

激光与光电子学进展

反射率传递光谱仪衰减孔阑的定标方法研究

江丰^{1,2,3}, 钮新华^{1,2,3*}, 殷恺^{1,2,3}¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

摘要 反射率传递光谱仪可通过短时间内测得的太阳光谱辐照度和地面目标光谱辐亮度, 计算准确的地面目标光谱反射率, 实现长期稳定的在轨辐射基准传递。采用孔阑对太阳光进行大量级衰减, 实现对太阳圆盘的直接观测, 孔阑衰减系数的准确度直接决定反射率的测量精度和传递精度。基于激光对探测器响应非线性度的校准原理, 提出一种宽动态标准光源结合后端光谱仪进行比对测量的方法, 实现对前端孔阑衰减系数的高精度定标。定标结果显示, 孔阑的衰减系数在空间维和光谱维均有明显的非均匀性。利用该特性对外场的反射率测量实验结果进行了修正, 目标漫反射板的光谱反射率相对差异由修正前的 20% 降低到 2% 以内, 证明了孔阑衰减因子实验室定标的有效性, 为后续反射率传递光谱仪的高精度交叉定标提供了技术基础。

关键词 测量; 辐射定标; 孔阑; 衰减因子; 激光非线性测量

中图分类号 TP731

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0112002

Calibration Method of Pinhole Aperture Attenuation in Reflectance Transfer Spectrometer

Jiang Feng^{1,2,3}, Niu Xinhua^{1,2,3*}, Yin Kai^{1,2,3}¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract A reflectance transfer spectrometer can be used to accurately and quickly calculate the spectral reflectance of the ground target from the measured spectral irradiances of the sun and ground, thus achieving the long-term stable-radiation standard transfer on-orbit. In this process, a pinhole aperture is used to largely attenuate sunlight for the direct imaging of the solar disk. The accuracy of the pinhole aperture attenuation factor directly determines the measurement and transfer accuracies of the reflectance. Based on the calibration principle of detector response nonlinearity using a laser, a method that combines the wide dynamic standard light source with a back spectrometer for comparison measurements is proposed for the high-accuracy calibration of the attenuation factor of a front pinhole aperture. Results show that the attenuation factor of the pinhole aperture shows obvious nonuniformity both in terms of the spatial and spectral dimensions. After modifying the experimental outdoor reflectance measurements, the relative difference of the measured spectral reflectance of the white diffusing plate can be reduced from 20% to less than 2%. This finding proves the validity of the laboratory calibration of the aperture attenuation factor and can

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-04-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA15010000)

通信作者: *nxh@mail.sitp.ac.cn

provide a technical basis for the high-accuracy cross calibration of reflectance transfer spectrometers.

Key words measurement; radiometric calibration; pinhole aperture; attenuation factor; laser nonlinearity measurement

1 引言

在轨辐射测量精度和溯源一致性是对地遥感器的关键性能指标。各种轨道上运行的多种气象遥感载荷的测量结果的准确性和一致性直接关系到对天气和气候这类复杂系统的科学理解^[1]。遥感仪器受发射时振动和在轨工作环境与地面差异的影响,地面实验得到的定标系数并不能保证适用于在轨数据反演,且随着长期工作运行,仪器的辐射响应会衰退,因此在轨辐射定标是实现长期高精度观测的基础^[2-3]。目前主流的在轨定标方法是将太阳作为定标光源,通过已标定的漫反射板产生已知辐射通量的朗伯光来校准仪器响应^[4-5],但漫反射板的传递误差及反射率在轨衰退等因素限制了定标精度的进一步提高^[6-7]。为了实现气候观测所需的更高测量精度,国内外均提出了直接观测太阳的在轨定标方法^[8-9],但是一般遥感仪器并不具备直接观测太阳的能力,本文提出了反射率传递光谱仪(RTS)来测量地面目标的绝对反射率,以实现对其他遥感载荷的在轨交叉定标。

太阳亮度是地面目标亮度的 10^5 倍,要实现光谱仪对太阳的直接观测,需对太阳光进行大量级衰减。遮挡孔径是衰减光通量的一个高效方法,对于口径为 24 mm 的光学系统,0.5 mm 的小孔可实现的衰减系数为 4.3×10^{-4} ,其衰减系数只与机械尺寸有关,比太阳漫反射板和衰减膜更具稳定性,且理论上衰减系数在光谱上没有特异性。小孔的缺点就是加入小孔光阑后,对太阳的直接观测定标为非全口径定标,引入了光学系统表面小区域光学性能差异的问题,同时小孔的衍射效应降低了光学系统的空间分辨率。目前国内外的研究通过测量小孔面积的方法来计算孔阑衰减系数^[10-11],虽然提及了小孔衍射和非全口径定标的影响,但并未给出相应的测量方法^[12],不能测量就无法校正,最终会导致这两种因素引入的不确定度超出准确度的范围。

为了校正孔阑(PA)引入导致的系统响应变化,本文提出了一种对孔阑衰减因子进行全面测试的

方法。该方法遵循仪器的定标与工作状态一致的原则,将孔阑与后端光谱仪光学系统作为一个整体进行定标,比单独测量孔阑遮拦比的方式更具准确性。

2 基本原理

反射率传递光谱仪的工作原理:利用仪器的短期稳定性,即认为仪器响应特性在对日观测和对地观测时相同,通过比对地面目标与太阳圆盘的信号值,计算地面目标反射率。此过程避免了不同仪器之间和同一仪器不同时期之间响应差异对测量结果的影响,可实现更高精度的反射率测量。测得的目标反射率可传递给同时、同观测角的其他遥感仪器,利用太阳圆盘光谱辐照度数据,实现溯源至国际标准单位制 SI 的在轨辐射校准^[13]。

2.1 地面反射率的测量原理

为测量地面目标的反射率,需先测量太阳的输入光谱辐照度,使用辐照度作单位,可减轻太阳空间非均匀性的影响。利用光谱仪直接扫描太阳圆盘,太阳圆盘的光谱辐照度计算公式为

$$E_{\lambda}^{(\text{solar})} = \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_i L_{i,\lambda}^{(\text{solar})}, \quad (1)$$

式中: η 为过采样因子; Ω_i 为像元的立体角; $L_{i,\lambda}^{(\text{solar})}$ 为太阳像元辐亮度; N_p 为太阳圆盘图像内所有像元的编号。单个像元探测的辐亮度为

$$L_{i,\lambda} = (S_{i,\lambda} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark})}) \times R_{i,\lambda}, \quad (2)$$

式中: $S_{i,\lambda}$ 为序号*i*像元的输出信号值; $S_{i,\lambda}^{(\text{dark})}$ 为暗信号; $R_{i,\lambda}$ 为定标系数。

假设存在一个理想的衰减片,只提供均匀的能量衰减,衰减系数为 δ_{λ} ,不引入光学像差,则太阳圆盘的光谱辐照度为

$$E_{\lambda}^{(\text{solar})} = \frac{1}{\eta \cdot \delta_{\lambda}} \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_i (S_{i,\lambda}^{(\text{solar})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark})}) \times R_{i,\lambda}, \quad (3)$$

式中: δ_{λ} 为出射光通量与入射光通量的比值。

$$\delta_{\lambda} = \phi_{\lambda}^{(\text{out})} / \phi_{\lambda}^{(\text{in})}. \quad (4)$$

双向反射分布函数(BRDF)的定义为材料表面的反射辐亮度与入射辐照度的比值,计算公式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dL_i(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i \cos \theta_i}, \quad (5)$$

式中: θ 和 φ 为球坐标系下的天顶角和方位角; i 为入射, r 为反射; $dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为 (θ_r, φ_r) 方向的反射亮度; $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为 (θ_i, φ_i) 方向的人射照度; $dL_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为 (θ_i, φ_i) 方向的人射亮度; $d\omega_i$ 为

$dL_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的辐射立体角, 量纲为 sr^{-1} 。

对地观测时, 波长 λ 通道的第 i 号像元探测的地面目标的反射率为

$$\text{BRDF}_{i,\lambda} = \frac{L_{i,\lambda}^{(\text{earth})}}{E_{\lambda}^{(\text{solar})} \cdot \cos \theta_{\text{solar}}} = \frac{\eta \delta_{\lambda} (S_{i,\lambda}^{(\text{earth})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark})}) \cdot R_{i,\lambda}}{\sum_{i=1}^{N_p} \Omega_i (S_{i,\lambda}^{(\text{solar})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark})}) R_{i,\lambda} \cos \theta_{\text{solar}}} \quad (6)$$

在地面通过观测均匀辐亮度面光源, 通过沿狭缝方向对太阳圆盘中心进行平场扫描, 可将各像元的定标系数归一化到同一像元 i_0 上, 即

$$L_{i,\lambda} = (S_{i,\lambda} - S_{i_0,\lambda}^{(\text{dark})}) \cdot R_{i,\lambda} = (S_{i,\lambda} - S_{i_0,\lambda}^{(\text{dark})}) \cdot \tau_{i,\lambda} \cdot R_{i_0,\lambda} \quad (7)$$

式中: $\tau_{i,\lambda}$ 为归一化系数。

$$\text{BRDF}_{i,\lambda} = \frac{\eta \cdot \delta_{\lambda} \cdot (S_{i,\lambda}^{(\text{earth})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark})})}{\sum_{i=1}^{N_p} \Omega_i (S_{i,\lambda}^{(\text{solar})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark})}) \tau_{i,\lambda} \cdot \cos \theta_{\text{solar}}} \quad (8)$$

从反射率计算公式可看出, 反射率测量不依赖于定标系数, 衰减系数 δ_{λ} 的准确度直接影响了反射率的绝对精度, 要实现长周期气候研究所需的高精度观测, 需对衰减系数进行准确而全面的定标。 δ_{λ} 是一个微小量, 要对孔阑衰减因子进行定标, 需要解决的第一个问题就是大量级衰减系数的测量。

2.2 大量级衰减系数的测量原理

测量衰减系数最直接的方法就是准确测量出衰减前的人射光通量和衰减后的出射光通量, 出射光通量与入射光通量的比值即为衰减系数。当衰

减的量级很大时, 即使入射光很强, 衰减后的出射光也很微弱。因此对大量级衰减系数的测量, 实际上就是对大动态光谱辐射的测量。通过延长积分时间, 标准传递光谱仪可以实现对微光的测量, 但要保证微光测量精度, 就需要对计量光谱仪进行大量级的线性度测试。当标准光谱仪的线性度测试能覆盖 6 个数量级时, 就可以从常规测量进入到微光测量。如果某波段大动态范围内的线性度很好, 普通亮度下标定后, 传递光谱仪即可在微弱亮度下使用。如果某波段有非线性, 则利用线性度测试结果对其进行修正。线性度测量通常采用双光路法^[14], 将两束能量稳定的激光打到探测器上, 计算非线性系数的公式为

$$I_{\text{nonlinear}} = 1 - \frac{I_1 + I_2}{I_{1,2}} \quad (9)$$

式中: I_1 为只有光束 1 时的信号; I_2 为只有光束 2 时的信号; $I_{1,2}$ 为光束 1 和光束 2 同时照射时的信号。基于激光的非线性测量设备如图 1 所示。

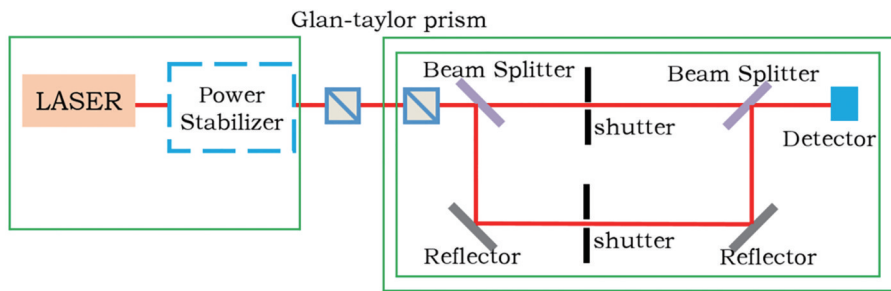


图 1 激光非线性测量实验装置^[15]

Fig. 1 Experimental setup for laser nonlinearity measurement^[15]

激光先经功率稳定器稳定, 通过两个棱镜后, 再经分束片分为光束 1 和光束 2。调整第二个棱镜, 使得光束 1 和光束 2 的能量近乎相等, 然后固定棱镜; 调整第一个 Glan-Taylor 棱镜的方向, 改变激光的功率; 调整两个棱镜, 可以实现激光功率 6 个数量级的动态变化, 激光功率稳定器可以实现 20 倍的功率调

整。综合下来, 整个系统的线性度测试可覆盖 7 个数量级, 能满足太阳衰减系统 5 个数量级的定标需求。

3 定标方法及验证实验

3.1 孔阑衰减因子的实验室定标

小孔光阑的材料为殷钢, 保证了孔阑的强度和

稳定性,小孔直径为 0.5 mm,光学系统的入瞳直径为 24 mm,衰减片的衰减系数约为 4.3×10^{-4} 。用飞秒激光加工微小尺寸的孔^[16],实现更大量级的衰减。理论上,小孔光阑的衰减系数等于小孔面积与入射光瞳面积的比值 δ_A ,但由于存在衍射效应和非全口径定标的影响,并不能直接用 δ_A 作为衰减系数来进行数据反演,需要加入小孔衍射影响因子 $\tau_d(\lambda)$ 和非均匀性影响因子 $h_{i,\lambda}$ 来修正。由光的衍射效应可知, $\tau_d(\lambda)$ 与小孔的大小和光的波长直接相关, $h_{i,\lambda}$ 与波长和小孔在光阑上的位置有关。 $\tau_d(\lambda)$ 的物理含义就是有小孔衍射效应时太阳圆盘图像中心的信号值与理论上无衍射效应时信号值的比。 $h_{i,\lambda}$ 的物理含义则为小孔径入射光对应的光学系统透过率与全口径时光学系统透过率的比。 $\tau_d(\lambda)$ 和 $h_{i,\lambda}$ 将用于修正太阳圆盘光谱辐照度,因此小孔光阑扫描得到的太阳积分辐照度可表示为

$$E_{\lambda}^{(\text{solar})} = \frac{1}{\eta \cdot \delta_A \cdot \tau_d(\lambda)} \cdot \sum_{i=1}^{N_d} \Omega_i (S_{i,\lambda}^{(\text{solar})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark})}) \cdot R_{i,\lambda} \cdot h_{i,\lambda} \quad (10)$$

在实验室,利用微光积分球和宽动态标准光谱仪对孔阑衰减因子进行标定。已采用 2.2 节介绍的方法对宽动态范围光谱仪标定线性度。测试光源选用宽动态积分球均匀光源系统,可通过计算机控

制软件调节可变光阑的大小,改变稳定光源进入积分球的光通量,并由积分球上的 thermoelectric cooler(TEC)制冷硅探测器监测积分球输出亮度。积分球在 400~1100 nm 光谱波段内可调节的辐亮度范围为 $1 \times 10^{-10} \sim 1.43 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$,出口的均匀性为 99.4%。反射率传递光谱仪为载荷的光学系统主体,其入瞳前装有衰减器轮,控制衰减器轮的步进电机转动,可在反射率传递光谱仪入瞳处切入或移开小孔光阑。

对小孔光阑综合衰减因子的测试方法如下:首先将绝对反射率传递光谱仪的积分时间设定在一个较长的值 $t_{\text{long,int}}$,反射率传递光谱仪入瞳处由电机切入小孔光阑,宽动态积分球的亮度设定在最大值,该值由宽动态范围光谱辐射计测量给出,记为 $L_{\lambda}^{(\text{high,lab})}$,记录此时探测器的输出信号 $S_{i,\lambda}^{(\text{high,lab})}$;再将积分球的亮度调低约 3 个数量级,转动电机移开小孔光阑,反射率传递光谱仪全口径观测积分球,积分时间 $t_{\text{long,int}}$ 不变;此时积分球的辐亮度 $L_{\lambda}^{(\text{low,lab})}$ 同样由宽动态范围光谱辐射计测量给出,记录此时探测器的输出信号 $S_{i,\lambda}^{(\text{low,lab})}$,为了减小同积分时间探测器响应的非线性影响,合理设置 $L_{\lambda}^{(\text{low,lab})}$,使 $S_{i,\lambda}^{(\text{low,lab})}$ 和 $S_{i,\lambda}^{(\text{high,lab})}$ 的码值接近;最后关闭积分球光源,记录暗电平的信号值 $S_{i,\lambda}^{(\text{dark,lab})}$ 。设积分时间为 $t_{\text{long,int}}$ 时,探测器的响应系数为 $R_{i,\lambda}^{(\text{long,int})}$,定标过程如图 2 所示。

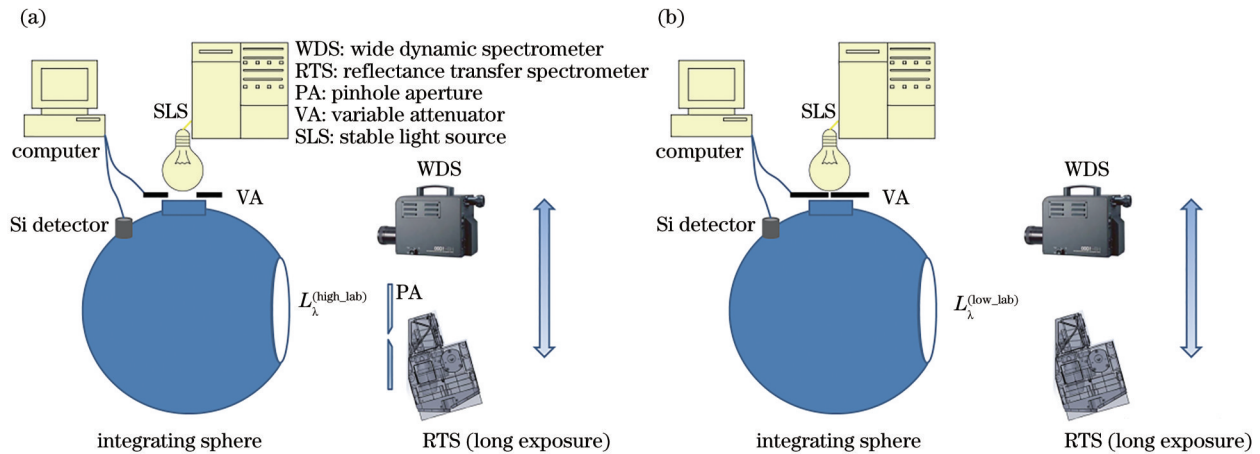


图 2 孔阑衰减因子的定标示意图。(a)测量高亮度光源的光谱辐亮度和该亮度下加孔阑观测时反射率传递光谱仪的响应; (b)测量低亮度光源的光谱辐亮度和该亮度下不加孔阑观测时反射率传递光谱仪的响应

Fig.2 Calibration diagrams of pinhole aperture attenuation factor. (a) Spectral radiance of high luminance source and response of the reflectance transfer spectrometer with a pinhole aperture are measured; (b) spectral radiance of low luminance source and response of the reflectance transfer spectrometer without a pinhole aperture are measured

根据上述测试方法,可得公式:

$$L_{\lambda}^{(\text{low,lab})} = (S_{i,\lambda}^{(\text{low,lab})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark,lab})}) \cdot R_{i,\lambda}^{(\text{long,int})} \quad (11)$$

$$L_{\lambda}^{(\text{high,lab})} = \frac{(S_{i,\lambda}^{(\text{high,lab})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark,lab})}) \cdot R_{i,\lambda}^{(\text{long,int})} \cdot h_{i,\lambda}}{\delta_A \cdot \tau_d(\lambda)} \quad (12)$$

进而可以算出孔阑的衰减因子为

$$\frac{h_{i,\lambda}}{\delta_{\lambda} \cdot \tau_d(\lambda)} = \frac{L_{\lambda}^{(\text{high_lab})} \cdot (S_{i,\lambda}^{(\text{low_lab})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark_lab})})}{L_{\lambda}^{(\text{low_lab})} \cdot (S_{i,\lambda}^{(\text{high_lab})} - S_{i,\lambda}^{(\text{dark_lab})})} \quad (13)$$

因为 $L_{\lambda}^{(\text{high_lab})}/L_{\lambda}^{(\text{low_lab})}$ 是一个相对值,其精度与线性度测试的精度相关,不依赖于辐亮度测试值的绝对精度。宽动态光谱仪对积分球高亮度工作模式和低亮度工作模式的光谱辐亮度测试结果如图 3 所示。

积分球高亮度下加孔阑观测和积分球低亮度下不加孔阑观测,反射率传递光谱仪的响应信号值如图 4(a)所示,数字量化值(DN)为无量纲单位,与光谱信号大小成正比。根据图 3 和图 4(a)的测量结果,可通过(13)式计算得到孔阑衰减因子,选取编号 $i=1$ 的空间维像元,结果如图 4(b)所示。

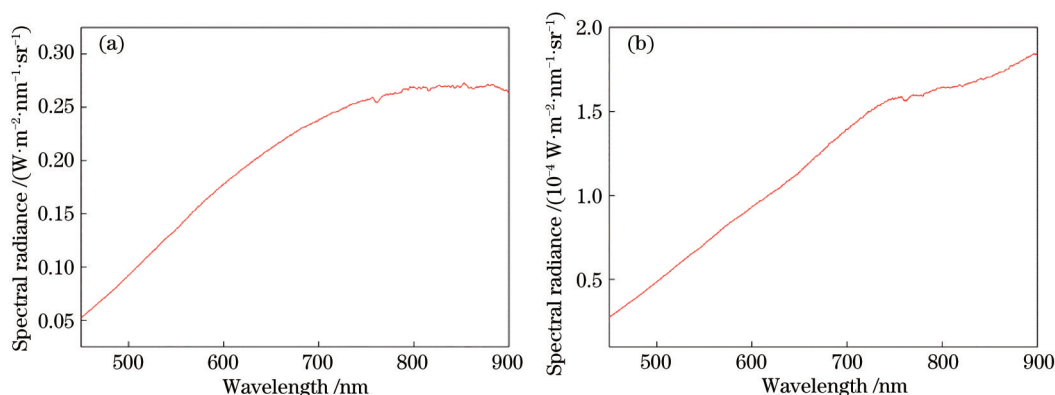


图 3 宽动态光谱仪测量的积分球光源光谱辐亮度。(a)高亮度;(b)低亮度

Fig. 3 Spectral radiance of integrating sphere light source measured by wide dynamic spectrometer. (a) High luminance; (b) low luminance

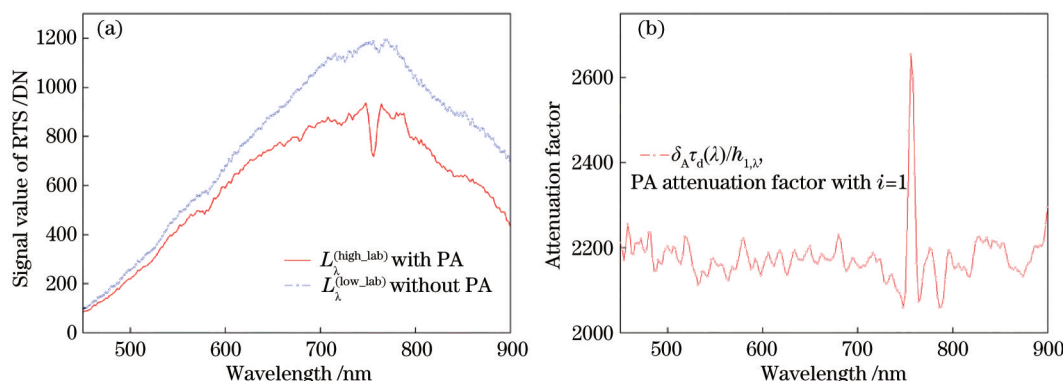


图 4 孔阑衰减因子的测量结果。(a)反射率传递光谱仪的响应值;(b) (13)式计算得到的孔阑衰减因子

Fig. 4 Measurement results of pinhole aperture attenuation factor. (a) Signal value of reflectance transfer spectrometer; (b) pinhole aperture attenuation factor calculated from Eq. (13)

3.2 反射率测量的外场实验

进行外场实验时选取晴朗无云的天气,调整反射率传递光谱仪的位置,使狭缝方向与太阳运行轨迹垂直,将孔阑切换到光谱仪入瞳处,再经二维转台将反射率传递光谱仪指向太阳,如图 5(a)所示。等太阳扫过视场后,再将反射率传递光谱仪指向放置在地面上的漫反射板,全口径测量漫反射白板(WDP)的光谱反射率曲线,通过测量有太阳光直射和挡掉太阳直射光这两种情况下的反射光,扣除环境漫反光的影响,如图 5(b)所示。

由于孔阑的衰减量级为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$,不能将太

阳的亮度衰减到漫反射白板的亮度水平,因此对太阳直接成像时还需要调低光谱仪的积分时间。实验过程中,对太阳观测时探测器积分时间为 $21.3 \mu\text{s}$,对漫反射白板观测时,积分时间为 1.36 ms 。光谱仪响应随积分时间变化的线性度已经校准。图 6(a)为 600 nm 通道下太阳圆盘过采样扫描图像。当太阳扫过光谱仪视场后,立即控制二维转台指向漫反射板,转台转动过程中切换积分时间,对太阳观测与对漫反射板观测的时间间隔为 10 s 以内,太阳高度角的变化可忽略不计。图 6(b)为光谱测量信号,太阳直射光谱和漫反射板的反射

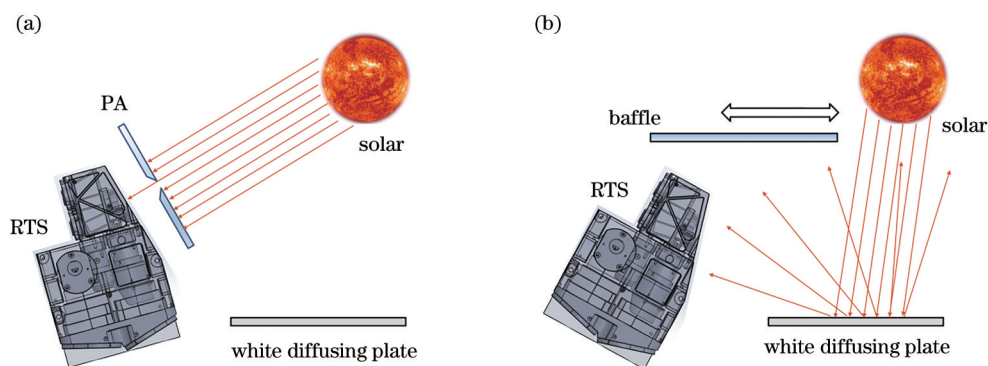


图 5 外场反射率测量实验示意图。(a)直接对太阳扫描成像;(b)观测漫反射白板

Fig. 5 Experiment diagram of measuring reflectance outdoor. (a) Directly imaging the solar; (b) observing the white diffusing plate

光谱均显示了明显的大气吸收特征,其中 688 nm 附近的吸收带为氧气 B 吸收带,710~730 nm 吸收带

则为水汽吸收带,760 nm 附近的吸收带为氧气 A 吸收带。

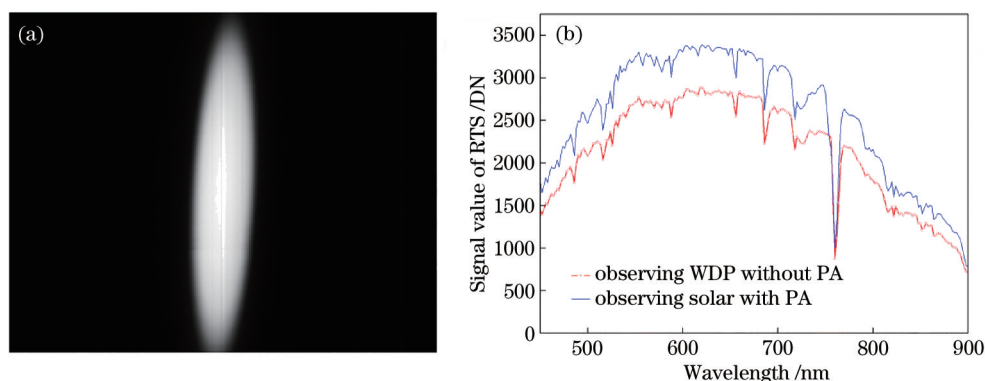


图 6 实验测试结果。(a)太阳圆盘的过采样图像;(b)反射率传递光谱仪对太阳和漫反射板的光谱响应

Fig. 6 Experimental test results. (a) Oversampled image of the solar disk; (b) spectral response of reflectance transfer spectrometer to solar and diffuse reflector

当高精度二维转台指向太阳时,反射率传递光谱仪的狭缝方向垂直于太阳的运行轨迹,美国国家能源可再生实验室提供的太阳和月球轨迹算法(SAMPA)可准确计算出观测地点任意时刻的太阳天顶角和方位角,根据太阳的角度位置随时间的变化,算出观测时刻太阳穿过狭缝视场的角速度 ω_{track} 。反射率传递光谱仪扫描维的瞬时视场角为 φ_{instant} ,探测器的帧周期为 t_{scan} ,则过采样因子为

$$\eta = \frac{\varphi_{\text{instant}}}{\omega_{\text{track}} t_{\text{scan}}} \quad (14)$$

将外场实验的时间和地点信息代入 SAMAPA,得到 ω_{track} 为 $0.008 (^{\circ})/\text{s}$,光谱仪瞬时视场角 φ_{instant} 为 0.0175° ,帧周期 t_{scan} 为 0.5 s ,计算得到过采样因子 η 为 4.375 。

4 分析与讨论

从图 6(a)可以看出,小孔的衍射效应导致光学

系统调制传递函数(MTF)降低,太阳圆盘的边缘变得模糊。而从图 4(a)结果中可以看出,孔阑的衰减因子在光谱上不是一个稳定值,有明显的波动,甚至在 750 nm 波长附近有一个超过平均值 20% 的峰,这与孔阑的衰减系数在波长上没有特异性的理论不相符。原因就是 0.5 mm 小孔光阑作为一个单独的元件来分析时,其遮拦比与波长无关,但与后面的光学系统作为一个整体分析时,光学系统的衍射极限和非全口径成像等问题对总衰减系数的影响不可忽略。如图 7 所示,反射率传递光谱仪加小孔光阑后对积分球亮光源进行观测时,探测器图像中间出现了一条阴影,最终确定是消叠级滤光片的膜层分界线投影,这在全口径对积分球光源进行观测时是看不到的。由于光谱仪的-1级衍射光谱与-2级衍射光谱部分区域重叠,为了防止不需要的-2级衍射光落到探测器上,在探测器前加了滤光片,滤光片中心分界线的两边镀了两种不同波长区间的增透膜,

使-1级的光谱能完整透过,-2级的光不能透过。非全口径成像对衰减因子的影响如图7所示,当小口径成像的光迹刚好落在膜层分界线上时,其光学透过率将主要由分界线处的透过率决定,光学表面微小缺陷的影响被放大。因为膜层分界线处的透过率偏低,所以在图像上会出现暗区。而全口径成像时,光学透过率由更大的圆形区域决定,分界线处的低透过率对总透过率的影响很小,因此看不到投影。

综上所述可知,孔阑衰减因子在光谱上出现的异常峰值是滤光片膜层分界线处的光学性能差异被非全口径成像放大导致的。可以预料,其他光学元件的表面特性不可能做到完全一致,也存在同样的问题,最终导致孔阑的衰减系数并不均匀。这种不均匀性,从外场的测试数据中也可以发现。利用图6(b)的外场测试结果,将光谱仪对太阳和漫反射

白板的响应信号值相比,结果如图8(a)所示,同样存在异常峰值,这与漫反射白板光谱反射率在可见光波段均匀的特性不相符。由(8)式可知,比值的异常波动是衰减因子造成的。用图4(b)的孔阑衰减因子对图8(a)的测试结果进行校正,将各波长的值归一化到平均值,得到归一化的结果,如图8(b)所示,异常峰值被有效校正,校正后的光谱反射率相对差异值在2%以内,可以反映出漫反射板光谱反射率平坦的特点,说明所提方法在实验室测得的衰减因子可校正外场测试数据。反射率测量实验是在外场大气环境下进行的,虽然测量太阳直射光谱和漫反射白板反射光谱的间隔时间很短,但测量过程中大气的持续扰动使得两次测量所处的大气环境并不完全一致,导致校正后的漫反射白板光谱反射率相对差异值高于实验室测量值。

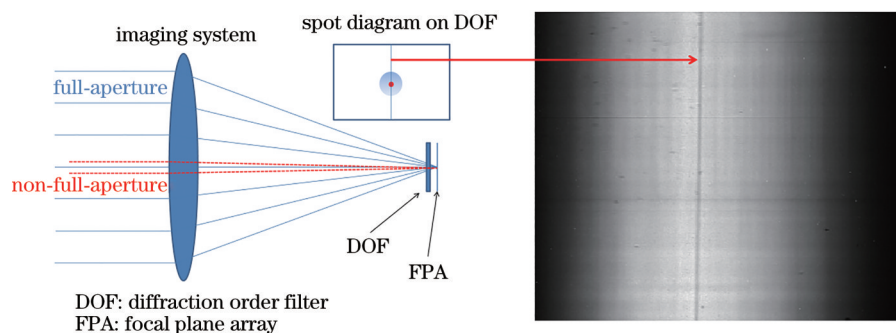


图7 非全口径成像对衰减因子均匀性的影响

Fig. 7 Influence of non-full-aperture imaging on the uniformity of attenuation factor

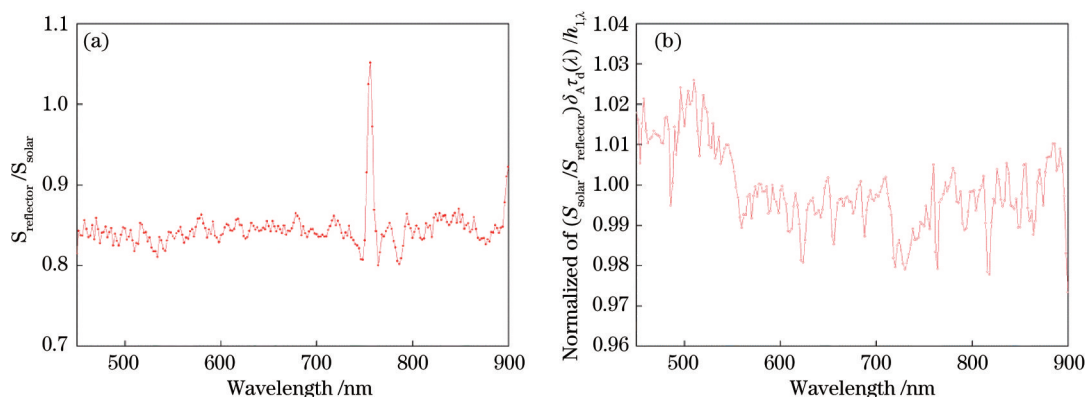


图8 非均匀性校正结果。(a)反射率传递光谱仪对太阳和漫反射白板的响应信号比值;(b)利用孔阑衰减因子的对比值非均匀性校正的归一化结果

Fig. 8 Results of non-uniformity correction. (a) Ratio of solar response signal of reflectance transfer spectrometer to white diffusing plate response signal; (b) normalized result of ratio non-uniformity corrected by pinhole aperture attenuation factor

太阳光谱辐照度的准确测量依赖于孔阑衰减因子的精确定标。根据(13)式,所提方法标定孔阑衰减因子时的不确定度来源主要是反射率传递

光谱仪的短期非稳定性和非线性、积分球光源的短期稳定性、高低亮度比值的不确定度。而积分球亮度比值的不确定度来自宽动态范围光谱辐射

计的非线性校准精度及其短期稳定性。最终所提方法确定的衰减因子不确定来源如表 1 所示。

其中,反射率传递光谱仪和宽动态范围光谱辐射计的短期非稳定性,均根据信噪比评估得出;非线性误差,根据校准后的非线性度评估;积分球光源的稳定性由 2 h 内的监视探测器读数变化量评估。

5 结 论

提出了一种简便的孔阑衰减因子测量方法,通过该测试方法得到的结果包含了小孔衍射和非全口径成像引入的影响,相比于单独测量孔阑的遮拦比所确定的衰减系数,更符合仪器的实际工作情况。在对反射率传递光谱仪的孔阑衰减因子进行定标过程中,发现了滤光片膜层分界线在探测器上的投影,说明非全口径成像对孔阑衰减因子的影响显著超出了现有研究的预期,需要准确定标。所提方法测量孔阑衰减因子时不依赖于光源亮度绝对值的计量,可以更容易实现高精度的测量。用测得的孔阑衰减因子对漫反射白板反射率的光谱非均匀性进行了修正,修正后的非均匀性在 2% 以内,证明了孔阑衰减因子测试方法的有效性,所提方法可用于实现基于反射率测量的高精度基准比对传递。

表 1 孔阑衰减因子测量的不确定度评估

Table 1 Evaluation of uncertainty in measurement of pinhole aperture attenuation factor

unit: %

Sources of uncertainty	Instability of RTS	Nonlinearity of RTS	Instability of light source	Instability of WDS	Nonlinearity of WDS	Total
Value	0.5	0.1	0.5	0.2	0.1	0.78

参 考 文 献

- [1] Fox N P, Green P D. Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial-and Helio-Studies (TRUTHS): an element of a space-based climate and calibration observatory[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2400.
- [2] Xiong X X, Butler J, Chiang K, et al. VIIRS on-orbit calibration methodology and performance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(9): 5065-5078.
- [3] Xiong X X, Sun J Q, Xie X B, et al. On-orbit calibration and performance of aqua MODIS reflective solar bands[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 535-546.
- [4] Li X, Zhang L M, Si X L, et al. Accuracy verification of on-board radiometric calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0928001.
李鑫, 张黎明, 司孝龙, 等. 星上辐射定标精度验证方法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0928001.
- [5] Xu H Y, Zhang L M, Huang W X, et al. On-board absolute radiometric calibration and validation based on solar diffuser of HY-1C SCS[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0928002.
许和鱼, 张黎明, 黄文薪, 等. 基于 HY-1C SCS 太阳漫反射板的星上绝对辐射定标与验证[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0928002.
- [6] Sun J, Wang M. On-orbit calibration of visible infrared imaging radiometer suite reflective solar bands and its challenges using a solar diffuser[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7210-7223.
- [7] Sun J Q, Chu M, Wang M H. Degradation nonuniformity in the solar diffuser bidirectional reflectance distribution function[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 6001-6016.
- [8] Leckey J P. Climate absolute radiance and refractivity observatory (CLARREO) [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015: 213-217.
- [9] Zhang P, Lu N M, Li C R, et al. Development of the Chinese space-based radiometric benchmark mission LIBRA[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 2179.
- [10] Zhao W X, Li X, Zhang Y N. High-precision measurement on area ratio of different apertures[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(3): 226-232.
赵文贤, 李新, 张艳娜. 不同光阑面积比值高精度测量方法[J]. *大气与环境光学学报*, 2018, 13(3): 226-232.
- [11] Bremer J C, Wood H J, Si G J. Attenuation of direct solar radiation by a perforated plate for on-orbit visible calibration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4135: 374-383.
- [12] Kopp G, Smith P, Belting C, et al. Radiometric flight results from the hyperspectral imager for climate science (HySICS)[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2017, 6(1): 169-191.
- [13] Richard E, Harber D, Coddington O, et al. SI-traceable spectral irradiance radiometric characterization and absolute calibration of the TSIS-1 spectral irradiance monitor (SIM)[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1818.
- [14] Wang X L, Wu Z F, Song G C, et al. Measurement of absolute linearity using laser covering large-scale dynamic range[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(4): 681-685.
王雪莲, 吴志峰, 宋贵才, 等. 激光大动态范围线性测量[J]. *应用光学*, 2019, 40(4): 681-685.
- [15] Wu Z F, Dai C H, Li L, et al. Nonlinearity of photodetector using laser facility[C]//*Proceedings of the 29th Quadrennial Session of the CIE*, June 14-22, 2019, Washington DC, USA. Vienna: CIE, 2019: 412-416.
- [16] Du K, Li X W, Yang B D, et al. Research progress of femtosecond laser microhole drilling on non-metallic materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111417.
杜坤, 李晓炜, 杨炳东, 等. 飞秒激光非金属微孔加工研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111417.