

“高分五号”卫星大气主要温室气体监测仪(特邀)

熊 伟^{1,2}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验, 安徽 合肥 230031)

摘要:“高分五号”卫星于 2018 年 5 月 9 日成功发射,是我国第一颗高光谱观测卫星,大气主要温室气体监测仪是其中一台有效载荷,采用空间外差光谱技术进行高光谱分光,是国际上首台基于该体制的星载温室气体遥感设备。阐述了载荷的基本工作原理,包括分光原理、工作模式及通道设置等内容。载荷的光学系统主要由五部分组成,核心单元为一体化胶合干涉仪,为避免光谱混叠对窄带滤光片的指标参数要求较高。为提高在轨数据量化水平,载荷设计了基于漫反射板系统的定标装置,可满足光谱及辐射定标要求。最后,梳理了载荷数据处理的基本流程,并对首批观测数据进行了光谱复原,成功获取了 1 级数据产品,为下一步温室气体反演应用奠定了基础。

关键词: 高分五号; 温室气体; 高光谱; 空间外差光谱技术; 傅里叶变换

中图分类号: O434.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0303002

Greenhouse gases Monitoring Instrument(GMI) on GF-5 satellite (invited)

Xiong Wei^{1,2}

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: GF-5 satellite was successfully launched on May 9, 2018. It is the first hyperspectral observation satellite in China. The Greenhouse gas Monitoring Instrument is one of the payloads. It is the first satellite-borne greenhouse gas remote sensing equipment in the world to use spatial heterodyne spectroscopy technology for hyperspectral spectroscopy. The basic working principle of the payload was described, including the principle of light splitting, working mode and band setting. The optical system of the payload consisted of five parts. The core unit was a bonded interferometer. In order to avoid spectral aliasing, the parameters of narrowband filters were required to be high. In order to improve the on-orbit data quantification level, a calibration device based on diffuse reflector system was designed, which can meet the requirements of spectral and radiation calibration. Finally, the basic process of payload data processing was sorted out, and the first batch of observed data was restored by spectrum. The first-level data products are successfully obtained, which lays a foundation for the next application of greenhouse gas inversion.

Key words: GF-5 satellite; greenhouse gases; hyperspectral; spatial heterodyne spectroscopy technology; Fourier transform

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家高分重大科技专项; 民用航天预研项目(D040102)

作者简介: 熊伟(1975-), 男, 研究员, 博士, 主要从事超光谱遥感探测技术方面的研究。Email: frank@aiofm.ac.cn

0 引言

“高分五号(GF-5)”卫星是我国高分辨率对地观测系统重大专项中唯一一颗实现高光谱分辨率观测的卫星,具备全球高光谱观测能力,用于获取从紫外到长波红外谱段的高光谱分辨率遥感数据产品,于2018年5月在太原卫星发射中心成功发射。该卫星共搭载了六台有效载荷,其中大气主要温室气体监测仪(Greenhouse gases Monitoring Instrument, GMI)由中国科学院安徽光学精密机械研究所负责研制,主要用于获取全球温室气体CO₂和CH₄柱浓度数据产品。

由于温室气体浓度变化在空间和时间尺度上均较小,对探测设备的光谱分辨率和信噪比等指标要求均较高,针对上述探测需求,高五卫星上的GMI载荷采用区别于传统高光谱分光技术的方案,利用空间外差光谱技术(Spatial Heterodyne Spectroscopy, SHS)进行精细吸收光谱数据的获取。GMI载荷是我国首次采用该高光谱技术进行星载工程化探测应用,同时也是国际上首台基于该体制的温室气体探测载荷,不同于日本的GOSAT^[1]和美国的OCO-2^[2]温室气体卫星。

文中重点介绍了GMI载荷的探测原理、系统的光学系统方案构成以及星上定标原理及装置。针对载荷获取的干涉数据特点,梳理了数据处理环节以及地面处理系统建设情况。最后对载荷开机后获取的首批观测数据进行了光谱复原处理,并通过加载光谱与辐射定标系数得到了首批高质量1级光谱数据产品。

1 载荷探测原理

CO₂在大气中含量相对较少(约410 ppm,1 ppm=10⁻⁶)且变化幅度不大(由季节性的光合作用变化引起的CO₂浓度波动从北半球的约12~22 ppm,向南半球递减到1~2 ppm)^[3],载荷光谱分辨率需优于0.1 nm才能够满足探测需求。常用的高分辨率遥感探测技术主要有两大类:一是基于衍射光栅(如OCO-2卫星);二是基于傅里叶干涉式(如GOSAT

卫星)。对于光栅光谱仪而言,随着光谱分辨率要求的提高,光栅光谱仪的体积质量等接近三次方比例增加,并且探测能力始终受限于入射狭缝等。干涉式光谱仪的主要问题是由于光程差非线性和系统准直的影响,要获得满足大气观测需求的高分辨率光谱,对于干涉仪的结构和控制等方面的工程要求极高,工程研制难度较大。

空间外差光谱技术是一种新型的光谱探测技术,它综合了光栅及FTS技术的特点,具有频率外差的特点,在一确定的中心波长范围内(如CO₂吸收峰)可获得极高的光谱分辨率^[4-5]。此外,核心干涉部件采取了一体化集成设计,使得空间外差光谱仪集成度高、体积小、质量轻,符合遥感监测技术小型化、模块化、标准化发展的要求^[6]。GMI采用该新型高光谱分光技术作为探测方案,利用面阵探测器进行温室气体干涉数据的采集,通过对卫星下传的探测数据进行误差修正、傅里叶变换、光谱定标、辐射定标等处理环节,获取目标气体的辐亮度光谱。基于最优化迭代全物理反演算法对光谱数据进行大气反演^[7-8],从而获取全球CO₂、CH₄的柱浓度分布数据,为温室气体的“源”与“汇”分析提供基础数据源。GMI探测工作原理如图1所示。

GMI在轨工作模式主要分为陆地和海洋两类情况:针对陆地下垫面采用天底穿轨打点工作方式,设置有1点、5点、7点和9点4种状态,默认工作模式为5点,采样点间距约100 km;此外,针对海洋下垫面反射率较低的情况,设置了海洋耀斑工作方式,可实时根据在轨太阳、卫星位置等参数进行自主跟踪海面耀斑。为满足对流层温室气体探测需求,选取可见近红外光谱区域作为遥感谱段,共设计有4个光谱通道:O₂(760 nm)通道,约束地表总大气压力,校正地表压力系统误差。通道对气溶胶和云敏感,可用于描述云和气溶胶的垂直分布;CO₂(1 575 nm)通道,CO₂弱吸收谱段,对浓度变化敏感且干扰气体少,用于反演CO₂柱浓度;CH₄(1 640 nm)通道,对CH₄浓度变化敏感且干扰气体少,用于反演CH₄柱浓度;CO₂(2 050 nm)通道,CO₂强吸收谱段,对CO₂浓度依赖很弱,而对云和气溶胶敏感,校正近红外波段内冰云和气溶胶散射特征对XCO₂的影响。表1

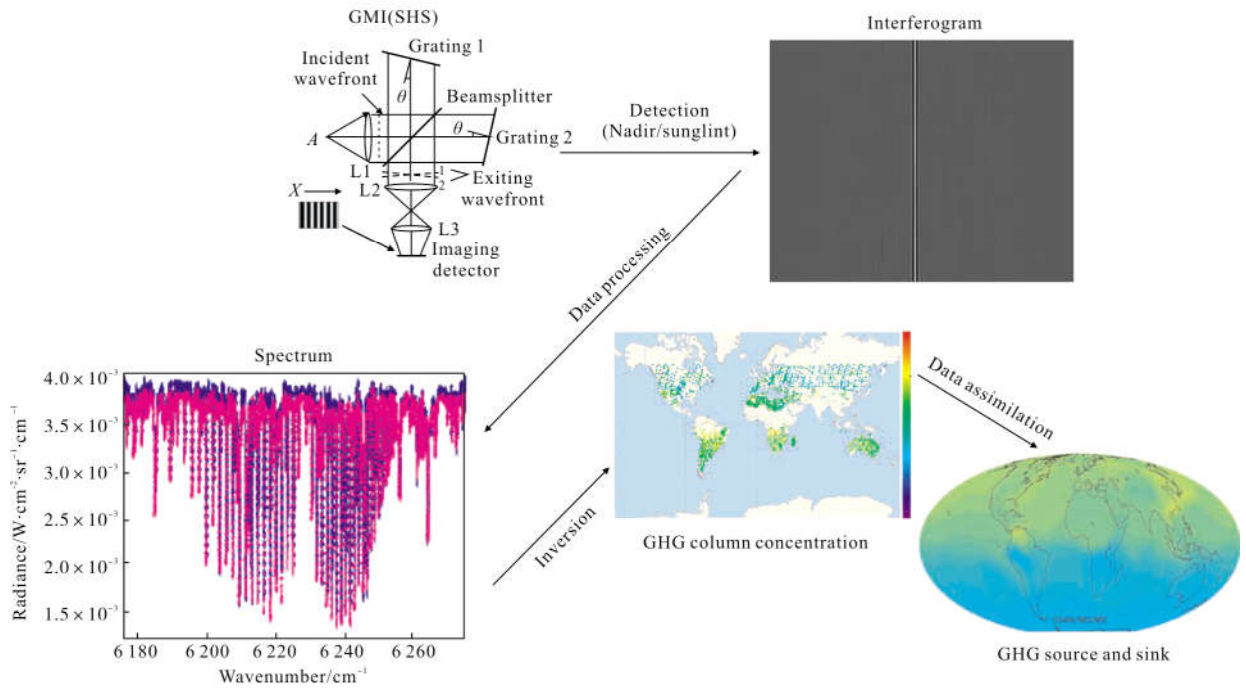


图 1 GMI 探测原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of GMI detection principle

表 1 大气主要温室气体监测仪主要技术指标

Tab.1 Main technical indicators of GMI

Parameters	Technical indicators			
	O ₂	CO ₂	CH ₄	CO ₂
Central wavelength/ μm	0.765	1.575	1.65	2.05
Spectral range/ μm	0.759–0.769	1.568–1.583	1.642–1.658	2.043–2.058
Spectral resolution/ cm^{-1}	0.6		0.27	
SNR		300@ $\rho=30\%$		250@ $\rho=30\%$
Radiometric calibration		Absolute accuracy: 5%		Relative accuracy: 2%
FOV		14.6 mrad(10.3 km@705 km)		
Operating mode		Nadir observation model; 1, 5, 7, 9 points(Default mode is 5 points) Sunlight observation model; Calibration observation model		
Quantitative level/bits		14/16		

给出 GMI 主要技术指标参数。

2 载荷光学系统方案

入射光通过大气主要温室气体监测仪前端的二维指向镜进入格利高利反射望远镜，光束直径被压缩后入射分色片完成四波段分束，每个波段入射光分别通过由分束器、扩视场棱镜以及闪耀光栅组成的干涉主体进行干涉调制，完成干涉后分别被成像

镜头成像至 CCD(760 nm 通道)、InGaAs(1 575 nm 和 1 640 nm 通道)探测器或 MCT(2 050 nm 通道)探测器，再经数据采集、干涉光谱数据预处理传输至输出。

大气主要温室气体监测仪的光学系统方案和设计参数(口径、视场角、光谱透过率)是根据应用要求的性能指标(空间分辨率、光谱分辨率、光谱范围、信噪比等)、所选用的探测器的规格性能(像元尺寸、像元数、灵敏度、光谱响应等)以及卫星平台提供的资

源的约束条件(体积、质量)进行综合工程技术权衡,总体优化确定^[9]。GMI 采用空间外差干涉原理,各通道光谱仪的主要功能组件为十胶合空间外差胶合件。考虑信噪比、光栅及分束器的加工能力等方面的因素,将十胶合干涉组件放置在光学系统中继的平行光路中,干涉仪棱镜尺寸满足仪器使用和现行光学加工的要求。

GMI 光学布局如图 2 所示。

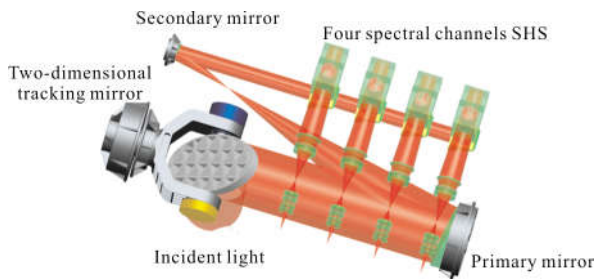


图 2 GMI 光学布局图

Fig.2 GMI optical layout

根据 GMI 光学布局,光学系统依据功能在组成上分为五部分,具体各部分功能如下。

(1) 望远系统:满足系统地面分辨率(视场角)指标、系统信噪比的要求(口径),并提供来自目标的平行光束;

(2) 分色组件:将不同波段的光谱输入至各通道准直中继系统内;

(3) 准直中继系统:将望远出瞳出射的平行光准直为满足干涉仪要求的有效通光口径和视场角的平行光,将一体化胶合干涉仪压缩在适当的尺寸和质量内,且出瞳在光栅面上;

(4) 空间外差干涉仪系统:进行干涉调制,由分束器、隔片、扩视场棱镜、光栅等 10 个光学元件胶合而成;

(5) 成像系统:要求具备特定的缩放比,将干涉条纹成像在焦平面上。

由于 GMI 采用 SHS 技术体制,基频和探测器像元饱和会出现低频和高频的光谱信号混叠,使该部分混叠的光谱区域与实际信号不吻合,易造成光谱信号失真,因此对窄带滤光片的陡度和截止度等方面的加工要求较高。在滤光片设计时需充分考虑如下因素:有效信号覆盖区域、基频的选择以及允差范围、探测器光谱维像元数目等。

3 载荷星上定标方案

准确的定标是精确反演大气 CO₂、CH₄ 浓度分布及变化状况不可或缺的技术组成。载荷发射前进行了大量地面实验室定标,分别利用积分球、标准灯+漫反射板开展辐射定标研究,利用可调谐激光器、元素谱线灯、气体吸收池进行了光谱定标测试^[10-12]。实验室定标是整个定标环节的基础,但是当载荷在轨运行后,由于仪器各器件性能的衰变,地面所获取的定标系数必将发生改变,需要开展在轨星上定标。GMI 星上定标采用太阳光作为定标光源。通过太阳照明定标器建立空间级大面积辐射标准源,在载荷光路的最前端充满其观测孔径和视场,实现端到端的全光路定标。载荷在进行星上定标时,其二维扫描机构从天底观测指向调整角度对准星上定标系统,从而将定标光源太阳光导入载荷望远镜开始进行定标模式数据采集,其在轨定标工作示意如图 3 所示。

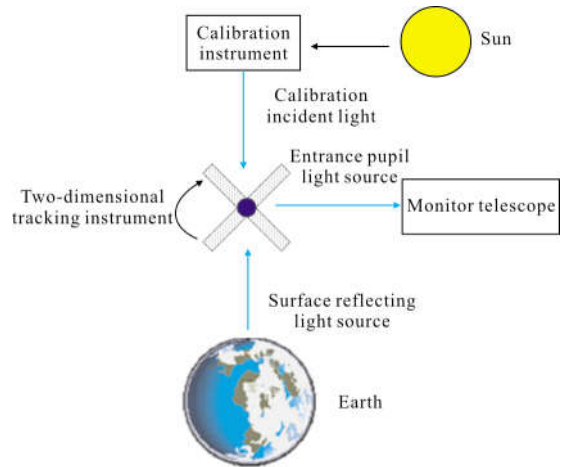


图 3 GMI 星上定标工作示意图

Fig.3 Working sketch of GMI on-board calibration

根据大气主要温室气体监测仪定标功能要求及工作原理,星上定标器由漫射板、光陷阱、比辐射计、定标挡门及驱动机构、定标舱等构成,实现载荷的全光路、全孔径、全视场定标,定标器组成及布局如图 4 所示。各定标器功能如下:漫射板为聚四氟乙烯材料制作而成,通过在轨太阳照明提供标准光源;比辐射计进行跟踪监视漫射板衰变;光陷阱提供暗背景参照,对仪器进行暗电流测量;定标舱体及空间光阑进行杂光消除和空间防护;挡门及驱动机构配合扫描镜二维转动实行定标操作。

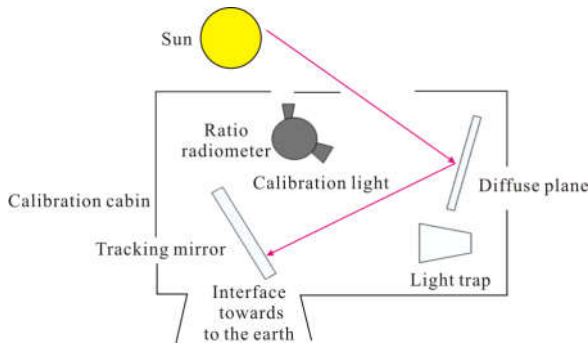


图 4 GMI 星上定标器示意图

Fig.4 Schematic diagram of GMI on-board calibration device

星上定标精度主要受遥感器定标系统状态变化等影响。大气主要温室气体监测仪星上定标系统采用漫反射板引入太阳光方案实现光谱与辐射定标,因此,对于本载荷而言,星上定标精度具体受漫射板双向反射比因子定标精度及其在轨衰变、杂散光状况、以及定标器结构应力引起的漫射板位置和姿态的形变等影响。为了在卫星寿命期将其不确定度控制在 5%之内,星上定标系统需满足以下基本要求:

- (1) 太阳漫射板,应具有优良的参照特性,其双向反射率因子的定标不确定度优于 2.5%;
- (2) 需配制监视测量装置对漫射板在轨衰变引起的反射率变化进行全过程跟踪监视,使在轨监测精度不超过 2%;
- (3) 需对定标系统进行消杂散光设计并评估,杂

散光水平控制在 2%之内;

- (4) 漫射板安装需满足:位置精度优于 0.5 mm、角度误差小于 0.5°,可保证其引起的定标不确定度在 1%之内;
- (5) 波长、视场、测量和稳流等其他误差为 1.5%;
- (6) 设置光陷阱装置,吸收率大于 0.99,对仪器进行暗电流监测。

根据以上分析,现阶段的定标水平可以满足上述各项指标精度的需求,可保证在轨漫射板的反射率定标的不确定度在 5%之内。

4 载荷数据处理流程及结果

GMI 在轨探测获取的是对应地面 10 km 区域采样点的干涉图(0 级产品),经星地链路下传到地面处理系统进行数据处理。GMI 的 0 级单点数据产品读入系统后,经过一系列判断进行预筛选,剔除由视场抖动等已知和未知原因导致的异常数据,同时将筛选后的干涉图数据输入数据预处理模块。在数据预处理模块中,正常 0 级单点数据产品将经过暗电流统计与扣除、探测器坏像元修复、探测器响应校正以及干涉数据的直流剔除、相位校正和切趾的处理,为光谱复原提供基础数据。经过预处理的干涉图进入光谱复原模块,经过对称化处理、延拓、傅里叶变换和光谱与辐射校正,转换成可用于大气反演的 1 级辐亮度光谱数据。GMI 数据处理的工作流程如图 5 所示。

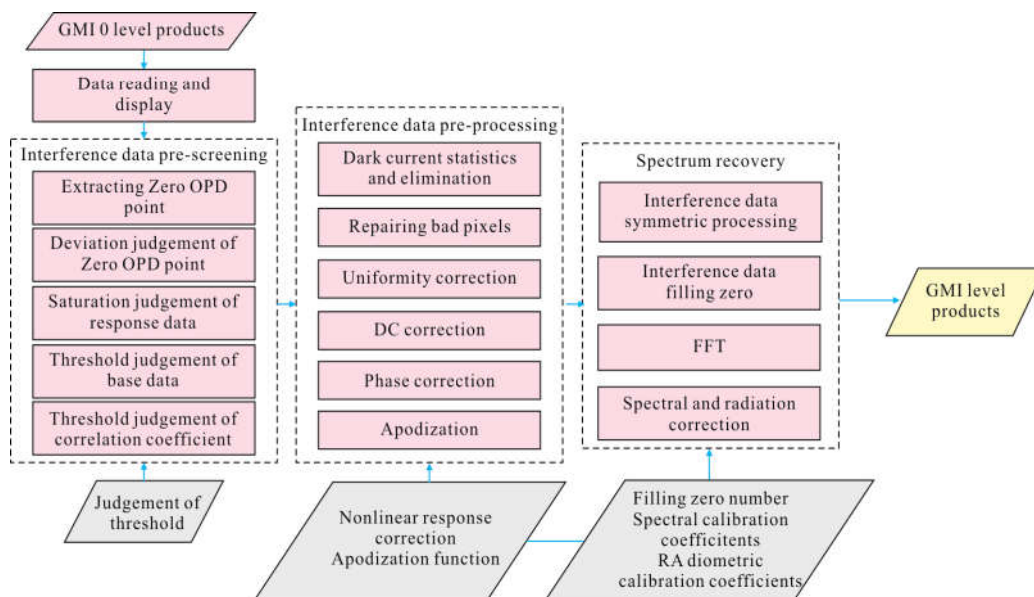


图 5 GMI 数据处理流程(0 级到 1 级)

Fig.5 GMI data processing flow (level 0-1)

GMI 采用的面阵探测器在轨运行过程中, 由于长期使用产生衰败或者宇宙高能粒子的轰击可能会导致某些正常响应出现异常, 需要对地面测试标记的坏像元坐标进行定期监督、更新。而光谱分辨率作为 GMI 的主要性能指标, 直接影响后续的待测目标气体浓度的反演, 需要对 GMI 的仪器线型函数 (ILS) 进行定期监测、更新。因此 GMI 载荷数据处理环节中加入了数据监督系统, 主要包括探测器坏像元坐标的和 ILS 两方面内容。此外, 仪器的指向精度决定了地面观测区域的精度, 需对其指向进行配准, 获取校正参数。

GMI 于 2018 年 5 月 9 日搭载高分五号卫星进入预定轨道, 经入轨初期加热除气后于 5 月 27 日开始成像, 进入在轨测试阶段。GMI 成功开机后不久下传了首批在轨观测数据, 经地面处理系统对数据分景编目、质量控制及误差修正、光谱复原等处理流程后, 获取了首批 GMI 1 级产品数据。图 6 为过境中国长三角区域(经度 121.550, 纬度 31.234)一观测点的光谱数据, 加载了光谱和辐射定标系数, 数据产

品可以清晰体现 CO₂ 吸收特征, 吸收峰相对趋势变化与理论光谱一致。

5 结 论

大气主要温室气体监测仪是 GF-5 卫星上的主要载荷之一, 其主要任务与功能是获取周期性高光谱探测数据, 定量监测大气中的 CO₂、CH₄ 等温室气体, 通过获取 O₂(0.765 μm)、CO₂(1.575 μm、2.05 μm)、CH₄(1.64 μm) 的高精度吸收光谱信息, 反演大尺度范围的温室气体浓度含量数据。该载荷为国际上首台采用空间外差光谱技术进行全球温室气体高光谱遥感探测载荷, 具有无动镜、高信噪比等技术特色, 且完全依托国内科研、工程等方面的基础能力进行自主研发。

GMI 在轨具有天底、耀斑等工作模式, 满足陆地及海洋区域高精度温室气体观测需求。此外, 为保障卫星在轨期间数据质量, 载荷设计有星上定标装置, 可实现每周 1 次的定标频次需求。通过对 GMI 首批下传的观测数据进行数据处理, 获取了首批 1 级数据产品, 光谱质量良好, 且在轨指标测试结果表明载荷性能已到达国际同类型载荷先进水平, 在轨期间载荷的光谱和辐射稳定性都表现良好, 为下一步的数据反演应用奠定基础。

致谢:

感谢研制团队所有人的努力付出, 是你们的三千个日夜的辛苦, 才有载荷在轨的良好状态。

参考文献:

[1] Hamazaki T, Kaneko Y, Kuze A, et al. Fourier transform spectrometer for greenhouse gases observing satellite (GOSAT)[C]//Enabling Sensor & Platform Technologies for Spaceborne Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2005.

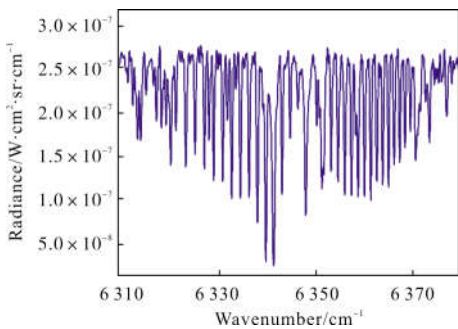
[2] Frankenberg C, Pollock R, Lee R A M, et al. The orbiting carbon observatory (OCO -2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(1): 301-313.

[3] O'Brien D M, Rayner P J. Global observations of the carbon budget, 2, CO₂ column from differential



(a) 观测轨迹

(a) Observation trace



(b) 光谱数据(1 575 nm 光谱通道)

(b) Spectrum data(1 575 nm spectrum channel)

图 6 GMI 首批观测光谱数据

Fig.6 First observation spectrum data from GMI

- absorption of reflected sunlight in the 1.61 μm band of CO_2 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (D18): 4354.
- [4] Harlander J M, Roesler F L, Englert C R, et al. Spatial heterodyne spectroscopy for high spectral resolution space-based remote sensing [J]. *Optics & Photonics News*, 2004, 15(15): 46–51.
- [5] Roesler F L, Harlander J M. Spatial heterodyne spectroscopy for atmospheric remote sensing [C]// Proc SPIE, 1999, 3756: 337–345.
- [6] Harlander J M, Roesler F L, Chakrabarti S. Spatial heterodyne spectroscopy: a novel interferometric technique for the FUV[C]//SPIE, 1990, 1344: 10.1117/12.23275.
- [7] Rodgers C D. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation [J]. *Rev Geophys and Space Phys*, 1976, 14 (4): 609–624.
- [8] Francois-Marie Breon, Philippe Ciais. Spaceborne remote sensing of greenhouse gas concentrations [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2009, 342(2010): 412–424.
- [9] Luo Haiyan, Li Shuang, Shi Hailiang, et al. Optical design of imaging system based on spatial heterodyne spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 228–233. (in Chinese)
- 罗海燕, 李双, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 228–233.
- [10] Shi Hailiang, Li Zhiwei, Luo Haiyan, et al. Error correction of spectral calibration for hyper-spectral atmosphere CO_2 monitoring instrument[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36 (7): 2296–2299. (in Chinese)
- 施海亮, 李志伟, 罗海燕, 等. 超光谱大气 CO_2 监测仪光谱定标误差修正[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(7): 2296–2299.
- [11] Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, et al. Research on laboratory calibration technology of space heterodyne spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (4): 0430002. (in Chinese)
- 李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪实验室定标技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0430002.
- [12] Shi Hailiang, Xiong Wei, Zou Mingmin, et al. Calibration method of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30 (6): 1683–1687. (in Chinese)
- 施海亮, 熊伟, 邹铭敏, 等. 空间外差光谱仪定标方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1683–1687.