

文章编号 1004-924X(2018)08-1967-10

## 碳卫星 CO<sub>2</sub> 探测器发射前的漫反射板定标

王 龙<sup>1</sup>, 蔺 超<sup>1</sup>, 纪振华<sup>1</sup>, 郑玉权<sup>1\*</sup>, 毕研盟<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 为了提高 CO<sub>2</sub> 探测仪的在轨辐射定标精度, 建立了在轨辐射校正原理, 并对关键环节漫反射板的制备、BRDF 定标和应用进行了系统的研究。根据 CO<sub>2</sub> 探测仪的工作原理与系统组成, 介绍了星上定标设备和在轨辐射定标策略, 确定了漫反射板的制备方法和优化工艺参数, 制定了以标准灯和标准探测器为传递链路的漫反射板 BRDF 的精确定标方法。对漫反射板基准 BRDF、角度修正因子和半球反射率进行了测试, 对其实验室定标精度进行了分析, 并通过在轨初期的应用结果予以验证。发射前的定标结果表明, 漫反射板在 760 nm、1 610 nm 和 2 060 nm 3 个波段的定标精度均优于 3%。在轨初期的测试结果表明 CO<sub>2</sub> 探测仪 1 610 nm 波段在轨绝对辐射定标精度优于 5%。CO<sub>2</sub> 探测仪漫反射板的定标结果满足仪器辐射定标对漫反射板定标的精度要求。

**关键词:** 碳卫星; CO<sub>2</sub> 探测仪; 漫反射板; 双向反射分布函数; 在轨定标策略

**中图分类号:** TP731; V11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182608.1967

## Preflight diffuser's calibration of carbon dioxide spectrometer of TanSat

WANG Long<sup>1</sup>, LIN Chao<sup>1</sup>, JI Zhen-hua<sup>1</sup>, ZHENG Yu-quan<sup>1\*</sup>, BI Yan-meng<sup>2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn*

**Abstract:** In order to improve the on-orbit calibration accuracy of a CO<sub>2</sub> spectrometer, the principle of on-orbit radiation correction was established, and key aspects such as the fabrication, BRDF calibration, and application of a diffuser were systematically studied. Based on the working principle and system composition of the CO<sub>2</sub> spectrometer, the device and strategy for performing the on-orbit radiation calibration were introduced, and the fabrication method and optimization of the process parameters of the diffuser were established. Next, an accurate calibration method with lamps and detectors as transmission standards for the diffuser's BRDF are developed. The reference BRDF, angle correction factor, and hemispherical reflectivity of the diffuser were tested. In addition, the calibration accuracy in the laboratory was analyzed and subsequently verified by the application results obtained during the initial stage of the orbit. The results obtained before the launch show that the calibration accuracy of the

收稿日期: 2018-03-15; 修订日期: 2018-04-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2015AA123801-02; No. 2011AA12A102)

diffuser was better than 3% for all three bands at 760 nm, 1 610 nm, and 2 060 nm. The initial test results on orbit indicate that the accuracy of the absolute radiation calibration of the CO<sub>2</sub> spectrometer at 1 610 nm was better than 5%. These results can satisfy the accuracy requirements for the diffuser radiation calibration of the CO<sub>2</sub> spectrometer.

**Key words:** carbon satellite; carbon dioxide spectrometer; diffuser; Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF); on-orbit calibration strategy

## 1 引言

为了应对全球气候变化、全面监测全球 CO<sub>2</sub> 浓度分布情况,我国于 2011 年启动了“全球二氧化碳监测科学试验卫星与应用示范”项目,卫星主载荷为高光谱与高空间分辨率 CO<sub>2</sub> 探测器(简称 CO<sub>2</sub> 探测器)<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub> 探测器应用大气差分吸收光谱(Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS)的探测原理,利用空气中的气体分子的窄带吸收特性来鉴别气体成分,并根据窄带吸收强度来推演出痕量气体二氧化碳的浓度<sup>[2]</sup>。二氧化碳浓度的定量反演对 CO<sub>2</sub> 探测器的定量探测提出严苛要求,因此,仪器的在轨辐射定标策略和定标精度至关重要。

美国宇航局于 1999 年 11 月成功发射的 Terra 航天器上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)配备了一块聚四氟乙烯 Spectralon 材料制成的太阳漫反射板,用于 0.41~2.2 μm 光谱通道的辐射定标,通过漫反射板稳定性监测仪(SDSM)观测漫反射板反射的太阳光和透过率 1.44% 衰减屏观测太阳光的对比监视方法,实现太阳漫反射板性能的长期监测,进而实现仪器的在轨辐射校正<sup>[3-6]</sup>。

美国宇航局于 2014 年 7 月成功发射轨道碳观测者 2 号卫星,通过观测 760 nm、1 610 nm 和 2 060 nm 波段附近的高分辨率大气吸收谱线的原理定量反演 CO<sub>2</sub> 气体浓度。该卫星在望远系统中设置旋转机构实现不同功能的定标和观测成像模式,切换至 A 模式望远镜孔径开放实现成像观测,切换至 B 模式定标灯和内部漫反射板实现定标灯内定标,切换至 C 模式太阳光和漫透射板实现太阳辐射定标<sup>[7-9]</sup>。

我国于 2016 年 12 月 12 日在酒泉卫星发射中心首次成功发射了星载 CO<sub>2</sub> 探测器,该仪器通过了入轨后的各项测试进入业务化运行阶段。

CO<sub>2</sub> 探测器通过在光路最前端引入漫反射板形成的近似朗伯面光源,实现了全孔径、全视场和全光路的在轨辐射定标,通过指向观测与漫反射定标的一镜两用设计,实现了载荷功能的高度集度和高可靠性<sup>[10]</sup>。漫反射板是光谱辐射传输过程中的重要环节,漫反射板发射前的实验室定标和在轨辐射校正策略是实现仪器绝对辐射定标的前提,本文主要描述了 CO<sub>2</sub> 探测器漫反射板的研制工艺,测试方法,在轨辐射定标策略,发射前的实验室定标和在轨初期的应用。

## 2 CO<sub>2</sub> 探测器载荷概述

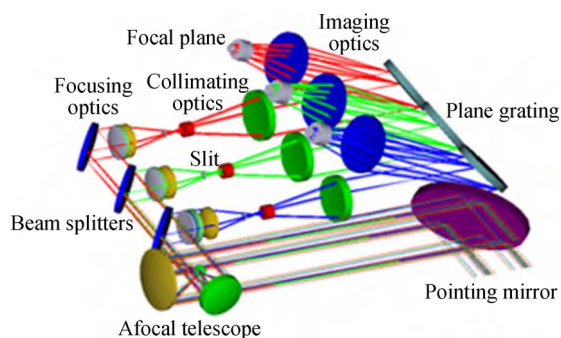
### 2.1 CO<sub>2</sub> 探测器原理与系统组成

CO<sub>2</sub> 探测器采用三通道光栅光谱仪的方案,选用一块 Si-CCD 探测器和两块 MCT 制冷探测器实现 0.76 μm(O<sub>2</sub>-A band)、1.61 μm(Weak CO<sub>2</sub> band)、和 2.06 μm(Srong CO<sub>2</sub> band)3 个谱段的高分辨率光谱辐射信息探测。由指向反射镜、望远镜、分束器、3 个光栅光谱仪和星上定标组件组成,3 个谱段分别以 0.044 nm、0.08 nm、0.1 nm 光谱分辨率对大气中的 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 痕量气体进行观测,观测方式有天底模式、耀斑模式、目标模式、掩星模式,提供大气温室气体的精细光谱测量结果<sup>[11-13]</sup>。

CO<sub>2</sub> 探测器在轨工作时,来自于地球大气的光谱辐射经过二维指向反射镜进入望远系统,望远系统是一组无焦离轴抛物面系统,出射的准直光束孔径缩小为入射光束孔径的 2/3 左右,然后经过分色片、滤光片、消偏器和会聚系统,将光辐射聚焦到对应波段的光谱仪入射狭缝上,从狭缝出射的光经过准直镜准直入射到衍射光栅上,色散后经过成像系统成像在探测器上<sup>[14]</sup>,光学系统如图 1(a)所示,光机结构组成如图 1(b)所示。

### 2.2 星上定标子系统

CO<sub>2</sub> 探测器星上定标子系统是实现仪器在



(a) 光学系统

(a) Schematic layout of optical system

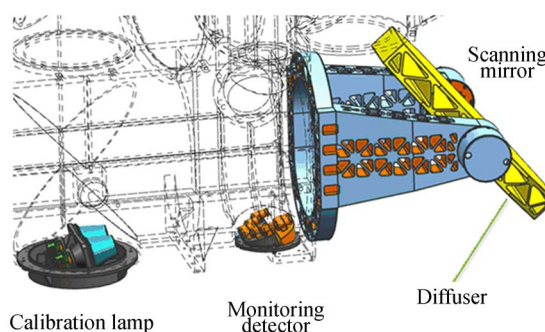
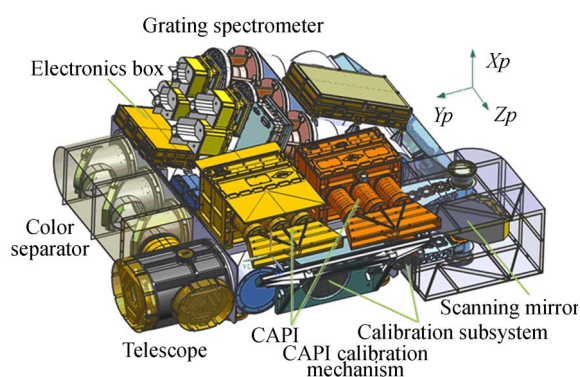


图 2 星上定标子系统配置图

Fig. 2 Subsystem configuration diagram of on-orbit calibration



(b) 光机结构组成

(b) Opto-mechanical structure

图 1 CO<sub>2</sub> 探测器系统组成

Fig. 1 Composition of carbon dioxide spectrometer

轨校正的基础,包括漫反射板、定标灯光源和监视探测器,布局如图 2 所示。指向镜位于系统光路的最前端,采用一镜两用的新颖设计思想,将一体化双面反射镜的一面设计成光学反射面,另一面设计成漫反射面,通过一维的精密转动同时实现成像模式和定标模式的功能。指向反射镜基底由铝合金制造,安装在一维转动支架上,通过合理的镜厚比和轻量化设计匹配星载的应用要求。指向反射镜一面镀镍抛光成镜面,接收地物反射辐射,与卫星平台配合实现天底、耀斑、掩星、目标多种对地观测模式;另一面研磨至漫反射面,通过定标灯和太阳的照射在仪器入瞳前形成近朗伯特特性的面辐射源,可进行星上的绝对辐射定标和相对辐射定标。

在指向反射镜光路后方设置了两组定标灯光源和两组监视探测器。定标灯光源采用寿命长、色温高的卤钨灯,光谱覆盖仪器波段范围。定标灯置于椭球反射镜的一个焦点位置上,通过调整

椭球反射镜位置使定标灯组件与主光路无干涉。椭球反射镜材料选用稳定性好的 7050 铝合金,表面抛光并镀制 MgF<sub>2</sub> 保护膜。为避免灯丝前向直射光产生的杂散光影响,在椭球反射镜的开口处安装遮光罩,保证灯丝辐射均照明在漫射板上。定标灯工作在 12 V 额定电压下,在稳流调整回路和稳流控制单元供电下,其输出辐亮度的稳定度优于 0.3%。

考虑到空间应用资源的限制,每组监视探测器选用一片硅探测器和两片 InGaAs 探测器,采用与 CO<sub>2</sub> 探测器波段宽度相近的窄带滤光片,分别监视 0.76 μm、1.61 μm 和 2.06 μm 3 个通道的辐射量变化。两组监视探测器紧密排列互为备份,同心观测漫反射板的相同位置。监视探测器信号处理电路的测量精度优于 0.2%,具备低噪声、高稳定性以及良好的响应线性度特性。

### 3 CO<sub>2</sub> 探测器星上辐射定标

#### 3.1 星上辐射定标策略

CO<sub>2</sub> 探测器在星上辐射定标方面,采用星上定标灯+漫反射板定标和太阳+漫反射板定标两种方法进行星上辐射定标。太阳光和定标灯作为稳定光源,经光学系统入口前的漫反射板散射形成均匀的朗伯面光源,覆盖仪器的全视场和全口径,太阳光的亮度设置为仪器动态范围的 80%,星上定标灯的输出亮度设置为仪器动态范围的 20%,通过动态范围内两个点的设计可实现仪器响应系数的在轨交叉定标和响应线性度的修正。

定标传递链路中漫反射板置于仪器的光路的最前端,暴露在外太空环境的几率最大,受强烈紫

外照射、太阳电磁辐射、带电粒子辐射、原子氧侵蚀等会导致漫反射板的漫反射特性衰变。通过监视探测器测量漫反射板出射太阳光和定标灯的亮度变化实现漫反射板在轨衰减因子的测定。

CO<sub>2</sub> 探测仪在轨常规定标运行频次为每天 1 次,在卫星发射初期,为掌握载荷光谱辐射性能并完成地面标准溯源,定标频次为每轨 1 次,同时在常规对地观测区域调整卫星姿态进行多次太阳定标,缩短仪器的辐射传递验证过程,尽早进入业务化观测状态。

### (1) 星上定标灯+漫反射板辐射定标

星上定标灯+漫反射板定标的原理设计如图 3(a)所示。指向反射镜的漫反射面正对着光学系统的入口,打开一只定标灯,光源照亮了漫反射板,定标光经漫射板朗伯散射后,一部分光充满光学系统孔径用于仪器的辐射定标,另一部分光则被监视探测器接收,进而监测光强度的变化。为了避免太阳和地气系统辐射对星上定标灯+漫反射板辐射定标的影响,定标的常规实施在地球阴影区内进行。

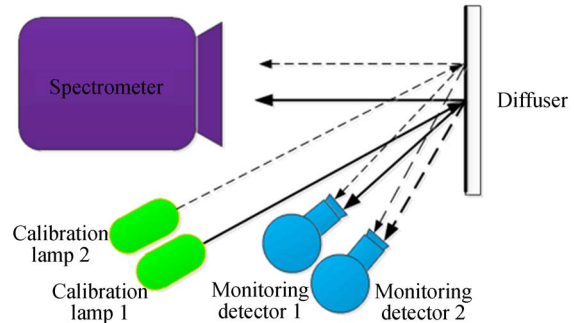
星上定标灯+漫反射板定标方案配置了两套灯和探测器组件用于光源的稳定性和漫射板的衰变的监视。在仪器长期运行中,定标灯 1 常开,完成常规定标作业,通过 2 套(6 支)标准探测器监测漫射板 3 个窄带工作波段辐射通量的时间衰变序列,进而对漫射板的反射特性进行在轨修正。定标灯 2 的开启频次远少于定标灯 1(长期运行后暂定 1 个月开启 1 次),通过对同一时段双灯交替开启状态下探测器接收到的数值比值,对定标灯 1 的强度衰减特性进行在轨修正。

### (2) 太阳+漫反射板辐射定标

基于太阳+漫反射板的辐射定标方法利用了太阳作为稳定辐射源的优点,通过太阳直接照明指向反射镜的漫反射面进而均匀照明仪器入瞳,入瞳亮度与地气系统亮度处于同一量级,便于在仪器对地观测工作点上校准辐射定标系数,通过漫射板光路后端的两组监视探测器,对漫射板长期稳定性进行定量监测。该定标方法的原理如图 3(b)所示。

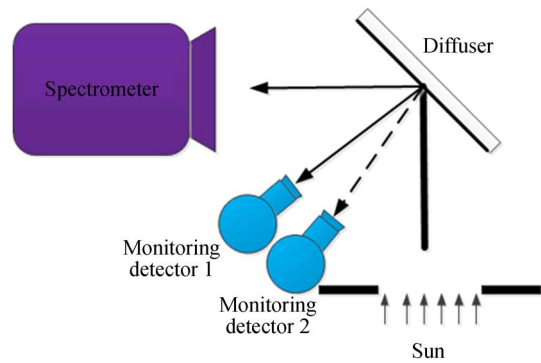
太阳+漫反射板的辐射定标需要调整卫星姿态,使载荷在 XZ 平面内与 Z<sub>p</sub> 轴偏转 5 度指向太阳,避免太阳辐射直射云与气溶胶成像仪(CA-PI)。考虑到载荷入地影前的性能状态与对地观

测时较为一致,且与对地观测区分,太阳+漫反射板辐射定标的常规实施设计在卫星入地影前的极地区域进行。



(a) 定标灯+漫反射板定标

(a) Calibration lights+diffuser calibration



(b) 太阳+漫反射板定标

(b) Sun+diffuser calibration

图 3 CO<sub>2</sub> 探测仪星上辐射定标原理

Fig. 3 Carbon dioxide spectrometer on-orbit radiation calibration principle

## 3.2 在轨辐射校正原理

理想的漫反射板是指表面具有朗伯漫反射特性且反射比等于 1 的表面,通常以双向反射分布函数衡量(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)。双向反射分布函数有多种不同的测量方式,包括经验公式模型、物理模型和 Data-Driven 模型方法,经验公式模型和物理模型对理想材料建立模型引入校正系数来模拟材料表面的 BRDF,该计算方法存在理想模型和经验系数的误差,一般应用于材料表面的理论分析。本文根据指向镜漫反射板的工程实际应用,采用基于测试数据的计算方法,具有较高的适用性和精度。根据漫反射板的在轨工作状态选择测量方式,在实验室测试中,以散射辐亮度  $L_s$  与入射辐

照度  $E_i$  的比值形式来描述  $BRDF_{lab}^{[15-16]}$ , 示意图如图 4 所示。

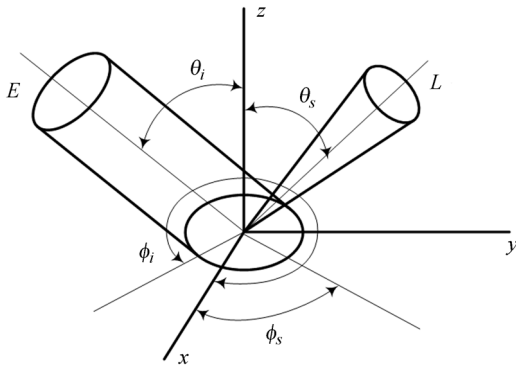


图 4 双向反射分布函数的定义

Fig. 4 Definition of bidirectional reflectance distribution function

$$BRDF_{lab}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s, \lambda) = \frac{L_s(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s, \lambda)}{E_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_s}, \quad (1)$$

其中,  $lab$  表示实验室测试条件下,  $\theta$  为俯仰角,  $\phi$  是方位角, 下标  $i$  和  $s$  分别表示入射和散射方向,  $\lambda$  代表波长,  $BRDF$  的单位为  $sr^{-1}$ 。

太阳定标卫星入地影前的极地区域进行, 卫星调整姿态并旋转指向镜漫反射面引入太阳光。此时, 仪器观测方向漫射板的光谱辐亮度为:

$$L_{SD,t}(\lambda) = \frac{E_{sun}(\lambda) \cdot \cos \theta_{SD,t}}{R^2} \cdot BRDF_t(\theta_{sun}, \phi_{sun}, \theta_{SD}, \phi_{SD}, \lambda), \quad (2)$$

式中:  $L_{SD,t}(\lambda)$  其中为星上定标  $t$  时刻漫射板在仪器观测方向的光谱辐亮度;  $E_{sun}(\lambda)$  为大气外日地平均距离处的太阳光谱辐照度;  $\theta_{sun}$ 、 $\phi_{sun}$  和  $\theta_{SD}$ 、 $\phi_{SD}$  分别为星上定标  $t$  时刻漫射板坐标系下太阳入射的天顶角与方位角及仪器观测的天顶角与方位角;  $BRDF_t(\theta_{sun}, \phi_{sun}, \theta_{SD}, \phi_{SD}, \lambda)$  为定标  $t$  时刻仪器观测方向的漫射板  $BRDF$ ;  $R$  为日地距离因子。

仪器在轨的漫射板  $BRDF$  随时间的衰减模型可表述为<sup>[17]</sup>:

$$BRDF_t(\theta_{sun}, \phi_{sun}, \theta_{SD}, \phi_{SD}, \lambda) = H(\lambda, t) \cdot BRDF_{lab}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s, \lambda), \quad (3)$$

其中:  $H(\lambda, t)$  为星上定标  $t$  时刻的漫射板衰减系数;  $BRDF_{lab}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s, \lambda)$  为星上定标  $t$  时刻的漫射板所对应角度的实验室测量  $BRDF$ 。

大气外太阳光谱辐照度非常均匀、稳定, 可由科学观测得到; 日地距离因子、太阳照明角度可根据卫星轨道参数计算得出, 因此可精确监测漫射

板的衰减系数  $H(\lambda, t)$ , 结合实验室测量的漫射板  $BRDF$ , 则可根据式(1)和式(2)计算得到星上定标时刻漫射板的光谱辐亮度。

仪器在轨辐射定标为精确定标仪器探测器响应  $DN$  值与入射辐射亮度的定量关系, 即获取仪器的绝对辐射定标系数, 根据下式 4 即可完成对仪器绝对辐射定标系数的在轨校验, 实现高精度辐射定标, 进而实现仪器的绝对基准定标。

$$G_{orbit} = (DN_{orbit} - B) / L_{SD,t}(\lambda), \quad (4)$$

式中:  $DN_{orbit}$  为在轨星上定标获取的仪器  $DN$  矩阵(去暗背景);  $G_{orbit}$  为 CO<sub>2</sub> 探测仪实际辐射定标增益;  $B$  为 CO<sub>2</sub> 探测仪辐射定标偏置。

## 4 漫反射板发射前的定标

### 4.1 漫反射面基准 BRDF 定标

CO<sub>2</sub> 探测仪漫反射板位于仪器入光口处, 受外太空环境影响严重, 需要良好的空间环境稳定性。本文采用铝制漫反射板, 通过物理磨砂形成一定粗糙度的漫反射面本体, 通过化学腐蚀去除表面划痕缺陷和多余的残留物, 并利用表面尖锐点的钝化作用形成稳定、均匀、柔和的漫反射板表面, 再通过镀铝膜与 MgF<sub>2</sub> 保护膜, 进一步提高表面特性和稳定性。最终制备的漫反射板将具备均匀的反射表面、较好的朗伯反射特性、较高的半球反射率和良好的空间稳定性等特点<sup>[18]</sup>。

漫反射板在发射前的实验室  $BRDF$  定标通过对基准角度下  $BRDF$  定标和测定不同入射方位角和俯仰角的角度修正因子的方法实现。根据载荷坐标系的定义, 载荷坐标系  $YZ$  平面为方位方向和  $XZ$  平面为俯仰方向。指向镜定位在 135°、太阳以  $-Zp$  轴入射为  $BRDF$  基准参考角度。

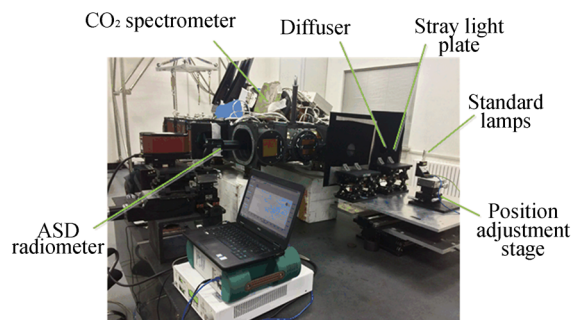
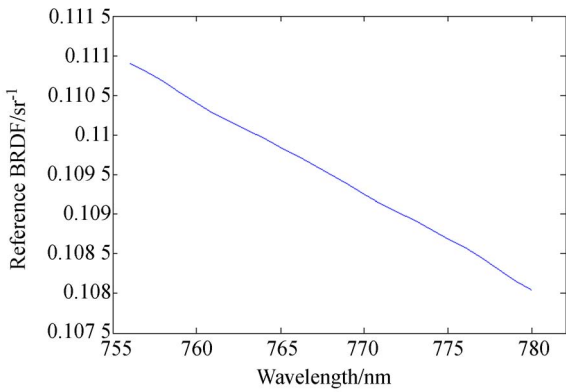
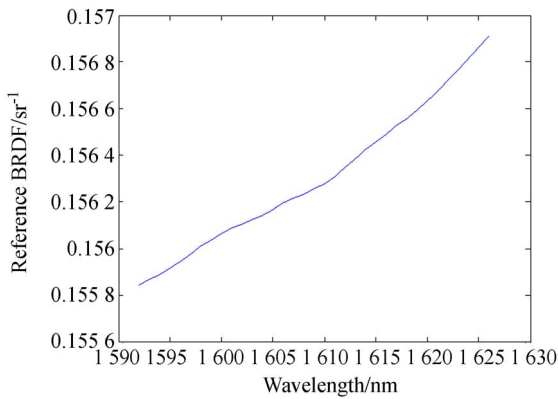


图 5 漫反射板 BRDF 定标

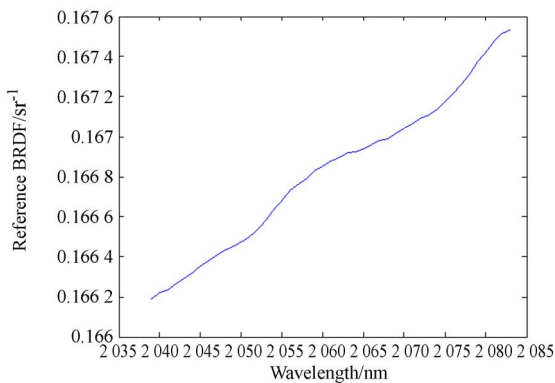
Fig. 5 Calibration of diffuser's BRDF



(a)760 nm 波段  
(a)760 nm band



(b)1 610 nm 波段  
(b)1 610 nm band



(c)2 060 nm 波段  
(c) 2 060 nm band

图 6 3 个波段漫反射板基准 BRDF

Fig. 6 Diffuser's reference BRDF for three bands

漫反射面 BRDF 的实验室定标如图 5 所示,1 000 W 标准灯工作在恒流模式,由高精度安捷伦电源恒流输出 8.200 A,数字万用表监视与标准灯串联的标准电阻两端的电压值监测标准灯输出照度

的准确性和稳定性。标准灯工作在标准距离下以标准照度照亮漫反射板,漫反射板的出射辐射亮度被传递光谱辐射计接收。测试采用双光阑的措施减小测试过程中杂光的影响。通过传递辐射计的亮度和标准照度根据公式(1)可得基准角度的 BRDF 数值,3 个波段测试结果如图 6 所示。

将标准漫反射板与指向镜漫反射板同位置替换,同样状态下用传递辐射计测量被标准灯照亮的指向镜漫反射板相对标准漫反射板的光谱亮度比值,得出指向镜漫反射板的半球反射率数据  $\rho(0, d)$ ,如图 7 所示。

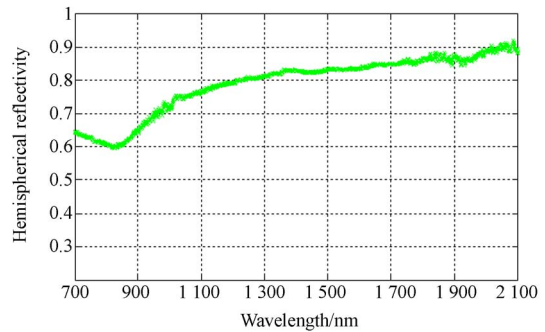
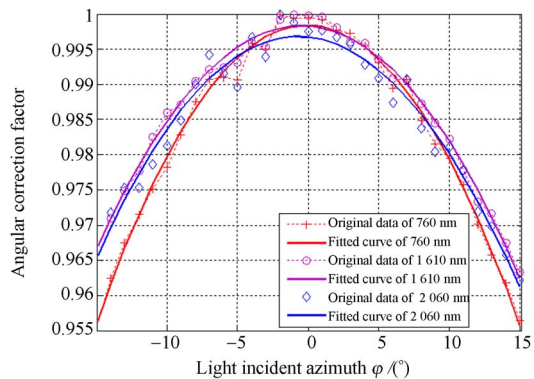


图 7 漫反射板的半球反射率

Fig. 7 Diffuser's hemispherical reflectivity

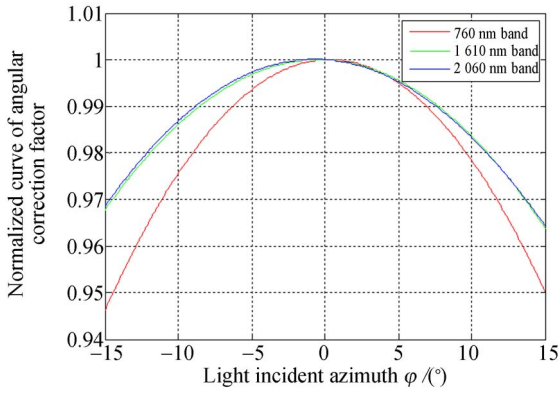
#### 4.2 漫反射板修正因子定标

通过指向镜漫反射板控制系统转动指向镜实现不同方位角下的 BRDF 相对数据测试,通过精确调整标准灯与指向镜漫反射板在俯仰方向角度并补偿空间位置关系,实现不同俯仰角下的 BRDF 相对数据测试。对数据分析得到了 3 个波段不同入射角度对 BRDF 的影响关系,采用多项式拟合消除噪声,并对参考基准归一化响应后得到了 3 个光谱波段的 BRDF 角度修正因子曲线,



(a) 方位角度修正因子拟合

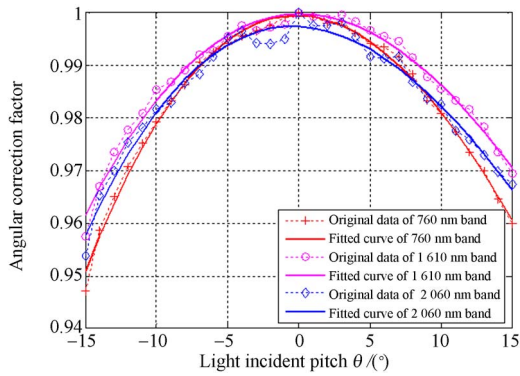
(a) Fitting of azimuth correction factor



(b) 归一化的方位角修正因子

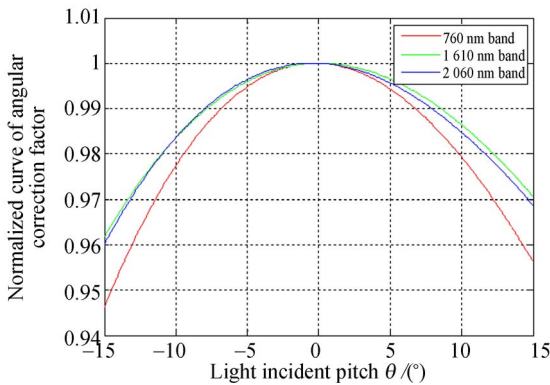
(b) Normalized curve of azimuth correction factor

图 8 3 个波段的漫反射板 BRDF 方位角修正因子  
Fig. 8 Azimuth correction factor of diffuser's BRDF for three bands



(a) 俯仰角度修正因子拟合

(a) Fitting of pitch correction factor



(b) 归一化的俯仰角修正因子

(b) Normalized curve of pitch correction factor

图 9 3 个波段的漫反射板 BRDF 俯仰角修正因子  
Fig. 9 Pitch correction factor of diffuser's BRDF for three bands

方位角 BRDF 修正因子如图 8 所示,俯仰角 BRDF 修正因子图 9 所示。在实际工作角度下对归一化的 BRDF 曲线插值得到的 BRDF 角度修正因子。

### 4.3 漫反射板实验室定标精度分析

漫反射板发射前的实验室定标存在多方面的不确定影响,包括,标准灯的不确定度、ASD 传递辐射计不确定度、角度拟合不确定度、相同角度下光谱维差异的不确定度、测试过程的位置和角度不确定度等。根据不确定度计算原理,如公式(5)所示。计算求得 3 个波段的 BRDF 的不确定度,结果如表 1 所示。根据结果可知 3 个波段的合成不确定度均小于 3% 的漫反射板定标精度指标。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \quad (5)$$

表 1 漫反射板 3 个通道 BRDF 的不确定度

Tab. 1 Uncertainty of diffuser's BRDF for three bands (%)

序号	不确定度来源	760 nm 波段	1 610 nm 波段	2 060 nm 波段
1	标准灯不确定度	0.69	0.47	0.5
2	ASD 传递辐射计不确定度	2.56	2.35	2.35
3	方位角度拟合不确定度	0.61	0.71	0.91
4	相同方位角下光谱维差异的不确定度	0.042	0.037	0.055
5	俯仰角度拟合不确定度	0.49	0.63	1.08
6	相同俯仰角下光谱维差异的不确定度	0.050	0.057	0.075
7	测试过程的位置和角度不确定度	0.42	0.29	0.28
8	合成不确定度	2.8	2.6	2.8

### 4.4 漫反射板 BRDF 在轨应用

对 CO<sub>2</sub> 探测仪指向镜漫反射面测试了基准 BRDF 值和不同入射角度下的 BRDF 修正量。在轨对日定标时,根据工作模式和卫星姿态得出太阳入射角度在载荷坐标系下方位角度 φ 和俯仰角度 θ。根据方位角和俯仰角的 BRDF 修正因子插值出修正系数 P<sub>φ</sub> 和 P<sub>θ</sub>,并根据公式(6)得出 3 个工作波段实际工作角度下漫反射板的 BRDF 值。碳卫星载荷采用一体化设计思想,载荷云与气溶胶成像仪 CAPI 视轴与 CO<sub>2</sub> 探测仪的视轴严格

定标平行, CO<sub>2</sub> 探测仪在轨对日定标时为了使 CAPI 视轴避开太阳直射,需将一体化载荷视轴在仪器俯仰方向与太阳入射方向偏转 5°。该角度下的 BRDF 值为在轨与应用的 BRDF 值。

$$BRDF\_band(\alpha, \beta) = BRDF\_ref\_band \cdot P_\alpha \cdot P_\beta, \quad (6)$$

其中:  $BRDF\_ref\_band$  为基准角度的 BRDF 值, band 代表不同的光谱波段,为 760 nm 波段、1 610 nm 波段或 2 060 nm 波段。  $P_\alpha$  和  $P_\beta$  分别为方位角和俯仰角的 BRDF 修正因子。

CO<sub>2</sub> 探测仪在轨对日定标模式下,太阳光在仪器入光口处的照度为  $E$ ,经过指向镜漫反射板照亮仪器入瞳,入瞳亮度  $L$  可由公式(7)得出。

$$L = BRDF\_band(\alpha, \beta) \cdot E. \quad (7)$$

### 5 漫反射板在轨初期定标测试

CO<sub>2</sub> 探测仪在轨飞行初期,获取了多轨下传的对日定标数据。通过对定标数据的处理分析,评估了漫反射板实验室定标精度的影响。随机选取的 2017 年 01 月 13 日第 328 轨的对日定标 weak-CO<sub>2</sub> 波段数据进行辐射校正后的处理结果如图 10 所示。仪器响应 DN 值和 Kurucz R. L 发布太阳标准照度数据分别通过公式(4)和公式(7)计算入瞳处的光谱辐亮度。两者的光谱辐亮度偏差在 0.8%~3.7%之间,优于仪器的在轨绝对辐射定标精度 5%的精度指标,间接验证了漫反射板的 BRDF 定标的合理性。

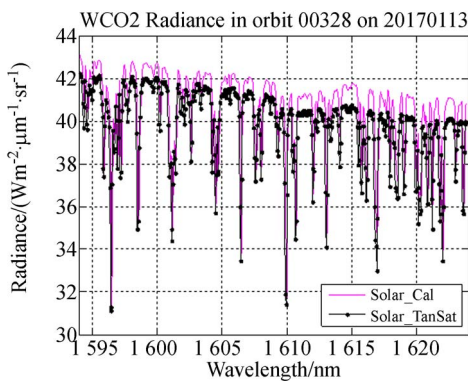
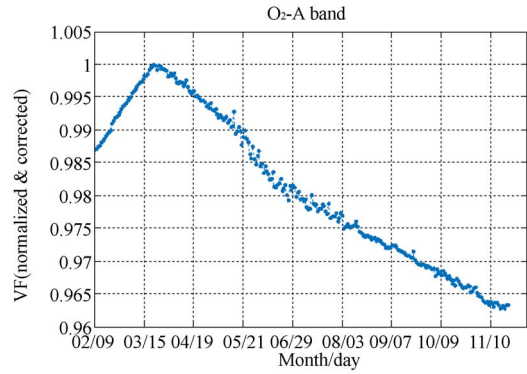


图 10 Weak-CO<sub>2</sub> 波段探测仪观测的入瞳辐亮度与太阳经漫反射板的入瞳辐亮度对比

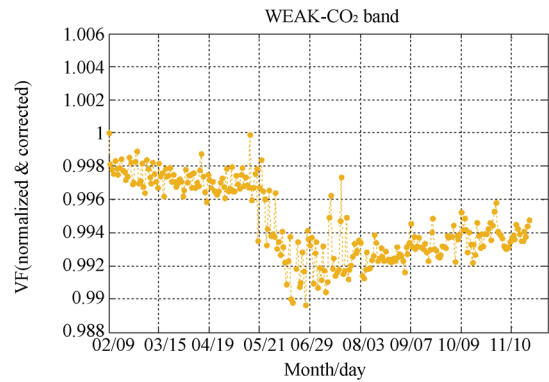
Fig. 10 On-orbit attenuation trend of the diffuser for three bands

在 2017 年 02 月 09 日到 2017 年 11 月 10 日期间,采集了对日定标的漫反射板监视探测器的观测数据,日地距离修正后的 O<sub>2</sub>-A 波段、weak-CO<sub>2</sub> 波段和 strong-CO<sub>2</sub> 波段的衰减变化如图 11 所示。



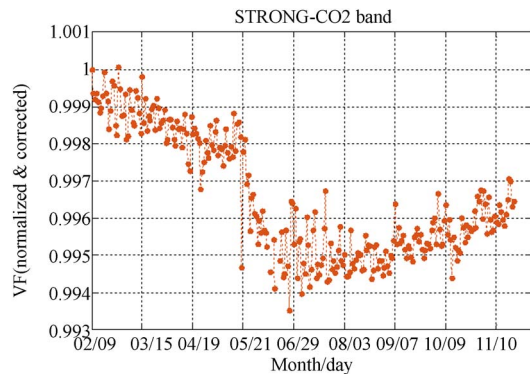
(a) O<sub>2</sub>-A 波段的漫反射板在轨衰减趋势

(a) On-orbit attenuation trend of the diffuser in O<sub>2</sub>-A band



(b) Weak-CO<sub>2</sub> 波段的漫反射板在轨衰减趋势

(b) On-orbit attenuation trend of the diffuser in weak-CO<sub>2</sub> band



(c) Strong-CO<sub>2</sub> 波段的漫反射板在轨衰减趋势

(c) On-orbit attenuation trend of the diffuser in strong-CO<sub>2</sub> band

图 11 3 个波段的漫反射板在轨衰减趋势

Fig. 11 On-orbit attenuation trend of the diffuser for three bands

根据在轨 10 个月漫反射板的衰减时间序列可知,漫反射板在 weak-CO<sub>2</sub> 波段的衰减小于 1%、strong-CO<sub>2</sub> 波段的衰减波段的衰减小于 0.7%、O<sub>2</sub>-A 波段的衰减总体小于 2%,但 O<sub>2</sub>-A 波段的衰减曲线出现升高的情况,原因是该波段的监视探测器的工作异常造成,后期的监视数据会采取主备份监视探测器互为验证的方式,提高数据的观测质量。3 个波段的漫反射板均存在一定程度的衰减且趋势未完全一致,分析原因为,在空间环境中,受真空紫外辐照、原子氧剥蚀、高能粒子轰击和有机污染等因素的影响,不同波段的表现特性存在差异,均由漫射板表层膜层的性能变化和污染物的光化学沉积与监视探测器的自身衰减共同引起。

#### 参考文献:

- [1] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 546-561.  
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 546-561. (in Chinese)
- [2] 赵其昌, 杨勇, 等. 大气痕量气体遥感探测仪发展现状和趋势[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 156-162.  
ZHAO Q CH, YANG Y, *et al.*. Development status and trends of atmospheric trace gas remote sensing instruments [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 156-162. (in Chinese)
- [3] JON F, NING L, BORYANA E, *et al.*. Suomi-NPP VIIRS Solar Diffuser Stability Monitor Performance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 2(54): 631-639.
- [4] NING L, XIAO X X. Suomi-NPP VIIRS Solar Diffuser BRDF Degradation Factor at Shot-Wave Infrared Band Wavelengths [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 10(54): 6212-6216.
- [5] NING L, XIAO X X. Impacts of the Angular Dependence of the Solar Diffuser BRDF Degradation Factor on SNPP VIIRS Reflective Solar Band On-Orbit Radiometric Calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 3(55): 1537-1543.
- [6] CHEN H D, XIONG X X, AMIT A, *et al.*. On-Orbit Characterization of the MODIS SDSM Screen for Solar Diffuser Degradation Estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 11(55): 6456-6467.
- [7] ROBERT E H, RANDY P, BRIAN M S, *et al.*. Fabrication and Assembly Integration of the Orbiting Carbon Observatory Instrument [J]. *Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation*, 2008, 13(7082): 1-10.
- [8] ROBERT R, STEPHEN M, B. CAROL J, *et al.*. Preflight Radiometric Calibration of Orbiting Carbon Observatory 2 [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 4(55): 1994-2005.
- [9] FRANKENBERG C, POLLOCK R, LEE R A, *et al.*. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8: 301-313.
- [10] 汪逸群, 王龙, 郭万存, 等. 空间多用途双面反射镜的设计与制备 [J]. 光学学报, 2015, 4(35): 0428001-0428009.  
WANG Y Q, WANG L, GUO W C, *et al.*. Design and Test of Imaging Spectrometer's Dual Dispersive Prisms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 4(35): 0428001-0428009. (in Chinese)
- [11] LI ZH G, LIN CH, LI CH L, *et al.*. Prelaunch spectral calibration of a carbon dioxide spectrometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(6): 675-684.

## 6 结 论

本文介绍了碳卫星载荷 CO<sub>2</sub> 探测器的原理、系统组成和星上定标子系统,根据仪器的在轨辐射定标要求,论述了在轨辐射校正原理,制定了在轨辐射校正策略,研究了辐射传递的关键环节漫反射板的制备和实验室高精度的定标。实验室结果表明,漫反射板 BRDF 3 个波段的实验室定标精度分别优于 2.8%、2.6% 和 2.8%,在轨初期应用结果表明,weak-CO<sub>2</sub> 波段 CO<sub>2</sub> 探测器的在轨定标精度优于 5%,3 个通道的漫反射板 10 个月内的在轨衰减分别优于 2%、1% 和 0.7%。漫反射板的在轨衰减较小,可靠性高,漫反射板 BRDF 的定标精度能够达到系统设计要求。

- [12] 简超,李诚良,王龙,等.碳卫星高光谱 CO<sub>2</sub> 探测仪发射前光谱定标[J].光学精密工程,2017,8(25):2064-2075.  
LIN CH, LI CH L, WANG L, *et al.*. Preflight spectral calibration of hyperspectral carbon dioxide spectrometer of TanSat [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 8(25):2064-2075. (in Chinese)
- [13] 韦跃峰,简超,薛浩,等.CO<sub>2</sub> 探测仪反射镜组件设计[J].光学精密工程,2017,3(25):641-647.  
WEI Y F, LIN CH, XUE H, *et al.*. Design of mirror subassembly in CO<sub>2</sub> sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,3(25):641-647. (in Chinese)
- [14] 郑玉权,高志良.CO<sub>2</sub> 探测仪光学系统设计[J].光学精密工程,2012,12(20):2645-2653.  
ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of CO<sub>2</sub> sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 12(20): 2645-2653. (in Chinese)
- [15] GEORGIEV G T, BUTLERB J J. BRDF STUDY OF GRAY-SCALE SPECTRALON [J]. *Proc. of SPIE*, 2008,7081:1-9.
- [16] STOVER J C. *Optical scattering: measurement and analysis, Third Edition* [M]. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2012.
- [17] 黄文薪,张黎明,司孝龙,等.太阳漫反射板衰减监测辐射计的设计及性能评估[J].光学精密工程,2016,4(24):732-739.  
HUANG W X, ZHANG L M, SI X L, *et al.*. Design of solar diffuser degeneration monitor and its performance evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,4(24):732-739. (in Chinese)
- [18] 王龙,简超,郑玉权.CO<sub>2</sub> 探测仪星上定标铝漫反射板的制备与试验[J].中国光学,2013,4(6):591-599.  
WANG L, LIN CH, ZHENG Y Q. Fabrication and experiment of aluminum diffuser for CO<sub>2</sub> detector calibration on orbit [J]. *Chinese Optics*, 2013, 4(6) : 591-599. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 龙(1985—),男,吉林磐石人,硕士,助理研究员,2008年、2011年于吉林大学分别获得学士学位、硕士学位,主要从事航空航天高光谱成像技术、结构设计、光谱辐射测量与定标等方面的研究。E-mail: wangling\_jixie@163.com



郑玉权(1972—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,博士生导师,1999年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射测量与定标等方面的研究。E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn