文章编号：1001-9014(XXXX)XX-0001-14

DOI：10. 11972/j. issn. 1001-9014. JIMW. 2026155

天问二号可见红外成像光谱仪定标方案与数据特性

何志平[1,3]， 陈鹏鹏[1,3]， 王梅竹[1]， 徐 睿[1,3]， 刘成玉[1]， 刘大卫[2]， 吕 刚[1,3]，
袁立银[1,3]， 李津宁[1]， 王 蓉[1]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院国家天文台，北京 100190；
3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘要：天问二号是中国首次小行星探测任务，将对近地小行星2016 HO3和主带彗星311P开展综合探测。可见红外成像光谱仪（Visible and Infrared Imaging Spectrometer，VIRIS）是其核心载荷之一，获取0. 45 - 4. 5 μm高光谱数据，用于表面物质成分与演化历史研究。VIRIS采用可见近红外及短中波红外双通道共孔径方案（0. 45 - 1. 6 μm / 1. 55 - 4. 5 μm），可有效覆盖辉石、橄榄石、含水矿物及有机物的关键吸收特征。本文系统阐述了VIRIS的定标方案，包括地面光谱定标、辐射定标、几何定标的方法与结果，表明：VIRIS的平均光谱分辨率在可见近红外谱段优于6. 55 nm，在短中波红外谱段优于9. 98 nm；绝对辐射定标不确定度在可见近红外谱段优于9. 1%，在短中波红外谱段优于8. 4%；几何指向精度优于0. 009°。然后，说明了VIRIS的探测、定标等工作模式与数据产品特性。

关 键 词：天问二号；可见红外成像光谱仪；定标方案；数据特性；小行星探测

中图分类号：V476；　　**文献标识码**：A

引言

小行星和彗星是太阳系形成初期的残余天体，其物质组成记录了早期太阳星云的化学分异与演化过程[1-2]。天问二号任务将首先对近地小行星2016 HO3开展遥感、就位探测和采样返回，随后对主带彗星311P进行绕飞探测[3-4]。2016 HO3可能为S或L型硅酸盐小行星[5]，地面望远镜观测表明，其反射光谱中1 μm和2 μm附近预期存在辉石、橄榄石的组合吸收特征。311P可能为Flora族S型活动小行星[6]，其2. 7 - 3. 6 μm区间可能记录水合作用或有机质信息。因此，对两类目标开展高精度光谱探测，对于揭示其物质组成、空间风化过程及形成演化历史具有重要科学意义。

为实现上述科学目标，需要获取目标天体表面的连续光谱信息，并准确解析矿物特征吸收谱带的位置、形态及强度。可见-红外高光谱成像技术能够同步获取目标表面的空间信息和连续光谱信息，是当前开展行星表面矿物识别、成分分析及空间分布研究的核心手段，已成功应用于多项小行星和彗星等地外天体探测任务[7-12]。天问二号共配置了11台科学载荷[13]，其中可见红外成像光谱仪（Visible and Infrared Imaging Spectrometer，VIRIS）覆盖0. 45 - 4. 5 μm，可实现从可见至中波红外的连续高光谱探测[14]。

然而，光谱成像载荷获取的原始数据受到光学系统透过率、探测器响应、电子学增益、温度漂移及像元非均匀性等因素影响，无法直接反映目标表面的真实辐射特性[15]。因此，高精度定标成为保证光谱数据质量和科学应用能力的关键环节。定标的目的在于建立仪器输出与目标真实辐射特性之间的准确映射关系，并精确描述载荷的光谱响应、辐射响应和几何成像特性。高精度定标不仅能够保证光谱数据的真实性和一致性，提高矿物识别与成分反演精度，而且为多源遥感数据融合、长期在轨性能监测及科学数据产品生成提供基础支撑[16]。因此，高精度定标方案已成为国内外深空光谱探测任务的重要研究内容，也是保证科学探测任务成功实施的关键技术之一。

为保证长期在轨观测数据的准确性和稳定性，国外典型深空光谱探测任务均建立了较为完善的地面与在轨定标体系，并根据不同探测任务特点设计了相应的定标策略。例如，L′Ralph 是 NASA Lucy 木星特洛伊小行星探测任务搭载的可见—近红外成像光谱载荷，用于获取小行星表面形貌、矿物组成及挥发分特征，其工作模式围绕“多目标高速飞越交会探测”任务架构设计[17]。观测过程空间覆盖由航天器相对运动产生，其观测模式属于典型的

飞越扫描模式。L′Ralph 配置了钨丝灯、微型黑体和太阳定标端口三类在轨参考源。上述内部定标源承担相对辐射稳定性监测功能，绝对辐射定标依赖巡航阶段标准恒星观测完成[18]；可见红外热成像光谱仪（Visible and InfraRed Thermal Imaging Spectrometer，VIRTIS）为 Rosetta 任务搭载的双通道成像光谱仪，其工作模式围绕“彗星绕飞长期演化观测”设计[19]，在在轨定标方面，VIRTIS 内置可见光/红外校准灯黑体辐射源，可通过周期性定标序列实现探测器增益、光谱响应与热背景的长期稳定监测[20]；卫星与木星成像光谱仪（Moons And Jupiter Imaging Spectrometer，MAJIS）是 JUICE 任务的可见–近红外成像光谱仪，用于木星及其冰卫星的矿物与挥发分探测[21]。其工作模式围绕“轨道长期伴飞+多目标重复观测”设计。通过内部定标源实现探测器增益与光谱响应的短周期监测[22]。

与上述任务相比，天问二号搭载的 VIRIS 在创新性与任务适配性方面有以下几个特点：第一，针对 2016 HO3 自转周期快、体积小的特点，设计了“主动扫描+被动推扫”双模式作业策略，可在 20 km 远距离通过主动扫描获取全貌，在 3 km 以内利用自转被动推扫，实现不同距离下的探测基准一致性。第二，在 15.3 kg 重量约束下，集成了积分球、黑体及光谱定标器三合一内置定标源，支持 0.45 – 4.5 μm 全谱段在轨自主定标。第三，针对 InGaAs 探测器在低温低照度下的非线性响应，建立了分段幂函数+线性联合辐射定标模型（见式（1）），将低照度定标误差降低至 5.2%。第四，双通道共孔径设计在 1.55 – 1.6 μm 过渡重叠，保证了辉石、橄榄石等矿物诊断吸收带的光谱连续性，相比分谱段拼接方案减少了跨通道定标误差。

已有文献对 VIRIS 的探测机理和总体设计进行了介绍[14]，但对具体的地面和在轨定标方案、数据特性及相关结果尚无系统阐述。本文在简要介绍 VIRIS 基本功能与性能指标的基础上，重点论述了 VIRIS 的地面定标方案，包括地面光谱定标、辐射定标、几何定标的具体方法与定标结果，以及在轨探测、定标等工作模式与数据产品特性。上述工作为天问二号抵近探测科学数据的快速处理与矿物填图等研究提供关键技术依据，支撑小行星矿物解译与演化研究。

1 VIRIS 概述

VIRIS 是一台推扫式成像光谱仪，为实现 0.45 – 4.5 μm 宽谱段连续探测，VIRIS 采用双通道共孔径方案：可见近红外通道（VNIR）覆盖 0.45 – 1.6 μm，短中波红外通道（SMIR）覆盖 1.55 – 4.5 μm，两通道在 1.55 – 1.6 μm 过渡，保证了 1 μm（辉石、橄榄石）和 2 – 3.6 μm（含水矿物、碳酸盐、有机物）等关键吸收带的光谱连续性。VNIR 通道使用 1024×320 元 InGaAs 面阵探测器，SMIR 通道使用 512×320 元 MCT 焦平面阵列，探测器均为上海技术物理研究所研发。为抑制红外背景辐射，SMIR 通道光机实施多温区辐射制冷，工作温度低于–120 ℃，实现了轻小型化。在完成宽谱段探测能力设计的基础上，VIRIS 针对不同探测阶段进一步设计了多种工作模式，以满足小天体交会探测需求。

针对天问二号不同距离测站及科学探测需求，VIRIS 设计了如图 1 所示的多种探测模式。在 20 km 远距离测站，采用主动扫描模式：指向机构以 27 Hz 频率摆扫，扩展视场覆盖，用于远距离目标获取与多载荷光轴配准。在 3 km、600 m、300 m 近距离测站，采用被动推扫模式：利用小天体自转实现推扫成像，在 3 km 高度幅宽约 194.7 m，瞬时视场角（Instantaneous Field of View，IFOV）对应地面 0.22 m（VNIR）和 0.44 m（SMIR）。此外，定标模式将视场切换至内置源和冷空间，定期执行。各模式协同满足全球填图、目标详查和数据一致性维护需求。

基于上述光学设计和工作模式，VIRIS 双通道平均光谱分辨率分别为 6.55 nm 和 9.98 nm，单像元 IFOV 为 0.074 mrad（VNIR）和 0.148 mrad（SMIR），总视场 3.8°。整机质量 15.3 kg，探测功耗约 45 W。如表 1 所示，与国际同类载荷相比，VIRIS 在谱段覆盖、空间分辨率和重量方面具有综合优势[14]。

VIRIS 谱段覆盖、光谱分辨率及空间分辨率均与天问二号科学探测目标矿物识别需求密切相关。下面分别从光谱覆盖能力、光谱分辨率和空间分辨率三个方面进行分析。

从光谱覆盖能力来看，VIRIS 覆盖 0.45 – 4.5 μm 波段，包含了小行星表面主要造岩矿物及挥发分相关组分的关键诊断吸收区间。含铁镁硅酸盐矿物以橄榄石和辉石为代表，在约 1 μm 附近表现出由 Fe^{2+} 晶场跃迁引起的宽吸收带，低钙辉石和高钙辉石分别在约 0.9 μm 和 1.9–2.3 μm 波段呈现特征吸收[23–25]。因此，0.45 – 2.5 μm 的连续光谱覆盖能够满足硅酸盐矿物识别、分类及矿物化学组成反演的需求。此外，2.7 – 3.1 μm 波段对应羟基和

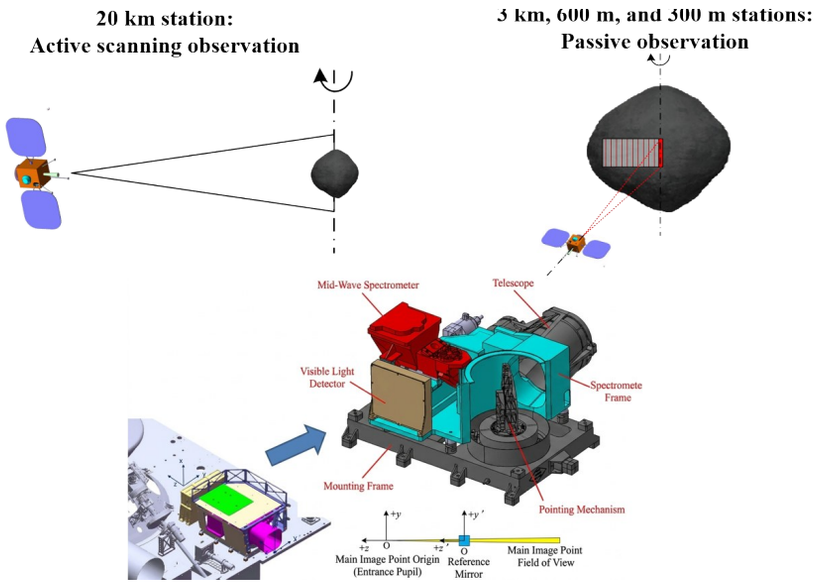

图 1　VIRIS 及其工况与安装位置示意

Fig. 1　Schematic illustration of the VIRIS operational configurations and mounting location.

表 1　深空探测领域主要光谱载荷技术指标对比[14]

Table 1　Comparison of key specifications of major spectroscopic payloads for deep-space exploration.

Payload	VIRTIS	CRISM	VIR	M3	MMS	L'Ralph	MAJIS	VIRIS
Mission	ROSETTA (2004)	MRO (2005)	DAWN (2007)	Chandrayaan-1 (2008)	TW-1 (2020)	LUCY (2021)	JUICE (2023)	TW-2 (2025)
Spectral Range/ μm	0.22 - 5.0	0.36 - 3.9	0.25 - 5.0	0.43 - 3.0	0.4 - 3.4	0.35 - 3.8	0.5 - 5.4	0.45 - 4.5
IFOV/ mrad	0.25	0.061	0.25	0.7	0.5	0.08	0.15	0.074(VNIR) 0.148(SMIR)
FOV/ (°)	3.7°	2.12°	3.7°	24°	12°	1.4°	3.4°	3.8°
Weight/ kg	23	32.9	20	< 10	8.09	35.0	49.2	15.3
Power Consumption/ W	50	44.4 - 47.3	52	< 20	/	24.5	/	45(均值)

结构水(OH/H_2O)的特征吸收[26-27],3.2 - 3.6 μm 波段与脂肪族有机物中 C - H 键的伸缩振动有关[28]。因此,扩展至 4.5 μm 的光谱探测能力,使 VIRIS 具备了对含水矿物、有机质及其他挥发分相关组分开展探测与识别的能力,为研究小行星水化作用历史及有机物赋存状态提供了重要观测手段。

在满足关键谱段覆盖的基础上,光谱分辨率进一步决定了矿物诊断吸收特征的解析能力。VIRIS 在 VNIR 和 SMIR 波段的平均光谱分辨率分别达到 6.55 nm 和 9.98 nm,可有效解析 1 μm 和 2 μm 附近吸收带的中心位置、带宽及非对称性等光谱参数,支持不同类型辉石的区分以及橄榄石铁镁含量变化的判识。同时,该分辨率水平能够满足 2.7 - 3.5 μm 波段较弱且相对狭窄的水化矿物和有机物吸收特征的提取需求。月球与小行星成像光谱探测任务的实践表明,约 10 nm 或更优的光谱分辨率能够有效解析主要矿物的诊断性吸收特征,满足矿物组成识别、矿物丰度反演以及表面物质混合状态分析等科学研究需求[29-30]。

除光谱性能外,空间分辨率决定了目标表面细尺度地质信息的获取能力。VIRIS 的瞬时视场分别为 0.074 mrad 和 0.148 mrad,在天问二号典型近距离观测条件下可获得米级至十米级的空间分辨率,能够表征局部岩块、撞击坑溅射沉积物以及潜在采样区域的光谱组成差异与空间分布特征,为识别表面物质异质性、解析地质过程及开展高价值采样点优选提供关键支撑。

综合分析表明,VIRIS 当前的技术指标能够满足天问二号任务针对橄榄石、辉石、含水矿物及有机物等关键科学目标的探测需求,支撑小行星表面

矿物组成识别、空间分布制图、矿物丰度反演以及水化和有机演化过程研究。上述性能分析表明，VIRIS已具备完成天问二号科学探测任务的硬件基础，而实现上述性能指标并获得满足科学分析要求的高质量数据，则依赖于完善的地面定标和在轨定标体系。

2 地面定标方案

VIRIS的定标方案由地面定标和在轨定标两部分构成。地面定标在发射前建立高精度基准；在轨定标通过内置源和冷空间观测维持任务周期内数据的一致性[14]，其中地面定标分为光谱定标、辐射定标和几何定标三个部分，所需的主要定标设备为单色仪、定标源、经纬仪、平行光管、真空罐和调整台，其中调整台含转台和俯仰台，如图2(a)所示。

2.1 光谱定标

光谱定标场景如图2(b)所示，采用单色仪(Horiba iHR550/iHR320)产生单色平行光，在真空罐内(VNIR通道-40 ℃、SMIR通道-120 ℃)扫描各波段，获取光谱响应函数，确定中心波长与光谱分辨率(Full Width at Half Maximum，FWHM)。定标结果见表2：VNIR通道平均光谱分辨率6.55 nm(最大7.9 nm)，SMIR通道平均9.98 nm(最大12.0 nm)；定标精度：0.45 - 0.9 μm优于0.5 nm，0.9 - 3.0 μm优于1.0 nm，3.0 - 4.5 μm优于2.5 nm。

2.2 辐射定标

辐射定标用于建立仪器输出DN值与入瞳辐射亮度之间的定量关系[31]。考虑到VNIR和SMIR探测器类型、工作温度和背景辐射特性不同，内部杂散辐射、环境温度变化以及测量距离等因素均可能影响红外辐射定量结果，需要结合具体工况建立相应的误差补偿与定标模型[32-33]，所以两个通道采用不同的定标源和处理模型。

地面辐射定标如图2(c)所示，0.45 - 2.5 μm采用积分球，2.2 - 4.5 μm采用变温黑体(250 - 420 K)和100 K低温黑体扣除背景。VIRIS首先采集背景数据，完成暗电流和红外背景扣除；其次利用积分球或黑体多能级数据开展相对辐射定标，修正像元间响应非均匀性。由于VNIR通道InGaAs探测器在低照度条件下呈现明显非线性，传统基于线性响应假设的相对辐射定标方法不适用于该通道，因此采用分段幂函数与线性联合模型进行逐像元响应校正；SMIR通道则采用线性模型进行相对辐射定标。然后基于已知辐射亮度的标准源开展绝对辐射定标，建立DN值与辐射亮度之间的转换关系；最后进行不确定度评估，形成定标系数库，用于后续科学数据处理。

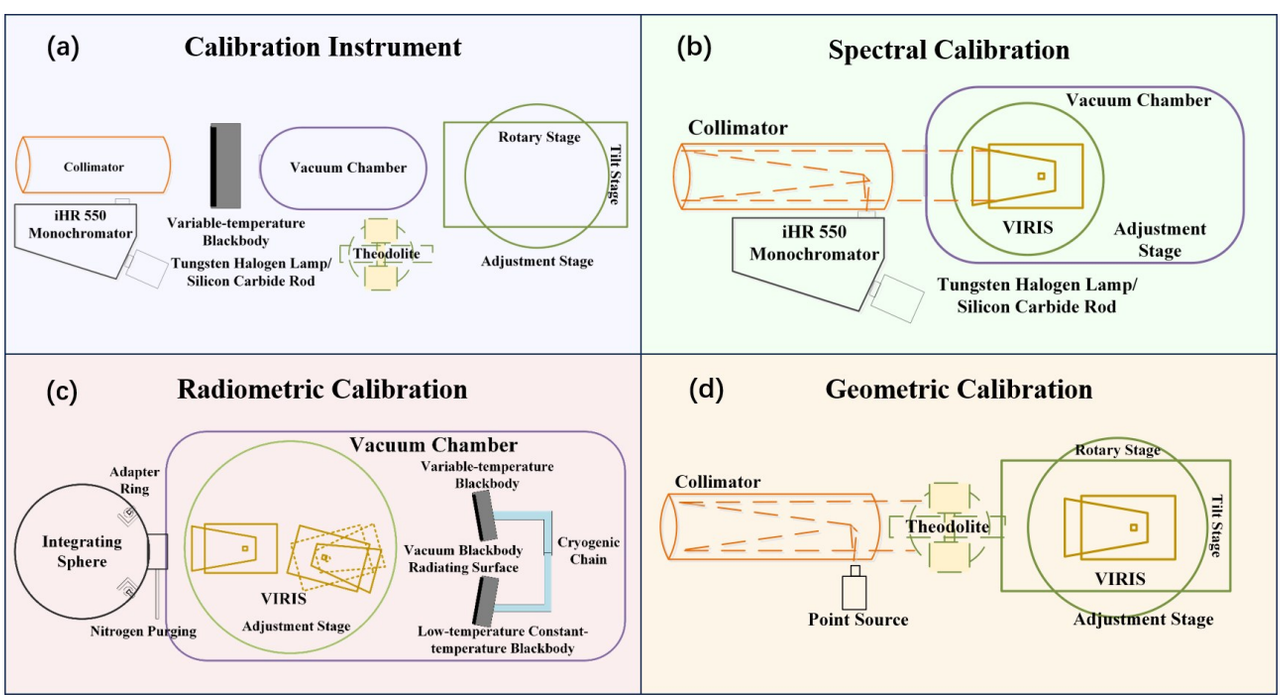

图2 VIRIS的地面定标系统：(a) 主要设备；(b) 光谱定标；(c) 辐射定标(左：积分球定标，右：黑体定标)；(d) 几何定标

Fig. 2 Ground calibration system of VIRIS: (a) Major calibration equipment; (b) Spectral calibration; (c) Radiometric calibration (left: integrating sphere; right: blackbody source); (d) Geometric calibration

2.2.1　VNIR通道辐射定标

由于VNIR通道InGaAs探测器在低照度条件下响应特性偏离线性模型,传统基于线性响应假设的相对辐射定标方法难以准确校正像元间响应差异。因此,采用分段幂函数+线性联合模型逐像元定标进行辐射校正,并在此基础上建立辐射响应关系,以保证低照度条件下辐射定标的准确性。定标模型如式1所示

$$L=\begin{cases}\dfrac{a}{t}\left(\dfrac{DN}{c}\right)^{b}, DN<c\\ \dfrac{1}{t}\left[d(DN-c)+a\right], DN\geqslant c\end{cases},\qquad(1)$$

其中,L为辐射亮度,单位$\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot \mu m^{-1}}$;$t$为积分时间,单位为ms;$a$为公用系数,单位为$\mathrm{mJ\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot \mu m^{-1}}$;$b$为非线性部分系数,无量纲;$d$为线性部分系数,单位为$\mathrm{mJ\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot \mu m^{-1}}$;$c$为分界点。辐射定标模型在$c$点连续。

该模型基于InGaAs探测器的物理响应机制,低照度下光生载流子以陷阱复合为主,响应服从幂律;高照度下复合饱和,响应趋于线性。模型中c为线性–非线性拐点,通过最小二乘拟合确定。利用积分球多能级数据进行逐像元拟合,得到模型残差:在0.45–1.6 μm范围内,拟合相对误差均值为2.1%,最大4.3%(0.45 μm低照度处)。该精度优于单一线性模型(低照度误差>15%)。

图3为经逐像元辐射定标后的图像,空间维均匀光滑,响应一致,较为明显的黑色条纹基本被消除。另外,受电路读出设计而产生的细条纹也完全消除。

2.2.2　SMIR通道辐射定标

SMIR 通道探测器(MCT)响应为线性,采用线性模型逐像元定标,并通过暗背景监测像元实时扣除暗电流。

在真空环境下,利用积分球和黑体分别获取1.6–2.5 μm、2.2–4.5 μm谱段不同空间视场的辐射响应。积分球和黑体有效均匀出射辐射面均覆盖了可见红外成像光谱仪的成像视场,可对该通道不同空间视场进行有效的非均匀性校正。

以25 ms积分时间下获取的数据为例。图4为去除暗背景数据经相对辐射定标前后的图像,空间维均匀光滑,响应一致。

2.2.3　辐射定标误差分析

VIRIS辐射定标过程中,积分球内部及光路中的水汽会在特征波段产生明显吸收,改变定标辐射

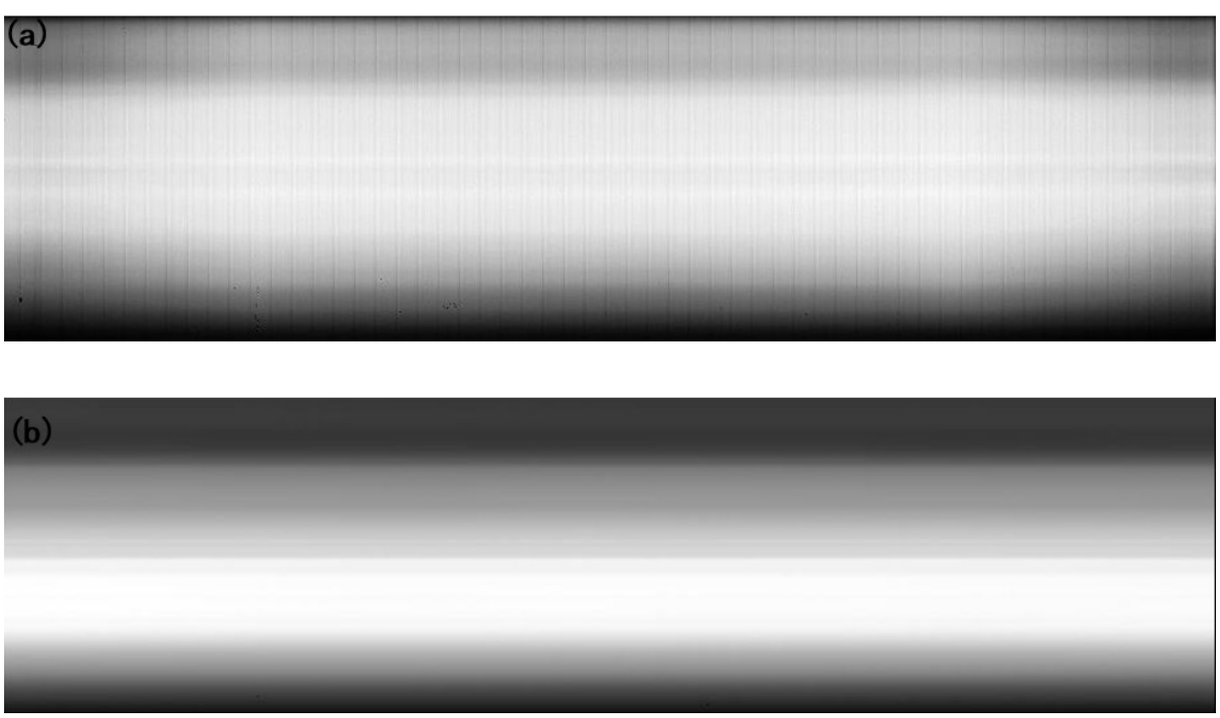

图3　VNIR通道辐射定标前后响应特性对比:(a) 辐射定标前; (b) 辐射定标后

Fig. 3　Comparison of response characteristics before and after radiometric calibration for the VNIR channel: (a) Before radiometric calibration; (b) After radiometric calibration

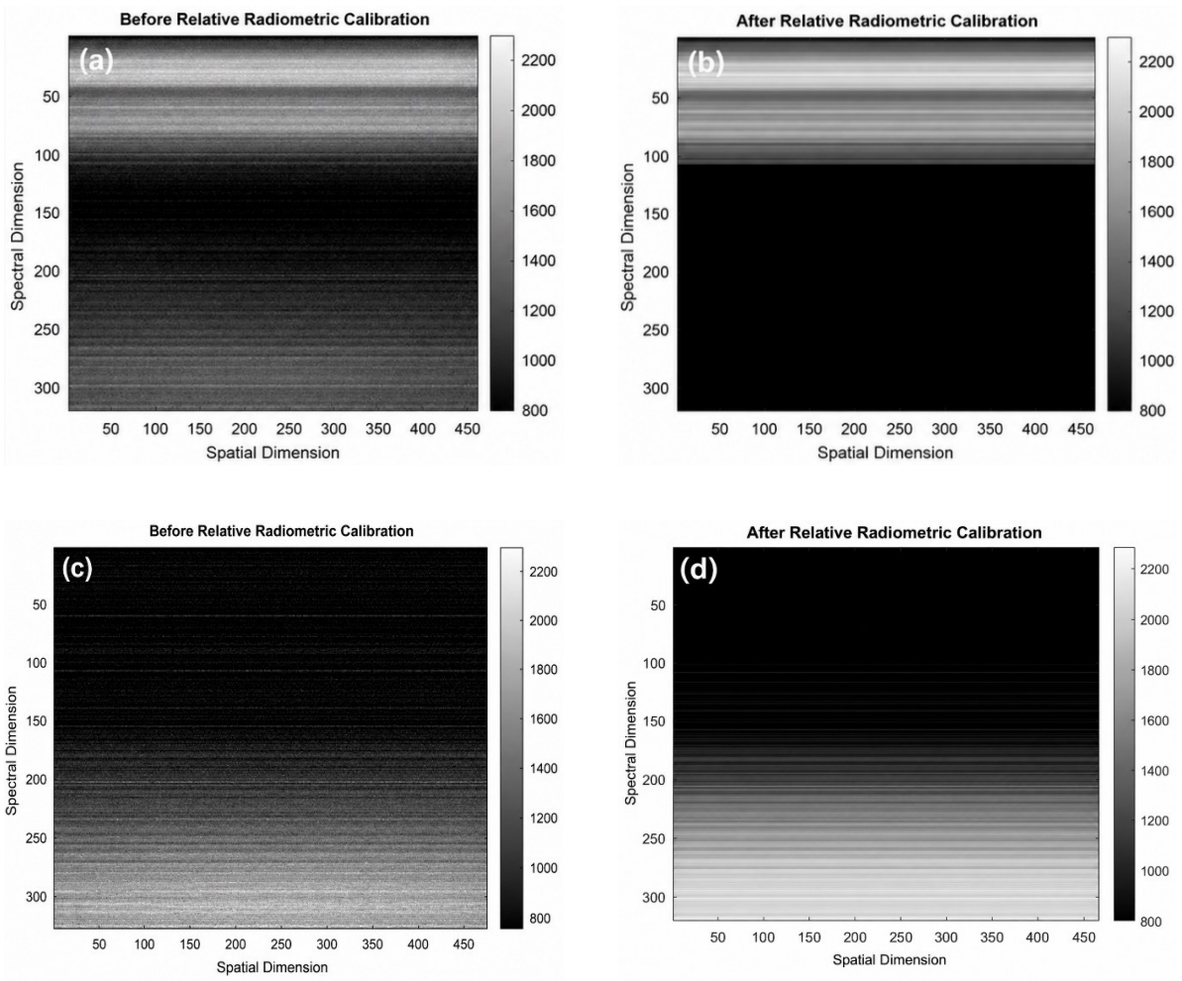

图 4 SMIR通道辐射定标前后响应特性对比:(a) 辐射定标前(1.6 – 2.5 μm); (b) 辐射定标后(1.6 – 2.5μm); (c) 辐射定标前(2.2 – 4.5 μm); (d) 辐射定标后(2.2 – 4.5 μm)

Fig. 4 Comparison of response characteristics before and after radiometric calibration for the SMIR channel: (a) Before radiometric calibration (1.6 – 2.5 μm); (b) After radiometric calibration (1.6 – 2.5 μm); (c) Before radiometric calibration (2.2 – 4.5 μm); (d) After radiometric calibration (2.2 – 4.5 μm)

量值的传递关系,进而影响溯源链条的可靠性和辐射定标结果的准确性,应严格开展湿度监测与控制,并在必要时进行干燥吹扫和水汽吸收修正。

相对辐射定标的不确定度主要来源于定标系统(参考辐射源)的空间非均匀性、定标模型逼近误差以及载荷自身的随机噪声等因素。因此,相对辐射定标总不确定度可由上述误差源按独立误差传播原则进行合成,其表达式如下:

$$\varepsilon_{rel} = \sqrt{P_U^2 + \alpha^2 + \varepsilon_\sigma^2}\,, \tag{2}$$

其中 ε_{rel} 为相对辐射定标总不确定度;P_U 为定标系统空间非均匀性引入的不确定度项;α 为相对辐射定标模型误差;ε_σ 为载荷噪声引入的随机不确定度。

对于单一光谱通道(或单波段)而言,载荷噪声不确定度定义为:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\sigma}{R_H}\,, \tag{3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(DN_i - \overline{DN})^2}{n-1}}\,, \tag{4}$$

其中,σ 为该波段的噪声标准差,R_H 为该波段除暗背景之后的最大信号值的一半,DN_i 为该波段第 i 个像元的数字量化值;$\overline{DN}$ 为该波段所有像元DN值的均值;n 为参与统计的有效像元数。

按照上述计算公式计算完所有波段的相对辐射定标误差之后,将某一谱段范围内所有波段相对辐射定标误差的均值作为该谱段范围内相对辐射

定标误差。定标系统的不确定度主要为积分球的光源稳定性与均匀性以及黑体的温度稳定性与面均匀性。

绝对辐射定标不确定度由标准传递不确定度、标准面光源积分球和黑体的稳定性、模型精度、相对辐射定标精度等决定。VIRIS定标系统的不确定度主要为积分球的光源稳定性与黑体的温度稳定性。根据辐亮度定标系统不确定度、稳定性、模型误差、相对辐射定标精度合成得到VIRIS绝对辐射定标不确定度,公式如下:

$$U_{abs} = \sqrt{P^2 + NL^2 + U^2 + R^2}\,, \tag{5}$$

其中U_{abs}为绝对辐射定标总不确定度;P为定标系统不确定度;NL为模型精度;U为定标系统稳定性;R为相对辐射定标不确定度。

积分球定标系统在直径30 cm的范围内均匀性指标优于0.46%,在±20°范围内角均匀性优于1%,时间稳定性优于0.2‰/h;黑体定标系统在面积20×20 cm的范围内均匀性指标优于0.4% @ 2.2 - 3.4 μm和0.1 K @ 3.4 - 4.5 μm。

定标结果表明:VNIR通道相对辐射定标在0.45 - 1.6 μm波段优于1.6%,SMIR通道相对辐射定标在1.6 - 3.4 μm波段优于1.1%,在3.4 - 4.5 μm波段温度等效不确定度优于0.14 K;VNIR通道绝对辐射不确定度优于9.1%,SMIR通道绝对辐射不确定度在1.6 - 3.4 μm波段优于8.4%,在3.4 - 4.5 μm波段温度等效不确定度优于1.4 K,如图5所示。

2.3　地面几何定标

几何定标包括指向精度、内方位元素和基准坐标系定标。指向机构采用光栅编码器(量化优于22 bit,测角精度5″),指向精度优于0.009°。内方位元素:VNIR主点列521,焦距201.915 mm,IFOV 0.074 mrad;SMIR主点列250,焦距201.988 mm,IFOV 0.148 mrad;双通道光轴夹角0.42°;畸变RMS优于0.07像元。基准坐标系定标确定摄测坐标系与基准镜坐标系之间的转换关系,各轴指向测量误差小于7″,原点测量误差小于0.02 mm。地面定标的主要结果如表2所示。

3　在轨定标方案

VIRIS在轨内置定标设备,如图6所示:①积分球(镀镍涂层,卤素灯,0.45 - 2.5 μm),辐射亮度不确定度≤3.7%;②黑体(25×8.05 mm,发射率≥0.975 @ 2.2 - 4.5 μm),测温精度±0.1 K;③光谱定标器(仪器有两个通道,每个通道都设置特征峰860、3300 nm)。

表2　地面定标主要结果

Table 2　Main results of ground calibration

Calibration Item	Calibration Parameter	Measured Value
Spectral Calibration	Spectral Range	0.445 - 4.511 μm
	Spectral Resolution	6.55 nm @ 0.45 - 1.6 μm 9.98 nm @ 1.55 - 4.5 μm
	Calibration Accuracy	0.5 nm @ 0.45 - 0.9 μm 1.0 nm @ 0.9 - 3.0 μm 2.5 nm @ 3.0 - 4.5 μm
Radiometric Calibration	Spectral Range	0.445 - 4.511 μm
	Relative Radiometric Calibration	Radiometric uncertainty < 1.6% @ 0.45 - 1.6 μm Radiometric uncertainty < 1.1% @ 1.6 - 3.4 μm Brightness temperature uncertainty <0.14 K @ 3.3 - 4.5 μm
	Absolute Radiometric Calibration	Radiometric uncertainty < 9.1% @ 0.45 - 1.6 μm Radiometric uncertainty < 8.4% @ 1.6 - 3.4 μm Brightness temperature uncertainty <1.4 K @ 3.3 - 4.5 μm
Geometric Calibration	Image Distortion	Geometric accuracy < 0.07 pixels
	Pointing Accuracy	< 0.009°
	Axis Pointing Measurement Error	< 7″
	Origin Measurement Error	< 0.02 mm

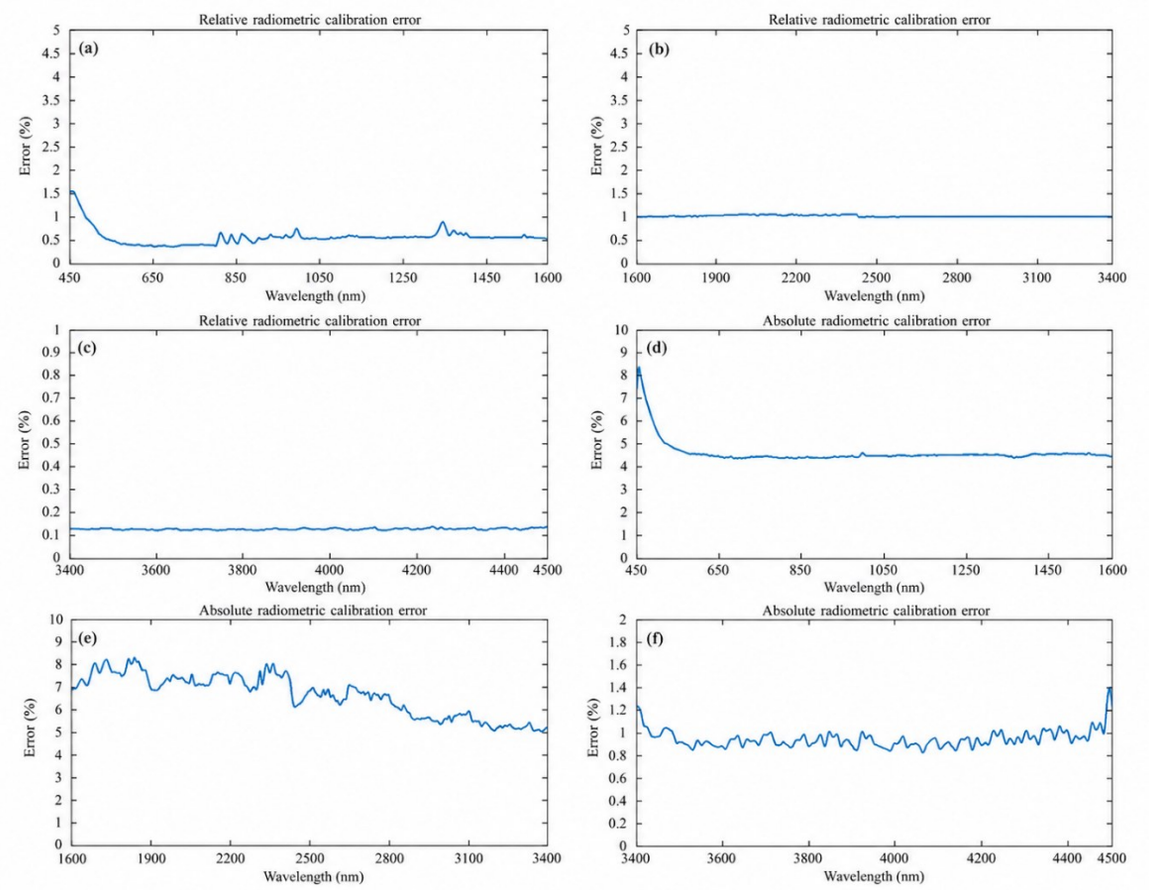

图5 VIRIS的地面辐射定标误差:(a) 0.45–1.6 μm谱段相对辐射定标误差;(b) 1.6–3.4 μm谱段相对辐射定标误差;(c) 3.4–4.5 μm谱段相对辐射定标误差;(d) 0.45–1.6 μm谱段绝对辐射定标误差;(e) 1.6–3.4 μm谱段绝对辐射定标误差;(f) 3.4–4.5 μm谱段绝对辐射定标误差

Fig. 5 Ground radiometric calibration uncertainties of VIRIS: (a) Relative radiometric calibration uncertainty in the 0.45–1.6 μm spectral range; (b) Relative radiometric calibration uncertainty in the 1.6–3.4 μm spectral range; (c) Relative radiometric calibration uncertainty in the 3.4–4.5 μm spectral range; (d) Absolute radiometric calibration uncertainty in the 0.45–1.6 μm spectral range; (e) Absolute radiometric calibration uncertainty in the 1.6–3.4 μm spectral range; (f) Absolute radiometric calibration uncertainty in the 3.4–4.5 μm spectral range

在轨定标按“背景基准→光谱定标→辐射定标→背景基准”逻辑顺序执行,各定标源均采集32帧数据。数据处理包括:盲元检测(联合冷空间与均匀光源,采用光谱维滤波与3σ准则)、光谱漂移校正(基于860 nm和3300 nm特征峰计算波长偏移并更新中心波长)、辐射定标更新(对比在轨与地面辐射亮度,变化超过10%时更新系数)。新定标系数实时反馈至校正算法,形成闭环优化,如图7所示。

4 探测模式与数据产品

4.1 探测模式

可见红外成像光谱仪的测站包括20 km、3 km、600 m、300 m高度悬停的凝视观测,具有被动探测、主动扫描两种探测模式。被动探测模式用于3 km及更近距离,利用小天体自转推扫,在3 km高度幅宽约194.7 m,IFOV对应地面0.22 m(VNIR)和0.44 m(SMIR)。主动扫描模式用于20 km远距离,为了匹配8 Hz的帧频、0.15 mrad的IFOV视场,设计指向镜通过摆扫扩展覆盖。定标模式将视场切换至内置源和冷空间,定期执行。各模式协同满足全球填图、目标详查和数据一致性维护需求。

(1) 主动扫描

在远距离探测时,利用指向机构摆扫,自主成像,并与中视场相机图像对比,确定在轨测量指向零位的偏离情况,得到角度偏差,在轨修正指向机构零位如图8(a)所示,实现可见红外成像光谱仪光轴与探测器–Z轴在Y–Z平面上的配准。在后续近

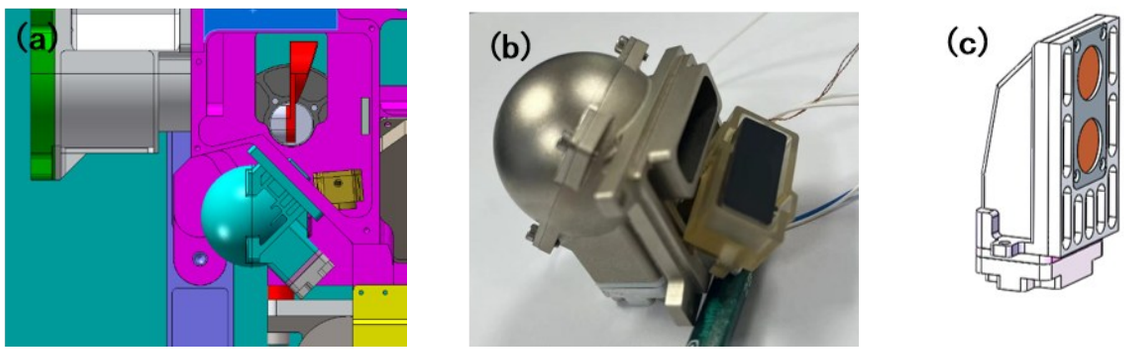

图 6　在轨定标装置的设计及组件:(a) 在轨定标设计示意; (b) 积分球和黑体; (c) 光谱定标器

Fig. 6　Design and components of the VIRIS onboard calibration system: (a) Schematic illustration of the onboard calibration configuration; (b) Integrating sphere and blackbody source; (c) Spectral calibrator

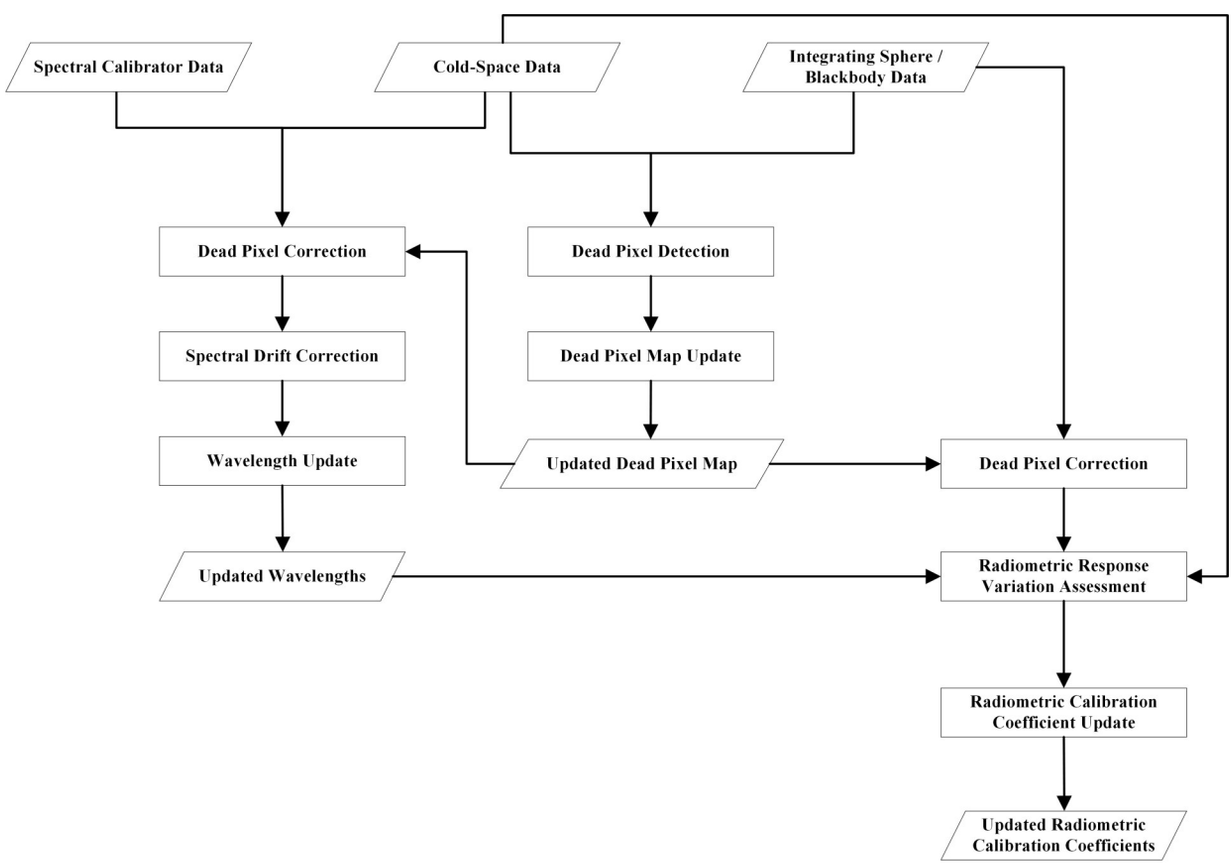

图 7　VIRIS 的在轨数据处理流程

Fig. 7　On-orbit data processing workflow for VIRIS

距离观测过程中,可见红外成像光谱仪可通过数据注入调整指向镜零位进行校准,用以补偿该方向的安装误差引入的视场偏离,进行小天体自转的被动目标成像。同时该过程也是单机的试拍流程,用于确定后续近距离观测阶段积分时间、增益等参数设置调试,如图 8(b)所示。

(2)　被动制图

针对探测器不同的悬停距离与姿态,结合 2016 HO3 的转动速度、信噪比及测控数传的要求,以匹配的帧率进行遥感观测,利用小天体自转实现对小天体的制图。在 3 km、600 m、300 m 测站,采用被动探测方式,如图 9 所示。

针对 3 km 悬停距离与姿态,结合 2016 HO3 的

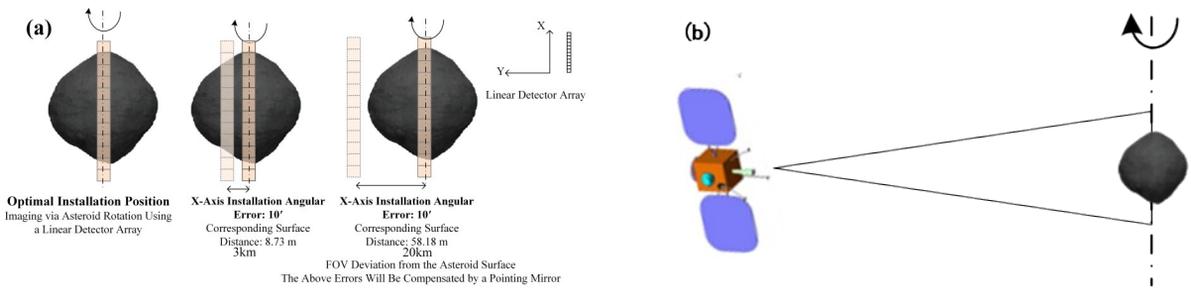

图 8 VIRIS远距离主动制图:(a) 零位视场偏差; (b) 主动扫描模式

Fig. 8 Long-range active mapping strategy of VIRIS: (a) Boresight offset relative to the nominal field of view; (b) Active scanning mode

转动速度,确定以1 Hz进行遥感观测。在3 km距离下,当线视场与自转轴平行时,可在不同相角下完成对小天体的制图。考虑到热控需求,小天体探测器绕Z轴发生姿态调整的可能,当线视场与自转轴形成倾角后,可制图的视场缩小。

针对小天体探测器的600、300 m悬停距离与姿态,结合2016 HO3的转动速度,确定以8 Hz进行遥感观测,完成单测站制图工作。可见红外成像光谱仪的有效幅宽约15 m,同样出于热控需求小天体探测器绕Z轴发生姿态调整的可能性考虑,当线视场与自转轴形成倾角后,等效为幅宽减少。

4.2 数据特性

VIRIS科学数据的处理过程划分为3个级别,分别是0级处理、1级处理和2级处理,其中,2级数据处理又可细分为2A级处理、2B级处理,通过不同级别的处理得到了不同用途的数据产品。如表3所示。0级为原始DN值及遥测参数;1级经盲元修复;2A级经暗背景扣除和辐射校正,输出光谱辐亮度(W·m^{-2}·sr^{-1}·μm^{-1})或反射率,中波红外可选亮温,是科学分析的推荐入门产品;2B级添加几何定位信息(天底点经纬度、太阳/观测角度),用于生成地理编码矿物分布图,如图10所示。数据经过下传接收后,由中国科学院国家天文台将原始数据解析为1级数据,用于后续数据处理,全链路定标系数均嵌入产品辅助数据,可追溯。

4.3 地面验证

为评估VIRIS定标后光谱数据的有效性,选取14种矿物样本(5种纯矿物:橄榄石、普通辉石、紫苏辉石、磷灰石、菱铁矿;9种混合矿物)在真空低温环境下同时采集VIRIS与标准仪器参考光谱,试验在国科大杭州高等研究院的真空罐内开展[34]。测量时采用卤钨灯照明,入射角30°,探测方向垂直,

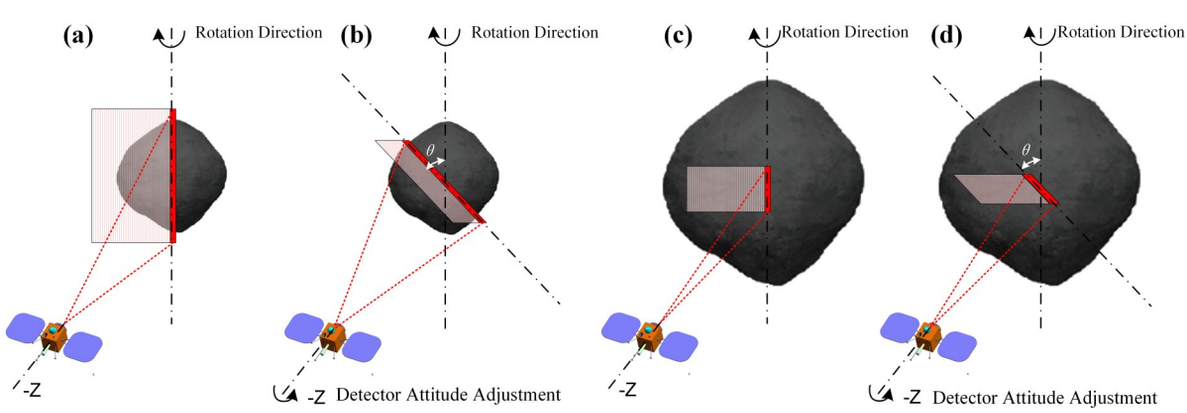

图 9 VIRIS被动制图模式:(a) 3 km被动观测;(b) 3 km被动观测(探测器绕Z轴姿态调整);(c) 600 m、300 m被动观测;(d) 600 m、300 m被动观测(探测器绕Z轴姿态调整)

Fig. 9 Passive mapping modes of VIRIS: (a) Passive observation at an altitude of 3 km; (b) Passive observation at 3 km with instrument attitude adjustment about the Z-axis; (c) Passive observations at altitudes of 600 m and 300 m; and (d) Passive observations at 600 m and 300 m with instrument attitude adjustment about the Z-axis

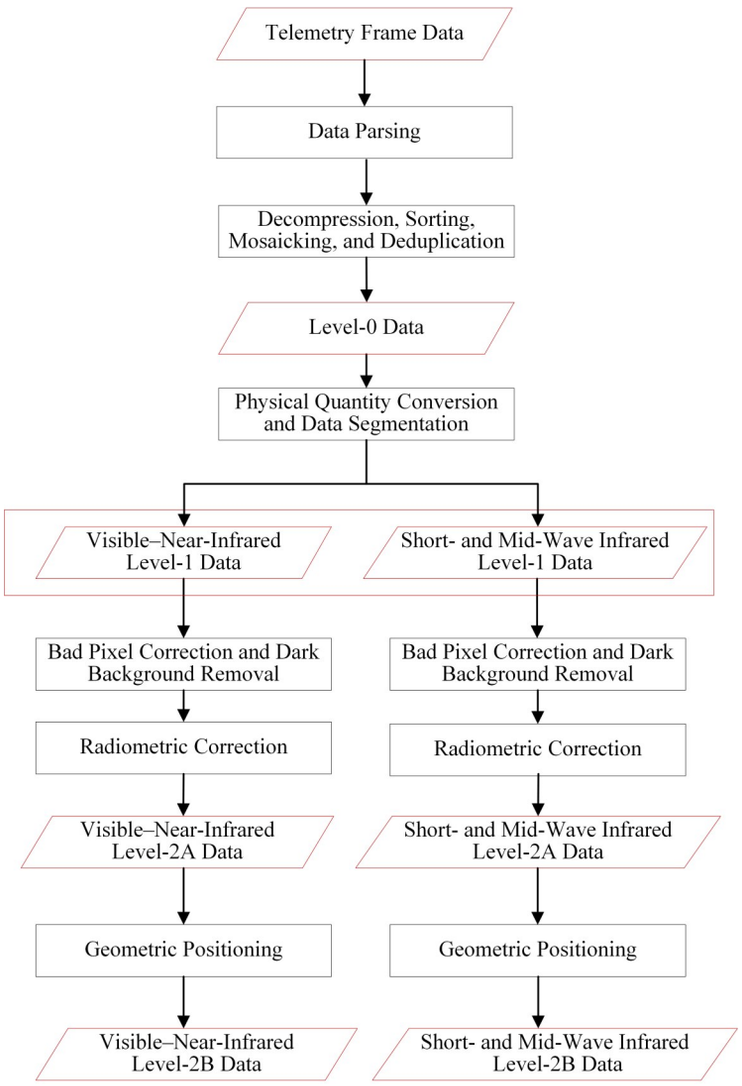

图 10　VIRIS科学数据产品生成流程

Fig. 10　Processing workflow for the generation of VIRIS science data products

表 3　数据产品分级

Table 3　Data product levels

Level	Name	Core Processing	Typical Applications
0	Raw Data	Frame Packaging + Telemetry	Status Monitoring
1	Basic Correction	Bad Pixel Correction	Instrument Response Assessment
2A	Radiometric Correction	Dark Background Subtraction + Radiometric Calibration	Mineral Index Calculation and End-member Extraction
2B	Geometric Correction	Geometric Calibration + Orbital Data	Mineral Distribution Maps and Multi-Station Mosaicking

VIRIS测量的反射光谱与参考光谱形态高度一致:橄榄石的1 μm吸收、辉石的1 μm/2 μm双吸收、菱铁矿的2.3 μm吸收均被清晰分辨。定量计算光谱相对标准偏差:450 – 700 nm平均8.26%,700 – 2500 nm平均4.64%,2500 – 4200 nm平均4.0%,全谱段结构性偏差优于10%,如表4所示。该实验证实VIRIS定标后的数据能够有效识别小行星典型矿物。

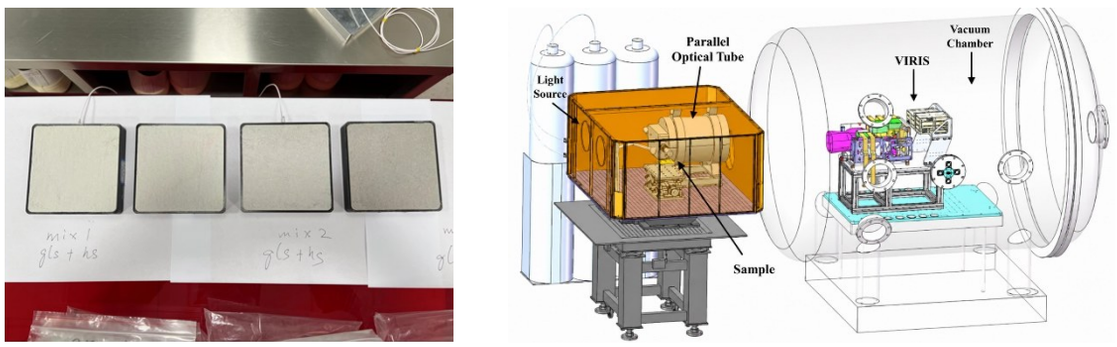

图 11 VIRIS地面矿物验证实验:(a) 矿物样本; (b) 实验模型

Fig. 11 Ground mineral validation experiment of VIRIS: (a) Mineral samples; (b) Experimental model

表4 VIRIS正样件与参比标准仪器光谱相对标准偏差

Table 4 Relative standard deviation of the spectra measured by the VIRIS flight model and the reference spectrometer.

Sample	Uncertainty		
	450 – 700 nm	700 – 2500 nm	2500 – 4200 nm
Olivine	10. 4%	4. 9%	7. 0%
Clinopyroxene	7. 6%	4. 8%	1. 8%
Orthopyroxene	9. 6%	5. 1%	3. 7%
Apatite	12. 2%	10. 1%	6. 3%
Siderite	12. 3%	9. 0%	3. 4%
Mixed Sample 1	7. 0%	4. 7%	5. 7%
Mixed Sample 2	5. 9%	1. 5%	3. 0%
Mixed Sample 3	7. 2%	2. 0%	3. 9%
Mixed Sample 4	6. 6%	2. 2%	4. 6%
Mixed Sample 5	2. 2%	3. 5%	2. 9%
Mixed Sample 6	9. 1%	2. 4%	4. 6%
Mixed Sample 7	8. 1%	3. 9%	4. 0%
Mixed Sample 8	11. 3%	6. 6%	2. 8%
Mixed Sample 9	6. 2%	4. 2%	2. 3%
Average	8. 26%	4. 64%	4%

5 结论

本文系统阐述了天问二号VIRIS地面与在轨定标方案,覆盖光谱、辐射和几何定标。其中,地面光谱定标获得VNIR和SMIR通道平均光谱分辨率分别优于6. 55 nm和9. 98 nm;辐射定标在VNIR和SMIR通道的绝对辐射不确定度分别优于9. 1%和8. 4%;几何定标实现了优于0. 009°的指向精度。地面定标结果表明,VIRIS光谱分辨率、辐射定标精度和几何指向等关键指标均满足小行星精细探测需求,地面矿物验证实验也验证了其对橄榄石、辉石及含水矿物诊断吸收特征的有效识别能力。

进一步,VIRIS在15. 3 kg重量约束下集成积分球、黑体和光谱定标器三合一内置源,配合主动扫描/被动推扫双模式和0. 45 – 4. 5 μm宽谱段覆盖,可为辉石、橄榄石、含水矿物及有机物诊断吸收特征提取和小天体矿物填图提供关键支撑。值得关注的是,地面定标受常压大气光路影响,1400 nm和1900 nm水汽吸收带易通过传递标准引入定标系数,而在轨真空环境下表现为谱形误差,需要重点开展工作去解决。总体而言,上述结果表明,VIRIS已具备满足天问二号小行星和彗星探测任务需求的光谱获取与长期数据一致性保障能力,也为同类深空成像光谱载荷的定标设计提供了可借鉴的工程方案。

References

[1] Stern S A. The evolution of comets in the Oort cloud and Kuiper belt [J]. Nature, 2003, 424(6949): 639-642.

[2] Zhu X K, Guo Y, O'Nions R K, et al. Isotopic homogeneity of iron in the early solar nebula [J]. Nature, 2001, 412(6844): 311-313.

[3] Zhang R Q, Zhang H, Liu J J, et al. Tianwen-2 small bodies exploration mission [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2025, 55(7): 279501.
(张荣桥,张熇,刘建军,等.天问二号小天体探测任务[J].中国科学:物理学 力学 天文学), 2025, 55(7): 279501.

[4] Li C L, Liu J J, Ren X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(3): 304-310.
(李春来, 刘建军, 任鑫, 等. "天问二号"任务科学目标和有效载荷配置[J].深空探测学报(中英文)), 2024, 11(3): 304-310.

[5] Sharkey B N L, Reddy V, Malhotra R, et al. Lunar-like silicate material forms the Earth quasi-satellite (469219) 2016 HO3 Kamo'oalewa [J]. Communications Earth & Environment, 2021, 2(1): 231.

[6] Jewitt D, Weaver H, Mutchler M, et al. The nucleus of active asteroid 311P/(2013 P5) PANSTARRS [J]. The Astronomical Journal, 2018, 155(6): 231.

[7] Lauretta D S, Balram-Knutson S S, Beshore E, et al. OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Bennu [J]. Space Science Reviews, 2017, 212(1-2): 925-984.

[8] Watanabe S, Tsuda Y, Yoshikawa M, et al. Hayabusa2 mission overview [J]. Space Science Reviews, 2017, 208: 3-16.

[9] Reuter D C, Simon A A, Lunsford A, et al. L'Ralph: a visible/infrared spectral imager for the Lucy mission to the Trojans [J]. Space Science Reviews, 2023, 219(8): 69.

[10] He Z P, Li C L, Xu R, et al. Spectrometers based on acousto-optic tunable filters for in-situ lunar surface measurement [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2019, 13(2): 027502.

[11] He Z P, Xu R, Li C L, et al. Mars Mineralogical Spectrometer (MMS) on the Tianwen-1 mission [J]. Space Science Reviews, 2021, 217: 27.

[12] Gui Y H, Li J N, Wang M Z, et al. Research and application of spectroscopic techniques in lunar and Mars exploration missions [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2022, 41(1): 74-84.
(桂裕华,李津宁,王梅竹,等.月球及火星探测任务中光谱技术研究与应用[J].红外与毫米波学报), 2022, 41(1): 74-84.

[13] Xu H T, Xue C B, Liu P, et al. Overall design of payload for China's first asteroid exploration mission [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2025, 55(7): 279502.
(徐海涛, 薛长斌, 刘鹏, 等. 中国首次小行星探测工程有效载荷总体设计[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学), 2025, 55(7): 279502.

[14] He Z P, Gui Y H, Lyu G, et al. Detection mechanism and instrumental characteristics of the Visible and Infrared Imaging Spectrometer on Tianwen-2 mission [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2025, 55(7): 67-74.
(何志平, 桂裕华, 吕刚, 等. 天问二号可见红外成像光谱仪探测机理与仪器特性[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学), 2025, 55(7): 67-74.

[15] Gu M, Li S J, Peng X, et al. A new infrared radiation calibration method based on lens cover deduction of internal stray radiation [J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 138: 105278.

[16] Shi X M, Chen J, Wang J T, et al. Refined lunar global chemistry mapping using farside ground truth information gathered by Chang'e-6 [J]. Nature Sensors, 2026, 1: 232-240.

[17] Levison H F, Olkin C B, Noll K S, et al. Lucy mission to the Trojan asteroids: science goals [J]. The Planetary Science Journal, 2021, 2(5): 171.

[18] Simon A A, Kaplan H H, Reuter D C, et al. Lucy L'Ralph in-flight calibration and results at (152830) Dinkinesh [J]. The Planetary Science Journal, 2025, 6(1): 7.

[19] Coradini A, Capaccioni F, Drossart P, et al. VIRTIS: the imaging spectrometer of the Rosetta mission [J]. Advances in Space Research, 1999, 24(9): 1095-1104.

[20] Filacchione G, Ammannito E, Coradini A, et al. On-ground characterization of Rosetta/VIRTIS-M. II. Spatial and radiometric calibrations [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 103106.

[21] Poulet F, Piccioni G, Langevin Y, et al. Moons and Jupiter Imaging Spectrometer (MAJIS) on Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) [J]. Space Science Reviews, 2024, 220(3): 27.

[22] Poulet F, Langevin Y, Piccioni G. Calibration of the Moons and Jupiter Imaging Spectrometer (MAJIS): introduction to the special collection and summary of the performances [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(7): 071601.

[23] Jiao L L, Xu Y S, Huang R, et al. Spatial coupling between lunar surface mineral abundance and morphological features based on visible-near infrared remote sensing [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2026, 45(4): 662-671.
(焦雷蕾,徐聿升,黄荣,等.基于可见–近红外遥感的月表矿物丰度与地形参数的空间耦合研究[J].红外与毫米波学报), 2026, 45(4): 662-671.

[24] Burns R G. Mineralogical applications of crystal field theory [M]. Cambridge University Press, 1993.

[25] Cloutis E A, Gaffey M J. Pyroxene spectroscopy revisited: spectral-compositional correlations and relationship to geothermometry [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(E5): 22809-22826.

[26] Rivkin A S, Howell E S, Britt D T, et al. 3-μm spectrophotometric survey of M- and E-class asteroids [J]. Icarus, 1995, 117(1): 90-100.

[27] Wen D Y T, Zhao H T, Liu X F, et al. Quantitative detection of water/ice in typical lunar minerals using Raman spectroscopy [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2025, 44(2): 192-202.
(闻道远天,赵海艇,刘向锋,等.拉曼光谱对月面典型矿物中水冰的定量检测[J].红外与毫米波学报), 2025, 44(2): 192-202.

[28] Kaplan H H, Simon A A, Hamilton V E, et al. Composition of organics on asteroid (101955) Bennu [J]. Astronomy & Astrophysics, 2021, 653: L1.

[29] Green R O, Pieters C M, Mouroulis P, et al. The Moon Mineralogy Mapper (M3) imaging spectrometer for lunar science: instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2011, 116: E00G19.

[30] Reuter D C, Simon A A, Hair J, et al. The OSIRIS-REx Visible and InfraRed Spectrometer (OVIRS): spectral maps of the asteroid Bennu [J]. Space Science Reviews, 2018, 214: 54.

[31] Li W X, Shen J L, Lu Z Y, et al. Measurement system calibration and radiation characteristic inversion based on infrared weak and small targets [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2026, 45(2): 341-348.
(李文雄,申军立,陆振玉,等.基于红外弱小目标的红外测量系统标定和辐射特性反演[J].红外与毫米波学报), 2026, 45(2): 341-348.

[32] Li T, Lai X F, Liao S, et al. A REBPNet-based IR radiometric calibration method considering ambient temperature change [J]. Infrared Physics & Technology, 2025, 145: 105715.

[33] Li J N, Shi X M, Liu B, et al. High-fidelity in-situ spectroscopy under thermal extremes enables cross-scale validation of the Chang'e-6 landing area [J]. PhotoniX, 2026, 7: 44.

[34] Ren X, Yan W, Chen W L, et al. Ground scientific verification tests for Tianwen-2 payload [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2025, 55(7): 139–151.
(任鑫,严韦,陈王丽,等.天问二号有效载荷地面科学验证试验[J].中国科学:物理学 力学 天文学), 2025, 55(7): 139-151.

Calibration and data product characteristics of the Visible and Infrared Imaging Spectrometer onboard Tianwen-2 for small-body exploration

He Zhi-Ping[1,3], Chen Peng-Peng[1,3], Wang Mei-Zhu[1], Xu Rui[1,3], Liu Cheng-Yu[1], Liu Da-Wei[2], Lyu Gang[1,3], Yuan Li-Yin[1,3], Li Jin-Ning[1], Wang Rong[1]

(1. Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Tianwen-2 is China's first asteroid exploration mission, which aims to conduct comprehensive investigations of the near-Earth asteroid 2016 HO3 and the main-belt comet 311P. The Visible and Infrared Imaging Spectrometer (VIRIS), as one of the key payloads onboard Tianwen-2, is designed to acquire hyperspectral data in the spectral range of 0.45 – 4.5 μm for investigating the surface composition and evolutionary history of extraterrestrial bodies. VIRIS adopts a dual-channel common-aperture configuration, including a visible and near-infrared (VNIR) channel (0.45 – 1.6 μm) and a short- and mid-wave infrared (SMIR) channel (1.55 – 4.5 μm), which enables effective detection of diagnostic absorption features of pyroxene, olivine, hydrated minerals, and organic materials. This paper systematically presents the calibration scheme of VIRIS, including the methods and results of spectral calibration, radiometric calibration, and geometric calibration. The results indicate that the average spectral resolution of VIRIS is better than 6.55 nm in the VNIR spectral range and better than 9.98 nm in the SMIR spectral range. The uncertainty of absolute radiometric calibration is better than 9.1% in the VNIR range and better than 8.4% in the SMIR range, and the geometric pointing accuracy is better than 0.009°. Furthermore, observation and calibration modes of VIRIS, as well as the characteristics of its data products, are introduced.

Key words: Tianwen-2, visible and infrared imaging spectrometer, calibration, data products, asteroid exploration