地球静止轨道微波辐射计技术

谢振超[1],李秀伟[2],姚崇斌[1],姜丽菲[1],李向芹[1]
(1. 上海航天电子技术研究所,上海 201109;2. 上海航天技术研究院,上海 201109)

摘　要:静止轨道微波辐射计可实现全天时、全天候、高频次云雨大气观测,在台风、流域性强降水探测和预报方面发挥重要作用。但在波束扫描、多频复用、系统定标等方面的运用存在较大困难,世界上尚无在轨应用先例。现从探测需求出发,对静止轨道微波辐射计进行了系统方案设计。提出了卫星平台与辐射计部件快慢结合扫描的方法,以解决波束扫描和系统定标难题;提出了低频选入射角层叠式布局准光学频段分离方法,以解决多频段复用难题。研制了微波辐射计原理样机,通过实验室和外场试验验证了系统设计,为静止轨道微波探测卫星研制提供了一定指导。

关键词:静止轨道;微波辐射计;波束扫描;准光学馈电;多频复用;系统定标;成像试验;灵敏度测试
中图分类号:P407.7　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.003

Research on Geostationary Orbit Microwave Radiometer Technology

XIE Zhenchao[1], LI Xiuwei[2], YAO Chongbin[1], JIANG Lifei[1], LI Xiangqin[1]
(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;
2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Geostationary orbit microwave radiometer can observe cloud, rain and atmosphere at high frequency in all-time and all-weather condition. It plays an important role in typhoon, basin area precipitation and weather forecast. Because of difficulties in application of beam scanning, multi-frequency complex and system calibration, no geostationary orbit microwave observation has been realized in the world. A whole GEO radiometer system is designed and a method of satellite platform slow scanning and radiometer fast scanning is put forward to solve the scanning and calibration problems simultaneously. A two-layer type and low frequency selective surface incident angle design is put forward to solve the multi-frequency feed problem. A prototype is manufactured and the system design is verified through laboratory and imaging test. The research is helpful for geostationary orbit microwave observation satellite development.

Keywords: geostationary orbit; microwave radiometer; beam scanning; quasi-optical feed; multi-frequency complex; system calibration; imaging test; sensitivity test

0　引言

静止轨道微波气象卫星采用被动微波遥感原理,可实现光学遥感和红外遥感所不具备的全天时、全天候观测[1],可实现极轨微波遥感所不具备的高频次观测,可对台风、流域性降水进行有效监测,同时获得大气温湿度廓线数据进行数值天气预报。

静止轨道微波辐射计技术是静止轨道微波气象卫星的重要技术,美国和欧洲都致力于发展该技术。美国开展了 GEM[2] 和 GeoStar[3-4] 项目的研究,GEM 采用孔径为 2 m 的卡塞格伦天线,考虑到频段内吸收系数峰值的强弱及受临近谱线干扰的程度,GEM 选择的频段为 54,118,183,380,425 GHz;GeoStar 采用固定式的 Y 形天线稀疏阵列的综合孔径微波辐射计方案,于 54 GHz 和183 GHz两个探测频点工作,每个探测频段约需 300 个单元的天线接收机,该项目完成了 54 GHz 地面缩比样机的研制。欧洲开展了 GO-

收稿日期:2017-11-20;**修回日期**:2018-01-08
作者简介:谢振超(1982—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为微波辐射计技术。

MAS[5-6]和 GAS 项目的研究，GOMAS 完全涵盖了 GEM 的概念，采用实孔径的技术体系，选择 54，118，183，380，425 GHz 作为静止轨道微波探测的预选频点；GAS 项目由欧洲航空局资助，于 2007 年底完成地面原理样机的研制，为减少天线阵列单元和接收机数量，GAS 项目采用自旋的 Y 形天线阵列旋转成像，频率为 54～380 GHz，每个探测频段所需的天线单元数约为 100 个。由于该技术难度巨大，美国与欧洲均未启动星载项目。

静止轨道微波辐射计的主要功能是：通过地球静止轨道全天时、全天候、高频次对大气进行三维观测，开展台风跟踪监测，提高台风路径、强度预报的准确性；用于流域性强降水观测和预报；对大气温度廓线、湿度廓线进行探测，满足全球数值和区域数值预报的需求。

静止轨道微波辐射计不同于极轨辐射计，需进行二维波束扫描。由于星下圆盘内指定区域需要高时间分辨率探测，传统逐行机械扫描方式需要整个载荷实现极快的运动速度，这将给平台带来 10 N•m 以上量级力矩干扰，使平台无法补偿。由于轨道高度高，为提高空间分辨率，辐射计探测频段需达到毫米波和亚毫米波，如采用阵列电扫的方式，难以控制振元相位的一致性，由此将严重影响探测精度，亦无法使用。仪器覆盖范围宽，且需要在卫星有限的空间包络内实现，频段的数量与布局空间局限性难以兼顾。与此同时，在辐射计二维扫描中，难以找到实时定标窗口，而定标频次过低又将严重影响观测精度。静止轨道微波辐射计的主要技术指标如下。

1）工作频段：50 ～ 60，89，118，166，183，425 GHz；

2）空间分辨率：50 km（地球静止轨道）；

3）扫描干扰力矩：≤0.2 N•m；

4）主波束效率：≥90%；

5）灵敏度：≤0.5 K（50～60 GHz），≤1.0 K（118 GHz），≤1.8 K（425 GHz）。

由以上分析和技术指标可见，只有解决静止轨道微波辐射计波束扫描、多频段复用、系统定标等难题，静止轨道微波遥感载荷才具有工程实现的可能。

本文首先对静止轨道微波探测需求进行分析，给出建议探测频段，然后对载荷系统组成进行设计，并针对波束扫描、多频段复用、系统定标等问题提出相应的解决方案，最后通过原理样机测试对方案进行验证，并给出结论。

1　静止轨道微波探测需求分析

由于强对流天气的典型生命史仅有 5～6 h，往往会在短时间内形成灾害性的天气，影响人们的生活，因此台风路径预测、流域性降水连续跟踪是气象预报和监测的重点项目。然而，较长的重访周期限制了极轨气象卫星载荷探测资料在灾害性天气监测预警中的作用，静止轨道光学气象载荷无法全天时、全天候提供大气三维内部结构信息。因而，发展静止轨道微波探测载荷可以有效提升我国应对台风、流域性降水等灾害性气候的能力。

静止轨道微波辐射计利用大气吸收频段可进行温湿度廓线探测，利用窗口频段地表辐射进行订正和降水探测。图 1 为微波大气吸收谱线图，共有 10 个频段可供选择：23.8，31.4，54，89，118，166，183，340，380，425 GHz。除 118 GHz 和 340，380，425 GHz 3 个亚毫米波段外，其余频段均为先进技术微波辐射计（Advanced Technology Microwave Sounder，ATMS）已有频段，具备国际上成熟的产品反演和应用方式，便于产品的检验、交叉定标和推广应用。

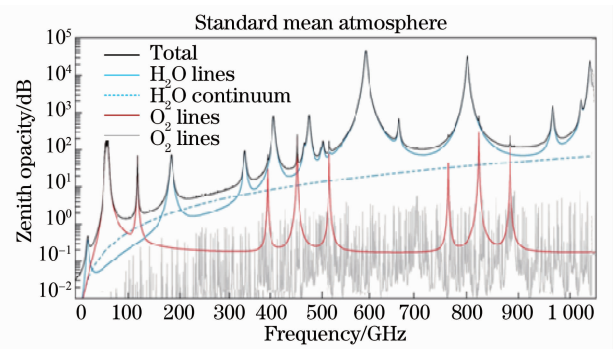

图 1　微波大气吸收谱线图

Fig.1　Absorption line of atmosphere at microwave frequency graph

以下从应用出发，对静止轨道微波辐射计工作频段进行分析。54，118，425 GHz 为氧气吸收频段，23.8，183，380 GHz 为水汽吸收频段，31.4，89，166，340 GHz 为窗区或准窗区频段。

23.8 GHz 为水汽总量探测频段，31.4 GHz 为 23.8 GHz 的辅助地表辐射订正通道，因此 23.8，31.4 GHz 主要探测大气中水汽总量，对台风和流域性降水探测作用不大。54 GHz 频段为大气温度廓线频段，是最为重要的温度廓线频段，可通过观测大气温度廓线获得台风内部温度分布。89 GHz 为

地表辐射订正频段，可利用水滴对辐射的散射作用观测降水及台风发生时的螺旋雨带，同时可用于地标导航。118 GHz 为大气温度廓线频段，可对中层大气温度廓线进行探测。166 GHz 频段为准窗区通道，可用于水汽廓线探测，同时可用作台风螺旋雨带观测，也可用于地标导航。183 GHz 频段为中低层大气湿度廓线探测频段，是最为重要的湿度廓线频段，可观测大气湿度廓线。380 GHz 为大气湿度廓线探测频段，对水汽探测有一定帮助，但作用有限。340 GHz 为 380 GHz 的背景微波辐射订正通道。由于 340，380，425 GHz 亚毫米波段国际上目前没有应用模式，425 GHz 为大气温度廓线探测，可与 54 GHz 联合提高空间分辨率，观测顶层冰云，对台风观测具有一定作用，因此亚毫米波段选择 425 GHz 开展在轨应用研究。各频段用途及重要性分析如表 1 所示。

根据以上分析，建议选择 54，89，118，166，183，425 GHz 6 个频段作为静止轨道辐射计工作频段。

表 1 地球静止轨道微波辐射计频段选择分析

Tab.1 Geostationary orbit microwave radiometer frequency analysis

频段/GHz	用途	重要性
23.8	水汽总量探测	用于水汽总量探测，对台风、降水等灾害性天气预报作用有限，可由低轨卫星载荷探测替代
31.4	地表辐射订正	
54	大气温度廓线探测	最为重要，可观测大气温度廓线，尤其可全天时、全天候观测台风、降水等内部温度三维立体分布
89	地表辐射订正、地标导航通道	可观测流域性降水、台风螺旋雨带，可用于图像导航配准
118	大气温度廓线、湿度廓线探测	可对中层大气温度廓线进行探测，观测流域性降水和弱降水
166	准窗区通道、地标导航通道	可观测流域性降水、台风螺旋雨带，可用于图像导航配准
183	中层大气湿度廓线探测	最为重要，可观测大气湿度廓线，尤其可全天时、全天候观测台风、降水等内部湿度三维立体分布
340	背景微波辐射订正	与 380 GHz 配合使用
380	大气湿度廓线探测	对水汽探测有一定作用，但作用有限
425	中高层大气温度廓线探测	分辨率高，可与 54 GHz 联合观测立体温度分布，可观测中上层冰云，对台风、降水观测具有一定作用

2 静止轨道微波辐射计系统组成

静止轨道微波辐射计采用电大尺寸天线，六频段复合准光学馈电网络，载荷整体二维慢运动与载荷运动部件一维快运动结合波束扫描，定标与快扫描同周期、共活动部件方案。系统由天线、定标、准光学馈电网络、接收机、信息处理、热控等 6 个子系统组成[7]。载荷系统组成如图 2 所示。

场景辐射亮温信号首先进入天线子系统，通过天线子系统各反射面依次反射后，进入定标子系统。定标子系统将热参考源、冷参考源、场景不同位置的辐射亮温信号周期性馈入准光学馈电网络，其中冷空定标镜反射冷空信号作为冷参考源，温度为 2.7 K，热参考源由高发射率、物理温度精密受控材料制成。准光学馈电网络系统通过频率选择表面、极化栅网等部件将信号进行频段、极化分离，通过反射镜进行波束反射与聚焦后，分频段、极化馈入各频段接收机。接收机通过低噪声放大、混频、功分、滤波、检波、积分、低频放大后将各频段、各通道辐射能量转换成对应电压值，并输入信息处理子系统。信息处理单元对信号进行采样和组帧，通过卫星数传分系统传输到地面接收站。

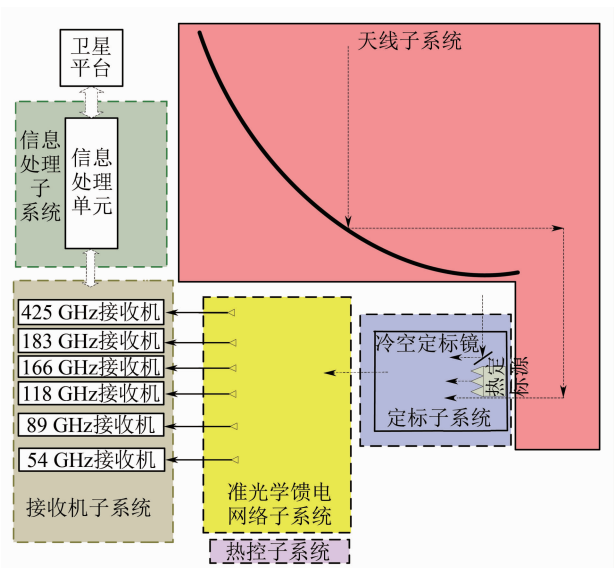

图 2 地球静止轨道微波辐射计系统组成图

Fig.2 Composition of geostationary orbit microwave radiometer

针对载荷波束扫描、多频段复用、系统定标等问题进行研发攻关，研制 1 m 口径波束扫描原理样机和接收定标原理样机进行技术验证，样机具体指标如表 2 和表 3 所示。

表 2　波束扫描原理样机性能指标表

Tab.2　Specifications of beam scanning principle prototype

指标名称	指标要求
工作频段	(89±1.5) GHz
口径	1 m
扫描角度	轴向扫描角度为 0.9°(对方位角为 0°,45°,90°,180°时进行考核)
扫描干扰力矩	≤0.2 N·m
波束宽度	≤0.3°
主波束效率	≥90%
扫描角度内性能一致性	方向系数起伏<1 dB

表 3　接收定标原理样机性能指标表

Tab.3　Specifications of receiver calibration principle prototype

频率/GHz	插入损耗/dB	灵敏度/K
118	≤1.5	≤1
425	≤1.5	≤1.8

3　静止轨道微波辐射计关键技术研究

3.1　波束扫描技术

在传统的机械扫描方式中，由伺服驱动机构带动天线、定标、准光学馈电网络和接收机子系统一起运动。由于静止轨道微波辐射计需要对地二维扫描，时间分辨率高，如采用这种扫描方式，运动部分的质量大、速度快，产生的干扰力矩极大，将超出星载可实现补偿的范围，故无法采用。如完全靠天线系统中小质量部件运动实现波束扫描，最直接的办法就是采用抛物面天线并移动馈源[8-9]。然而随着频段的增高和口径的增大，天线方向图恶化较为严重。以抛物面作为主反射面的双反射镜天线中，由于使用了双反射镜系统，其扫描范围相较单反射面天线增大，但当主反射面焦径比小于 0.5、且需扫描 7 个波束宽度以上时，性能恶化更严重[10-11]。另一种方式是使用馈源阵列加反射面进行电扫描，这种方式的优势是最大扫描角与反射面尺寸及天线增益无关[12]。然而由于辐射计频段达到亚毫米波段，各频段阵列馈电网络损耗极大，且保持相位精度十分困难，因此也不适用。

为解决静止轨道微波遥感载荷窄波束、大范围、低扰动力矩扫描等难题，实现辐射计高主波束效率观测、高时间分辨率两维波束扫描，设计了载荷整体二维慢运动与天线部件一维快运动结合的波束扫描方式，辐射计整体作慢速运动，完成东西方向循环往返、南北方向步进的二维粗扫描；同时天线中运动部件作快速运动，形成圆环形细扫描。

载荷整体作二维慢运动，具体过程如下：先在东西方向加速运动，然后进入东西方向匀速运动结合快扫描形成一个由部分圆环组成的扫描条带，此后再于东西方向作减速运动。在东西方向加速和减速时间内，南北方向步进一个条带位置(含加减速时间)。扫描一个条带后，东西方向再反向扫描形成另一个条带，重复以上步骤直至完成全区域扫描。

由于快扫描周期仅为秒级，扫描速度快且活动部件质量小，载荷整体运动速度仅为 0.01(°)/s 左右即可满足观测时间分辨率要求，形成的干扰力矩小于 0.2 N·m。扫描轨迹示意如图 3 所示。

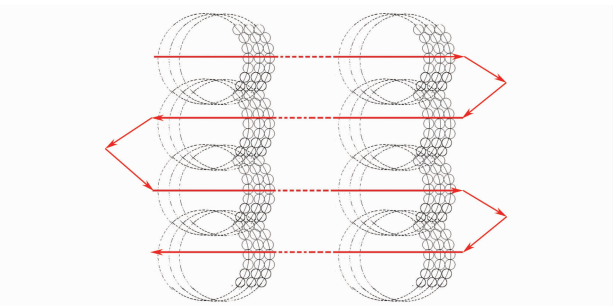

图 3　扫描轨迹示意图

Fig.3　Scanning trajectory of radiometer

场景辐射电磁波在天线子系统内变化的理论计算方法如下：设 $\boldsymbol{E}_{0,\theta_p,\varphi_q}$、$\boldsymbol{H}_{0,\theta_p,\varphi_q}$ 分别为辐射计天线口面$\{\theta_p,\varphi_q\}$($p=1,2,\cdots,P$；$q=1,2,\cdots,Q$)方向入射的平面波在天线主反射面处的电场强度和磁场强度，P 为扫描锥角计算个数、Q 为周向计算点数，$\boldsymbol{E}_{0,\theta_p,\varphi_q}$，$\boldsymbol{H}_{0,\theta_p,\varphi_q}$ 表达式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{E}_{0,\theta_p,\varphi_q}(r)=E_0\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}}\\ \boldsymbol{H}_{0,\theta_p,\varphi_q}(r)=\dfrac{E_0}{\eta_0}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}}\end{cases}\tag{1}$$

其中

$$\boldsymbol{k}=-\hat{\boldsymbol{x}}\cos\theta-\hat{\boldsymbol{y}}\sin\theta\cos\varphi-\hat{\boldsymbol{z}}\sin\theta\sin\varphi\tag{2}$$

式(1)中：E_0 为电场强度大小；η_0 为自由空间波阻抗；$\boldsymbol{k}$ 为传播矢量；$\boldsymbol{r}$ 为位移矢量；下标 θ_p，φ_q 表示入射平面波的锥角 θ_p 和方位角 φ_q。式(2)中：$\hat{\boldsymbol{x}}$、$\hat{\boldsymbol{y}}$、$\hat{\boldsymbol{z}}$ 为直角坐标系单位矢量。

设天线共有 M 个反射面，如图 4 所示。由于各反射面电尺寸大，第 $m+1$ 个反射面的反射场$\{\boldsymbol{E}_{m+1,\theta_p,\varphi_q},\boldsymbol{H}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}\}$($m=0,1,\cdots,M-1$)可采用

物理光学法由第 m 个反射面的入射场$\{\boldsymbol{E}_{m,\theta_p,\varphi_q},\boldsymbol{H}_{m,\theta_p,\varphi_q}\}$计算获得，具体公式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{J}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}=2\boldsymbol{n}_{m+1}\times\boldsymbol{H}_{m,\theta_p,\varphi_q}\\ \boldsymbol{A}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}=\dfrac{\mu_0}{4\pi}\iint\limits_{B_{m+1}}\boldsymbol{J}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}(\boldsymbol{r}')\dfrac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR}}{R}\mathrm{d}s'\\ \boldsymbol{E}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}=-\mathrm{j}\omega\left[\boldsymbol{A}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}+\dfrac{1}{k^2}\nabla(\nabla\cdot\boldsymbol{A}_{m+1,\theta_p,\varphi_q})\right]\\ \boldsymbol{H}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}=\dfrac{1}{\mu_0}\nabla\times\boldsymbol{A}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}\end{cases}\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{J}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}$为第 $m+1$ 个反射面上的面电流；$\boldsymbol{n}_{m+1}$为第 $m+1$ 个反射面的法矢量；$\boldsymbol{A}_{m+1,\theta_p,\varphi_q}$为电矢位；$\boldsymbol{r}'$为坐标原点到源点的矢量；$\boldsymbol{R}$ 为源点到场点的矢量(R 为其大小)；k 为传播矢量的模；μ_0 为真空中磁导率；$\mathrm{d}s'$为面积分单位面元；ω 为工作角频率。

天线波束扫描可根据以下步骤设计与实现：

1)在微波辐射计天线口面，根据式(1)、式(2)设置各入射角$\{\theta_p,\varphi_q\}$($p=1,2,\cdots,P$；$q=1,2,\cdots,Q$)下的平面波入射场。

2)根据式(3)，依次计算平面波经过天线各反射面后的电场与磁场$\{\boldsymbol{E}_{m,\theta_p,\varphi_q},\boldsymbol{H}_{m,\theta_p,\varphi_q}\}$。

3)求出接收平面上最大反射电场$|\boldsymbol{E}_{M,\theta_p,\varphi_q}|$对应的点 F_{θ_p,φ_q}，下标 θ_p，φ_q 表示入射平面波的锥角 θ_p 和方位角 φ_q(见图 4)。

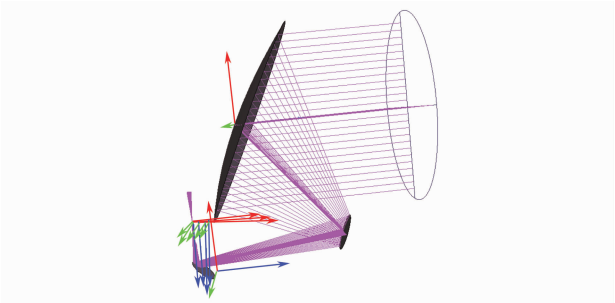

图 4 接收平面最大反射电场对应点示意图

Fig.4 Corresponding points of maximum reflected electricity field in receiving plane

4)将不同入射角度下的 F_{θ_p,φ_q} 拟合成圆周，此圆周即为环形区域内各足迹辐射能量依次通过辐射计天线接收后的聚焦点运动轨迹。

5)设计具有能量传播方向偏轴变换功能的运动部件(见图 5)，使部件运动时圆周上各点的能量均可聚束到固定的馈电位置，即可实现波束环形细扫描。通过载荷辐射性能仿真计算，可求出载荷辐射性能处于指标临界状态时的锥角 θ_P，θ_P 即为最大扫描锥角，对应可实现最大圆环半径。

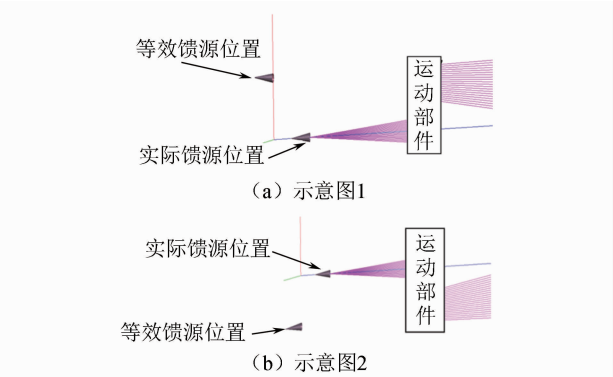

图 5 具有能量传播方向偏轴变换功能的运动部件

Fig.5 Move part which can change direction of energy

研制了一台包含天线主反射面、第一副反射面、第二副反射面、运动部件、测试馈源的波束扫描原理样机，通过尺寸大小为 200 mm × 200 mm × 240 mm，质量为 2 kg，转动惯量为 0.2 N·m 的运动部件，实现了天线波束偏轴 0.9°锥角的圆周扫描，配合载荷整体二维慢速扫描可实现对星下圆盘任意区域扫描覆盖。

3.2 系统定标技术

微波辐射计一般需要秒级定标周期，以修正辐射计接收电平随环境的变化，获得亮温与电压准确的对应关系。微波辐射计定标可分为内定标和外定标两种方式，由于静止轨道微波辐射计最高工作频段需达到亚毫米波段，当前内定标部件尚未成熟应用于该频段，故宜采用外定标方式。在外定标中又可分为天线口面和馈源口面定标，天线口面定标需要研制和天线口径大小相同的热反射镜和冷空反射镜，系统包络尺寸大大增加，故宜采用馈源口面定标。

由于载荷工作于地球静止轨道，需连续二维扫描，如对某个区域完成扫描观测后再进行定标，则 2 次定标间隔时间达到分钟级，影响定标精度。为实现系统秒级周期定标，在不增加额外装置的条件下，设计了与快扫描同周期、共活动部件的系统定标方案。利用天线波束扫描部件的圆周运动，实现在场景、冷、热定标源之间的观测切换。冷空定标镜以反射宇宙背景微波辐射信号作为冷参考源，温度约为 2.7 K。热参考源由反射率已知的材料组成，通过控制其物理温度作为热定标源。将冷空反射镜和

热源安装在接收平面的能量聚焦圆周上，通过计算电磁场束腰宽度得出冷镜与热源的最佳尺寸。在快扫描 360°圆周中，根据慢扫描粗条带宽度确定用于场景观测的角度范围，同时确定两个角度范围分别用于冷、热定标，由此实现快扫描与系统定标结合。由于子扫描周期为秒级，即实现了秒级周期定标，扫描定标区域如图 6 所示。

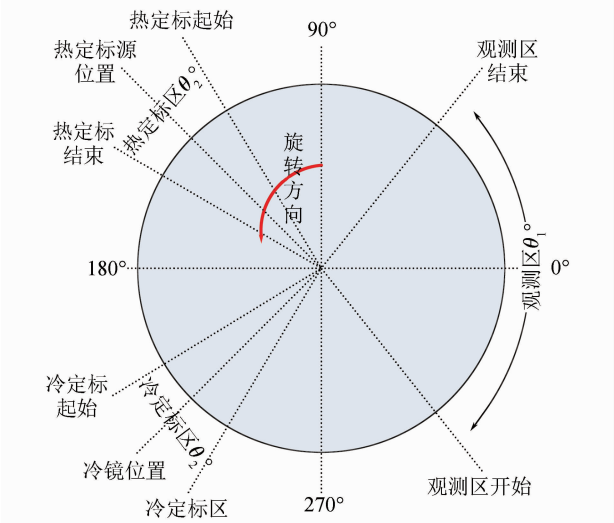

图 6　扫描定标区域示意图

Fig.6　Scanning and calibration area diagram

定标装置如图 7 所示。每个扫描周期热定标源提供的热定标信号、冷空反射镜组合提供的冷定标信号和主反射面接收到的观测目标信号通过运动部件反射至准光学网络，从而达到对接收的地面遥感信息进行标定的目的。定标实现步骤如下：

1）当波束照射至热定标源时，热定标源的热辐射通过运动部件馈入准光学网络和接收机，从而获得高温定标信号。

2）当波束照射至冷空反射镜时，宇宙背景辐射通过冷空反射镜反射到运动部件再馈入准光学网络和接收机，这时接收机接收到的是宇宙背景辐射亮温，用作低温定标信号。

3）当波束照射至天线时，天线接收大气和地球表面的微波辐射能量，通过获得的高、低温定标信号对其定标，通过反演获得场景信息。

研制包括 54～425 GHz 准光学馈电网络、118 GHz接收机、425 GHz 接收机、54～425 GHz 热定标辐射源及载荷运动部件、冷空定标镜、信息单元等的接收及定标原理样机，样机按照预定工作时序依次接收观测场景辐射、宽口径冷定标辐射源辐射

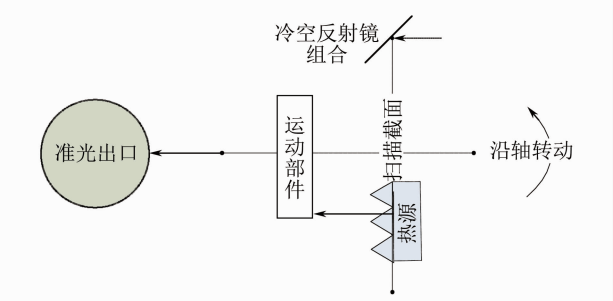

图 7　定标装置示意图

Fig.7　Schematic diagram of calibration sub-system design

和热定标辐射源辐射，辐射信号经准光学馈电网络传输并馈送至各接收系统中进行处理。

3.3　频段复用技术

辐射计共有 54，89，118，166，183，425 GHz 6 个频段，需要设计合适的频段分离方案，使各通道场景辐射低损耗地馈入各频段接收机。准光学馈电网络设计过程中，为避免波束发生畸变，频率选择表面及反射镜应尽可能小角度入射，并采用平面镜将部分频段折返，以实现双层结构设计，使准光学馈电网络布局更加紧凑。

馈电网络在 1 200 mm×1 000 mm×350 mm 空间范围内实现了 54～425 GHz 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。采取先粗分毫米波与亚毫米波频段，后细分各频段的分离次序，使每个频段透射的频率选择表面次数最少。为保证系统灵敏度，要求各频段插入损耗小，设计了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。具体分离方案如下：

1）采用频率选择表面 FSS1 分离 425 GHz 波束和 54～183 GHz波束。

2）采用频率选择表面 FSS2 分离 166～183 GHz波束和 54～118 GHz波束，其中 166 GHz 和 183 GHz 波束经平面镜折返到另外一层，并用极化栅网进行分离。

3）采用频率选择表面 FSS3 分离 54 GHz 波束和 89～118 GHz 波束，其中 89 GHz 和118 GHz 波束经平面镜折返到另外一层，并用极化栅网进行分离，FSS1、FSS2、FSS3 入射角均小于 20°。

准光学馈电网络设计模型图如图 8 所示。

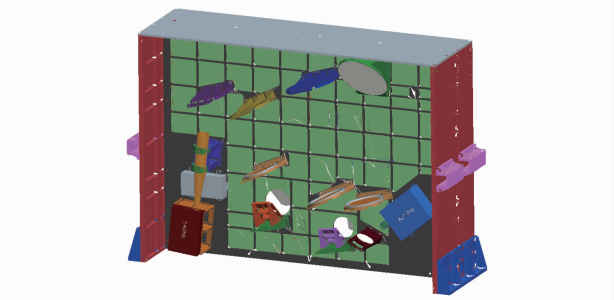

图 8 准光学馈电网络结构模型

Fig.8 Structure model of quasi-optical feed network

4 试验验证

研制了波束扫描原理样机和接收及定标原理样机，完成波束扫描原理样机的外场成像试验、辐射方向图测试，获得微波图像和天线波束扫描各角度时的辐射方向图，并对波束扫描方法进行定性和定量验证；研制了接收及定标原理样机，完成接收及定标样机定标试验，通过测试 118，425 GHz 频段通道插入损耗和灵敏度，对准光学馈电技术和系统定标技术进行定量验证。

4.1 外场成像试验验证

为验证波束扫描方式，研制了 1 m 口径的波束扫描原理样机，完成了辐射计外场成像。通过扫描转台驱动载荷整体二维扫描运动，扫描驱动控制器控制天线运动部件进行快扫描运动，并使快慢扫描同步，探测获得微波图像。对探测距离 1.2 km 楼群场景进行观测，获得的微波图像显示，楼顶部与天空分界明显，楼群特征清晰，数量与实际完全一致，如图 9 所示，验证了平台与载荷快慢结合扫描方案的准确性。

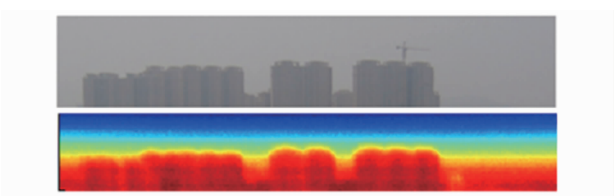

图 9 系统外场成像试验

Fig.9 Building observation test using prototype

4.2 天线辐射方向图测试

对波束扫描原理样机的辐射方向图进行测试，验证了各扫描位置天线性能指标的符合性。采用天线近场测试法，对波束扫描方位角为 0°，45°，90°，180°时的方向图进行测试，如图 10 所示。天线测试结果如图 11 所示。

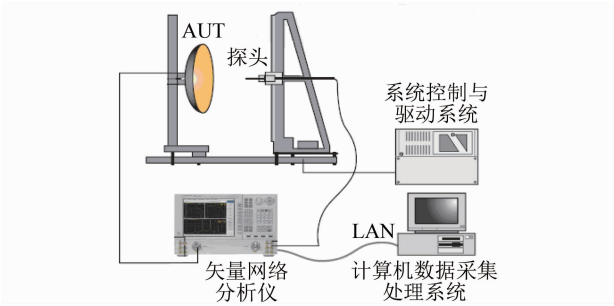

图 10 系统方案验证样机方向图测试

Fig.10 Antenna pattern test of prototype

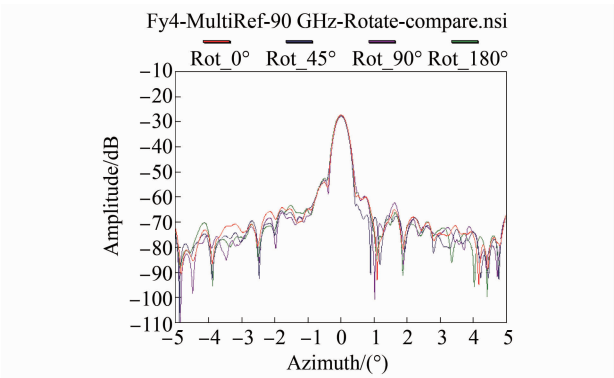

图 11 各扫描角度天线方向图

Fig.11 Antenna patterns of different scanning angles

波束扫描原理样机各项技术指标符合性如表 4 所示。

研制波束扫描原理样机并进行方向图测试，实测值与指标要求值一致，各扫描角度方向图一致，主波束效率均大于 94%（主波束效率为主波束内辐射能量与全空间能量之比[13-14]），验证了快慢结合扫描方案。未来对亚毫米波段的测试也可采用三反射面紧缩场测试法[15]。

4.3 定标试验

研制 54～425 GHz 准光学馈电网络、118 GHz 接收机、425 GHz 接收机、54～425 GHz 热定标辐射源以及载荷运动部件、冷空定标镜、信息单元，并集成毫米波和亚毫米波接收及定标原理样机。利用宽口径冷定标辐射源和仪器自带热源对系统的灵敏度进行了测试（同时可用 Y 因子法计算出准光学馈电网络插入损耗），如图 12 所示。各通道灵敏度满足指标要求，如表 5 所示。

表 4　测试结果指标符合性表

Tab.4　Antenna pattern test result

指标名称	指标要求	实测量		符合性
工作频段	(89±1.5) GHz	(89±1.5) GHz		符合
口径	1 m	1 m		符合
扫描角度	轴向扫描角度为 0.9°(方位角为 0°，45°，90°，180°时进行考核)	轴向扫描角度实测为 0.9°(方位角为 0°，45°，90°，180°)		符合
扫描干扰力矩	≤0.2 N·m	0.12 N·m		符合
波束宽度	≤0.3°	方位角 0°	0.29°	符合
		方位角 45°	0.29°	
		方位角 90°	0.28°	
		方位角 180°	0.29°	
主波束效率	≥90%	方位角 0°	96.6%	符合
		方位角 45°	95.2%	
		方位角 90°	94.5%	
		方位角 180°	94.4%	
扫描角度内性能一致性	方向系数起伏<1 dB	方向系数最大起伏为 0.38 dB		符合

图 12　毫米波和亚毫米波接收定标样机灵敏度测试图

Fig.12　Sensitivity test of millimeter wave and submillimeter wave receiver calibration prototype

测试结果显示，系统运动部件旋转 1 周时间为 2.3 s，实现了秒级定标的要求。118，425 GHz 频段的插入损耗均低于 1.5 dB，系统灵敏度优于 1 K 和 1.8 K，均满足指标要求。验证了系统频段复用和系统定标技术的符合性。

5　结束语

在对地球静止轨道微波辐射计探测需求分析的基础上，给出了地球静止轨道微波辐射计建议频段，设计了系统总体方案，并对大口径低干扰力矩天线波束扫描、系统定标、多频段准光馈电网络等关键技术进行了研究，同时给出了方案验证样机测试与成像结果。成像试验获得了与场景一致的微波图像，方向图测试中 89 GHz 频段各扫描角度方向图一致，并获得了大于 90%的主波束效率。虽然受限于研制费用和测试条件，目前在实物中只实现和测试了部分频段(包含最高频段)，但对关键技术的解决方法已实现了验证，为静止轨道微波探测卫星研制打下了坚实的基础。

表 5　毫米波和亚毫米波接收定标样机灵敏度指标测试结果

Tab.5　Sensitivity test results of millimeter wave and submillimeter wave receiver calibration prototype

频率/GHz	通道	插入损耗/dB	灵敏度指标要求值/K	灵敏度验收值/K	符合性
118	通道 1	≤0.2	≤1	0.86	符合
	通道 2			0.57	符合
	通道 3			0.53	符合
	通道 4			0.54	符合
	通道 5			0.84	符合
	通道 6			0.65	符合
	通道 7			0.50	符合
425	通道 1	≤1.36	≤1.8	≤1.8	符合
	通道 2			≤1.4	符合
	通道 3			≤1.2	符合

探测仪原理样机天线口径为 1 m，如需实现引言中提出的 54 GHz 频段、50 km 空间分辨率指标，后续需研制 5 m 口径天线系统，天线主反射面电尺寸达到 7 000 倍波长，静止轨道温度变化范围较大，达到－150～120 ℃，因此还需攻关大口径高精度天线反射面加工制造、热变形控制等关键技术，使微波辐射计在轨实现要求的空间分辨率。

在大口径天线系统研制完成后，考虑到各部件相对位置的高精度集成要求，及高频段大口径系统辐射性能测试要求，还需对大尺寸高频段微波辐射计高精度集成、测试技术进行研究。

在上述两方面技术攻关完成后，静止轨道微波辐射计即完成全部攻关工作，具备工程研制条件。

参考文献

[1] 乌拉比 F T，穆尔 R K，冯健超. 微波遥感[M]. 侯世昌，马锡冠，译. 北京：科学出版社，1988：13-37.

[2] GASIEWSKI A J，VORONOVICH A，WEBER B L，et al. Geosynchronous microwave (GEM) sounder/imager observation system simulation[C]// International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)，2003 IEEE International，Toulouse，2003：1209-1211.

[3] TANNER A B，WILSON W J，LAMBRIGSTEN B H，et al. Initial results of the geostationary synthetic thinned array radiometer (GeoSTAR) demonstrator instrument[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2007，45(7)：1947-1957.

[4] LIM B，GAIER T，KANGASLAHTI P，et al. Initial results from the GeoSTAR-Ⅱ laboratory demonstrator[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)，2012 IEEE International，Munich：[s. n.]，2012：1282-1285.

[5] PINORI S，BAORDO F，MEDAGLIA C M，et al. On the potential of sub-mm passive MW observations from geostationary satellites to retrieve heavy precipitation over the Mediterranean Area[J]. Advances in Geosciences，2006(7)：387-394.

[6] BIZZARRI B. Initiatives for millimetre/submillimetre wave sounding from geostationary orbit[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)，2002 IEEE International，Toronto：[s. n.]，2002：548-552.

[7] XIAO H，XIE Z C，CHEN L. Primary design of millimeter and sub-millimeter wave sounder for GEO meteorological satellite[C]// The 4th CSA-IAA conference，Chinese Society of Astronautics and International Academy of Astronautics，Shanghai：[s. n.]，2011：60-61.

[8] MRSTIK A. Scan limits of off-axis fed parabolic reflectors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation，1979，27(5)：647-651.

[9] RUZE J. Lateral-feed displacement in a paraboloid [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation，1965，13(5)：660-665.

[10] LANG K，FORMAN B. Experimental study of scanning characteristics of an offset Cassagrainian reflector antenna[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium，Stanford：[s. n.]，1977：545-548.

[11] RAHMAT-SAMII Y. Subreflector extension for improved efficiencies in Cassegrain antennas-GTD/PO analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation，1986：1266-1269.

[12] MRSTIK A V，SMITH P G. Scanning capabilities of large parabolic cylinder reflector antennas with phased-array feeds[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation，1981：455-462.

[13] 叶云裳. “神舟四号”飞船微波辐射计天线的主波束效率[J]. 空间科学学报，2003，23(6)：459-466.

[14] RUZE J. Antenna tolerance theory：a review[J]. Proceedings of the IEEE，1966，54(4)：633-640.

[15] LIU X M，MAI Y，SU H S. Tri-reflector compact antenna test range design at high frequency[J]. Terahertz Science and Technology，2011，4(1)：20-24.