

文章编号: 1672-8785(2022)03-0040-13

## 欧空局地球远红外辐射监测 FORUM 任务 红外有效载荷研究进展

陆 燕 王媚君 葛逸伦 许 晨

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 对地观测任务“远红外出射辐射认知和监测(Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring, FORUM)”在 2019 年被选定为欧洲空间局(European Space Agency, ESA)“生命的行星计划”中“地球探测器”的第 9 个任务。FORUM 任务的目标是测量大气平流层和对流层在  $100\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ (即  $6.25\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ )范围内的远红外发射光谱,其红外有效载荷包括非成像的傅里叶变换光谱仪——FORUM 探测仪(FORUM Sounding Instrument, FSI)和 FORUM 嵌入式成像仪(FORUM Embedded Imager, FEI)。在 A/B1 阶段方案研究期间,ESA 分别投资了两个团队,开展了 A、B 两个方案研究。空客防务航天公司(Airbus Defence and Space GmHB, ADS)牵头 A 方案,泰雷兹阿莱尼亚空间英国有限公司(Thales Alenia Space Ltd-UK, TAS-UK)牵头 B 方案。本文重点介绍了 TAS-UK 的 B 方案中 FSI 和 FEI 两台红外有效载荷在 B1 阶段进行的设计及关键技术研究状况。

**关键词:** 远红外辐射监测; 红外有效载荷; 红外遥感仪器

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.03.006

### Development of FORUM Payloads in ESA

LU Yan, WANG Mei-jun, GE Yi-lun, XU Chen

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In 2019, the FORUM (Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring) mission has been selected by the ESA as the ninth mission Earth Explorer in the Living Planet Programme. It will measure the emission spectrum of the Earth's stratosphere and troposphere in the spectral range of 100 to 1600  $\text{cm}^{-1}$  (i. e.  $6.25\text{ }\mu\text{m}$  to  $100\text{ }\mu\text{m}$ ). The FORUM space segment consists of a single satellite carrying two optical instruments: the FORUM Sounding Instrument (FSI) and the FORUM Embedded Imager (FEI). The primary optical instrument is an infrared-atmospheric-sounder Fourier transform spectrometer. During the FORUM phase A/B1, studies have been led by Airbus Defence and Space (UK) and Thales Alenia Space Ltd (UK) as mission prime contractors, with concept A and concept B respectively. This paper will describe the design and key technology research progress of concept B of the FSI and FEI.

**Key words:** far-infrared radiation monitoring; infrared payload; infrared remote sensing instrument

收稿日期: 2022-02-16

作者简介: 陆燕(1965-),女,上海人,研究员,主要从事空间制冷、低温光学热控以及空间红外遥感方面的研究。  
E-mail: luyan420@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

“地球探测器”计划是 ESA “生命的行星规划”中的一部分,旨在解决关键的科学挑战,同时展示地球观测方面的突破性技术。2019 年,ESA 选定 FORUM 任务作为“地球探测器”的第 9 个任务<sup>[1]</sup>,同时指定两个独立工业联盟同时开展可行性研究<sup>[2-3]</sup>。在 2019 年 7 月于英国剑桥举行的用户咨询会议上,A 阶段结束时,FORUM 任务被推荐作为 ESA 第 9 个“地球探测器”任务实施。该建议在 2019 年 9 月得到了地球观测项目委员会的认可,并转入 B1 阶段。作为深化方案研究的 B1 阶段,继续由前期 A 阶段的两个团队同时开展:一是提出 A 方案的空客防务与航天公司,其平台继承“哨兵-5P”的六棱柱外形。二是共同提出 B 方案的泰雷兹阿莱尼空间英国有限公司以及 OHB 系统有限公司。前者负责任务总体方案和平台,后者主要负责有效载荷。B 方案的平台继承了“哨兵-3”卫星。

FORUM 任务将首次观测地球出射长波辐射(Outgoing Long-wave Radiation, OLR)在红外光谱中的分布,包括波数为  $100\sim 667\text{ cm}^{-1}$  的远红外波段。在之前的“地球探索者”任务背景下,这些测量具有自身的价值。测量的辐射亮度可以直接用于以下几个方面:(1)评估和改进 FIR 波段的基础光谱;(2)将观测到的辐射特征直接与大气特性变化联系起来,特别是水蒸气、温室气体、薄卷云、冰云和地表特性等;(3)利用卫星模拟器对气候模型中的辐射过程进行严格评估。FORUM 的主要目标是使

这些测量具有足够宽的光谱覆盖和足够高的光谱分辨率和辐射精度,以满足每个目标需求。这些高精度的测量也可以作为未来红外辐射观测对比的基准。最为迫切的应用是下一代气象卫星 MetOp-SG-A1 红外高光谱探测仪 IASING 的辐射定标。

根据应用需求,FORUM 任务工作在  $817\sim 847\text{ km}$  轨道高度上,通过星下点观测直径为  $15\text{ km}$  的圆形区域。主要工作仪器(即这里所述的有效载荷)应能够测量具备光谱分辨的地球长波辐射能量,在远红外光谱范围内具有高的绝对精度,并可对观测视场内的地表、大气和云均匀性进行表征,帮助解释已有的高分辨率辐射观测值。FORUM 任务使用 FSI 和 FEI 两种仪器。其中,FSI 是一种傅里叶变换光谱仪,用于测量光谱分辨大气顶 OLR。FEI 与 FSI 共地面采样位置,并与 FSI 具有相同的视轴,工作在大气热红外(TIR)窗口;空间分辨率高于 FSI,以表征场景均匀性;工作波段的中心波长为  $10.5\ \mu\text{m}$ ,光谱带宽为  $1.5\ \mu\text{m}$ 。

本文总结了相关文献中 B 方案 FSI 和 FEI 两台有效载荷的设计方案及关键技术研究进展。

## 1 仪器技术指标需求

根据 FORUM 任务需求<sup>[2]</sup>,卫星轨道高度、载荷采样距离、波长范围等以及 FSI/FEI 设计的技术性能指标见表 1。光学设计系统参数如下:像元大小为  $2\text{ mm}^2$ ,入瞳口径为  $80\text{ mm}$ ,望远镜放大倍数为 2.4。

表 1 FSI 和 FEI 的性能指标

观测要求	指标
轨道高度/km	817~847
空间采样距离/km	100 (目标: 70)
系统积分能量	15 km 圆范围内大于 91%
光谱范围/ $\text{cm}^{-1}$	100~1600
光谱分辨率/ $\text{cm}^{-1}$	小于 0.5 (目标: 小于 0.36)
噪声等效光谱辐射(NESR)/ ( $\text{mW}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{cm}^{-1})$ )	0.6 (目标: 0.4) 在 $200\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 内 2.0 (目标: 1.0) 在 $200\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 以外 0.25 ( $200\sim 1300\text{ cm}^{-1}$ ); 1 K (其他波段)
绝对辐射精度(ARA)/K	目标: 0.2 K ( $200\sim 300\text{ cm}^{-1}$ ); 0.1 K ( $300\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ ); 0.2 K ( $1100\sim 1300\text{ cm}^{-1}$ ); 1 K (其他波段)

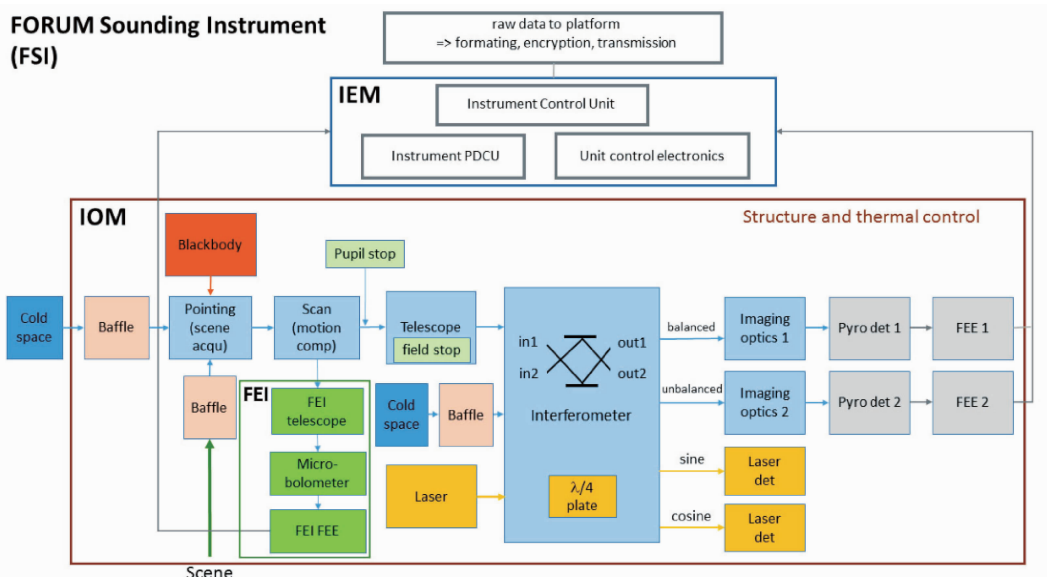


图 1 有效载荷组成框图

## 2 仪器结构设计

FSI 和 FEI 两个子系统共用前置光学系统，由安装在卫星侧板上的光学模块 IOM 和安装在卫星体内的电子学模块 IEM 组成(见图 1)<sup>[4]</sup>。IOM 模块包含光学、定标黑体 (BBU) 以及前端电子设备 (FEE)。其中，FEE 由 FSI 探测器、激光接收器、FEI 微测辐射热计探测器的 A/D 转换，激光源及其驱动程序，与 IEM 的接口等组成。IEM 模块具有与卫星平台相连的电源接口、数据传输与管理接口等，包括仪器控制和数据处理单元 (ICU)、仪器子系统的供电单元 (PDCU)、机械驱动和控制的电子设备以及与卫星平台的接口等。ICU 负责对 FSI、FEI 和指向机构的控制与监测，其一端与 FEE 连接，另一端与电源及数据平台连接。干涉仪有专用的控制电子设备 (ICE)，其中还包括激光计量系统。该系统通过光纤与干涉仪机构连接。ICU 和 ICE 都安装在卫星平台内部，并通过线缆和光纤连接到仪器模块。

图 2 显示了仪器的机械设计模装图。为了有效地容纳光学模块 IOM 的所有功能组件，在光学平台安装面的上下两侧均布置有光学组件。入口和冷空间遮光罩、黑体、指向组件、FEE 位于光学平台的顶部(见图 2(a))，扫描组件、前望远镜、干涉仪组件、后光学组件与

探测组件、FEI 仪器位于光学平台的底部(见图 2(b))。两侧的光路通过指向镜与扫描镜之间的开孔连接。

### 2.1 前置光学系统

前置光学系统包括望远镜、遮光罩、指向机构、扫描单元以及定标黑体。

#### 2.1.1 望远镜

望远镜采用了放大倍数为 2.4 的离轴三无焦系统，主镜和三镜为抛物凹面镜，次镜为非球面凸面镜。该望远镜减小了干涉仪内部的光束直径，使分束器和角镜的尺寸最小化。另外望远镜设置了场光阑，限定  $\pm 0.507^\circ$  的圆形视场。望远镜的入瞳孔位于第一镜前面的孔光阑位置，中间焦平面的  $F$  数为 4.23。

#### 2.1.2 孔径光阑和场光阑

孔径光阑位于望远镜入瞳第一镜前的平面上，用于定义仪器的入口孔径。孔径光阑的图像在角镜的对称平面上(与角立方体内部的两个反射镜对称)。将孔径光阑设计为 D 字形以使角镜尺寸最小化。根据辐射测量需求，圆形入瞳直径需达到 80 mm。因此采用等面积的 D 型入瞳(见图 3(a))，其面积近似为  $110 \text{ mm} \times 53.7 \text{ mm}$  矩形大小。图 3(b)所示为 D 形入射和反射光束脚印与直径为 71 mm 的角镜通光孔适配图。

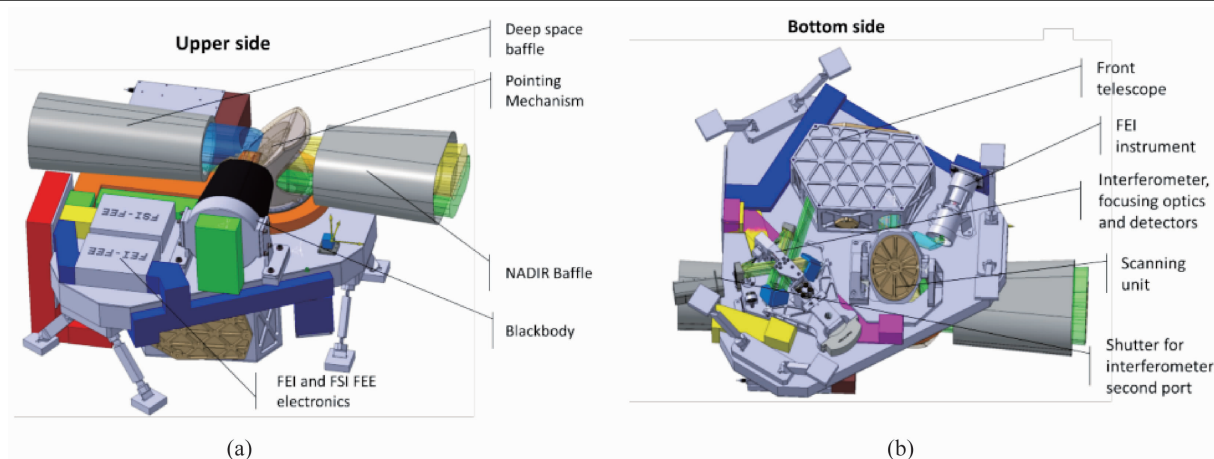


图 2 FORUM IOM 光学结构

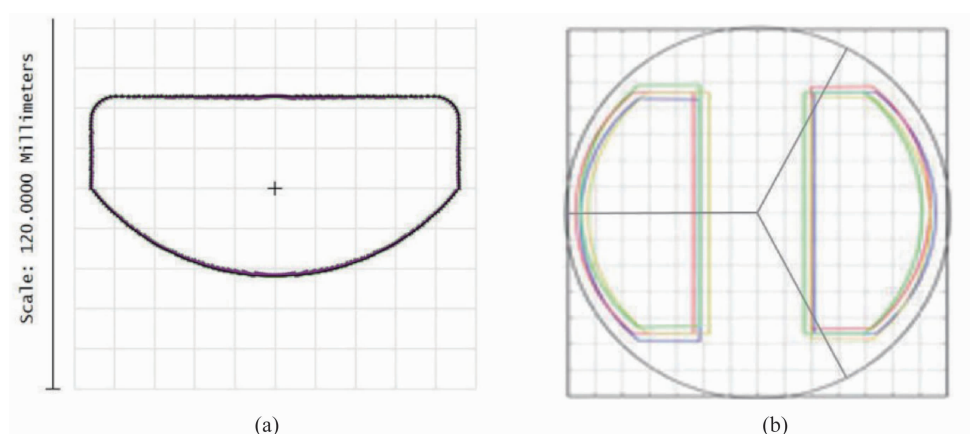


图 3 (a) D形入瞳; (b)角镜通光孔与入射和反射脚印

场光阑位于望远镜的中间焦平面上, 可定义仪器的极限视场。因此, 望远镜的前两个反射镜决定了仪器的几何性能。这两个反射镜之后的所有光学元件尺寸过大将降低图像质量。特别是过大的探测器将只作为“光子储存器”, 且只能用方形探测器才可以提供更好的均匀性。光学元件的尺寸过大不太重要。因为视场内杂散光的水平与标称信号成正比, 所以它可以通过定标消除。

### 2.1.3 定标黑体

将内部黑体作为绝对参考, 根据对其表面光谱发射率和温度的感知, 可以精确地获得黑体的光谱出射率。黑体应完全覆盖孔径。考虑到孔径需求, 选择带沟槽表面的圆柱形板作为基准。该结构表面产生多次反射, 提高发射率。指向镜结构使黑体在不工作时关闭并维持黑体处于平衡状态, 黑体工作在环境温度附

近。这种设计的优点是, 非 100% 发射率的影响很小。

如图 4 所示, FORUM 黑体简单结构有以下几个组件: (1) 集成了温度传感器和挡板的 V 形槽辐射板; (2) 用于支撑辐射板并增设隔热垫的外壳; (3) 两个通过外壳支撑黑体的安装支架。

### 2.1.4 指向单元和扫描单元

图 5 所示为指向和扫描机构的工作原理和机械结构。指向单元(见图 5(a))作用于跨轨道, 分别指向星下点方向、冷空间和内部黑体。指向镜沿着仪器 LOS 轴线旋转, 实现恒定入射角, 以使偏振灵敏度最小化。扫描单元(见图 5(b))跟随指向单元并沿轨迹运动, 其任务是在干涉图采集过程中补偿轨道运动, 保持 LOS 与地面交会稳定(旋转轴在反射镜平面内)。



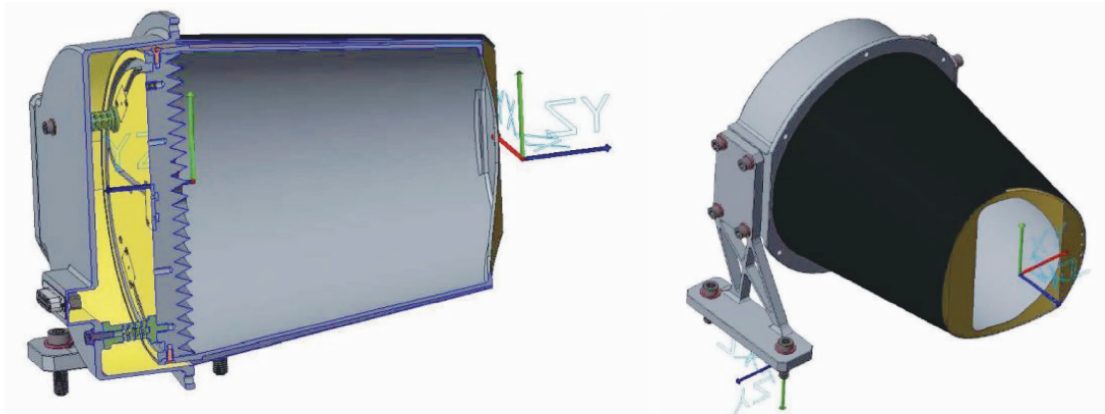


图4 定标黑体

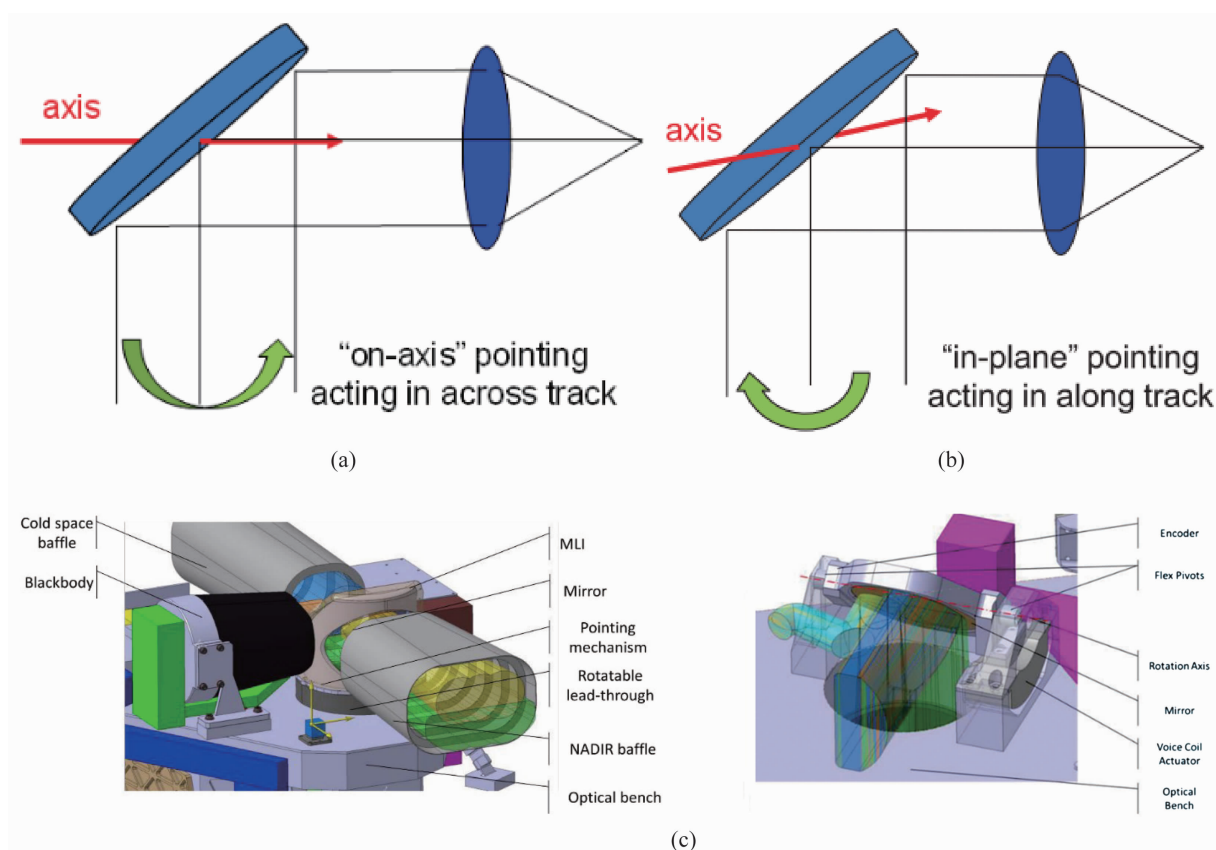


图5 (a)指向机构的工作原理图；(b)扫描机构的工作原理图；(c)机械结构图

## 2.2 干涉仪及FSI后光学系统

作为FORUM探测仪FSI的核心部件，干涉仪将产生的干涉图通过傅里叶变换反演后重建出辐射光谱。采用以双端口双摆臂概念为基础的迈克尔逊和马赫-曾德尔混合结构设计，利用了迈克尔逊设计结构简单紧凑和马赫-曾德尔设计易于实现4分束器端口的特点。与其他潜在的候选方案相比，这是最紧凑和简单的

设计，有望获得高性能，更重要的是双摆臂原理具有可继承的飞行产品。图6描述了该干涉仪及FSI后光学系统的光学设计<sup>[4]</sup>，表2列出了其关键设计参数。图7是干涉仪的结构设计草图<sup>[2]</sup>。主要组成单元包括分束器、双摆臂运动组件、计量系统、后光学和探测器链等组成。

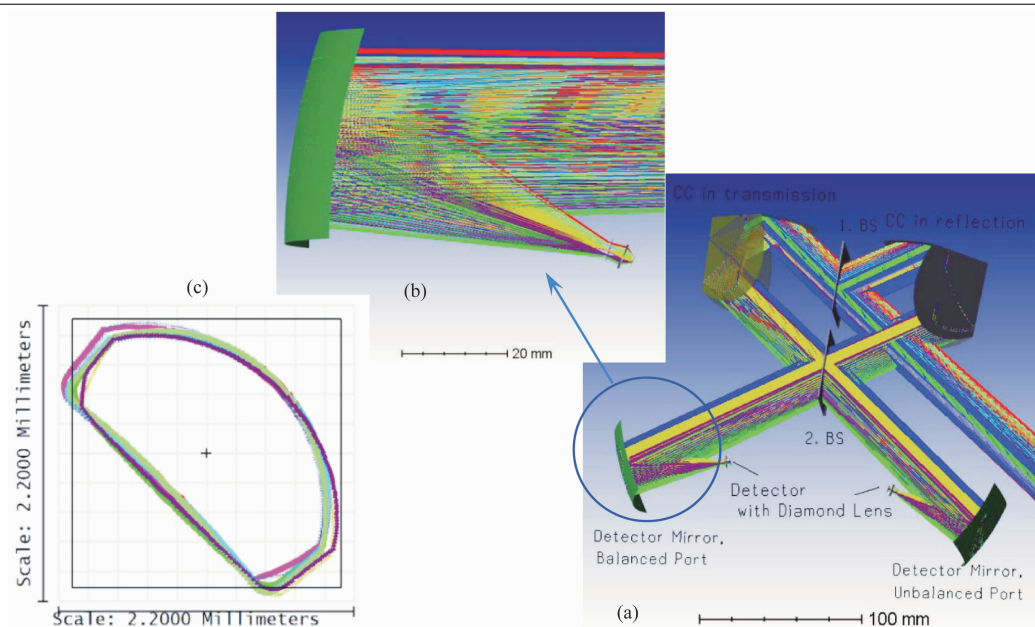


图 6 干涉仪组件的光学设计

表 2 干涉仪设计参数

参数	数值
干涉仪入瞳当量直径	33.3 mm
光束发散度	$\pm 1.217^\circ$
MOPD	13.5 mm
光谱分辨率	$0.48 \text{ cm}^{-1}$ (对应于 $1600 \text{ cm}^{-1}$ )
分束器	楔形金刚石板
立方角镜	整体镀金, 通光孔径 71 mm

驱动单元是具有一个中心轴承以及承载角立方镜的双臂双摆装置。中心支撑轴承的旋转导致两个角立方镜的反相位移, 从而使两束光之间的相移加倍。

分束器是干涉仪的核心光学部件。如图 7 (a)所示, 该分束器是由两个独立的聚酯薄膜通过 CVD 镀制金刚石薄膜窗口组成, 分别通过两个独立的分束器框架独立校准。

计量系统使用波长为 1550 nm 的激光束, 通过准直器和小型折叠镜将其引入到干涉仪光路中(入射激光具有  $45^\circ$  线性偏振)。设计了冗余二极管激光器单元。信号通过保偏光纤输入到干涉仪。冗余激光接收单元测量两种偏振状态, 并提供由四分之一波片在两束中的一束所产生的正弦和余弦信息。这些信号被转换成数字信息, 并包含在用于地面数据处理的科学数

据流中。因摆式干涉仪的轨迹驱动是基于绝对位置的, 而该位置由读取计量信号的条纹计数器跟踪, 所以利用计量干涉仪的信号进行干涉仪驱动的闭环控制是可行的。

FSI 有两组后端光学和探测器组件用于接受来自干涉仪的干涉信号。如图 6 (b)所示, 每组都由成像光学元件和基于热释电探测器的探测单元组成。成像光学元件由一个独立反射镜子加在成像探测器入瞳处的金刚石透镜组成。为了适应 D 形入瞳, 将聚焦镜设计成非球面的平凸形状, 并将其集成到探测器前端。两个探测单元均由热释电探测器、包括窗口的壳体、FEE 组成, 热释电探测器敏感区域为  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  的方形区域(见图 8)。通过控制外壳温度, 实现  $295 \pm 5 \text{ K}$  的工作温度。探测器组件是 Leonardo 公司的 DIATGS 106 组件, 外壳窗口由 CVD 金刚石制成。FEE 位于探测器附近, 并将信号放大和数字化。

### 2.3 FEI 设计

FEI 是一种工作在热红外波段的相机。由带通滤光片确定其工作波段的中心波长为  $10.5 \mu\text{m}$ 、半峰带宽为  $1.5 \mu\text{m}$ 。FEI 成像仪与 FTS 干涉仪共对准, 并共享相同的指向和扫描机构。图 9 显示了 FEI 的机械结构设计。

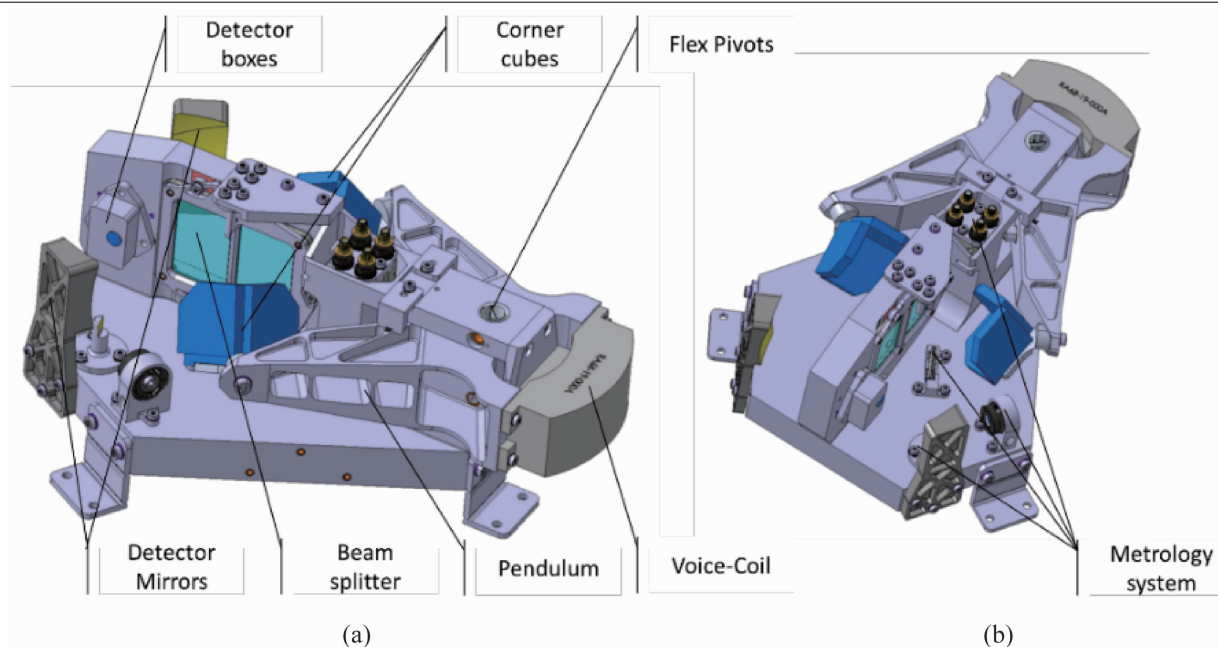
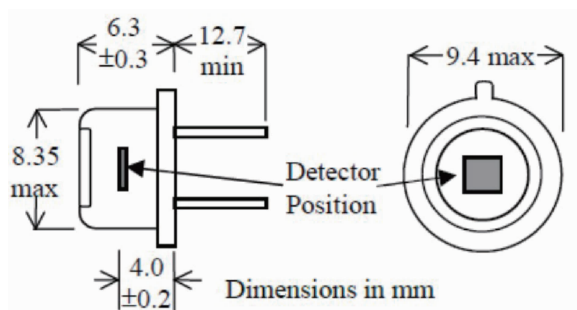
图7 FORUM FSI干涉仪的结构设计草图<sup>[2,5]</sup>

图8 Leonardo DIATGS 106 探测器组件

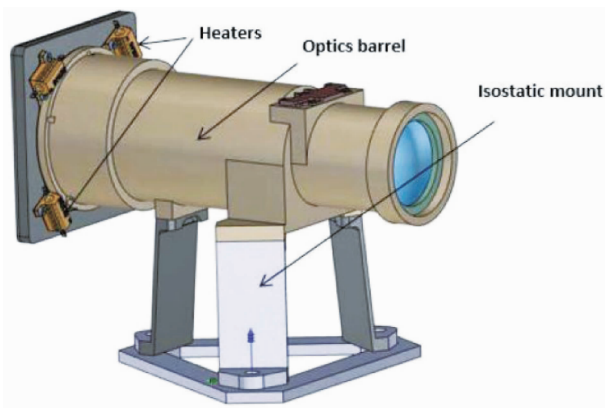


图9 FORUM FEI的机械结构设计

FEI的成像光学设计为一个折射透镜系统，其焦距和F数由微测辐射热计的有效像元大小定义。将微测辐射热计阵列的几个像元进行组合以增加焦距。FEI通过带通滤光片将光谱限定在以 $10.5\ \mu\text{m}$ 为中心、带宽为 $1.5\ \mu\text{m}$ 的

范围内。带通滤光片作为附加元件被安装在第一个和第二个透镜之间。基线FEI的光学参数总结如表3所示。

表3 FEI的设计参数

参数	设计值
有效焦距	49.6 mm
入瞳直径	31.0 mm
视场	$38.4\ \text{km} \times 38.4\ \text{km}$ ( $2.59^\circ \times 2.59^\circ$ )
F数	1.6
光谱范围	$9.75 \sim 11.25\ \mu\text{m}$
像元尺寸	$34\ \mu\text{m}$ (对应 $2 \times 2$ , 单个像元 $17\ \mu\text{m}$ )
尼奎斯特频率	14.7 周/mm

FEI选用图10所示的ULIS1024-048探测器。这种像元间距为 $17\ \mu\text{m}$ 的 $1024 \times 768$ 微测辐射热计热电阻型阵列由非晶硅连接到Si读出电路(ROIC)，并集成到真空Kovar壳体中。通过控制探测器外壳的温度，微测辐射热计阵列将在环境温度( $295 \pm 2.5\ \text{K}$ )下工作。探测器外壳具有一定的锥度，为探测器视场中的主要部分提供均匀温度背景。前端电子元件位于光学平台另一侧靠近探测器的位置，用于将探测器信号放大并转化为数字信号。数字化的原始信号在ICU单元中被格式化，传递给平台后再传输到地面。



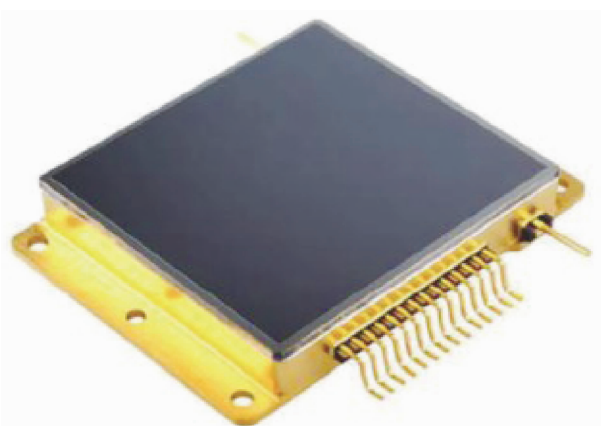


图 10 ULIS1024-048 微测辐射热计探测器组件

### 3 仪器热设计

仪器安装在图 11 所示的卫星平台  $Z_{sc}$  侧面板上。它处于卫星的阴影面, 以最小化轨道环境温度变化。通过将遮阳板、多层绝热 MLI、独立散热板等的被动热控和加热器的主动热控相结合, 使仪器保持在所需的温度和稳定度范围内。光学基板顶板上加热器主动控制可确保光学单元保持在  $+21^{\circ}\text{C}$  的稳定温度以下。FEE (FEI、FSI 和激光系统) 通过柔性支撑和多层绝热 MLI 与光学基板进行热隔离。散热板直接连接到光机单元的上表面。在轨运行期间, 遮阳板通过覆盖的多层绝热 MLI 隔离直接来自太阳的热流。加热器控制的光学基板可容纳所有光学子系统, 由钛合金双脚支撑件减少仪器与卫星平台之间的传导耦合。光学基板在轨温度稳定性优于  $0.2\text{ K}$  (峰到谷), 光学组件甚至更稳定 (通常小于  $0.02\text{ K}$ )。初步的 STOP 分析表明, 由热弹性变形引起的光学性能退化远低于所分配的极限值。

### 4 辐射定标

辐射定标采用两点定标方案, 以冷空间为零参考和  $\sim 300\text{ K}$  温度的在轨黑体。两个定标源通过指向镜获取。该指向镜也用于获取星下点位置对地观测。

仪器的占空比  $100\%$  意味着没有专门用于定标轨道位置。那么, 一个自然的假设是系统占空比  $20\%$  用于定标。定标周期在时间上是

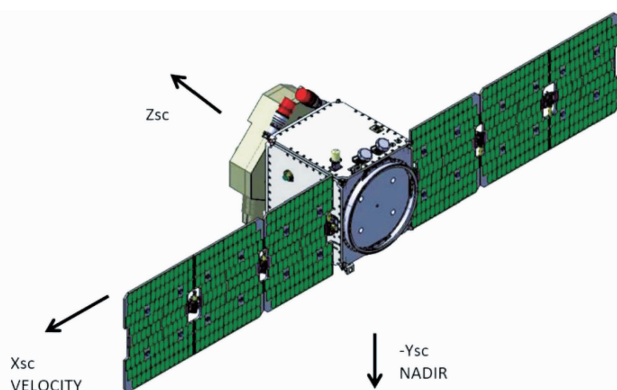


图 11 仪器在卫星平台上的安装位置

等距的, 而不是与轨道持续时间同步, 因此不会发生系统性的覆盖损失。冷空间作为零参考, 不包含光谱特征。黑体具有无光谱特征的宽波段涂层。在定标模式下, 黑体和光学元件的任何剩余光谱特征都有望以  $3\sim 4\text{ cm}^{-1}$  的分辨率进行辨析。

这使得定标测量的光谱采样显著减少, 而不影响辐射测量精度。作为一个初步假设, 本文提出了一个 10 倍减少因子, 即从  $0.37\text{ cm}^{-1}$  减少到  $3.7\text{ cm}^{-1}$ 。黑体普朗克函数仍然以感兴趣波数范围 ( $100\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ ) 中的 405 个样本进行采样。任何残留的高光谱分辨率特征将被均匀控制, 全光谱分辨率为  $0.36\text{ cm}^{-1}$ 。这种方法的优点是大大提高了信噪比。

#### 4.1 定标方案

提议的定标方案假设 15 个科学采样中有 3 个专门用于定标 (见图 12), 这导致  $20\%$  的观测损失。假设总长为  $97.5\text{ km}$  的采样空间, 采样的时间间隔为  $14.8\text{ s}$ , 干涉仪的回转和扫描镜的重新定位分配了  $0.8\text{ s}$ , 有效用于干涉图采集的时间为  $14.0\text{ s}$ , 两次科学采样之间的总时间为  $3\times 14.8\text{ s}=44.4\text{ s}$ 。图 13 所示为该方案建议的时间线。假设对两个干涉仪扫描方向分别进行 3 次黑体采样和 3 次冷空间采样。假设每次定标 IFG 为  $1.4\text{ s}$ , 光谱采样就变为  $3.7\text{ cm}^{-1}$ 。

指向镜角度需求如下: 星下点到黑体的角度间隔为  $90^{\circ}$ , 黑体到冷空间的角度间隔为  $90^{\circ}$ , 从冷空间回到观测场景是  $180^{\circ}$ 。定标时



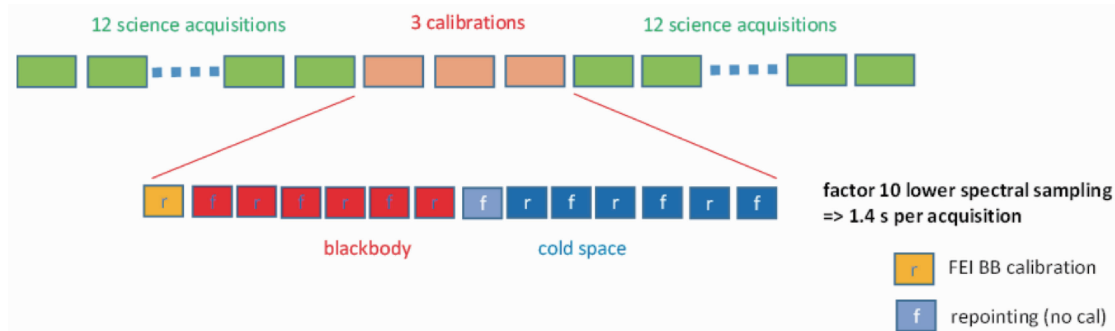


图 12 定标策略

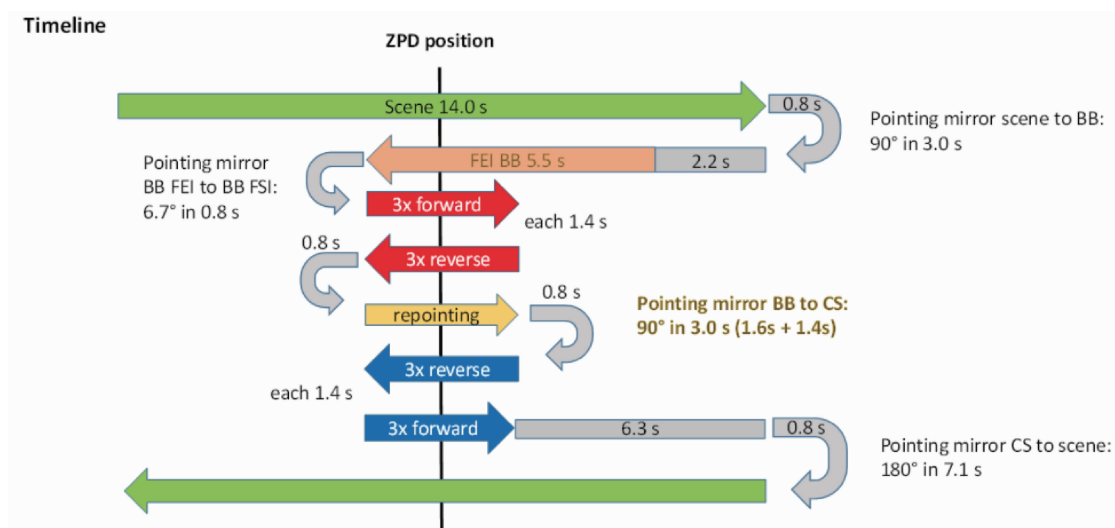


图 13 定标时间线

间线考虑到这一点，并增加了指向镜运动的 2 次干涉仪扫描。90°的可容忍采样时间为 3.0 s，180°的可容忍时间为 7.1 s，包括稳定时间。定标方案的总耗时为  $14 \times 0.8 \text{ s} + 2 \times 6.3 \text{ s} + 14 \times 1.4 \text{ s} = 43.4 \text{ s}$ 。这比允许的时间少了 1.0 s。有效定标时间为 19.55%，符合最大 20%。

#### 4.2 光谱特征校核

仪器光谱特征的稳定性来源于涂层等，可用全光谱分辨率检测，且不必频繁检测，如一月一次，每次检测大约一到两轨。例如：以 2.0 cm MPD 约 143.8 min 进行 400 次测量；200 次黑体采样(向前 100 次，反向 100 次)；200 次冷空间采样(向前 100 次，反向 100 次)。这将会使有效定标时间增加 0.33%，到 19.88%。

### 5 仪器性能

#### 5.1 几何特性

FSI 仪器的几何性能主要由望远镜场光阑

平面上的点扩散函数决定。该函数由系统积分能量(SIE)和系统能量分布函数(SEDf)的非均匀性来确定。即使仪器在单个像元探测器上对场景进行成像，SEDf 形状理解为依赖于由图像质量限制的场点相对系统传递函数。这对于 20  $\mu\text{m}$  以上的远红外波长尤其重要。由于远红外衍射，艾利斑的尺寸变得非常大。此外，即使在场光阑后，光学元件上的场依赖透射效应也会影响 SEDf 的均匀性。总的来说，影响几何性能的因素包括像差、衍射、涂层透射、在轨稳定性、微振动和杂散光。

图 14 所示为最关键波长 100  $\mu\text{m}$  计算所得的 SEI 和 SEDf。在这种基于光学模型的计算中，只包括像差、衍射和涂层影响。分别对微振动和杂散光评估后，认为可以忽略不计。实现 wrt 值的要求列于表 4。

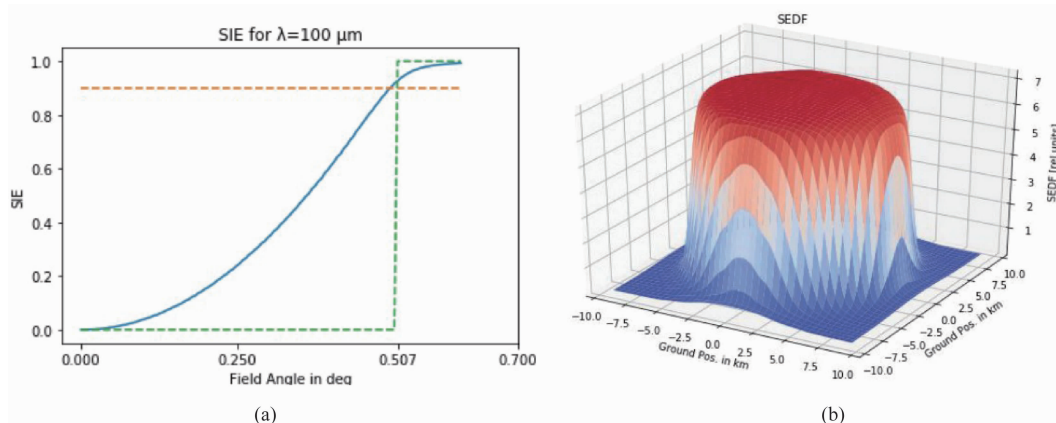


图 14 最关键波长 100 μm 处以 SIE (a) 和 SEDF (b) 表示的几何特性

表 4 几何特性符合状态

参数	特性	设计
100 μm 处 SEI	>90%	>92% → 符合的
100 μm 处 SEDF 不均匀性	<15%	<6.4% → 符合的

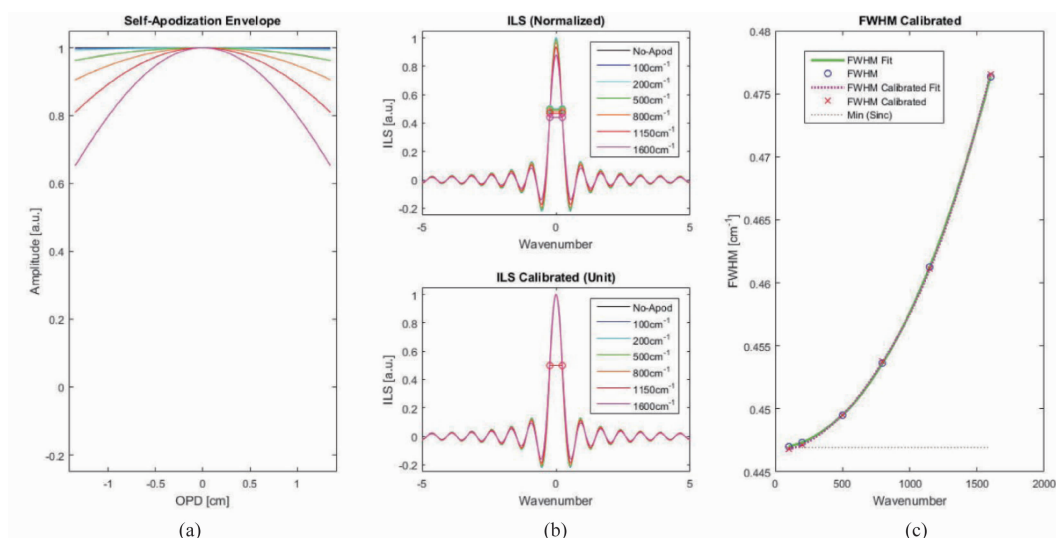


图 15 光谱性能结果

### 5.2 FSI 光谱特性

光谱性能被定义为仪器的光谱响应函数 (ISRF), 它与理想 Sinc 函数的偏差由自切趾控制。在图 15(a) 中可以看到在干涉图域预期的自切趾包络线。图 15(b) 显示了归一化的 ILS (归一化后无自切趾条件的 ILS 达到 1)。归一化就是每个 ILS 被归一化到最大值为 1 (有利于确定光谱分辨率为半宽值 FWHM)。图 15(c) 显示了预期的光谱分辨率, 无论是否受到仪器辐射响应的影响。在  $0.5 \text{ cm}^{-1}$  的光谱分辨率临界值时有很小的裕量 (见表 5)。

### 5.3 FSI 辐射性能

NESR 是 FORUM FSI 仪器的关键性能之一。由于必须使用热释电探测器来覆盖所需的光谱带宽, 仪器受到探测器的限制。在 PRR 阶段, 设计已根据实现临界值而调整了冗余, Leonardo 过去已有飞行的 DLATG 探测器最低性能保证, 其技术成熟度等级为 TRL5。在 SRR 阶段, 仪器经过优化, 探测器性能是基于辐射老化 (10 krad 总剂量) 后的生产和测试批次。表 6 显示了辐射要求的性能。

表 5 光谱性能需求总结

光谱性能参数	需求	性能
波数范围	100~1600 $\text{cm}^{-1}$	100~1600 $\text{cm}^{-1}$ →符合
光谱分辨率	临界值 0.5 $\text{cm}^{-1}$ (目标 0.36 $\text{cm}^{-1}$ )	<0.477 $\text{cm}^{-1}$ →符合临界值
光谱精确度	临界值 2 ppm (目标 1 ppm)	<0.83 ppm→符合目标
ISRF 不对称	临界值 3.34% (目标 1.67%)	<0.5%→符合目标

表 6 辐射性能总结

辐射参数	需求				性能			
	波数范围/ $\text{cm}^{-1}$		临界值	目标	波数范围/ $\text{cm}^{-1}$		特性值	
NESR/ ( $\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ )	100	200	2	1	100	200	0.37	<目标
	200	800	0.6	0.4	200	800	0.28	<目标
	800	1600	2	1	800	1600	0.52	<目标
绝对辐射精度/K	波数范围/ $\text{cm}^{-1}$		临界值	目标	波数范围/ $\text{cm}^{-1}$		特性值	
	100	200	1	1	100	200	0.191	<目标
	200	300	0.2	0.25	200	300	0.064	<目标
	300	1100	0.1	0.25	300	1100	0.095	<目标
	1100	1300	0.2	0.25	1100	1300	0.192	<目标
1300	1600	1	1	1300	1600	0.973	<目标	

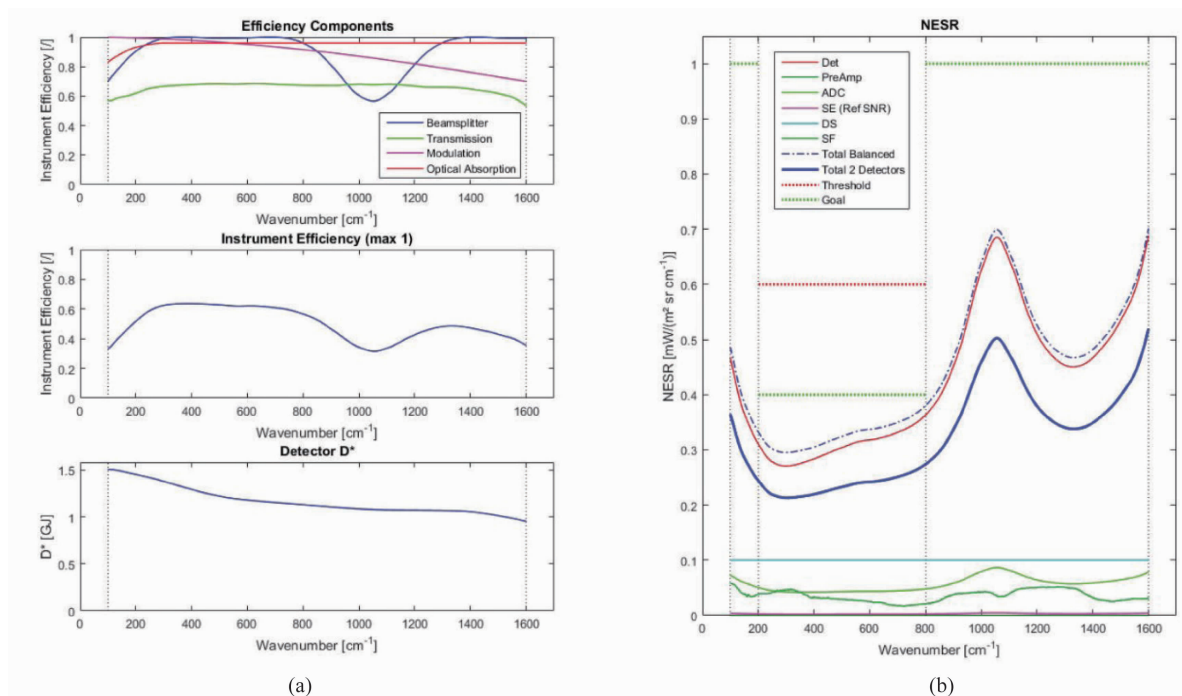


图 16 (a)仪器输入参数; (b)NESR 性能预测

图 16(a)所示为仪器预期效率分量和 EoL 探测器灵敏度水平  $D^*$ 。图 16(b)所示为预测的 NESR 性能。可以看出, NESR 已经与平衡端口探测器的目标 NESR 兼容, 并提供了一些裕量与两个探测器的组合。

## 6 关键技术研究进展

### 6.1 楔形金刚石分束器

在金刚石样品的基础上, 概念 B 的全尺寸楔形钻石分束器已经在计划的 A 阶段进行了制造、镀膜和测试。图 17 显示了在预开发活

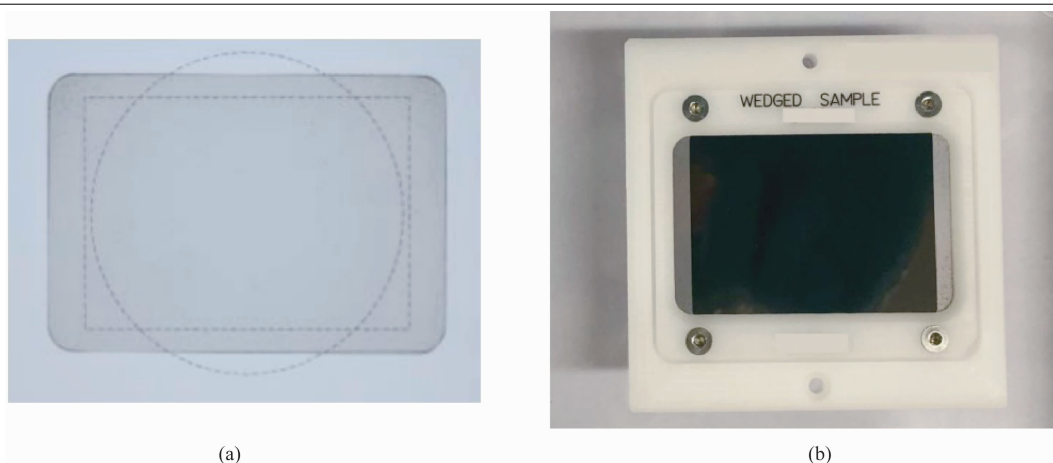


图 17 FSI 干涉仪的全尺寸楔形金刚石分束器板：(a)未涂覆；(b)涂覆锗后

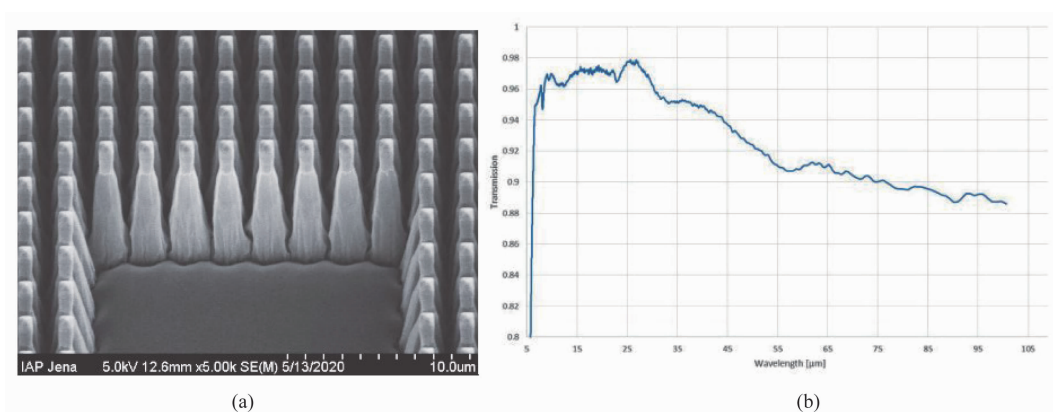


图 18 (a)金刚石窗口的微观结构；(b)透过率测试结果

动期间制造的全尺寸楔形金刚石分束器。其中，图 17(a)所示为未加涂层的金刚石基片；图 17(b)所示为蒸镀了锗的金刚石窗口。采用了微结构抗反射涂层见图 18(a)，窗口透过率见图 18(b)。测量由德国国家物理技术标准研究所 (PTB) 完成。整个光谱范围从  $6.25 \sim 100 \mu\text{m}$ ，金刚石在目标光谱范围内的折射率高达 2.4，导致了约 17% 的非涅尔损耗或 83% 的透射率下降。微结构涂层的应用使透射率显著提高。在  $13 \sim 30 \mu\text{m}$  之间，反射效率最高，从 17% 下降到 3.5% 以下。由此可见，制造和镀制 FORUM 所需尺寸 (直径  $70 \sim 80 \text{ mm}$ ) 楔形金刚石基底的可行性。

## 6.2 干涉仪原理样机

图 19 所示为基于单轴支撑的双摆臂干涉仪的原理样机。在 A 阶段完成了设计、制造、校准和性能实验，并成功地进行了速度稳定性和微振动试验。

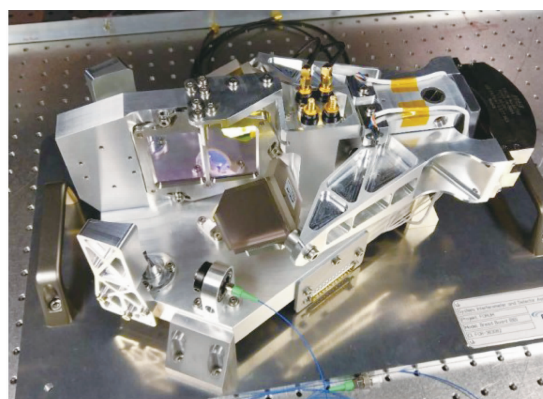


图 19 FSI 干涉仪的原理模拟样机

## 7 结论

由泰利斯阿莱尼亚空间公司和 OHB 系统有限公司牵头开发的 FORUM 红外有效载荷——FSI 仪器基于一个紧凑的双摆干涉仪，其中 CVD 金刚石窗口分束器的关键部件，在  $6.25 \sim 100 \mu\text{m}$  的指定光谱范围内提供了改进的光传输能力。结合黑体性能和基于热释电探测



器探测链能够满足仪器设计要求,其光谱、辐射和几何特性具有独特的挑战性。

### 参考文献

- [1] 陆燕. 欧空局选定 FORUM 为“地球探索”的第 9 项任务 [J]. *红外*, 2020, **41**(11): 47–48.
- [2] ESA. Earth Explorer 9 Candidate Mission FORUM—Report for Mission Selection [EB/OL]. <https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/EE9-FORUM-RfMS-ESA-v1.0-FINAL.pdf>, 2019.
- [3] Pachot C, Dominguez B C, Oetjen H, et al. The infrared Fourier transform spectrometer and the infrared imager instrument concepts for the FORUM mission, ESA’s 9th Earth Explorer [C]. *SPIE*, 2020, **11530**: 115300D.
- [4] Fray S, Lippa M, Semmler E, et al. FORUM payload study for phase A/B1 by a consortium led by OHB System AG and TAS-UK [C]. *SPIE*, 2021, **11852**: 1185225.
- [5] Pachot C, Domínguez B C, Sierk B, et al. , Far infrared Fourier transform spectrometer breadboard activities for the FORUM mission, ESA’s 9th Earth Explorer [C]. *SPIE*, 2021, **11852**: 1185224.
- (上接第 30 页)
- [18] Pan D L, Wang D F, He X Q. Study on Marine Application Potentiality of CMODIS/SZ-3 [J]. *Engineering Sciences*, 2004, **2**(2): 1–5.
- [19] 袁艳, 李立英, 熊望娥, 等. 环境减灾-1A 卫星超光谱成像仪结构设计 [J]. *航天器工程*, 2009, **18**(6): 97–105.
- [20] 王跃明, 贾建鑫, 何志平, 等. 若干高光谱成像新技术及其应用研究 [J]. *遥感学报*, 2016, **20**(5): 850–857.
- [21] 覃帮勇, 刘志文, 李盛阳. 天宫一号高光谱数据的陆地应用 [J]. *载人航天*, 2018, **24**(4): 546–552.
- [22] 郭崇滨, 刘善伍, 陈宏宇. 面向快速响应的 SPARK 高光谱卫星系统设计 [J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(33): 403–409.
- [23] 刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制 [J]. *遥感学报*, 2020, **24**(4): 333–344.
- [24] Dong S Y, Sun G Y, Du Y M, et al. Image Quality Assessment for Visual and Infrared Multi-spectral Imager of Gaofen-5 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, **35**(2): 381–388.
- [25] 范斌, 陈旭, 李碧岑, 等. “高分五号”卫星光学遥感载荷的技术创新 [J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(1): 1–7.
- [26] 孙允珠, 蒋光伟. “高分五号”卫星概况及应用前景展望 [J]. *航天返回与遥感*, 2018, **39**(3): 1–13.
- [27] 李先怡, 范海生, 潘申林, 等. 珠海一号高光谱数据卫星数据及应用概况 [J]. *卫星应用*, 2019, **8**(8): 12–18.
- [28] 王建成, 朱猛. 高光谱侦察技术的发展 [J]. *航天电子对抗*, 2019, **35**(3): 37–45.