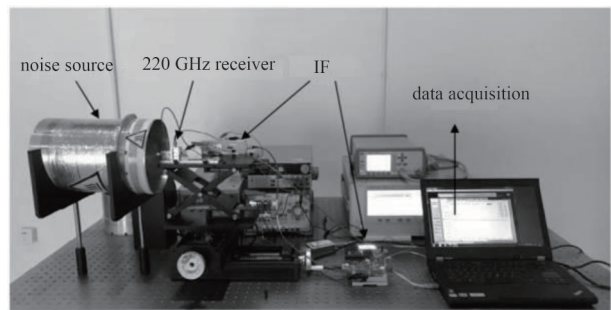


Fig.13 Receiver of 220 GHz radiometer(UESTC)
图 13 220 GHz 辐射计接收机(电子科技大学)

电科 55 所和 804 所联合研制了星载 664 GHz 辐射计接收机前端，噪声系数约 11.5 dB，功耗小于 6 W，指标水平与德国 RPG 同类型产品相当。

905 所研制前端集中在 180 GHz 以上频段，目前在国内具有一定指标优势。国内太赫兹前端噪声系数如表 1 所示。

表 1 国内太赫兹前端噪声系数
Table1 Noise figures of domestic THz receiver front

frequency band/GHz	183	229	330	380	425	664	850	1 040
NF/dB	5.5	6.2	6.6	7.9	8.1	10.6	12.6	13.4

在太赫兹频段，固态器件设计困难，研制成本较高，20 世纪只有少数发达国家的实验室进行研究和设计，且对中国实行禁运。现阶段太赫兹系统设计中，主要关注平面肖特基势垒二极管的混频器和倍频器。这些方面国外研究起步早，工艺先进，在理论和工程应用上比较成熟，制作工艺已向单片集成方向发展，工作频段不断提高，测试方法以及测试设备日趋完善，性能较为优异。

肖特基势垒二极管组成的混频器在太赫兹频段芯片封装存在较大的寄生效应，这些引入的寄生参量很难进行理论分析，一般需建立精确的三维模型才能进行设计应用。国内各太赫兹研制单位所使用的二极管大多无法得到准确的模型；同时，太赫兹前端对二极管的装配精确度要求极高，需达到微米量级。目前国内研制单位采用多投入、精挑细选的方法解决上述问题，生产一台前端，往往需投产十几台产品，通过测试筛选出性能最优的产品，废品率较高^[13-15]。

4 星载太赫兹产品技术难点

4.1 准光技术难点

准光产品研制可分为系统设计、部组件研制、集成测试 3 个方面。其中部组件可分为结构件和关键部组件两类。

针对用于星载辐射计产品的准光学馈电网络，其难点在于准光系统的小型化设计以及准光器件的国产化，准光学馈电网络研制流程如图 14 所示。现阶段极化栅网、频率选择表面、馈源喇叭等准光学器件研制有实验室国产研制基础，但型号应用产品研制还存在一定难点。

1) 极化栅网通常由特制的金属细丝缠绕在一定形状的框架上实现，使用传统的手段很难在圆弧形的外轮廓上稳定地缠绕出所规划的线型，平面度较差，导致极化栅网插入损耗大。

2) 频率选择表面通过介质层表面做出各种周期形状，实现频段分离。其结构由多层介质叠加而成^[16]，单元尺寸为微米级。传统的电化学腐蚀方法，在进行大面积电化学腐蚀加工时，产品内部腐蚀效果不一致，会出现四周孔大中间孔小的结果，影响产品性能。因此，可以考虑采用激光束蚀刻或微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)制造技术方法。同时，频率选择表面低损耗衬底材料配比研制也是频率选择表面研制的难点之一。

3) 馈源喇叭利用内部槽齿结构改变场的分布。准光学系统通常使用超高斯喇叭以获得良好的性能，在毫米

波和亚毫米波段,由于波纹微结构尺寸的减小、精确度以及表面粗糙度要求的提升,芯模加工难度急剧增大。电铸的系列工艺效应在面对细微尺度高深宽比的芯模结构时,会在微结构内部产生“囊腔”风险,馈源喇叭高精度膛铣与电铸技术研究,是实现高指标性能馈源喇叭国产化研制的难点。

4.2 太赫兹前端技术难点

目前太赫兹高频段无成熟可用低噪声放大器,肖特基势垒二极管组成的混频器在太赫兹频段芯片封装存在较大的寄生效应,这些引入的寄生参量很难进行理论分析,一般需建立精确的三维模型才能进行设计应用。目前国内研制单位采用多投入、精挑细选的方法解决上述问题,研制效率较低;同时,在太赫兹频段对芯片的装配精确度要求极高,如导电胶的厚度、位置等,需要研制经验的长期积累。

另一方面,相比地面应用,目前星载太赫兹产品需求量较小,前期需投入大量人力物力,暂未能形成规模化和产业化,开发、研制、生产成本较高,且存在芯片一致性较差、可靠性较低等问题。同时星载太赫兹前端后续还需重点解决内部芯片气密封装以及“氢中毒”效应等可靠性问题,以满足日益增长的星载产品长寿命、复杂环境使用需求。

5 星载太赫兹产品发展趋势

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。随着频率的升高和通道数目的增加,准光学技术越来越多地用于星载辐射计。此外,在深空探测、功率合成等领域,准光学技术均有应用。为适应日益迫切的星载应用要求,准光系统组部件的小型化、高指标、高可靠性是该领域日后发展趋势和国内相关单位攻关重心。

在星载辐射计应用中,太赫兹接收前端的发展趋势为:

1) 更低噪声^[17-18]。辐射计内部高灵敏度噪声接收机,其核心功能是将天线输入热噪声信号进行放大,要求其自身噪声温度低。目前低频段接收机噪声系数已达到极低的噪声水平,如10 GHz接收机噪声系数约1.5 dB,但太赫兹高频段噪声系数指标较高,如国内664 GHz接收机噪声系数接近12 dB,国外同频段星用先进产品噪声系数约10 dB,意味着辐射计接收机灵敏度有近50%的提升空间。

针对低噪声需求,除采用先进芯片、工艺等措施外,后续可考虑采用低温制冷方式,研制超导接收机。国外有采用低温超导技术研制的510 GHz前端,其噪声温度为95 K;电科16所已研制C频段低噪声放大器,噪声系数0.5 dB;804所联合南京大学等单位正在开展664 GHz高温超导接收机地面产品的研制,噪声系数可小于6.5 dB(1 000 K)。星载低温接收机前端需解决轻量化、低功耗、高可靠星载制冷机等工程应用难题。

2) 低功耗^[19-21]。辐射计除要求接收机噪声低外,还要求接收机自身温度波动小,一方面需要卫星有针对性地进行热控设计,一方面要求自身具有低功耗,缩短接收机性能稳定时间。

3) 长寿命抗辐照。目前我国大部分卫星均为长寿命设计,工作年限一般为8年以上,且不少为中、高轨道,空间环境复杂,要求辐射计接收机具有寿命长和抗辐照能力强等性能,如某在研静止轨道卫星项目,在整星已采取多种屏蔽措施的情况下,要求接收机抗辐照能力不低于60 krad(Si)。

6 结论

星载微波辐射计具有全球、全天时、全天候探测等优点,用于服务国家重大战略和国计民生,可有力支撑

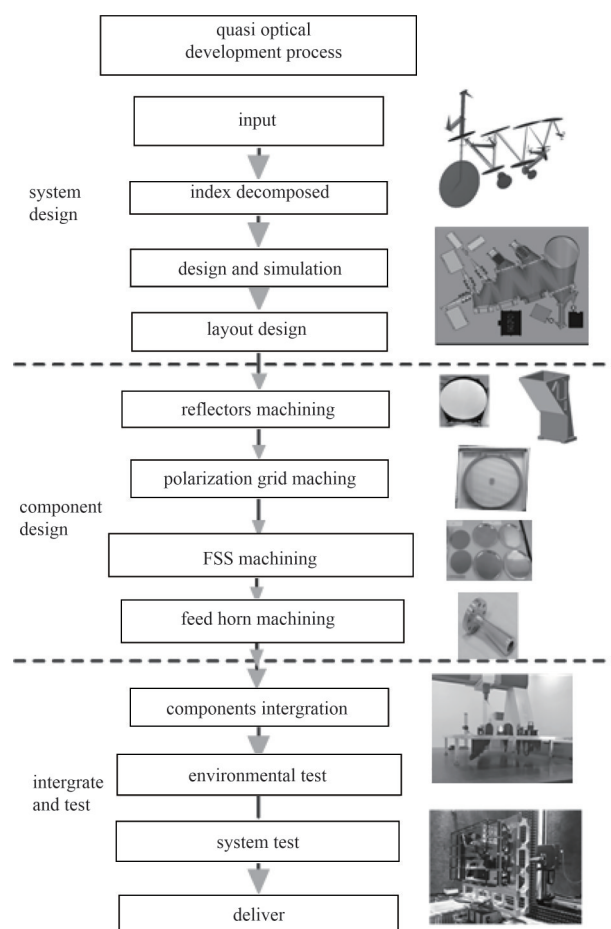


Fig.14 Flow of quasi-optical feed network manufacture

图14 准光学馈电网络研制流程图

航天强国和气象强国的建设。为进一步提升性能,星载微波辐射计不断朝太赫兹高频段和细分通道发展,目前已有多个在轨和在研产品。本文介绍了微波辐射计的组成和工作原理,以及主要技术指标,重点分析了国内星用准光组件(极化栅网、频率选择表面、馈源喇叭等)、接收机前端应用情况以及与国外同类技术(产品)的差异,在应用层面综合了星用太赫兹产品技术难点,梳理了星载太赫兹产品后续发展需求和应用展望,主要集中在低噪声、低功耗、长寿命等方面。太赫兹产品技术不断进步,将极大助力我国微波辐射计领域高质量发展。

参考文献:

- [1] 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 development of microwave radiometer[J]. Aerospace Shanghai, 2018,35(2):1-12). doi:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.001.
- [2] ULABY F T,MOORE R K,FUNK A K. Microwave remote sensing fundamentals and radiometry[M]. Massachusetts:Addison-Wesley, 1981:9-12.
- [3] SKOU N. Microwave radiometer design and analysis[M]. Norwood:Artech House, 1989:21-40.
- [4] GOLDSMITH P F. Quasioptical systems:Gaussian beam quasioptical propagation and applications[M]. New York:IEEE Press, 1998.
- [5] 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.
- [6] 刘小明,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.) doi:10.11805/TKYDA2021299.
- [7] 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.) doi:10.11805/TKYDA2018282.
- [8] 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.)
- [9] 吕利清,徐红新,栾英宏.一体化微波成像探测技术发展和展望[J].上海航天,2017,34(1):1-10. (LYU Liqing,XU Hongxin,LUAN Yinghong. Technology development and prospection of integrated microwave imager sounder[J]. Aerospace Shanghai, 2017,34(1):1-10.) doi:10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.01.001.
- [10] 胡伟东,季金佳,刘瑞婷,等.太赫兹大气遥感技术[J].中国光学,2017,10(5):656-663. (HU Weidong,JI Jinjia,LIU Ruiting,et al. Terahertz atmosphere remote sensing[J]. Chinese Journal of Optics, 2017,10(5):656-663.) doi:10.3788/CO.20171005.0656.
- [11] BEEGADA M,LABRIOLA M,GONZALEZ R,et al. The Ice Cloud Imager(ICI) preliminary design and performance[C]// 2016 the 14th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment(MicroRad). Espoo,Finland:IEEE, 2016:27-31. doi:10.1109/MICRORAD.2016.7530498.
- [12] 刘新.星载微波辐射计的设计及应用[D].上海:上海交通大学,2009. (LIU Xin. Design and application of the spaceborne microwave radiometer[D]. Shanghai,China:Shanghai Jiao Tong University, 2009.)
- [13] 刘戈.太赫兹辐射计前端关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2018. (LIU Ge. Research on the key technology of the terahertz radiometer front end[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)
- [14] 李树丹.220 GHz 辐射计前端关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2018. (LI Shudan. Research on key techniques of 220 GHz radiometer front end[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)
- [15] XUE W. W band broadband direct detection receiving front-end[D]. Chengdu, China: School of Electronic Science and Engineering, 2008.
- [16] 韦黔,陈迪,刘米丰,等.毫米波段多层介质型频率选择表面设计与仿真[J].上海航天,2017,37(4):164-169. (WEI Qian,CHEN Di,LIU Mifeng,et al. Design and simulation on millimeter wave multilayer frequency selective surface based on Mylar substrate[J]. Aerospace Shanghai, 2017,34(4):164-169.) doi:10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.020.

(下转第 999 页)