

文章编号: 1672-8785(2022)10-0043-14

欧洲人为二氧化碳排放监测 CO2M 卫星计划

陆 燕 葛逸伦

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 欧空局 2019 年将“人为二氧化碳排放监测任务 CO2M”列为哥白尼计划的 Sentinel 7 任务, 并在前期方案设计的基础上, 签订了载荷研制合同。该卫星的主要探测仪器有用于 CO₂ 和 NO₂ 探测的 CO2I 和 NO2I 组合光谱成像仪、多角度偏振仪 MAP 和三波段高空间分辨率云成像仪 CLIM。基于公开文献, 概述了该任务的需求以及主要光学有效载荷的性能指标需求、探测原理、结构设计和关键技术等。

关键词: 二氧化碳监测; 二氧化氮监测; 温室气体监测; 成像光谱仪; 多角度偏振仪; 云成像仪

中图分类号: TP73 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.10.006

European Satellite CO2M Mission for Monitoring Anthropogenic Carbon Dioxide Emissions from Space

LU Yan, GE Yi-lun

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

Abstract: In 2019, the CO2M mission has been selected by the ESA as Sentinel 7 in Copernicus programme, which will be measuring CO₂ concentration in terms of column-averaged mole fraction (denoted as XCO₂). The payload comprises a suite of instruments addressing the various aspects of the challenging observation requirements. A push-broom imaging spectrometer will perform co-located measurements of top-of-atmosphere radiances in the near infrared (NIR) and short-wave infrared (SWIR) at high to moderate spectral resolution. A multi-angle polarimeter is co-located measurements of aerosols performed. Finally, measurements of a three-band cloud imager, co-registered with the CO₂ observations, will provide the required cloud-flagging capacity at sub-sample level. This paper will review the results of the Phase A/B1 instrument studies, including technology pre-development activities, preliminary design of the CO2M mission's instruments, etc.

Key words: CO₂ monitoring; NO₂ monitoring; greenhouse gas monitoring; imaging spectrometer; multi-angle polarimeter; cloud imager

收稿日期: 2022-05-28

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

在 2015 年联合国气候变化大会(COP 21)出台的《巴黎气候协议》中,为控制全球变暖,要求各国尽可能减少人为温室气体排放。全球有 195 个国家承诺积极应对气候变化行动计划,并签署了旨在减少化石燃料燃烧排放的国际条约和协议。据此欧盟委员会希望能建设一个可提供监测和核查碳排放的系统,包括原位观测和遥感观测相结合。

从空间观测地表温室气体排放主要采用阳光反射波段具有光谱分辨的遥感仪器。国内外已有多项温室气体遥感观测的空间仪器,且已得到在轨应用验证。2002 年欧空局发射的 Envisat 卫星 SCIMACHY 仪器首次实现从空间测量温室气体浓度。日本 JAXA 2009 年发射的 GOSAT 卫星 TANSO-FTS 仪器,是首个专门同时测量 CO_2 和 CH_4 的空间光电仪器。它采用傅里叶变换光谱技术测量大气层顶部辐射,其光谱覆盖可见光-热红外波段,幅宽为 750 km,空间分辨率为 10.5 km。美国 NASA 2014 年成功发射的 OCO-2 提供了高空间分辨率(3 km^2)的 XCO_2 连续观测。OCO-2 仪器是一种三波段推扫式光栅光谱仪,以 20 km 幅宽探测全球区域尺度上的 CO_2 源和汇,其备份仪器 OCO-3 于 2017 年发射到国际空间站。2016 年中国发射了 TanSat 卫星,其携带的二氧化碳光栅光谱仪以 20 km 的幅宽和 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的分辨率提供 XCO_2 观测。2017 年欧空局发射的 Sentinel-5P 卫星 TROPOMI 仪器可监测大气对流层的多种气体成分(包括 O_3 、 NO_2 、 CH_4 、 CO 和 SO_2 等)。日本 JAXA 2018 年发射的 GOSAT-2 卫星 TANSO-FTS-2,较之前的 GOSAT/TANSO-FTS 提高了精度和空间分辨率(9.7 km)。

2015 年欧空局在“地球探测计划”第 8 个

候选项目中,提出了一个碳卫星(CarbonSat)星座计划,将采用宽条带(200 km 幅宽)和高分辨率($2 \text{ km} \times 3 \text{ km}$)观测技术对人为排放碳源和浓度进行连续观测。该计划虽未被选中,但欧空局在 2018 年和 2019 年两个财年,安排了分别由空客防务(ADS)和 OHB System AG 牵头同时开展可行性研究。2019 年,在研究基础上,人为二氧化碳排放监测(CO_2M)任务被规划为未来的哥白尼任务,目标是 2025 年发射。方案研究活动得到了科学研究的支持,确定了一个卫星星座的观测需求。这些卫星配备一套优化的仪器,用于人为二氧化碳监测。2019 年 11 月, CO_2M 任务正式列为欧空局发布的 6 项优先级哥白尼任务之一,并于 2020 年 4 月选定由 OHB System AG 牵头的工业联盟来实施 CO_2M 任务。分包商 Thales Alenia Space 将提供用于测量二氧化碳排放量的近红外和短波红外光谱仪。

1 CO_2M 任务概况

以往对 XCO_2 观测空间任务的主要科学目标是与全球碳循环对温室气体自然源和汇的确定和量化相关。二氧化碳的人为通量通常比生物通量弱一个数量级,且难于从生物通量中分离出来,因此更难于量化。文献[1]根据应用需求提出了 CO_2M 观测计划的首要目标,即通过精确量化不同空间尺度(从区域到国家领域)的人为温室气体排放,为决策者提供可操作的信息。这需要在足够高的空间分辨率和重访频率下对二氧化碳 XCO_2 和甲烷 XCH_4 两类关键温室气体浓度进行高精度全球测绘。经研究后确定业务监测系统的空间部分需要一个卫星星座,从而实现在 40° 纬度方向 2~3 天的陆地覆盖和赤道方向 5 天的陆地覆盖。表 1 总结了文献[2]提出的未来 CO_2M 任务主要性能需求。

表 1 XCO₂ 产品特性

参数	2 级产品要求
XCO ₂ 精度	0.7 ppm (植被场景)
XCO ₂ 系统误差	≤0.5 ppm
XCO ₂ 空间分辨率	2×2 km ²
XCO ₂ 羽流成像能力	250×250 km ²
XCO ₂ 时间覆盖	全球覆盖和平均每周有效覆盖纬度 40°以上的地区一次, 即排放最强的地区

经 A/B1 阶段的方案论证后确定, 以 735 km 同一轨道高度部署 2 颗卫星, 每颗卫星承载 4 台仪器: (1) CO₂ 成像仪 CO2I, 由三个空间配准的推扫型光谱成像仪组成, 覆盖近红外 NIR (747~773 nm)、短波红外 SWIR-1 (1595~1675 nm) 和 SWIR-2 (1990~2095 nm) 波段, 具有中等辐射分辨率 ($R=5000\sim7000$); (2) NO₂ 成像仪 NO2I, 工作在可见光波段 (405~490 nm), 与 CO2I 组合, 称为其第四个光谱波段; (3) 多角度偏振仪 MAP, 一种紧凑型光谱成像仪, 具有 40°视场, 沿轨道方向跨越观测天顶角 (OZA) 的 ±60°范围; (4) 三波段高空间分辨率云成像仪 CLIM。

2 二氧化碳和二氧化氮组合成像仪

以柱平均摩尔分数 (XCO₂) 表示的二氧化碳浓度, 分别从近红外 NIR 和短波红外 SWIR 的三个波段测量中得到。XCO₂ 定量测量是一个挑战。二氧化碳工业和城市排放增加的浓度只相当于本底浓度的几个百分点, 且这些排放源经常伴随着二氧化氮 (NO₂) 共同排放。NO₂ 微量气体测量是具有空间继承的 (如文献 [3])。NO₂ 在可见光 (VIS) 波段中吸收, 通常比在近红外和 SWIR 波段中可以获得更高的信噪比。通过 NO₂ 增强可以跟踪到 CO₂ 排放。经科学支持分析表明, 同时和共定位的 NO₂ 柱密度测量大大提高了探测 CO₂ 柱^[4]位置的能力。CO2M 任务将携带一个单谱段 (VIS) NO₂ 成像仪 (NO2I), 与三波段 CO₂ 成像仪 (CO2I)

进行同时和同位置测量, 称为 CO2I/NO2I 组合成像仪。

2.1 观测原理

二氧化碳成像仪是一种推扫型光谱成像仪, 具有近红外和短波红外区域 (分别为 NIR 和 SWIR) 的三个空间配置光谱波段。图 1 所示为其测量原理图。通过望远镜将地面场景收集在光谱仪的入口狭缝上, 在跨轨道 (ACT) 方向上投影的狭缝长度定义了仪器幅宽, 并由此确定其空间覆盖。航天器沿轨道运动投影的狭缝为沿轨道方向 (ALT) 连续扫描地球表面。在这个运动过程中, 衍射光栅将垂直于 ACT 方向的狭缝图像进行光谱分散, 光谱仪相机将二维图像聚焦到阵列探测器上。在驻留时间 (即两次连续读数之间的曝光时间) 期间形成的距离提供了采集过程中 ALT 方向的空间采样。在任何时刻, 探测器像元对 ACT 空间采样 ALT 光谱采样进行成像。

与其它 CO₂ 观测技术相比不同的是, CO2I 以星下点具有中等光谱分辨率和宽带宽测量上升的大气顶部光谱辐射, 这样该仪器即使在低辐射水平也具有高信噪比的特点。这对于从辐射分辨点源中典型 XCO₂ 辐射增强吸收特征的微小差异至关重要, 特别是在中高纬度地区。表 2 总结了 CO2I 三个 CO₂ 观测波段 (NIR 和 2 个 SWIR) 和一个 NO₂ 观测波段的性能。图 2 给出了 CO₂ 的三个观测波段模拟光谱辐射。

表 2 CO₂ 和 NO₂ 组合成像仪性能^[5]

光谱通道	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm	光谱采样率	灵敏度 SNR ph/(s·nm·cm ² ·sr)	Level-2 产品
VIS	405~490	0.60	3.0	750@ $L=1.35 \times 10^{13}$	NO ₂
NIR	747~773	0.12	3.0	330@ $L=6.4 \times 10^{12}$	XCO ₂ (植被 SIF、气溶胶、云、地表压力)
SWIR-1	1590~1675	0.30	3.0	400@ $L=2.1 \times 10^{12}$	XCO ₂ (气溶胶、甲烷、云、H ₂ O)
SWIR-2	1990~2095	0.35	3.0	400@ $L=1.8 \times 10^{12}$	XCO ₂ (气溶胶、云、水、表面压力)

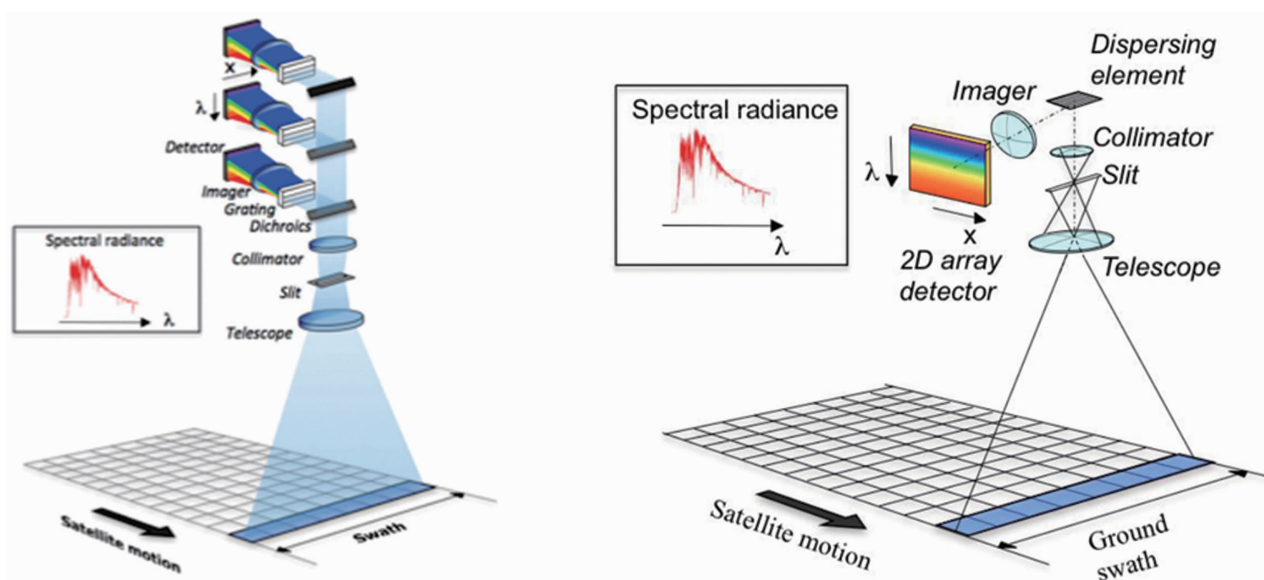
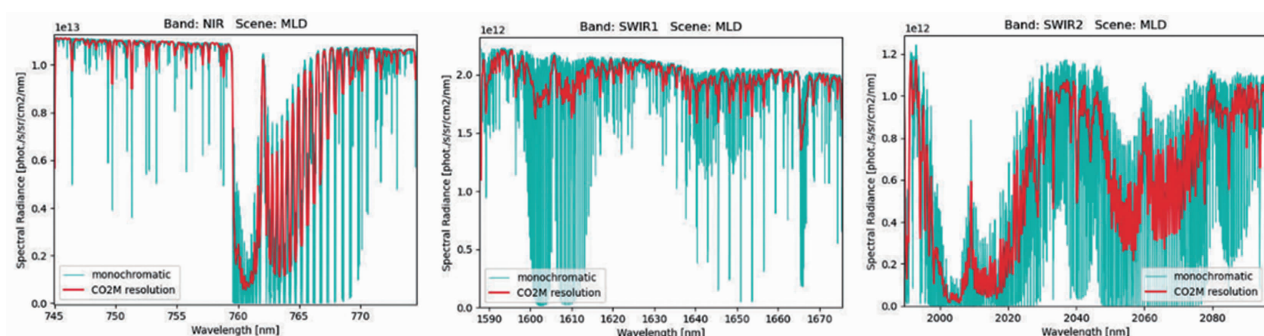


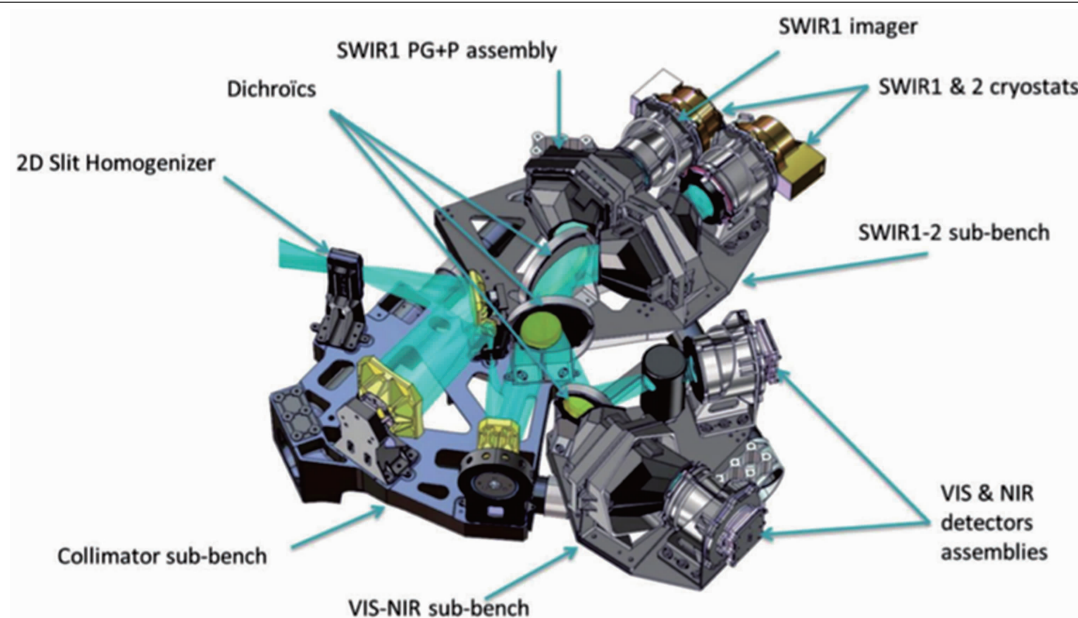
图 1 推扫型光谱成像仪原理图

图 2 CO₂I 三个波段模拟的 TOA 光谱辐亮度

2.2 CO₂I 和 NO₂I 设计

CO₂I 和 NO₂I 的光学设计由 Thales-Alenia 法国公司负责,采用消像散的三反射(TMA)望远镜系统,以 Babinet 伪去偏振器的偏振扰频元件作为第一光学元件,降低了从地面场景反射和散射光的偏振度。除了地球辐射之外,

该望远镜还可以通过在轨定标单元(FCU)观察到各种光源,包括用于太阳定标的两个 Spectralon 漫反射器(一个常用,另一个备份)、用于光谱性能定标的可调谐激光二极管、用于平场(flat field)测量的白光光源(WLS)等。光学系统结构如图 3 所示。

图 3 CO₂I 和 NO₂I 组合仪器的光学设计

星下点观测模式下, 望远镜将地面场景聚焦到入口狭缝上, 狭缝确定了沿轨迹方向 (ALT) 800 m、跨轨迹方向 (ACT) 256 km 宽。该狭缝采用了矩形多模光纤阵列组成, 其主要作用是光通过光纤内传输过程中的多次反射后使空间非均匀输入场景得到均匀化。从狭缝出来的发散光由其界面上的远心反射准直器进行准直后, 由随后的三个光谱仪共享。沿着光路由级联分色滤光片将光分配给四个独立的色散元件。准直光束经第一个分色元件后反射 VIS 和 NIR 波段、透过 SWIR, 并分别引导到两个分离的 VIS/NIR 和 SWIR 子光路 (见图 3)。然后, 两束光束分别通过随后的分色元件进行光谱分离, 得到的 VIS、NIR、SWIR-1 和 SWIR-2 波段指向到各自的色散单元。色散元件在四个波段之间的总体布置相同, 并将透射光栅粘接在第一棱镜的出口表面, 实现了棱镜-光栅-棱镜的组合 (PG+P)。色散表面由高度规则的二元结构沟槽形成, 其凹槽中由高折射率材料填充。在光栅后留有一定的气隙, 第二棱镜可倾斜并调整其大小以最小化畸变。PG+P 组件均按一级衍射级工作, 每个波段具有不同的光栅参数和棱镜几何形状, 以适应光谱带宽和分辨率的要求。

两个 SWIR 成像仪将分散的狭缝图像在光谱方向和空间方向上去放大的方式聚焦到探测器阵列上。这两个 SWIR 波段是准相同的, 由两个抛光的非球面硅透镜组成。具有三个透镜的近红外成像仪基于低折射率玻璃, 可从本质上减少杂散光。在两个 SWIR 波段, 在成像仪和探测器之间放置一个光谱滤光片, 以减少带外杂散光, 并抑制工作温度为 240 K 的光谱仪光学系统发出的背景热辐射。望远镜提供的入瞳孔大小适应了信噪比的要求, 因此 VIS 和 NIR 光谱仪实现了由光栅定义的缩小入瞳孔径, 从而使得 CO₂I 和 NO₂I 组合有效载荷非常紧凑地排列。辐射光谱在 VIS 和 NIR 波段由硅 CMOS 探测器 (工作温度为 250 K) 获得, 在 SWIR 光谱仪中由碲镉汞 (MCT) 焦平面阵列 (工作温度为 150 K) 获得。每个探测器的前端电子设备 (Front-End-Electronics, FEE) 单元将数据传输到图像采集和数据处理单元。图像采集和数据处理单元执行空间分拣并将数据传输到平台数据处理系统。

2.2.1 纤维基入口狭缝

CO₂M 将首次采用一种新型入口狭缝的光谱成像仪, 这种狭缝基于光学多模光纤^[6]。该技术的基本原理是在光谱和空间方向上对输入

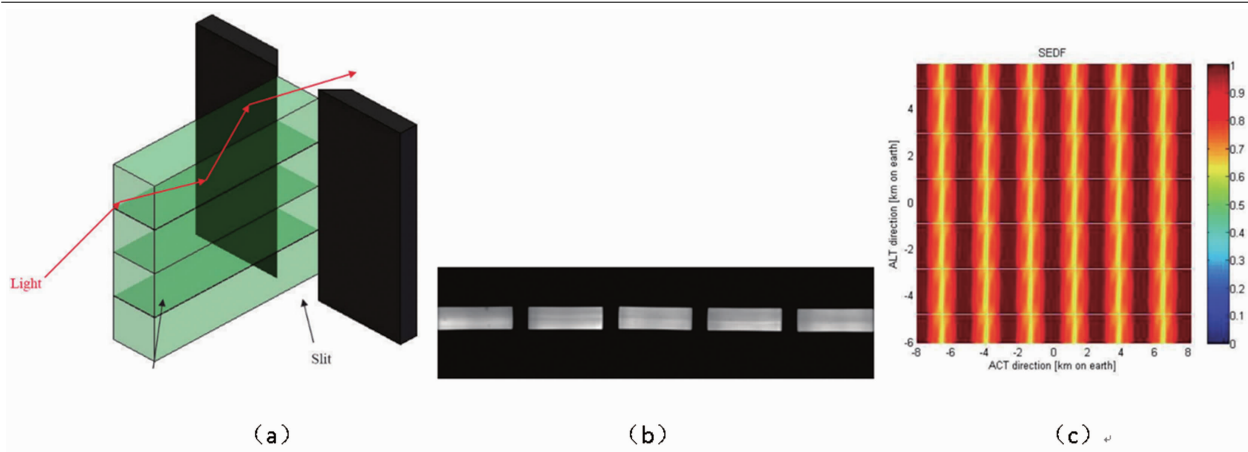


图 4 (a)光纤基狭缝的均质器(2DSH)原理;(b)光纤堆截面的显微图;(c)描述 CO2I 仪器空间性能的模拟系统能量分布函数(SEDF) (图片由 IUP、Thales Alenia Space Switzerland 和 Optec 提供)

场景进行分段均匀化,以获得稳定的、与场景无关的仪器光谱响应函数(ILRS)。如图 4(a)所示,狭缝在望远镜 ACT 方向视场排列 120 根矩形纤维,每根纤维芯(尺寸为 $319\ \mu\text{m} \times 121\ \mu\text{m}$)就代表了一个子狭缝,其短边定义了缝的宽度,长边定义了 ACT 采样空间的瞬时视场。在采样空间收集到的光在沿着 20 mm 长的光纤传播时经历了多次反射,平均了场景对比度,在光纤出口表面产生了一个空间均匀的近场图像。均质化在光谱(ALT)和空间(ACT)两个方向都得到了实现,后者在地面上的每个 ACT 采样空间上逐块进行。纤维基入口狭缝的这一特征将有别于 Sentinel-5 任务^[7]中实现的狭缝均化器,后者只在光谱方向上均匀化。经过二维均匀化后可以在焦平面上得到稳定的、与场景无关的狭缝图像,消除了场景在光谱和空间方向上^[8]的 ISRF 畸变,可以实现最小化光学元件并优化杂散光性能。

CO2M 采用的二维狭缝均质器(2DSH)的另一个优点是,它促进了一种像元混合策略,导致了近乎完美的空间共配准:由于周围的包层分离了光纤核心,焦平面上的照明减少成条纹图案;当光谱分散的狭缝图像投影到探测器阵列上时(见图 4(c)),这些“灰色条纹”之间的探测器像素可以清楚地与由单个纤维定义的子狭缝相关联。对于每个光谱通道,定义了一种空间像元组合方案,例如将通过同一光纤的

光产生的信号分段地单独相加。由于包层间的光谱弥散图像反映了光谱仪的梯形畸变,因此像元组合间隔可以适应光谱仪的实际装配,甚至在飞行中也可以适应。像元组合模式保留了光谱波段内以及在共享同一入口狭缝的四个光谱仪之间的空间共配准,与光学畸变和机械失配(例如探测器位置)不相关。

图 5 所示是由瑞士 TAS (TASiCH)开发和 Optec (意大利)制造的 2DSH 纤维狭缝三维实物。组装成狭缝是通过微定位工具在显微镜的监督下,将矩形光纤逐一放置后,再粘合成光纤堆。通过测量配准精度、焦比减少(FRD)和传输性能,对原型元件进行了综合质量评估,并成功地完成了环境试验。杂散光、均质化等其它性能还有待在下一阶段的光谱仪工程样机中进行测量。

2.2.2 衍射光栅

所有四个光谱波段的色散元件是棱镜-光栅-棱镜组合(也称为棱镜光栅),两个棱镜光栅之间有一个气隙,如图 6 所示,是由位于德国耶拿的夫琅和费应用光学与精密工程研究所(Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, IOF)为碳卫星(Carbon-Sat)候选任务的前期开发而研制的。

透射衍射光栅由蚀刻在熔融二氧化硅衬底上的亚波长结构形成。该亚波长结构粘接在第一(入口)棱镜的出射表面上,并以一级衍射级

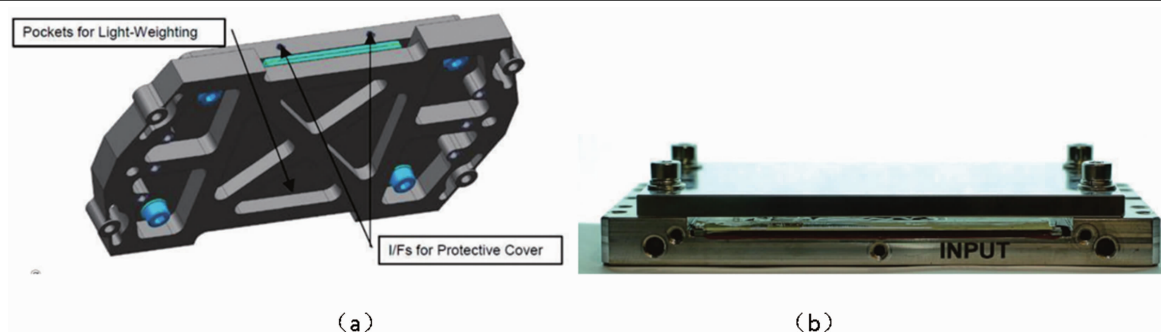


图 5 CO₂I 和 NO₂I 仪器的光纤狭缝原型: (a)设计草图; (b)实物照片(由瑞士泰利斯阿莱尼亚空间公司提供)

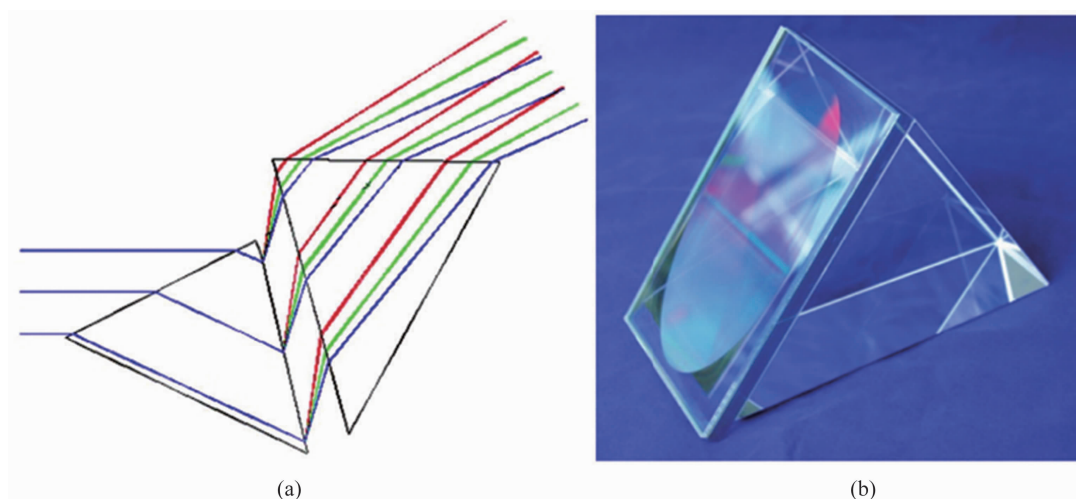


图 6 (a) OPG-P 色散元件设计草图; (b)光栅基板粘接后的棱镜光栅照片。可以看到在出口表面上的光栅是椭圆形结构(照片由 IOF 提供)

和 Littrow 结构工作。图 7 所示为表面结构的示意图和电子显微镜图像。采用电子束光刻和活性离子刻蚀技术制备的二元沟槽规则结构具有良好的衍射、偏光和杂散光性能。沟槽的深度一般在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 量级, 光栅周期远低于沟槽波长(VIS 波段为 $420\ \text{nm}$, SWIR-2 波段为 $1200\ \text{nm}$)。通过原子层沉积(ALD)技术沉积出由 TiO_2 和 Al_2O_3 层交替叠加而成的纳米层状多层膜, 可以调节折射率。在 CarbonSat 的前期研发阶段, 这种涂层还局限于结构的表面。在 CO₂M 任务下的进一步研发目标是填充整个沟槽, 然后用 ALD 沉积的硅氧化物将二元结构严密包住并覆盖。这种光栅技术被证明可以产生超过 90% 的高衍射效率和低于 10% 的偏振灵敏度(见图 7), 并具有低波前误差, 既能实现紧凑化光学设计, 又能保证高信噪比、

低杂散光等苛刻的辐射测量精度要求。

2.2.3 CO₂I/NO₂I 探测器

CO₂I 和 NO₂I 组合仪器将采用两种不同类型的探测器获取空间和光谱的二维图像, 可见光和近红外通道采用硅 CMOS 探测器, 而短波红外波段采用碲镉汞(MCT)探测器。用于可见光和近红外波段的是 Teledyne-E2V 提供的一种新型探测器 CIS120。它具有大格式(2048×2048 像元)、小像元间距($10\ \mu\text{m}$)特征, 可以实现光学图像在两个维度上都可以进行过采样调整, 这有利于光谱和辐射测量性能。图 8 列出了 CIS120 探测器的主要特性。CO₂M 任务将使用最新的 CIS-120 背照型, 提高了全阱容量(80ke^-)。选定的 SWIR 焦平面器件是所谓的“下一代全色”(NGP)探测器, 由 Lynred 根据 ESA 合同研发^[9], 具有较高的成熟度。

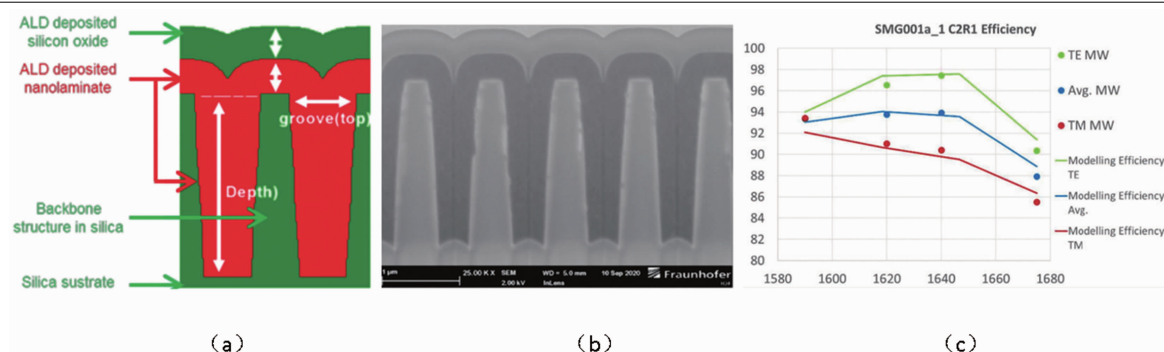


图 7 PG-P 色散棱镜的光栅衬底上粘合的二元沟槽：(a)结构设计图；(b)产品显微图；
(c) SWIR-1 波段衍射光栅的衍射效率预测和测量(图像由 IOF 提供)

Teledyne e2v	CIS120
Sensor Format	
Technologies	2048 x 2048, global shutter, 10 μm pitch
FWC	BSI, no microlenses
QE x Fill Factor	Standard 45 ke-, Variant for CO2M 80 ke-
$\lambda = [405-490\text{nm}]$	Customized ARC based on multi 2 coating
$\lambda = [747-773\text{nm}]$	87%
	70%

图 8 CIS-120 硅 CMOS 探测器及其主要特性(来自 Teledyne-e2v)

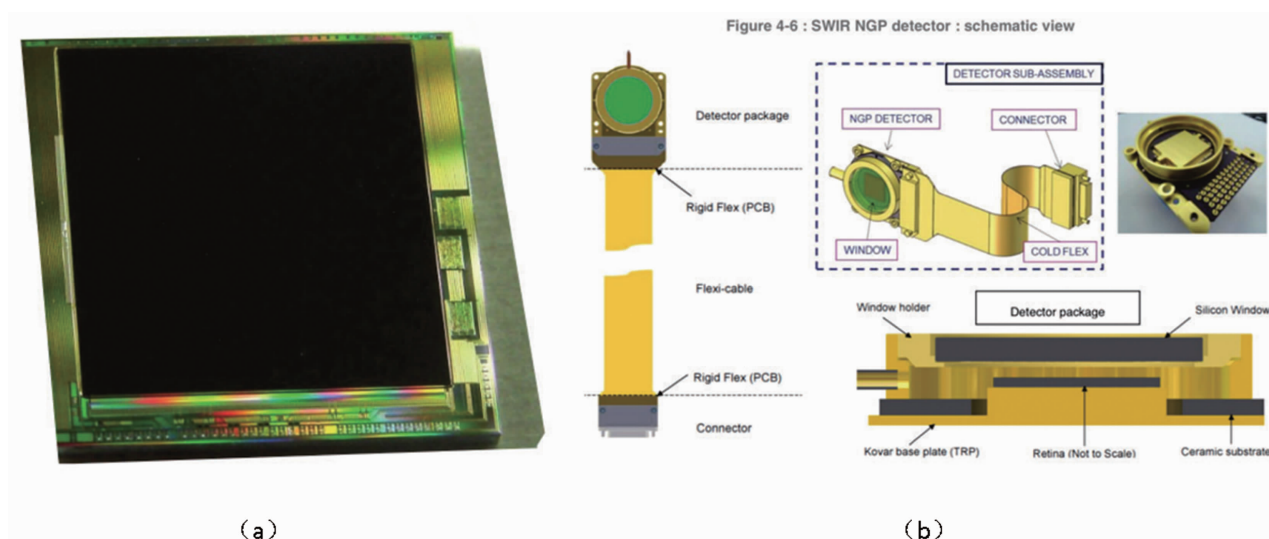


图 9 (a) NGP 探测器图像；(b)建议的探测器封装设计草图

该探测器的基线产品，是将用于 Sentinel-5^[10] 和 MicroCarb^[11]任务的 1024×1024 阵列，间距为 $15 \mu\text{m}$ ，灵敏度高达 $2.5 \mu\text{m}$ ，并提供 680ke^- 的电荷处理能力，非常适合于 CO₂I 和

NO₂I 的动态范围。图 9 描绘了 NGP 和相应的探测器组件。这两种探测器都已启动了综合测试和鉴定计划，特别强调对 XCO₂ 测量特别关键的辐射偏置性能。

3 多角度偏振辐射计

从太空测量二氧化碳浓度的挑战之一是地面场景上方大气中气溶胶的存在, 灰尘、煤烟和微滴颗粒会产生散射过程, 从而调节光通过大气的有效路径。场景上方的大量气溶胶改变了光路, 从而改变了 CO_2 吸收带的深度。这与气体浓度增强的影响是不可区分的。因此, 像 OCO-2 这样的传统任务依赖于偏差校正(使用地面测量)和剔除高气溶胶光学深度(AOD)测量的数据过滤。为了便于这样的修正, 必须知道观测场景上方的气溶胶特性(总量和微物理参数)。多角度偏振计(MAP)的目的是提供这些信息, 从而确保 XCO_2 反演所需的准确性。

空间偏振测量可继承的任务有法国空间中心 CNES 承载于 ADEOS 卫星上的 POLDER 仪器^[12], 以及未来 PACE 任务上的 SPEXone 偏振仪, 其观测原理是测量不同观测角度和光谱波段的亮度和线偏振度(DoLP)。用于 CO_2M 任务的 MAP 仪器原理样机由泰利斯-阿莱尼亚

空间英国公司(Thales-Alenia Space-UK)开发, 原理与 POLDER 仪器类似, 通过各种光谱滤波片和偏振片传递三个不同的偏振角度(AOP)来测量辐亮度, 其光学设计是基于大面积焦平面阵列结合像元尺度的微偏振技术。图 10 所示为 MAP 仪器的测量原理图。它由四个相同的配有独立小型反射望远镜的相机组成, 每个相机具有由探测器像元以不同方向(0° 、 60° 和 120°)对地面场景成像定义的 12 个视场。在每个观测方向上, 当光通过彩色条纹滤光片和与探测器像元对齐的微偏振片阵列时, 光谱辐亮度在七个波长窗口(见表 3)和三个偏振角中测量。

图 11 中的焦平面组件, 微偏光器阵列夹在探测器和彩色条纹滤光片之间。在每个瞬间, 每个探测器像元测量偏振、光谱通道和视角的特定组合, 航天器运动期间的采样提供了 ALT 方向的空间采样。探测器在高读出频率下工作, 导致高密度的本地采样(大约 200 m)。对数据压缩在轨分包处理后, MAP 仪器提供以 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 空间采样的全角范围

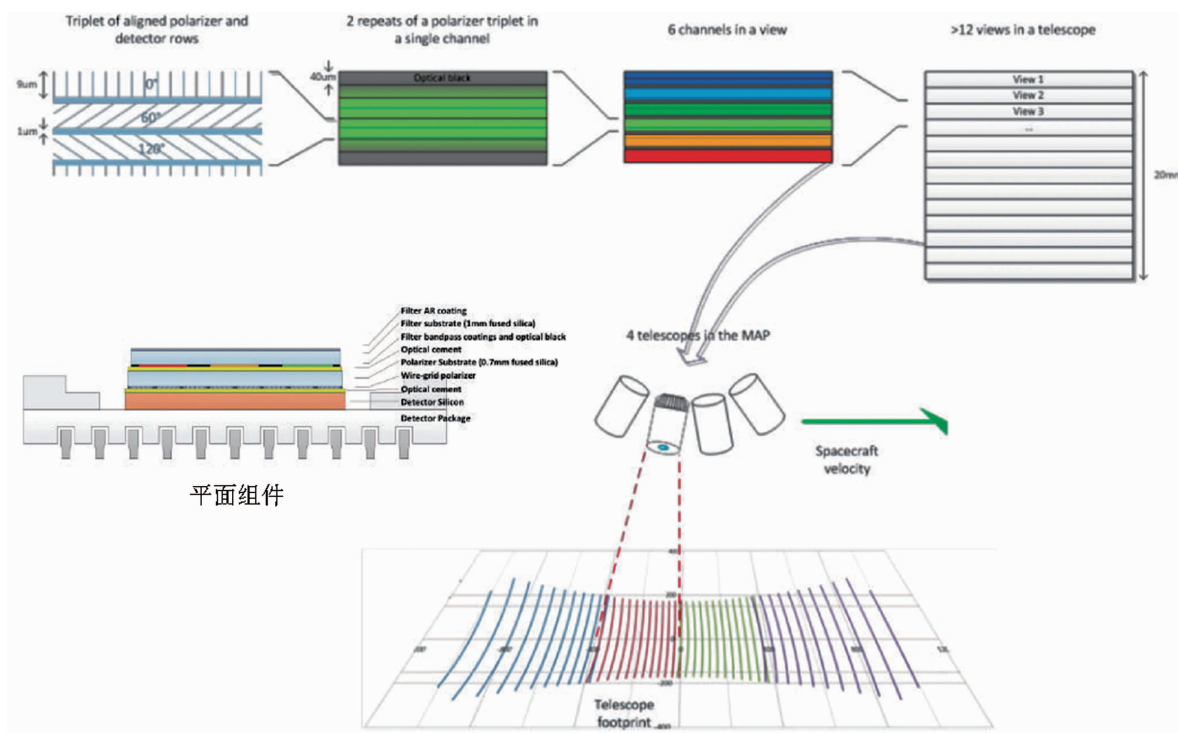


图 10 用于 CO_2M 的多角度偏振计(MAP)的观测原理图(图片由英国泰利斯阿莱尼亚空间公司提供)

表 3 MAP 光谱波段需求

	通道中心波长/nm	通道光谱宽度/nm	DoLP
MAP-1	410	20	Y
MAP-2	443	20	Y
MAP-3	490	20	Y
MAP-4	555	20	Y
MAP-5	670	20	Y
MAP-6	753	9	N
MAP-7	865	40	Y

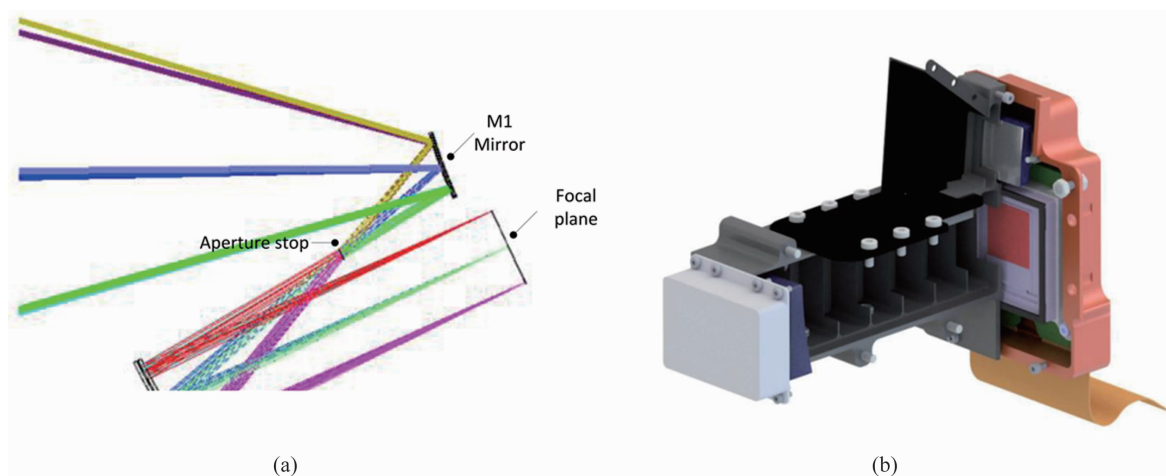


图 11 MAP 单台相机: (a)光学布局; (b)机械设计剖面

内共定位偏振光谱辐亮度。然后,该数据集在地面上由 CO₂I/NO₂I 测量定义的网格被进一步重新采样。

3.1 相机设计

视场中有具有单独远心成像焦平面组件的四个独立相机,单个相机的光学设计和结构设计如图 11 所示^[13]。相机的光学设计,以最小化杂散光,采用镀银球面反射镜,以离轴 Schwarzschild 结构排列,通过入瞳可获得约 28°×28°的正方形视场。设计的 F 数由滤光片光晕确定应慢于 $F/17$ 。这有利于杂散光控制,系统可以在 M2 和焦平面之间设置挡板,且简化了组装和对准。望远镜孔径导致焦点上衍射限制系统,但为了扩大点扩展函数,需要额外的离焦,以最小化 MAP 产品重新采样到 CO₂I 光谱仪产品网格时的混叠效应。

相机的光学和机械部分由 Optec S.p.A (IT)研制。每个相机包括一个遮光罩,以最小化场景外的杂散光。四个相机被彼此相邻地安

排在一个光学工作台上,它们的轴向沿轨道方向呈扇形排列(如图 12)^[13]。光学平台通过在航天器阴影面的辐射器热沉和主动热控控制在较低的温度,以最小化指向的热弹性变化,也最小化了焦平面上应力双折射效应的潜在变化。光学单元的外形尺寸为 540 mm×380 mm×330 mm,总重量约为 12 kg。

3.2 焦平面组件

MAP 仪器的核心创新是焦平面组件(FPA)(见图 13),由 Teledyne e2v 探测器、Moxtek 的微偏振器和 Optics Balzers (DE)的光谱滤光片组成。探测器选用了与 NO₂/CO₂ 光谱仪的 VIS 和 VNIR 通道相同的 CIS120 CMOS 探测器。线栅微偏振器由美国 Moxtek 公司研制,用于对入射到 FPA 上的偏振光进行空间分离,由 10 μm 间距的行偏振器以 0°、60°和 120°的方向交替排列,并以亚微米的精度键合到探测器的硅基片上,将焦平面大体上分割成三个 2048×682 交错探测器。每个探测

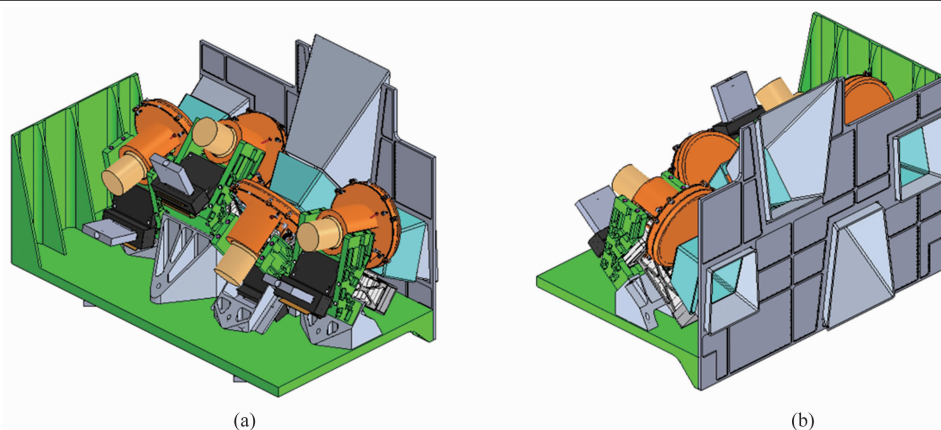


图 12 MAP 光学模装图: 包含四个相同的摄像机和校准子系统的排列(移除了外壳、MLI、引线等)

表 4 CLIM 仪器目标性能参数

参数	地面 像元数	ACT FOV	幅宽	空间采 样距离	地面 SSD ALT $\times$ ACT	系统积 分能量	中心波长	FWHM
CLIM-1	5200	34.6	465 km	174 m	87 m $\times$ 87 m	≥ 0.6	670 nm	20 nm
CLIM-2	5200	34.6	465 km	174 m	87 m $\times$ 87 m	≥ 0.6	752 nm	9 nm
CLIM-3	3144	35	470 km	340 m	174 m $\times$ 163 m	≥ 0.6	1370 nm	15 nm

器测量不同的偏振。像元化微偏振器用于将光在像元级分裂成 4 个偏振态。对于 CO₂M 任务, 因为仪器已经在推扫模式下工作, 所以采用行定向。Moxtek 线栅偏振器已在喷气推进实验室的 MAIA 仪器上飞行。光谱分离是通过 Optics Balzers 研发的二色滤光片进行的。该滤光片由 150 条单个波段条纹组成, 在 6 个通道中循环。附加的 753 nm 通道位于滤光片的边缘, 以便提供一个与 NO₂/CO₂ 光谱仪星下点指向共观测波段。

4 云成像仪

CO₂M 仪器套件由高分辨率云成像仪 (CLIM) 补充和完善。CLIM 仪器的必要性源于 CO₂I/NO₂I 仪器空间样本中云层污染的危害性。如果一个空间样本部分被云层覆盖, 复杂的散射过程将使近红外波段和 MAP 仪器的光路评测失效。虽然完全阴天的地面样品相对容易被检测和过滤, 但 4 km² 范围内的 1%~5% 区域小云量很难识别, 并且需要充分调制光路来控制信号探测量的误差。像 OCO-2 这类传统任务的经验表明, 即使是飞机的冷凝羽流气体在空间样本内也会使 XCO₂ 的反演结果失

效。稀薄的亚可见卷云因其大散射高度而强烈地调制光路, 在可见光波长上几乎无法被探测到。因此, CO₂M 有效载荷需要在子样本分辨率 (<200 m) 下对 CO₂I/NO₂I 观测场景进行空间共配准的云覆盖测量。

这些测量的要求指定了覆盖 VIS、NIR 和 SWIR 三个光谱波段(中心分别在 670 nm、753 nm 和 1370 nm)的辐亮度测量。SWIR 通道位于饱和水汽吸收带内, 对卷云的探测至关重要。图 14 所示的仪器概念是基于 Proba-V 任务^[14]继承设计的。目前比利时 OIP 传感器系统部正在对仪器进行调整, 以适应 CO₂M 任务的具体要求。该仪器由一个反射式 TMA 望远镜组成, 其幅宽为 470 km, 通过光谱带通滤光片传输光线, 并在两个线性阵列焦平面探测器上采样成像。三个光谱波段的瞬时视场在 ALT 方向分离。像其他有效载荷仪器一样, 云成像仪以推扫模式工作, 通过根据地面投影距离对探测器读出计时, 确保光谱波段之间的空间共配准。图 14 所示为 CLIM 仪器的光学设计和总体结构设计, 其性能特征列在表 4 中。

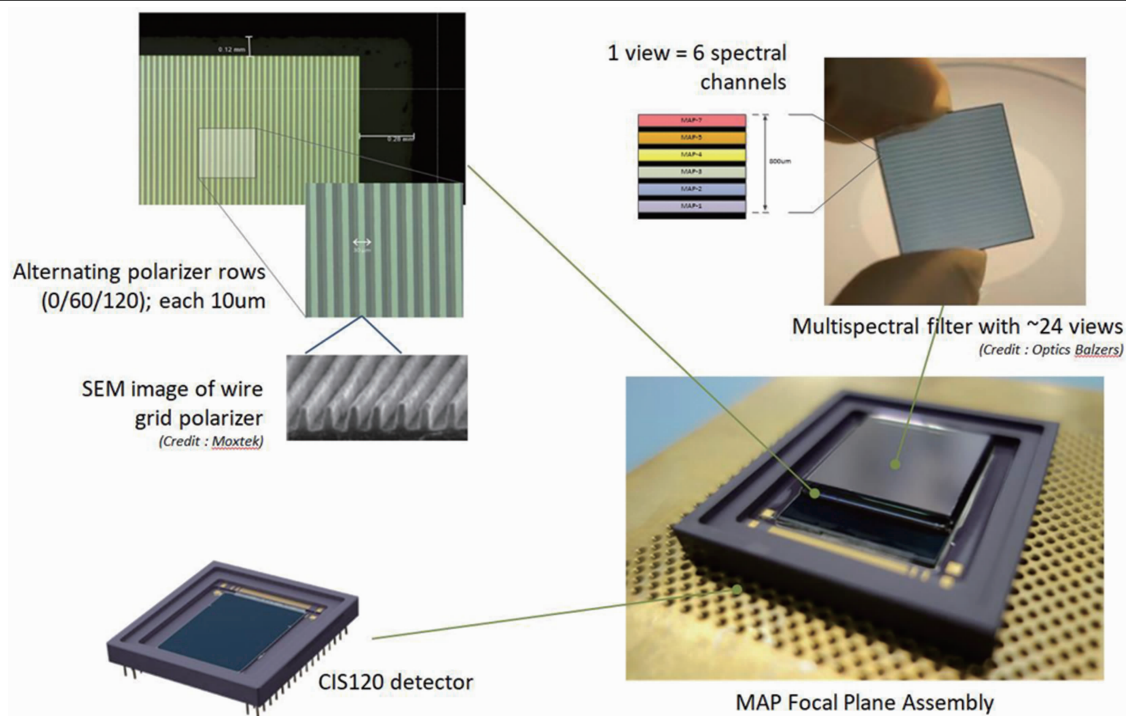


图 13 偏振器和滤光片集成到 CIS120 探测器顶部后的焦平面组件模装图

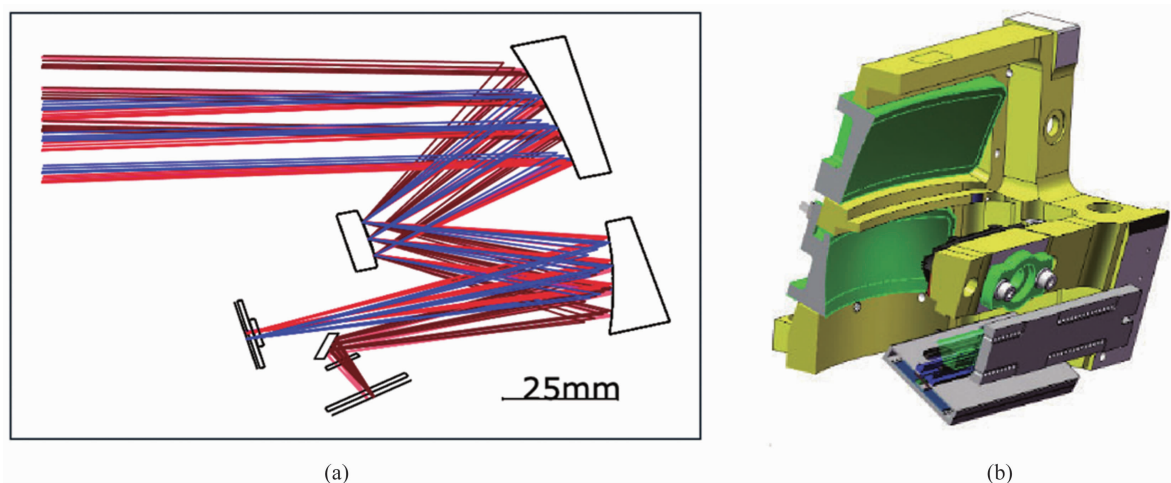


图 14 (a) CLIM 仪器的光学布局; (b) CLIM 仪器设计的前后剖视图(图片由 OIP 提供)

VIS/NIR 焦平面组件是基于硅 CCD 探测器(Teledyne/e2v 制造)构建的四线列,但只使用其中的两列(VIS 和 NIR 各一列),照射 6000 个像元中的 3800 个(像元间距为 $13\text{ }\mu\text{m}$)。图 15 所示为探测器像元排列,以及 SWIR 焦平面阵列的设置。具有近红外和可见光两种涂层的双波段滤光片直接安装在可见光/近红外探测器组件上。相比之下,SWIR 光谱带滤光片设置在距焦平面组件有一定距离的折叠镜后面。SWIR 焦平面是基于 Xenics 的 InGaAs 探

测器,具有三列 1024 像元(间距为 $25\text{ }\mu\text{m}$)的线列,在 ACT 方向上略有重叠,以实现辐射测量的交互定标。该仪器的绝对辐射测量精度是通过月球定标和已知地面目标的替代定标实现的。

5 结论

本文介绍了哥白尼 CO₂M 任务需求的四种仪器,阐述了各仪器的目标、概念和有效载荷组件的关键技术。图 16 描述了整个卫星平台及有效载荷总体结构。这四种仪器的设计和

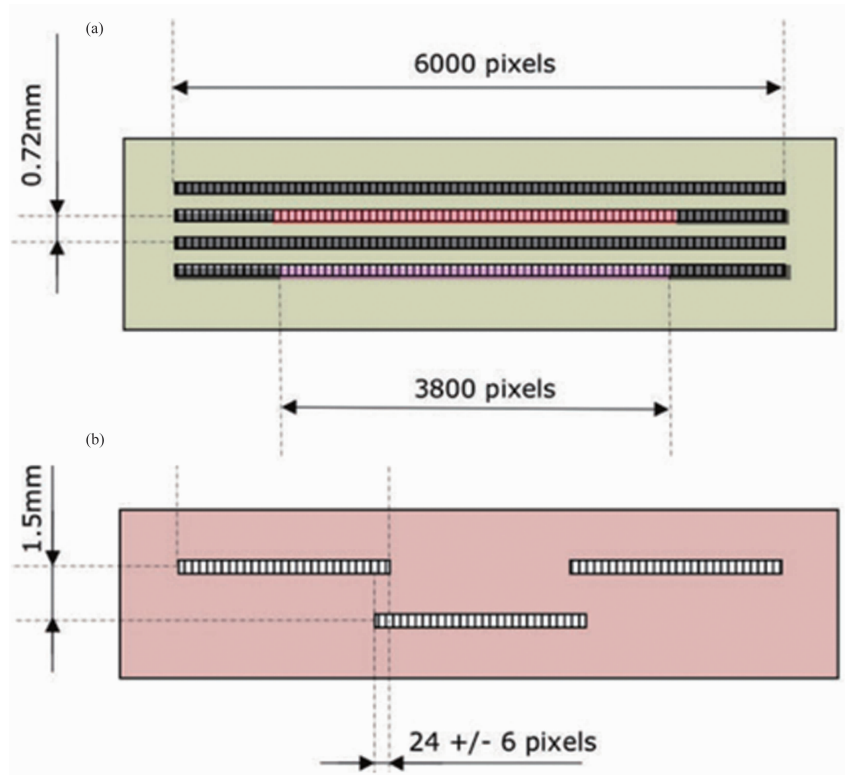


图 15 两个焦平面探测器的示意图: (a) 四线列 Si CCD 探测器中的用于 VIS (上面第二列) 和 NIR (最下面一列); (b) SWIR 焦平面由三条略微重叠的 InGaAs 探测器线列采样 (图像由 OIP 提供)

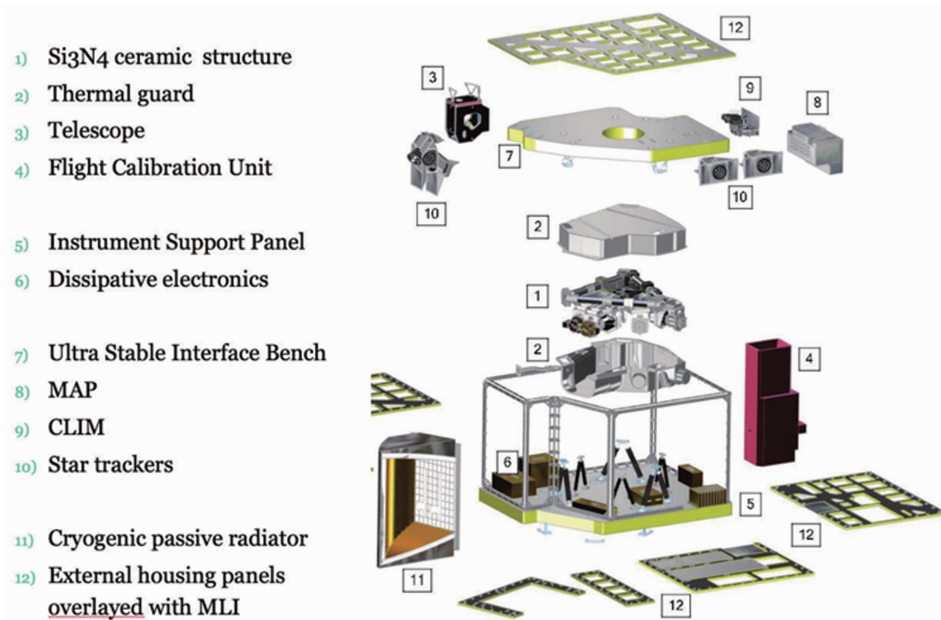


图 16 CO₂M 完整系统的概貌: 包括所有仪器和平台 (由法国 TAS 提供)

操作是完全互补和优化的, 最大限度地提高单次探测的精度和平均二氧化碳浓度的准确性, 以满足量化人为二氧化碳源 (如发电厂和大城市) 测量的要求。它们以一种协调的方式工作, 其数据通过协同反演后获得温室气体浓度。二

氧化碳和甲烷推扫式成像仪由三个具有共同入口狭缝和准直器的光谱仪组成, 将提供连续和详细的温室气体浓度全球测绘。它与第四台光谱仪相结合, 测量场景二氧化氮浓度, 作为弱点源的示踪器, 并识别出排放羽流的形状。多

角度偏振计(MAP)可同时测量光路校正所需的气溶胶参数,因此即使是在污染严重的工业地区,也能实现精确的反演。最后,高分辨率云成像仪(CLIM)以子样本分辨率探测云,用于云污染样本的高级数据筛选和过滤。

目标发射计划是 2025 年,预计该卫星星座的观测系统将以以前所未有的空间覆盖,提供高空间分辨率和精度的全球温室气体浓度地图。这套特有的数据将能够可靠地监测人为温室气体排放,为决策者提供可操作的信息,并支持政府和社区评估其为减少温室气体排放和保护地球气候方面所做的重要努力^[15]。

参考文献

- [1] European Commission. Towards a European Operational Observing System to Monitor Fossil CO₂ Emission [EB/OL]. www.copernicus.eu/sites/default/files/2019-09/CO2_Blue_report_2015.pdf, 2015.
- [2] ESA. Copernicus CO₂ Monitoring Mission Requirements Document [EB/OL]. https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/CO2M_MRD_v3.0_20201001_Issued.pdf, 2020.
- [3] Veefkind J P, Aben I, McMullan K, et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **120**: 70–83.
- [4] Kuhlmann G, Broquet G, Marshall J, et al. Detectability of CO emission plumes of cities and power plants with the Copernicus Anthropogenic CO₂ Monitoring (CO2M) mission [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, **12**(12): 6695–6719.
- [5] Bézy J L, Fernandez V, Bernd S, et al. The European Copernicus mission for anthropogenic CO₂ emission monitoring [C]. *SPIE*, 2019, **11501**: 1150103.
- [6] Amann S, Quynh D E, Tobias H, et al. Characterization of fiber-based slit homogenizer devices in the NIR and SWIR [C]. *SPIE*, 2019, **11180**: 111800M.
- [7] Hummel T, Meister C, Keim C, et al. Slit homogenizer introduced performance gain analysis based on the Sentinel-5/UVNS spectrometer [J]. *Atmos Meas Tech*, 2021, **14**(8): 5459–5472.
- [8] Butler J J, Caron J, Armin L, et al. The CarbonSat candidate mission: imaging greenhouse gas concentrations from space [C]. *SPIE*, 2014, **9218**: 92181F.
- [9] Fieque B, Chorier P, Lamoure A, et al. Status of space activity and science detectors development at Sofradir [C]. *SPIE*, 2019, **11180**: 111803E.
- [10] Bézy J L, Keim C, Bartsch P, et al. Sentinel-5 instrument: status of design, performance, and development [C]. *SPIE*, 2017, **10423**: 1042309.
- [11] Cugny B, Buil C, Cansot E, et al. A new space instrumental concept based on dispersive components for the measurement of CO₂ concentration in the atmosphere [C]. *SPIE*, 2017, **10564**: 105641R.
- [12] Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, **224**: 474–511.
- [13] Spilling D, Thales A. The Multi Angle Polarimeter (MAP) on board ESA's Copernicus Carbon Dioxide Monitoring mission (CO2M) [C]. *SPIE*, 2021, **11852**: 118523M.
- [14] Francois M, Santandrea S, Mellab K, et al. The PROBA-V mission: the space segment [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, **35**(7): 2548–2564.
- [15] Sierk B, Fernandez V, Bézy J L, et al. The Copernicus CO2M mission for monitoring anthropogenic carbon dioxide emissions from space [C]. *SPIE*, 2021, **11852**: 118523M.