

毕研盟, 王倩, 杨忠东, 等. 2022. 碳卫星高光谱二氧化碳探测仪基于太阳夫琅禾费吸收线的在轨波长定标 [J]. 大气科学, 46(3): 645–652. BI Yanmeng, WANG Qian, YANG Zhongdong, et al. 2022. TanSat ACGS On-orbit Wavelength Calibration Using the Solar Fraunhofer Lines [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 645–652. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21069

# 碳卫星高光谱二氧化碳探测仪基于太阳夫琅禾费吸收线的在轨波长定标

毕研盟<sup>1</sup> 王倩<sup>1,2,3</sup> 杨忠东<sup>1</sup> 刘成保<sup>1</sup> 蔺超<sup>4</sup>  
田龙飞<sup>5</sup> 张乃强<sup>6</sup> 王雅澄<sup>7</sup>

- 1 许健民气象卫星创新中心, 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081
- 2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031
- 3 中国科学技术大学, 合肥 230026
- 4 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033
- 5 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203
- 6 华云星地通科技有限公司, 北京 100081
- 7 航天恒星科技有限公司, 北京 100086

**摘 要** 大气二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 探测仪 (ACGS, Atmospheric Carbon dioxide Grating Spectrometer) 搭载于中国全球二氧化碳观测科学试验卫星 (TanSat), 通过探测 0.76 μm、1.61 μm、2.06 μm 波段的反射太阳光谱, 采用最优估计算法反演大气 CO<sub>2</sub> 浓度。满足高光谱分辨率和高精度 CO<sub>2</sub> 浓度反演需求, 精确探测光谱波长的变化非常重要。本文以高分辨率太阳参考光谱的夫琅禾费吸收线作为参考基准, 利用 ACGS 对太阳的观测光谱计算了 ACGS 三个谱段通道中心波长位置在一年内的变化情况。结果显示, 三个谱段的波长变化在光谱分辨率 10% 以内, 满足光谱定标精度需求。这种变化可能是由于仪器在轨状态变化引起, 特别是在轨运行温度变化引起的。ACGS 波长的微小变化需要在产品反演中进行修正。基于独立太阳夫琅禾费吸收线的在轨光谱定标方法不仅可以有效监测 ACGS 的光谱稳定性, 还可以为 L2 产品的处理的提供参考信息。

**关键词** 高光谱 二氧化碳 光谱定标 太阳光谱

文章编号 1006-9895(2022)03-0645-08

中图分类号 P407.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21069

## TanSat ACGS On-orbit Wavelength Calibration Using the Solar Fraunhofer Lines

BI Yanmeng<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1,2,3</sup>, YANG Zhongdong<sup>1</sup>, LIU Chengbao<sup>1</sup>, LIN Chao<sup>4</sup>  
TIAN Longfei<sup>5</sup>, ZHANG Naiqiang<sup>6</sup>, and WANG Yacheng<sup>7</sup>

- 1 Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite, Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081
- 2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

收稿日期 2021-04-22; 网络预出版日期 2021-09-09

作者简介 毕研盟, 男, 1979 年出生, 博士, 研究员, 主要从事高光谱遥感、微波遥感以及 GNSS 掩星研究。E-mail: biym@cma.gov.cn

通讯作者 王倩, E-mail: qwang@cma.gov.cn

资助项目 国家 863 计划项目 2011AA12A104, 民用航天技术预先研究项目 D040301

**Funded by** National High-tech R&D Program of China (863 Program) (Grant 2011AA12A104), Civil Aerospace Technology Pre Research Project (Grant D040301)

3 University of Science and Technology of China, Hefei 230026

4 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

5 Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203

6 HuaYun ShineTek, Beijing 100081

7 Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086

**Abstract** Spectra measured using an atmospheric carbon dioxide grating spectrometer (ACGS) by the Chinese global carbon dioxide monitoring scientific experimental satellite (TanSat) in the bands of 0.76, 1.61, and 2.06  $\mu\text{m}$  can be used for retrieving carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) concentrations by fitting observations and simulations using an optimal estimation algorithm. Accurately detecting the change in the center wavelength is important because of its very high spectral resolution and accuracy requirement for product retrieval. Variations in the center wavelength for all the three bands of ACGS have been calculated at the locations of the Fraunhofer lines by comparing solar-viewing measurements and a high-resolution solar reference spectrum. Variations in magnitudes less than 10% of the spectral resolution for each band have been detected. Changes are probably caused by the vibration and instrument status difference between the ground and space, especially the temperature variation in the orbit. The scheme described herein can be used not only for monitoring spectral stability but also to gain spectral knowledge prior to the level-2 product processing. These minor temporal changes in the wavelength in the orbit should be corrected during the product retrieval.

**Keywords** High-resolution, Carbon dioxide, Spectral calibration, Solar spectra

## 1 引言

探测全球大气  $\text{CO}_2$  浓度的分布对了解碳源汇, 改进对气候变化的认识都非常重要 (Miller et al., 2007; Chatterjee et al., 2017; Schwandner et al., 2017)。中国全球二氧化碳观测科学试验卫星 (TanSat) 在 2016 年 11 月 21 日成功发射, 运行在 700 km 的太阳同步轨道上, 轨道升交点地方时 13:30。碳卫星探测的主要目标是区域到大陆尺度的大气  $\text{CO}_2$  浓度分布, 探测精度是 1% (1~4 ppm)。碳卫星搭载的大气二氧化碳光栅光谱仪 (ACGS, Atmospheric Carbon dioxide Grating Spectrometer) 是一个三谱段光栅光谱仪, 探测波段为中心波长在 0.76  $\mu\text{m}$  的  $\text{O}_2$  吸收带 ( $\text{O}_2\text{A}$ ), 1.61  $\mu\text{m}$  的弱  $\text{CO}_2$  吸收带 ( $\text{WCO}_2$ ) 和 2.06  $\mu\text{m}$  的强  $\text{CO}_2$  吸收带 ( $\text{SCO}_2$ )。ACGS 仪器的一次观测可以获取 9 个空间像元的数据, 数据采样率为 3.4 Hz, 观测视场的空间分辨率为 2 km (沿轨)  $\times$  3 km (跨轨), 星下探测幅宽是 20 km (Yang et al., 2020)。

ACGS 可以获取大气  $\text{CO}_2$  浓度、气溶胶和云的信息。云会阻挡太阳辐射到达地面, 遮挡云下大气  $\text{CO}_2$  柱含量的探测, 因此  $\text{CO}_2$  的反演首先要进行云检测。 $\text{O}_2\text{A}$  带的观测光谱包含云量和地表气压信息。 $\text{XCO}_2$  是  $\text{CO}_2$  柱浓度和干空气柱浓度之比, 称为气柱平均干空气质量混合比, 可通过  $\text{WCO}_2$

和  $\text{SCO}_2$  波段的观测光谱和模拟光谱的迭代拟合得到 (O'Dell et al., 2012; Crisp et al., 2012)。在迭代过程中, 若仪器效应和多普勒效应导致的观测和模拟光谱偏差较大, 可能导致  $\text{XCO}_2$  反演失败。因此, 评估仪器效应引起的光谱变化对  $\text{XCO}_2$  反演至关重要。

在轨光谱定标涉及到仪器线型 (ILS, Instrument Line Shape) 定标和波长定标两个方面。ILS 代表单个像元探测器对单色光的响应。Sun et al. (2017) 针对 OCO-2 仪器利用不同的分析函数拟合 ILS, 分析了仪器在轨的 ILS 变化。对 TanSat, 由于 ACGS 的 ILS 的顶端和翼区存在一些不规则的结构特征, 上述分析函数不能够完全表征 ACGS 的 ILS 特征 (如图 1 所示)。因此, 本文假设 ILS 在轨状态保持不变, 仅研究仪器在轨运行期间相对于发射前的波长变化。不同于 OCO-2 卫星的对日观测采用的漫透射板, 碳卫星 ACGS 的对日观测采用了漫反射板, 因此对碳卫星 ACGS, 以上线型不变的假设是合理的。另外, 碳卫星没有会引起翼区加宽的在轨去污染事件 (Crisp et al., 2017), 因此, 本文假设在轨 ILS 不变, 重点在于波长定标。

在轨光谱定标通常是利用观测的太阳辐射光谱和参考太阳光谱拟合计算实现的 (Chance, 1998; Liu et al., 2005, 2010; Munro et al., 2016; Sun et al., 2017)。相对于以往拟合全谱段太阳吸收线的方法, 本研究利用独立的太阳夫琅禾费吸收线作为参考基

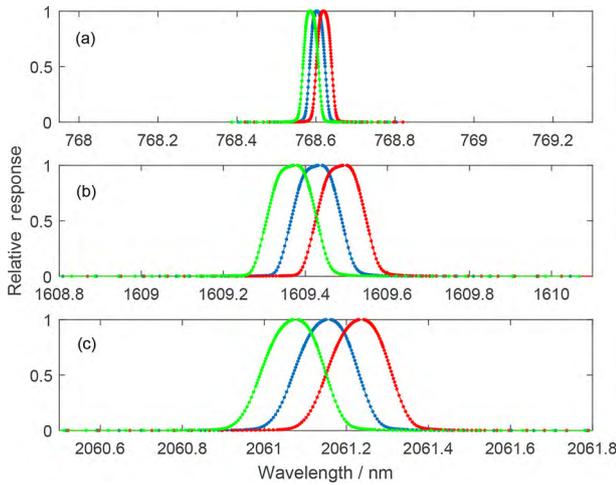


图1 实验室测定的 (a) O<sub>2</sub>A 带、(b) WCO<sub>2</sub> 带和 (c) SCO<sub>2</sub> 带星下像元的中心区域的仪器线型 (ILS)

Fig. 1 Preflight ILS (Instrument Line Shape) functions at three adjacent pixels located in the central section of FPA (Focal Panel Arrays) for (a) O<sub>2</sub>A band, (b) WCO<sub>2</sub> band and (c) SCO<sub>2</sub> band

准。这种方法的特点在于，利用 ACGS 在北极附近通过漫反射板观测的太阳夫琅禾费吸收线的真实位置直接计算波长偏移量，避免了复杂的拟合匹配过程。但它的缺点是由于吸收线的位置可能受到辐射定标不确定性的影响，分析结果也轻微依赖于所选的基准吸收线。

本文的分析采用的是 ACGS 最新版本的 L1 级辐射数据。Yang et al. (2020) 给出了 TanSat 早期在轨测试结果，在前期工作基础上，我们对仪器暗背景定标、光谱定标偏差进行了订正，形成了新版本的一级辐射光谱数据；并进一步优化我们光谱定标算法，给出了从卫星发射入轨后一年的光谱定标结果。这一结果明显揭示了 ACGS 波长对在轨状态的依赖，表现为在轨太阳定标观测模式次数变化后对光谱定标产生影响，随后仪器状态稳定后，O<sub>2</sub>A 带波长偏差出现减小的趋势，两个 CO<sub>2</sub> 带保持稳定。

## 2 基于独立太阳吸收线的光谱定标方法

碳卫星 ACGS 通过漫反射板进行对日观测，如果直接观测太阳，仪器会饱和。漫反射板的作用是减弱辐射强度，不会改变 ILS 线型特征。在 2017 年 2~7 月的在轨测试阶段，ACGS 在北极附近会进行每两轨一次的对日观测，每天可以获取

6~7 次的对日观测数据。在轨测试后，ACGS 对日观测的频率降低为每天 1 次。对日观测是在完成科学观测后，进入阴影区之前进行的，共 10 分钟的时间，包括 3 分钟的指向准备，5 分钟的对日观测和 2 分钟的太阳掩星观测。中间 5 分钟的对日观测可以得到一千多帧的太阳光谱数据。太阳光谱经过多普勒效应修正后，合并成一个过采样光谱，用于进行光谱定标精度的评估。

ACGS 采用二维探测器对每个谱段的辐射数据采样，探测器的一维是空间维，一维是光谱维。O<sub>2</sub>A 带有 1242 个光谱像元，两个 CO<sub>2</sub> 谱段的光谱维像元数均为 500。为保证光谱采样率大于 2，同时保持较高的信噪比水平，WCO<sub>2</sub> 和 SCO<sub>2</sub> 谱段的光谱分辨率分别设置为 0.14 nm 和 0.18 nm，这一光谱分辨率均低于美国 OCO-2 的光谱参数设置，O<sub>2</sub>A 带保持与 OCO-2 相等的水平 (Frankenberg et al., 2015; Crisp et al., 2017)。表 1 给出了碳卫星 ACGS 的详细光谱参数。

ACGS 每个像元的 ILS 和波长都是发射前由可调谐激光器测定的 (Yang et al., 2018)。图 1 是星下像元每个谱段三个中间像元的 ILS 线型。每个像元的波长  $\lambda_p$  由 5 次多项式计算得到：

$$\lambda_p = \sum_{i=0}^5 c_i \times p^i, \quad (1)$$

其中， $p$  表示像元序号，对应探测器的第一个像元到最后一个像元。每个探测器的像元总数如表 1 所示。 $c$  是色散系数，是实验室光谱定标测得的，每个空间像元和波长均有各自对应的系数。图 2 给出了三个谱段，第五个空间像元，波长与光谱像元的函数关系。5 次多项式拟合的精度足够满足 ACGS 的 1/10 光谱分辨率的光谱定标精度需求。

本研究采用高分辨率的 Kurucz 太阳光谱作为参考光谱 (Fontenla et al., 1999; Chance and Kurucz, 2010)，最早为日本 GOSAT 卫星研发，它可以满

表 1 TanSat ACGS 主要光谱参数

Table 1 Spectral parameters of the TanSat ACGS instrument

| 探测波段             | 谱段范围 /nm  | 光谱分辨率 /nm   | 光谱像元数 | 光谱采样率 | 空间像元数 |
|------------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|
| O <sub>2</sub> A | 758~778   | 0.033~0.047 | 1242  | >2    | 9     |
| WCO <sub>2</sub> | 1594~1624 | 0.12~0.14   | 500   | >2    | 9     |
| SCO <sub>2</sub> | 2042~2082 | 0.16~0.18   | 500   | >2    | 9     |

足 TanSat 高光谱 CO<sub>2</sub> 探测仪光谱定标的需求。Kurucz 太阳光谱的采样分辨率为 0.001 nm, 数据可以从网站获取 (<http://Kurucz.harvard.edu/sun> [2020-02-10])。ACGS 的太阳观测光谱可以清晰分辨出太阳外层大气元素吸收形成的太阳夫琅禾费吸收线。

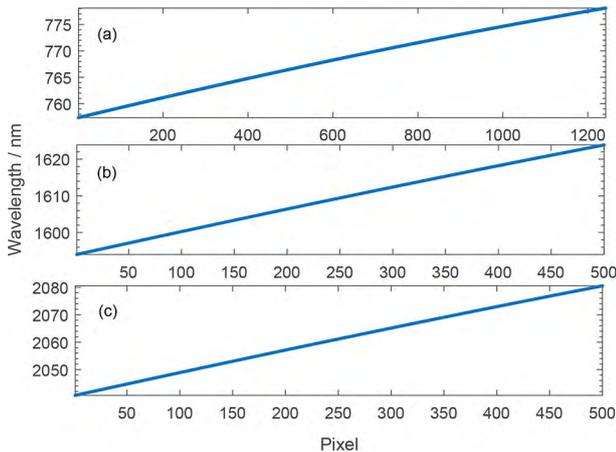


图2 星下像元 (a) O<sub>2</sub>A 带、(b) WCO<sub>2</sub> 带和 (c) SCO<sub>2</sub> 带波长及像元序号的对应关系

Fig. 2 An example of wavelength as a function of pixel index in the focal plane at FOV 5 for (a) O<sub>2</sub>A band, (b) WCO<sub>2</sub> band and (c) SCO<sub>2</sub> band

Kurucz 太阳光谱的光谱分辨率比 ACGS 高一个量级, 因此, Kurucz 太阳光谱可以作为 ACGS 在轨光谱定标的参考光谱。

图 3 给出了对应于 ACGS 三个谱段的 Kurucz 太阳光谱和用于 ACGS 光谱定标的参考吸收线位置 (红色叉号所示)。基于理论太阳光谱的光谱定标方法, 首先需要选择合适的吸收线中心位置作为参考标准。为了能够清晰从光谱中分辨出来, 基准吸收线需要独立可分辨, 并且具有一定的吸收强度。仪器在轨运行后的波长漂移是由仪器在轨运行时的仪器效应和多普勒效应造成的。多普勒效应可以通过卫星和太阳的相对速度计算得到, 多普勒效应的订正满足以下公式:

$$f_d = f \left( 1 + \frac{V_{\text{rel}}}{c} \right), \quad (2)$$

其中,  $f_d$  表示多普勒频移,  $c$  是光速,  $f$  是原始太阳辐照度的频率。  $V_{\text{rel}}$  是卫星和太阳的相对速度, 当  $V_{\text{rel}}$  为正时, 表示两者相互靠近。图 4~6 为 O<sub>2</sub>A 带、WCO<sub>2</sub> 带和 SCO<sub>2</sub> 带在对日观测时多普勒频移量的长时间变化序列图。太阳定标时的  $V_{\text{rel}}$  大约为 7 km s<sup>-1</sup>, 对 O<sub>2</sub>A 带而言, 多普勒效应引起的

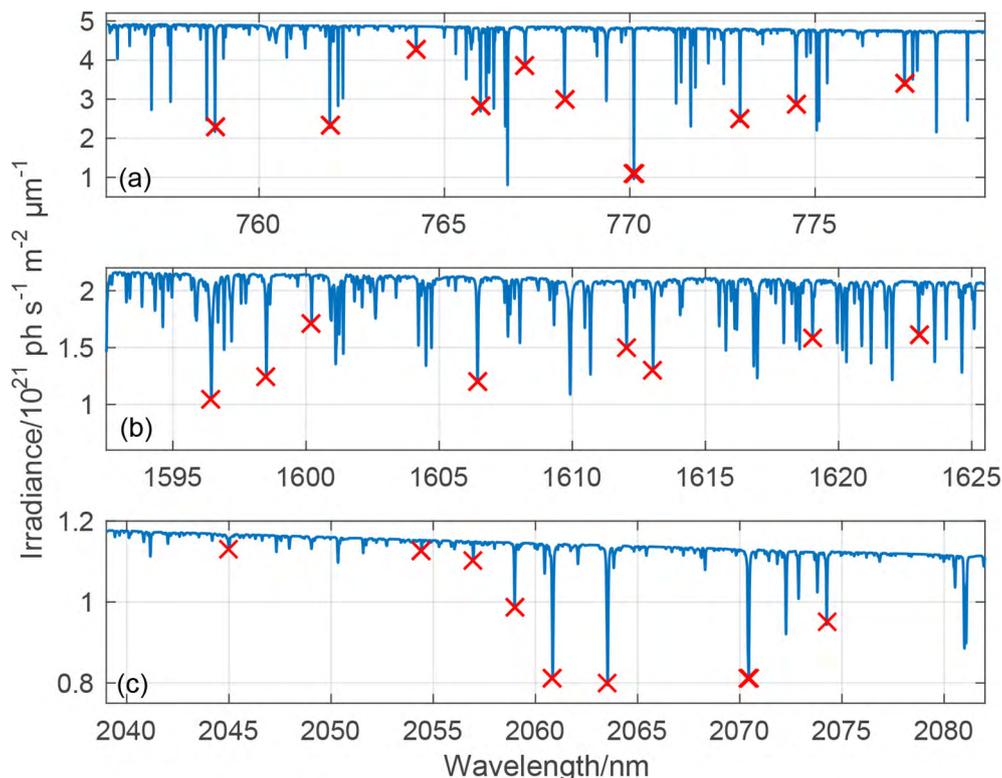


图3 (a) O<sub>2</sub>A 带、(b) WCO<sub>2</sub> 带和 (c) SCO<sub>2</sub> 带的 Kurucz 太阳光谱和选择的参考吸收线位置 (红色×)  $\mu$

Fig. 3 Kurucz solar spectra and locations of the Fraunhofer lines selected as a reference in (a) O<sub>2</sub>A band, (b) WCO<sub>2</sub> band and (c) SCO<sub>2</sub> band

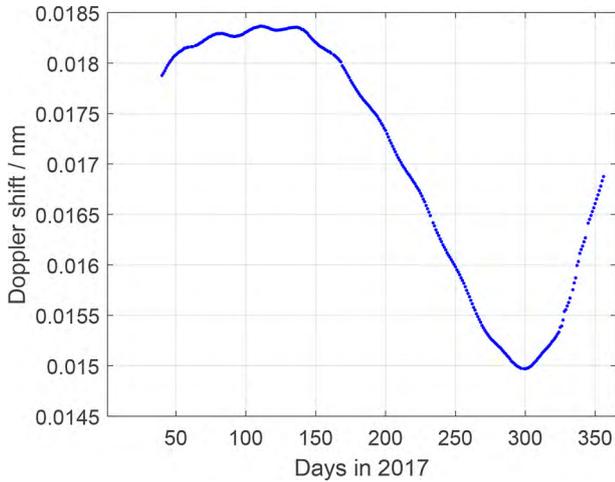


图4 O<sub>2</sub>A 带 2017 年多普勒频移的时间序列  
Fig. 4 Time series of the Doppler shifts in the O<sub>2</sub>A band in 2017

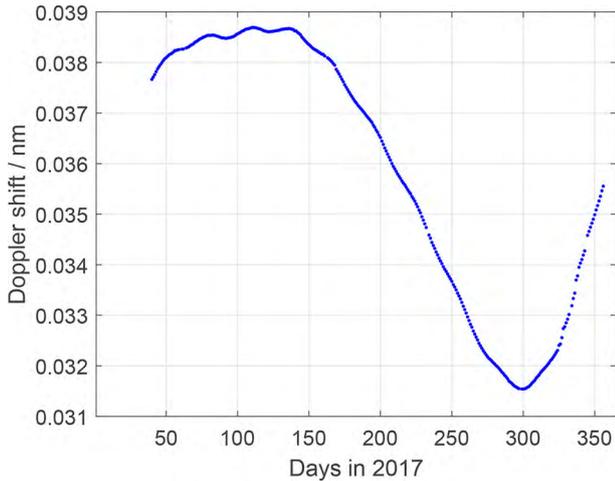


图5 WCO<sub>2</sub> 带 2017 年多普勒频移的时间序列  
Fig. 5 Time series of the Doppler shifts in the WCO<sub>2</sub> band in 2017

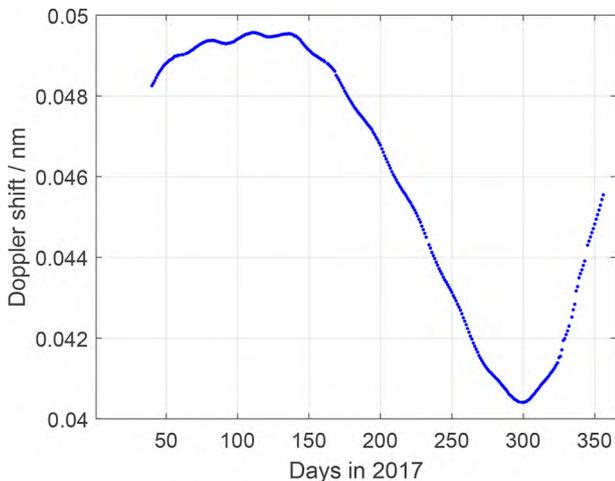


图6 SCO<sub>2</sub> 带 2017 年多普勒频移的时间序列  
Fig. 6 Time series of the Doppler shifts in the SCO<sub>2</sub> band in 2017

波长漂移约为 1/2 光谱分辨率。图中的多普勒频移量的个别离群值是由于星上计时误差造成相对速度计算异常导致的。完成多普勒效应订正后，观测光谱合并成一个过采样的太阳光谱，通过选定的吸收线位置，对仪器效应引起的波长偏移进行订正。

图 7 给出了光谱定标的具体流程。ACGS 对日观测时间约 5 分钟，共可获得 1457 帧数据，选择其中观测稳定的 100 帧辐射光谱数据，进行多普勒频移订正，将这些订正好后的光谱合并成一个过采样的太阳观测光谱，根据选择的参考光谱位置，提取对应的太阳夫琅禾费吸收线的观测值，进一步采用高斯拟合寻峰确定出中心位置，与 Kurucz 参考光谱进行比较，得到观测光谱的波长偏移量。

### 3 定标结果

基于上述吸收线选择标准，对 O<sub>2</sub>A、WCO<sub>2</sub> 和 SCO<sub>2</sub> 谱段分别选择了 10、8 和 8 条参考吸收线。图 3 给出了 ACGS 三个谱段中，高光谱分辨率参考光谱和对应的参考吸收线位置。这些吸收线比较均匀的分布在整个谱段。碳卫星 ACGS 在轨测试阶段，基于选择的基准吸收线作为参考，完成了 ACGS 的光谱定标。这个方法也成功应用于 ACGS 的在轨监测和原始数据到 L1 辐射数据产品

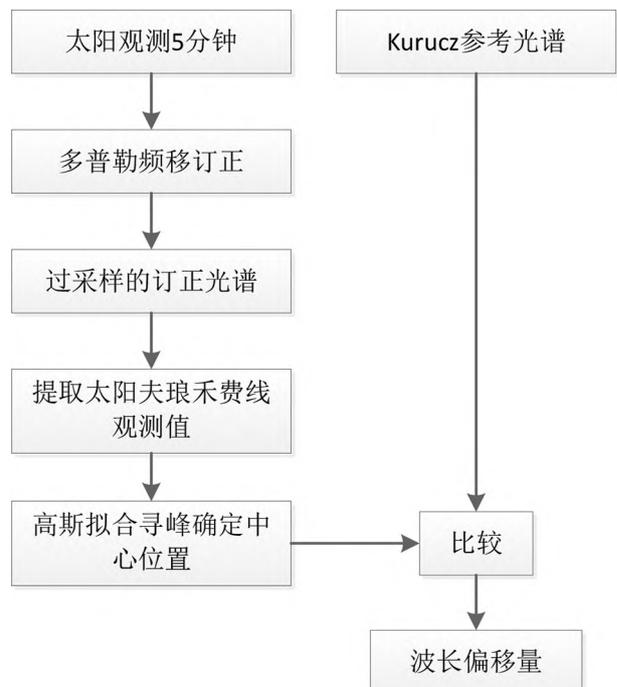


图7 光谱定标算法流程  
Fig. 7 Flow chart of the spectral calibration algorithm

的处理中。

波长偏移是基于多普勒订正后的观测光谱与参考夫琅禾费吸收线计算完成的。图 8~10 给出了 2017 年基于太阳观测光谱计算的波长偏移量的时间变化序列，图中红色虚线表示光谱定标精度指标范围。对每个空间像元，O<sub>2</sub>A、WCO<sub>2</sub> 和 SCO<sub>2</sub> 的平均波长偏移量分别为 -0.002 nm、-0.007 nm 和 -0.008 nm。三个谱段的波长偏移量存在一定的变化特征，不同空间像元的变化趋势具有较好的一致性，波长变化范围满足光谱分辨率十分之一的精度需求。图中显示的每个空间像元间波长偏移的系统偏差可能是由于光学系统和探测器阵列 (FPAs)

之间存在微小的热梯度，这种热变化引起主要光学元件几何特征可能发生轻微变化造成的。2017 年 5 月 24 日 (DOY 144) 的明显变化是由于太阳定标观测频次从在轨测试期间的每天 6~7 次变为每天 1 次造成的。这种对日观测次数的转换对整个系统热平衡有显著影响。

根据上述方法，针对选定的基准吸收线，统计分析了各波段和各空间像元的波长偏移量。图 11~13 给出了 2017 年观测的太阳光谱和参考夫琅禾费吸收线波长偏移量的统计结果。由图可见，SCO<sub>2</sub> 谱段的统计偏差最大，其次是 WCO<sub>2</sub> 带，O<sub>2</sub>A 带的偏差最小。SCO<sub>2</sub> 的偏差最大是因为这个波段的

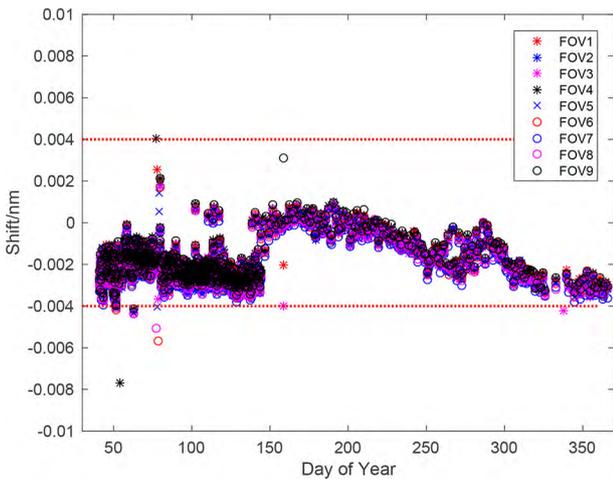


图 8 O<sub>2</sub>A 带 9 个空间像元波长偏移的时间序列  
Fig. 8 Time series of the wavelength shift for nine spatial FOVs in the O<sub>2</sub> A-band

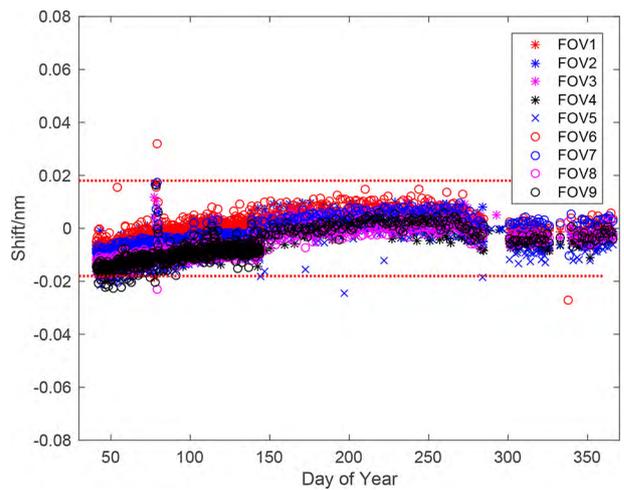


图 10 SCO<sub>2</sub> 带 9 个空间像元波长偏移的时间序列  
Fig. 10 Time series of the wavelength shift for nine spatial FOVs in the SCO<sub>2</sub> band

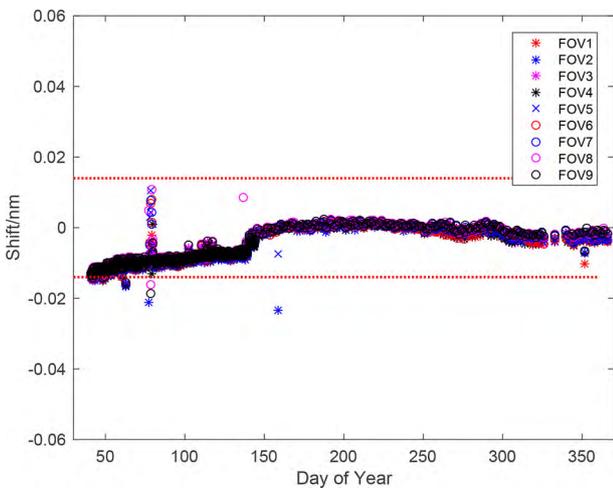


图 9 WCO<sub>2</sub> 带 9 个空间像元波长偏移的时间序列  
Fig. 9 Time series of the wavelength shift for nine spatial FOVs in the WCO<sub>2</sub> band

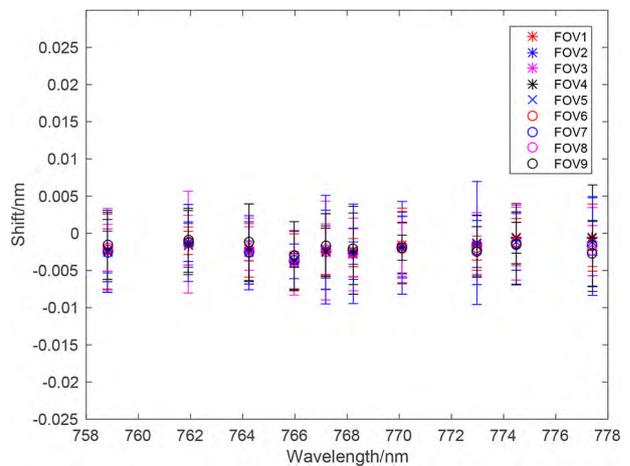


图 11 O<sub>2</sub>A 带基准吸收线位置波长偏移量统计结果  
Fig. 11 Statistics of the wavelength shift at the locations of the selected Fraunhofer lines in the O<sub>2</sub>A band

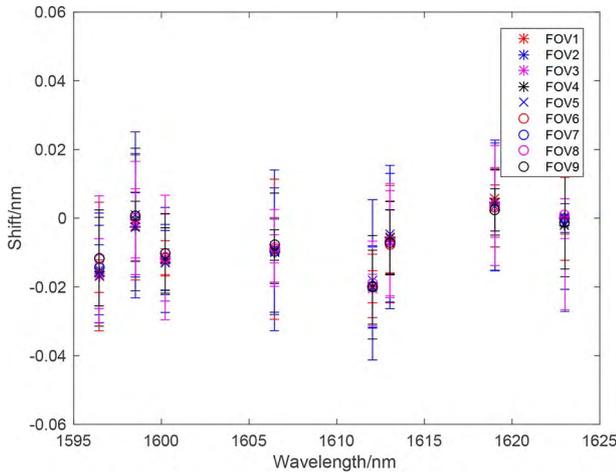


图 12 WCO<sub>2</sub> 带基准吸收线位置波长偏移量统计结果  
Fig. 12 Statistics of the wavelength shift at the locations of the selected Fraunhofer lines in the WCO<sub>2</sub> band

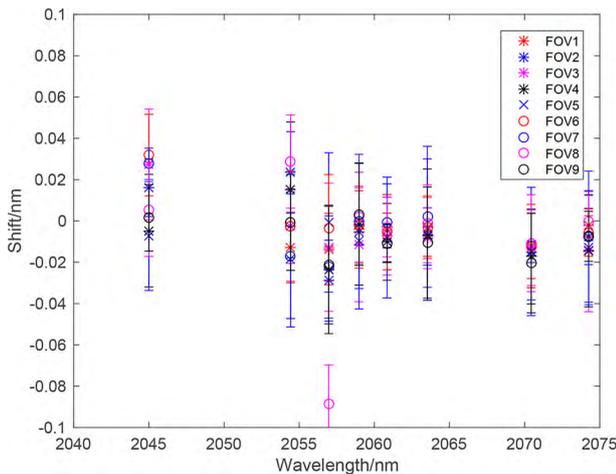


图 13 SCO<sub>2</sub> 带基准吸收线位置波长偏移量统计结果  
Fig. 13 Statistics of the wavelength shift at the locations of the selected Fraunhofer lines in the SCO<sub>2</sub> band

噪声高于其他两个波段，同时，温度变化对 SCO<sub>2</sub> 波段的影响也显著大于 O<sub>2</sub>A 带和 WCO<sub>2</sub> 带。O<sub>2</sub>A 带采用的是硅探测器，两个 CO<sub>2</sub> 谱段用的是碲镉汞探测器，碲镉汞探测器对微小的温度变化敏感性更高。综上所述，尽管 O<sub>2</sub>A 带、WCO<sub>2</sub> 带和 SCO<sub>2</sub> 带的太阳光谱能量比紫外、可见光波段的弱很多，采用独立太阳夫琅禾费吸收线的方法仍然可以评估 ACGS 的波长偏移量。

### 4 结论

本研究采用独立太阳夫琅禾费吸收线的方法评估了 TanSat ACGS 的在轨波长变化。该方法不仅

可以监测波长稳定性，还可以获取数据处理中必须的光谱定标精度先验信息。本文基于 ACGS 通过漫反射板对日观测获得的太阳光谱和选定的独立夫琅禾费吸收线，分析得到了 ACGS 在轨波长偏移。高分辨率的太阳光谱可以为选择的吸收线提供准确的位置，作为参考标准。这种方法计算的偏移量表现出很好的一致性，波长偏移量小于光谱分辨率的 10%，满足 ACGS 的在轨光谱定标需求。

### 参考文献 (References)

Chance K. 1998. Analysis of BrO measurements from the Global Ozone Monitoring Experiment [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25(17): 3335–3338. doi:10.1029/98GL52359

Chance K, Kurucz R L. 2010. An improved high-resolution solar reference spectrum for earth’s atmosphere measurements in the ultraviolet, visible, and near infrared [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 111(9): 1289–1295. doi:10.1016/j.jqsrt.2010.01.036

Chatterjee A, Gierach M M, Sutton A J, et al. 2017. Influence of El Niño on atmospheric CO<sub>2</sub> over the tropical Pacific Ocean: Findings from NASA’s OCO-2 mission [J]. *Science*, 358(6360): eaam5776. doi:10.1126/science.aam5776

Crisp D, Fisher B M, O’ Dell C, et al. 2012. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm—Part II: Global X<sub>CO<sub>2</sub></sub> data characterization [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 5(4): 687–707. doi:10.5194/amt-5-687-2012

Crisp D, Pollock H R, Rosenberg R, et al. 2017. The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 10(1): 59–81. doi:10.5194/amt-10-59-2017

Fontenla J, White O R, Fox P A, et al. 1999. Calculation of solar irradiances. I. Synthesis of the solar spectrum [J]. *Astrophys. J.*, 518(1): 480–499. doi:10.1086/307258

Frankenberg C, Pollock R, Lee R A M, et al. 2015. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): Spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 8(1): 301–313. doi:10.5194/amt-8-301-2015

Liu X, Chance K, Sioris C E, et al. 2005. Ozone profile and tropospheric ozone retrievals from the Global Ozone Monitoring Experiment: Algorithm description and validation [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 110(D20): D20307. doi:10.1029/2005JD006240

Liu X, Bhartia P K, Chance K, et al. 2010. Ozone profile retrievals from the Ozone Monitoring Instrument [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(5): 2521–2537. doi:10.5194/acp-10-2521-2010

Miller C E, Crisp D, DeCola P L, et al. 2007. Precision requirements for space-based X<sub>CO<sub>2</sub></sub> data [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 112(D10): D10314. doi:10.1029/2006JD007659

Munro R, Lang R, Klaes D, et al. 2016. The GOME-2 instrument on the Metop series of satellites: Instrument design, calibration, and level 1 data processing—An overview [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 9(3): 1279–1301. doi:10.5194/amt-9-1279-2016

- O' Dell C W, Connor B, Bösch H, et al. 2012. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm— Part 1: Description and validation against synthetic observations [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 5(1): 99–121. doi:10.5194/amt-5-99-2012
- Schwandner F M, Gunson M R, Miller C E, et al. 2017. Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources [J]. *Science*, 358(6360): eaam5782. doi:10.1126/science.aam5782
- Sun K, Liu X, Nowlan C R, et al. 2017. Characterization of the OCO-2 instrument line shape functions using on-orbit solar measurements [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 10(3): 939–953. doi:10.5194/amt-10-939-2017
- Yang Z D, Zhen Y Q, Yin Z S, et al. 2018. Laboratory spectral calibration of the TanSat atmospheric carbon dioxide grating spectrometer [J]. *Geosci. Instrum. , Method. Data Syst.*, 7(3): 245–252. doi:10.5194/gi-7-245-2018
- Yang Z D, Bi Y M, Wang Q, et al. 2020. Inflight performance of the TanSat atmospheric carbon dioxide grating spectrometer [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 58(7): 4691–4703. doi:10.1109/TGRS.2020.2966113