

太阳光谱仪辐亮度响应度定标系统

张建文 邓伟杰 李博 吴珩 林冠宇

Calibration system for solar spectrograph radiance response

ZHANG Jianwen, DENG Weijie, LI Bo, WU Heng, LIN Guanyu

引用本文:

张建文, 邓伟杰, 李博, 等. 太阳光谱仪辐亮度响应度定标系统[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 670–675. DOI: 10.5768/JA0202546.0303002

ZHANG Jianwen, DENG Weijie, LI Bo, et al. Calibration system for solar spectrograph radiance response[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 670–675. DOI: 10.5768/JA0202546.0303002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JA0202546.0303002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于超连续光源的InGaAs探测器相对光谱响应度定标技术

Relative spectral responsivity calibration technology of InGaAs photodetector based on super-continuum light source

应用光学. 2021, 42(4): 709–716 <https://doi.org/10.5768/JA0202142.0403003>

大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪光谱定标

Spectral calibration of atmosphere hyper-spectral resolution infrared sounder

应用光学. 2020, 41(4): 723–729 <https://doi.org/10.5768/JA0202041.0406001>

光栅式成像光谱仪空间均匀性测试研究

Research on spatial uniformity test of grating imaging spectrometer

应用光学. 2020, 41(2): 354–360 <https://doi.org/10.5768/JA0202041.0203003>

紫外-真空紫外成像光谱仪校准技术研究

Research for calibration technology of ultraviolet-vacuum ultraviolet imaging spectrometer

应用光学. 2020, 41(4): 778–785 <https://doi.org/10.5768/JA0202041.0409902>

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JA0202243.0203001>

太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准技术

Calibration technology for spectral range and signal-to-noise ratio of terahertz time-domain spectrometer

应用光学. 2023, 44(5): 1068–1072 <https://doi.org/10.5768/JA0202344.0503002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0670-06

引用格式: 张建文, 邓伟杰, 李博, 等. 太阳光谱仪辐亮度响应度定标系统[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 670-675.

ZHANG Jianwen, DENG Weijie, LI Bo, et al. Calibration system for solar spectrograph radiance response[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 670-675.



在线阅读

太阳光谱仪辐亮度响应度定标系统

张建文¹, 邓伟杰¹, 李博², 吴珩², 林冠宇²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 空间光学研究一部, 吉林 长春 130033)

摘要: 研究太阳光谱对于科学发展和人类社会有着深远的意义。根据该要求设计出的星载太阳成像光谱仪, 其在地面定标时, 直接进行辐亮度响应度定标后得到的辐亮度响应度信噪比较低, 不确定度较大, 难以实现对辐亮度响应度的精确测量。因此构建了太阳辐亮度高光谱响应度定标系统, 进行系统整机辐亮度响应度测试。提高了待测太阳成像光谱仪定标试验的定标精度, 获得了2.8倍动态范围提升, 产生的扩展不确定度可以达到4.60%。该辐亮度响应度定标系统测试对比直接进行辐亮度响应度定标, 显著提高了太阳成像光谱仪定标试验的信噪比, 满足太阳成像光谱仪辐亮度响应度定标的要求。

关键词: 定标; 仪器、测量和计算; 滤光片; 光谱仪

中图分类号: TN06; O433.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0303002

Calibration system for solar spectrograph radiance response

ZHANG Jianwen¹, DENG Weijie¹, LI Bo², WU Heng², LIN Guanyu²

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. The 1st Department of Space Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The study of solar spectrum is of profound significance to science and human society. The satellite-borne solar imaging spectrometer designed in accordance with this requirement has a low signal-to-noise ratio and a large uncertainty after calibration of the radiance response directly on the ground, so it is difficult to achieve accurate measurement of the radiance response. Therefore, the solar radiance hyperspectral responsivity calibration system was constructed to test the whole system radiance responsivity. The calibration accuracy of the solar imaging spectrometer calibration test was improved, the dynamic range was improved by 2.8 times, and the extended uncertainty could reach 4.60%. Compared with the results of direct calibration, the signal-to-noise ratio of solar imaging spectrometer calibration test was significantly improved, which met the requirements of radiance response calibration of solar imaging spectrometer.

Key words: calibration; instrument, measurement, and metrology; filters; spectrometers

引言

太阳是地球外部能量的主要来源, 监测太阳光

谱对太阳物理研究以及分析太阳对地球影响具有重要意义。为获取太阳等高亮度目标的辐亮度信

收稿日期: 2024-12-23; 修回日期: 2025-02-10

基金项目: 国家自然科学基金 (62005268)

作者简介: 张建文 (1998—), 男, 硕士, 主要从事光学设计与光学测试技术研究。E-mail: asy1057@126.com

通信作者: 李博 (1981—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学系统设计、空间紫外预警、高光谱遥感载荷总体技术等研究。E-mail: libo0008429@163.com

息, 星载太阳光谱仪器在轨工作时往往要经受高温高亮度的考验。太阳表面辐亮度大约是地表反射辐亮度的 50 000 倍, 若直接观测则需要对目标信号进行衰减, 以避免出现探测器饱和现象^[1]。在国外, 欧洲航天局 ESA 与美国航天局 NASA 合作研制的太阳轨道器卫星就配备了具有 10 种不同仪器的科学有效载荷, 相互配合以观测太阳内部运作的图景, 以及太阳活动对于太空环境的影响^[2]。这些光学系统都需要进行地面定标, 以保证在轨运行状态稳定。由日本宇宙航空研究开发机构 JAXA 领导研制的 Hinode 卫星, 其搭载的极紫外成像光谱仪主要用于测量太阳粒子的流速或速度, 并诊断太阳等离子体的温度和密度, 该成像光谱仪在地面进行辐射定标时使用同步辐射对光学组件进行校准^[3]。在国内, 长春光学精密机械与物理研究所研制的风云三号卫星搭载了太阳辐照度光谱仪^[4,5], 为我国监测太阳活动引起的地球气候系统能量变化提供了有力的支撑, 该系统采用辐射强度较高的同步辐射源进行辐射定标^[6]。由中国航天科技集团有限公司八院抓总研制的太阳 H α 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星“羲和号”, 其工作轨道为太阳同步轨道, 搭载的光谱探测系统获得的太阳 H α 光谱可为诸多太阳相关的科学问题提供重要研究支撑^[7]。

过往研究中, 使用同步辐射源可获得更小的不确定度, 但使用成本较高, 不适合为常规近红外光谱仪进行实验室定标, 而采用标准钨灯或氙灯进行定标, 由于定标过程与待测设备引入的误差, 总不确定度一般会高于 5%^[8]。从探测需求来讲, 国内太阳成像光谱仪设计已经接近成熟, 但针对太阳辐亮度高光谱定标系统, 相关文献报道较少。因此, 本文对太阳辐亮度成像光谱仪高精度辐亮度定标技术开展研究, 搭建太阳辐亮度高光谱响应度定标系统, 解决了辐亮度响应度的定标问题, 对后续同类产品的研制具有重要借鉴意义。

1 基本原理

该系统的基本原理是, 通过响应度系数映射模块对光谱辐亮度响应度进行精确参数映射, 主要利用光路中光学元件的光谱性质、各组件光谱性质关系对待测太阳光谱仪系统进行分析计算^[9], 计算公式如下:

$$t = r^m r_s t_1^k \prod_{i=1}^n e^{-a_i \Sigma d_i} \quad (1)$$

式中: t 为光学系统透过率; r 为反射镜的反射率;

m 为反射镜数目; r_s 为分光镜的反射率; t_1 为透镜双面平均透过率; k 为透镜数量; n 为透镜材料种类数量; a_i 为光学材料的平均吸收系数; Σd_i 为光学材料透镜总厚度。

该系统视场角为 $2a$ 时, 半视场角的正切与滤光片厚度 D 及垂轴位移 ΔT 的关系如式 (2) 所示, b 为滤光片前表面出射光的折射角:

$$\tan a = \frac{D \tan b}{D - \Delta T / \tan a} \quad (2)$$

通过数学变换, 得到垂轴位移的计算公式 (3):

$$\Delta T = D(\tan a - \tan b) \quad (3)$$

之后利用折射定律, 可得式 (4):

$$\Delta T = D(\tan a - \tan(\arcsin(\frac{\sin a}{n}))) \quad (4)$$

为提高检测结果精确度, 还应对该系统的工况进行仿真校正, 通过结合前端准直镜组、狭缝与后端色散光栅和聚焦镜组的面形与离轴位移特征, 搭建太阳光谱仪工作状态理论模型, 并对该光学系统整机结构进行光线追迹采样, 取峰值误差 0.03% 与平均误差 0.26% 的平滑网格数据统计, 取太阳光谱仪轨道处对应的理论太阳平均功率, 最终分析结果如表 1 所示, 其中系统接收到的辐照度最大值偏差值为 0.175 8 W/mm², 平均辐照度偏差值为 0.135 2 W/mm², 标准偏差为 -0.093 0, 平均偏差为 -0.009 5。以该偏差值作为辐亮度响应度仿真校正映射系数, 加入辐亮度响应度分析环节中^[10]。

表 1 分组件定标后辐照度偏差

Table 1 Deviation comparison of irradiance calibration

Type	Difference value
Maximum irradiance	0.175 8 W/mm ²
Average irradiance	0.135 2 W/mm ²
Standard deviation	-0.093 0
Average deviation	-0.009 5
Distribution position and extension width	X: -0.036 0 μ m σ : 0.032 4 mm Y: -0.012 1 μ m σ : 0.032 3 mm

将校正系数输入计算分析系统, 由于光谱辐亮度响应度受到该光学系统的响应值以及插值辐亮度的影响, 根据式 (1) 的元件性质计算关系可得式 (5):

$$R(P_X, P_Y) = \frac{V(P_X, P_Y) T(P_X, P_Y)}{L(P_X, P_Y)} \quad (5)$$

式中: P_X 为空间维方向使用分布位置和延展宽度的 X 偏差校准后的像元位置; P_Y 为光谱维方向使用分布位置和延展宽度的 Y 偏差校准后的像元位置; R 为辐亮度响应度阵列; V 为分离中性衰减片后

光学系统的响应值阵列; L 为利用积分球 740 nm~800 nm 标准辐亮度数据与各像元中心波长拟合得到的辐亮度数据阵列; T 为通过测量得到的中性衰减片组件的透过率阵列。

为了保证探测器的信息有效性还应当进行像面有效区域的划分。有效区域的划分方法为: 探测器码值远高于暗背景灰度值的像元认为是有效像元, 并对数据阵列进行布尔运算, 即取有效像元位置的乘数为 1, 否则为 0, 计算响应度结果时, 使用有效区域对响应度数据进行分析处理, 得到符合实际的等效有效区域的光谱响应度数据。

对有效区域内像素计算分离中性衰减片组件后的光谱维空间维对应的像元光谱响应值 V , 表达式如式 (6) 所示:

$$V(P_X, P_Y) = \frac{(M(P_X, P_Y) - D(P_X, P_Y))A(P_X, P_Y)}{t_{\text{int}}} \quad (6)$$

式中: M 为探测器对积分球测得的光谱响应码值阵列; D 为关闭积分球后探测器测得的暗背景码值阵列; A 为有效区间阵列; t_{int} 为测量时探测器的积分时间。

代入系统元件光谱性质后, 该光学系统的辐亮度响应度 R 的计算公式如下:

$$R(P_X, P_Y) = \frac{(M(P_X, P_Y) - D(P_X, P_Y))T(P_X, P_Y)A(P_X, P_Y)}{L(P_X, P_Y) \times t_{\text{int}}} \quad (7)$$

对于辐亮度响应度定标, 还应当计算光谱维方向的平均辐亮度响应度, 根据平滑网格统计偏差, 在计算后代入平均偏差, 即可得到分组件定标后的光谱维方向平均辐亮度响应度^[11]。

2 装置系统组成

太阳成像光谱仪光学系统^[12]一般由望远镜单

元、成像光谱系统单元、焦平面单元组成。其中前置滤光片组由衰减片以及带通滤光片组成, 衰减片用于过滤削弱太阳光强度以保证设备正常工作。

如果使用传统辐亮度响应度定标方法, 由于系统本身不确定度偏差的影响以及系统响应度较低, 会降低待测系统的响应度定标精度。为研究对比近红外波段范围内本文定标系统与常规测试方法的表现, 取待测光谱仪部分波段(750 nm~790 nm), 使用标准灯与漫反射板配合的定标方式进行辐亮度响应度定标试验, 测试结果如图 1 所示, 可以看出, 辐亮度响应度曲线信号波动较为密集, 且信号偏弱, 信噪比较低, 动态范围只有 6.0 dB, 不能满足定标测试要求^[13]。

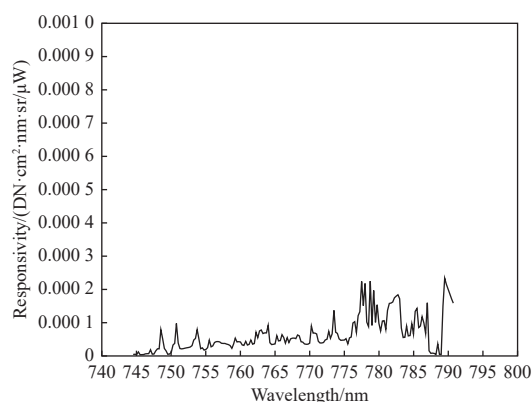


图 1 直接测量得到的部分波段光谱响应函数

Fig. 1 Partial band spectral response function obtained by direct measurement

为实现对太阳光谱仪辐亮度响应度的定标测试, 搭建太阳辐亮度高光谱响应度定标系统, 该系统主要包括均匀光谱辐射传递光源、响应度系数映射模块及分析计算模块, 其基本组成如图 2 所示。其中均匀光谱辐射传递光源由辐射

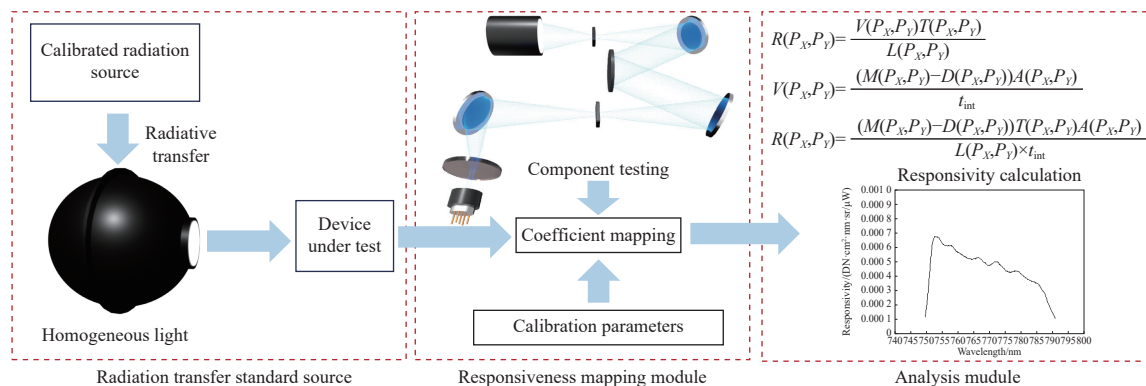


图 2 太阳辐亮度高光谱响应度定标系统组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of composition of solar radiance hyperspectral responsivity calibration system

传递光源和均匀光谱辐射模拟光源组成, 通过标准辐射获得均匀高光谱光束输出。响应度系数映射模块由组件参数测试模块、仿真参数校正模块及系数映射分析模块组成, 通过测试光学系统内组件的参数性质, 结合仿真参数修正, 代入辐亮度响应度分析计算模块中。分析计算模块通过结合辐射传递光源与映射模块参数, 分析计算获得太阳光谱仪迎日工作状态下的光谱辐亮度响应度输出。

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

使用响应度系数映射模块对系统组件进行测试, 输出系统组件光谱性质, 其中中性衰减片对系统探测器的光谱响应度影响较大, 其部分光谱透过率如图3所示。结合仿真校正值, 对辐亮度响应度进行分析计算。

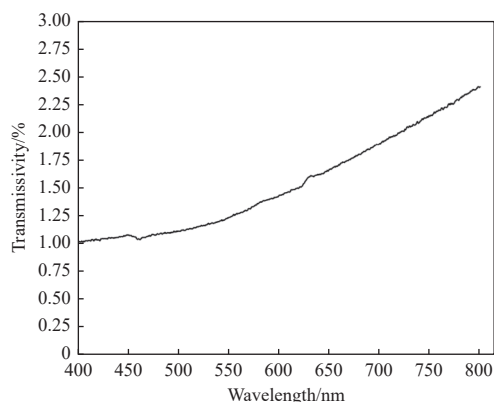


图3 部分波段的透过率

Fig. 3 Transmittance curve of partial bands

该均匀光谱辐射传递光源系统在测试时选用卤钨灯积分球作为辐射光源, 为了确定积分球的标准插值辐亮度, 本文利用传递辐射计与石英标准灯标定了积分球开口输出辐射亮度和内置监视探测器输出之间的关系, 得到如图4所示的积分球标准辐亮度与波长的关系作为辐射基准, 传递得到的积分球标准辐亮度值^[14]。该方案会因辐射计传递与误差引入非线性不确定度。由于采用模块化的定标系统设计, 辐射计传递链路得到了一定的简化, 且能实时观测辐射计传递情况, 降低了由辐射传递链路引入的不确定度, 其中, 非线性引入不确定度 1.00%, 辐射计传递链路信噪比引入不确定度 0.50%, 辐射计误差引入不确定度 1.12%。

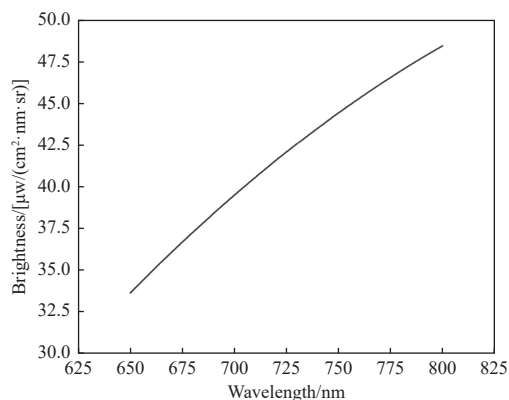


图4 标准辐亮度与波长的关系

Fig. 4 Relation between standard radiance and wavelength

如图5所示, 通过式(7)可以计算得到待测光谱仪的辐亮度响应度曲线。与图1对比可以明显看出, 待测光谱仪的曲线动态范围与直接测量的量级基本相同, 说明计算方式正确。使用太阳辐亮度高光谱响应度定标系统测试得到的结果较直接测量定标方法的动态范围更大, 达到了 16.9 dB, 提高了 2.8 倍。通过动态范围扩展, 降低了低信噪比相对误差, 从而降低了定标测试实验引入的不确定度, 可以满足测试要求。

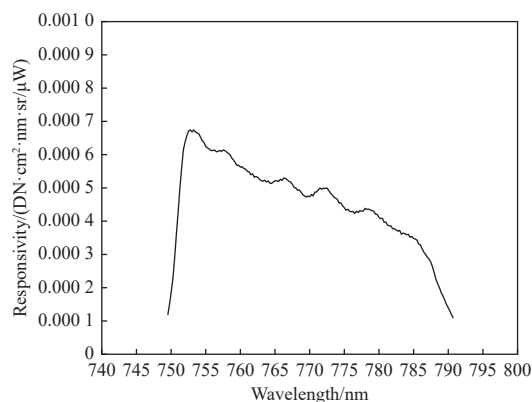


图5 计算得到的部分波段光谱响应函数

Fig. 5 Partial band spectral response function

3.2 不确定度分析

光谱响应度定标不确定度的来源主要包括: 标准辐照度石英卤钨灯辐射输出的不确定度、仪器读出误差、波长重复性、环境杂光影响、仪器非线性、积分球的辐亮度不确定度及滤光片测量不确定度^[15,16]。

为确定在 750 nm~790 nm 波长范围内响应度数据的准确性, 利用分光光度计进行滤光片透过率的测量。该过程会引入不确定度, 其中主要包括滤光片波长不确定度以及光度计的测量不确定

度,通过多次重复测量计算可得出测量不确定度为 1.50%。仪器自身的杂光不确定度通过软件分析获得,响应非线性以及重复性不确定度都可由重复实验获得,波长的重复性以及准确性主要通过光谱定标所引入的不确定度获得。辐亮度定标的不确定度主要来源于定标过程中的辐射传递过程和积分球本身^[17]。辐射传递过程中的不确定度主要来源于几何测量误差、传递光源以及标准辐射计的稳定性、漫反射板的不确定度^[18]。传递光源误差由中国计量院的定标检测报告给出,不确定度为 1.60%。积分球辐射源由辐射计传递得到,其中响应非线性引入的不确定度为 1.00%,辐射计传递链路信噪比引入的不确定度为 0.50%,辐射计误差引入的不确定度为 1.12%。积分球本身主要受半球反射比、照明非均匀性、杂散光、内部光源稳定性、积分球面均匀性和角度均匀性的影响,通过式(8)计算得到积分球出射辐亮度不确定度为 2.58%。

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^z u_i^2}, \quad (8)$$

式中: u_c 是合成不确定度; u_i 代表每个不确定度的取值; z 为不确定度影响因素总数。通过式(8)可以计算得到扩展不确定度为 4.60%。表 2 为不确定度计算表,其中 k 为包含因子。

表 2 不确定度计算表

Table 2 Uncertainty calculation

Component of uncertainty($k=2$)		Contributions/%
Uncertainty of radiance of integrating sphere	Diffuse reflection plate	1.50
	Transmit standard radiometer error	1.12
	Geometric error	0.50
	Integral sphere error	2.58
	Transfer light error	1.60
The instrument uncertainty	Instrumental repeatability	1.00
	Wavelength repeatability and accuracy	0.80
	Stray light	1.00
	Non-linearity	1.50
Filter measurement uncertainty	Accuracy of photometer measurement	1.50
	Accuracy of filter wavelength	1.00
Expanded uncertainty($k=2$)		4.60

4 结论

本文使用太阳辐亮度高光谱响应度定标系统

对太阳成像光谱仪的响应度定标方法进行了改进,通过该系统对待测成像光谱仪进行辐亮度响应度定标试验,得到待测成像光谱仪辐亮度响应度数据,实现了对太阳成像光谱仪响应度的精确测量。相比常规辐亮度响应度测试方法,降低了不确定度,提高了测量系统的精确度,获得了 2.8 倍的动态范围提升。并对分组件方法的辐亮度响应度定标试验的整体试验过程及计算方法进行了评估计算,得到了定标过程的扩展不确定度为 4.60%,满足太阳光谱仪辐亮度响应度定标的不确定度要求。

参考文献:

- [1] WOODS T N, HARDER J W, KOPP G, et al. Solar-cycle variability results from the solar radiation and climate experiment (SORCE) mission[J]. *Solar Physics*, 2022, 297(4): 43.
- [2] HALAIN J P, RENOTTE E, AUCHÈRE F, et al. The EUI flight instrument of solar orbiter: from optical alignment to end-to-end calibration[C]//SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Conference. Austin, United States: SPIE, 2018: 106990H.
- [3] TSUNETTA S, ICHIMOTO K, KATSUKAWA Y, et al. The solar optical telescope for the hinode mission: an overview[J]. *Solar Physics*, 2008, 249(2): 167-196.
- [4] YANG D J, FANG W, YE X, et al. Design and calibration of the solar irradiance monitor[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. Beijing, China: SPIE, 2011: 81960S.
- [5] WANG H R, WANG Y P, YE X, et al. Total solar irradiance monitors, space instruments for measuring total solar irradiance on FY-3 satellites[C]//Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III. Beijing, China: SPIE, 2014: 926404.
- [6] GAO P, HAN Z Y, BAI Z M, et al. Assessment and correction of radiometric calibration for the medium resolution spectral imager on FY-3C[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(8): 083105.
- [7] LI C, FANG C, LI Z, et al. Chinese H α solar explorer (CHASE)—a complementary space mission to the ASOS[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 112-116.
- [8] 雷宽. 风云三号黎明星太阳辐照度光谱仪对日定量观测与定标校准[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机

- 械与物理研究所, 2023.
- LEI Kuan. Quantitative observation and calibration of Fengyun-3 Li Star Solar Irradiance Spectrometer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2023.
- [9] 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 201-220.
- LI Lin. Modern optical design method[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2009: 201-220.
- [10] 邹曜璞, 冯绚, 韩昌佩, 等. 基于响应率修正的傅里叶变换光谱仪非线性校正算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2023, 42(3): 369-376.
- ZOU Yaopu, FENG Xuan, HAN Changpei, et al. Research on nonlinear correction algorithm of Fourier transform spectrometer based on responsivity correction[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, 42(3): 369-376.
- [11] ZHANG Q, ZHANG Y N, LI P, et al. Research on spectral calibration method of solar irradiance spectrometer based on fèry prism[C]//Ninth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. Hefei, China: SPIE, 2023: 1261777.
- [12] LIU Y X, BAUER A, VIARD T, et al. Freeform hyperspectral imager design in a CubeSat format[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 35915-35928.
- [13] 肖思, 付利平, 胡秀清, 等. 远紫外高光谱成像光谱仪的辐射定标技术[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 125-132.
- XIAO Si, FU Liping, HU Xiuqing, et al. Radiometric calibration technology based on far ultraviolet hyperspectral imaging instrument[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 125-132.
- [14] 王阳, 钮新华, 张锷, 等. FY-3B/VIRR 真空红外定标辐射响应度一致性校正[J]. 遥感学报, 2023, 27(10): 2295-2306.
- WANG Yang, NIU Xinhua, ZHANG E, et al. Uniformity correction of radiance responsivity in vacuum infrared calibration for FY-3B/VIRR[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(10): 2295-2306.
- [15] ALBERDING B G, WOODWARD J T, SHAW P S, et al. Pyroelectric detector-based method for low uncertainty spectral irradiance and radiance responsivity calibrations in the infrared using tunable lasers[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(11): 2957-2966.
- [16] SCHUSTER M, NEVAS S, SPERLING A. Validation of short-pulse-laser-based measurement setup for absolute spectral irradiance responsivity calibration[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(13): 2815-2821.
- [17] 黄思佳, 袁银麟, 翟文超, 等. 噪声等效光谱辐亮度定标系统的性能测评[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(12): 81-90.
- HUANG Sijia, YUAN Yinlin, ZHAI Wenchao, et al. Performance evaluation of noise equivalent spectral radiance calibration system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 81-90.
- [18] 冀春延, 赵敏杰, 周海金, 等. 紫外高光谱探测仪实验室辐照度定标研究[J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(3): 167-176.
- JI Chunyan, ZHAO Minjie, ZHOU Haijin, et al. Laboratory irradiance calibration of spaceborne ultraviolet hyperspectral atmospheric spectrometer[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(3): 167-176.