

月基双通道地球辐射能谱仪——太阳定标器定标方法研究

董瑞瑞^{1,2} 叶新¹ 邵益凯³ 朱平⁴ 罗志涛¹ 董航¹ 李曙琦¹ 刘衍峰^{1,2} 王钰玮¹ 宋宝奇¹ 郑裕隆¹ 吴铎^{1*}

1(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(上海卫星工程研究所 上海 201109)

4(深圳大学 深圳 518060)

摘要 嫦娥七号轨道器搭载的中法合作载荷——月基双通道地球辐射能谱仪, 通过 0.2~50 μm 和 5~50 μm 通道同步开展月基地球全盘辐射探测, 并利用双通道差分获取地球反射太阳辐射分量。仪器配备星上定标黑体, 用于实现地球自发热辐射谱段在轨定标, 地球反射太阳辐射谱段在轨定标则采用太阳定标器结合光学小孔的定标方案, 其中, 太阳定标器用于提供实时太阳辐射参考。本文介绍月基双通道地球辐射能谱仪的仪器概况与太阳定标器工作原理, 建立太阳定标器辐射功率响应度定标方法, 并开展发射前地面高精度定标实验。实验结果表明: 太阳定标器辐射功率响应度为 53561.316 $\text{DN}\cdot\text{W}^{-1}$, 相对不确定度优于 0.1%, 可为该仪器在轨高精度定标与稳定探测提供可靠地面数据支撑。

关键词 地球辐射收支, 辐射定标, 热敏电阻, 不确定度

中图分类号 P414.5; P422.2

Calibration Methodology for the Solar Calibrator of Moon-based Two-Channel Spectrometer

DONG Ruirui^{1,2} YE Xin¹ SHAO Yikai³ ZHU Ping⁴ LUO Zhitao¹
DONG Hang¹ LI Shuqi¹ LIU Yanfeng^{1,2} WANG Yuwei¹ SONG Baoqi¹
ZHENG Yulong¹ WU Duo¹

1 (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

2 (University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3 (Shanghai Satellite Engineering Institute, Shanghai 201109)

4 (Shenzhen University, Shenzhen 518060)

基金项目: 吉林省人才专项-中青年科技创新创业卓越人才(团队)项目(20240601033RC)

投稿日期: 2025-8-29

* E-mail: wuduo@ciomp.ac.cn

Abstract Accurate observations of the Earth radiation budget are essential for characterizing the energy state of the climate system and evaluating long-term variations in Earth's energy imbalance. However, conventional Earth radiation measurements from low-Earth-orbit satellites are affected by limitations in spatial and temporal sampling, which motivates the development of alternative observation platforms capable of providing long-term and stable measurements. The Moon-based Two-Channel Spectrometer (MTCS), a major international collaborative payload aboard the Chang'e-7 orbiter, is designed to perform Earth radiation budget observations from the lunar perspective. The MTCS simultaneously measures the full-disk Earth radiation using two broadband channels, including a total-wave channel covering 0.2–50 μm and a long-wave channel covering 5–50 μm . The reflected solar radiation component is obtained through the differential measurement between the two channels. The instrument is equipped with an onboard blackbody calibration source for the in-orbit calibration of the terrestrial thermal radiation spectrum. For the calibration of the reflected solar radiation spectrum, an innovative approach combining a solar calibrator and an optical pinhole is proposed. The optical pinhole attenuates the solar radiation to enable direct observation by the instrument, while the independent solar calibrator provides a real-time solar irradiance reference for improving the accuracy and long-term stability of shortwave calibration. This paper presents the instrument configuration and the operating principle of the solar calibrator. A radiometric power responsivity calibration method for the solar calibrator is established, and a high-precision pre-launch ground calibration experiment is conducted. The calibration procedure determines the relationship between incident radiation power and detector digital output, and the calibration uncertainty is quantitatively evaluated. Experimental results show that the radiometric power responsivity of the solar calibrator is $53561.316 \text{ DN}\cdot\text{W}^{-1}$, with a relative uncertainty better than 0.1%. The obtained calibration parameters provide reliable ground-based reference data for future in-orbit radiometric calibration and stable Earth radiation observations of the MTCS.

Key words Earth Radiation Budget, Radiation Calibration, Thermistor, Uncertainty

0 引言

近年来, 人类活动与自然过程的复杂耦合, 对地球气候稳定构成了严峻挑战^[1-5], 地球辐射能量收支不平衡日益凸显^[6, 7]。对地球辐射收支进行长期稳定地监测是评估全球气候变化趋势、改进气候模型、评价地球工程干预效果的关键科学手段^[2]。地球辐射包括大气层顶反射的太阳辐射和地球自身发射的热辐射。地球辐射测量数据质量直接取决于定标体系的准确性与稳定性。在轨期间, 空间辐射、热循环与污染/退化等环境作用会导致仪器光学组件、探测器和电子学部件发生响应度漂移与暗电流变化, 带来系统性误差, 随着时间的累积, 最终影响数据的科学观测结果的准确性与可靠性。因此, 构建高精度和长期稳定的在轨定标方法, 对于保障仪器在轨数据质量至关重要。

1984 年, 美国 NASA 与 NOAA 联合开展地球辐射收支实验 (Earth Radiation Budget

Experiment, ERBE), 并先后搭载于 ERBS、NOAA-9 和 NOAA-10 卫星进行地球辐射收支观测, 该任务采用多星协同观测方式, 其中扫描辐射计设置三个通道: 短波 ($0.2\text{--}5\mu\text{m}$)、长波 ($5\text{--}50\mu\text{m}$) 和总通道 ($0.2\text{--}50\mu\text{m}$), 为实现在轨辐射校准, 仪器配备黑体源、钨丝灯和太阳漫反射板, 黑体源用于长波辐射定标, 其温度溯源至国际温标 IPTS-68, 短波辐射通过钨灯与硅光电二极管组合定标, 并通过有源空腔辐射计 (Active Cavity Radiometer, ACR) 溯源至世界辐射基准 (WRR), 太阳漫反射板用于监测短波增益漂移^[8, 9]; CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) 是 NASA 延续 ERBE 计划的项目, 配备了内部黑体源、钨卤素灯和太阳漫射板等在轨定标装置, 其中, 黑体源温度溯源至国际温标 ITS-90; 钨卤素灯通过可调谐主动空腔辐射计 (Tunable Advanced Cavity Radiometer, TACR) 与短波参考源 (Shortwave Reference Source, SWRS) 间接溯源至美国国家标准与技术研究院 (NIST) 辐射标准; 太阳漫射板则用于监测短波通道的响应变化, CERES 为全球气候变化和辐射强迫研究提供了关键支持, 稳定运行超过 20 年^[10, 11]; 为了精确观测地球昼夜变化, 地球同步轨道辐射收支探测仪 (Geostationary Earth Radiation Budget, GERB) 是首个专用于地球辐射收支的地球静止轨道载荷, 在轨定标源包括黑体和太阳积分球, 黑体温度溯源至国际温标 ITS-90, 短波增益主要基于地面增益比定标结果, 其中地面积分球光源辐亮度溯源至英国国家物理实验室 (National Physical Laboratory, NPL) 的辐射标准; 太阳积分球则用于在轨监测并更新短波与总通道之间的增益比变化^[12-14]。2024 年, 宽带辐射计 (Broadband Radiometer, BBR) 作为 EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) 任务的关键载荷, 随 EarthCARE 卫星成功发射入轨, 旨在开展对地球辐射收支的高精度观测, 其在轨定标模块配置黑体源和太阳漫反射板, 温度溯源至国际温标 ITS-90, 短波增益依赖地面定标结果, 太阳漫反射板监测短波响应漂移^[15, 16]。上述载荷采用的在轨定标方案体现了当前宽带辐射计在轨定标的典型技术路径, 其中短波通道主要通过钨灯、太阳漫反射板或太阳积分球等定标装置监测并修正响应变化。然而, 长期在轨运行过程中, 钨灯的辐射输出可能发生漂移, 太阳漫反射板等定标组件的辐射特性也可能受太阳照射及空间环境影响发生退化, 从而影响短波定标的长期稳定性^[10, 16, 17]。

月基双通道地球辐射能谱仪是嫦娥七号任务中主要国际合作载荷之一, 旨在从月球视角实现地球全盘辐射长期稳定观测。针对地球反射太阳谱段长期在轨定标需求, 提出太阳定标器与光学小孔结合的在轨定标方法: 仪器通过光学小孔观测衰减后的太阳辐射, 同时, 利用独立的太阳定标器提供实时太阳辐照度, 从而有利于提高地球反射谱段在轨定标的准确性与长期稳定性。

本文介绍了嫦娥七号国际载荷——月基双通道地球辐射能谱仪的概况, 针对其地球反射谱段定标模块中的太阳定标器展开了详细描述, 系统阐述其意义与工作原理, 并对其实验室定标方法展开系统研究, 建立了基于激光光源与陷阱探测器的辐射功率定标方法, 完成太阳定标器地面辐射功率响应度定标与不确定度分析。

1 仪器概况

嫦娥七号月基双通道地球辐射能谱仪由法国凡尔赛大学牵头、长春光机所负责载荷研制, 深圳大学负责科学应用, 该载荷的主要优势在于依托稳定的月球轨道平台, 能够直接获取地球全盘辐射, 有效降低传统低轨扫描辐射计在全球辐射通量重建中时间插值和多源数据融合所引入的不确定性^[18]。同时, 月球轨道远离地球大气层与辐射带, 提供了相对稳定、低干扰的观测环境, 为长期连续的地球辐射测量奠定了可靠基础^[19]。该载荷整机结构如图 1 所示, 核心组成包括: $5\text{--}50\mu\text{m}$ 长波通道、 $0.2\text{--}50\mu\text{m}$ 全波通道、星上定标黑体、太阳定标器、光学小孔、对地观测相机 (星上定标黑体和光学小孔均位于仪器内部)。其中, 长波通道用于测量地球自发热辐射; 全波通道用于测量地球全谱段辐射, 并通过两通道的测量结果进行差分

反演短波辐射分量。星上定标黑体用于实现地球自发热辐射谱段的在轨辐射定标，黑体温度由中国计量科学研究院标定；太阳定标器与光学小孔共同构成地球反射谱段定标模块，仪器通过光学小孔观测衰减后的太阳辐射，太阳定标器提供实时太阳辐照度值；对地观测相机是对地跟踪系统中的光学成像单元，负责系统对地跟踪反馈，并提供地球场景信息与相位信息。上述组件共同构建月基地球辐射探测系统。

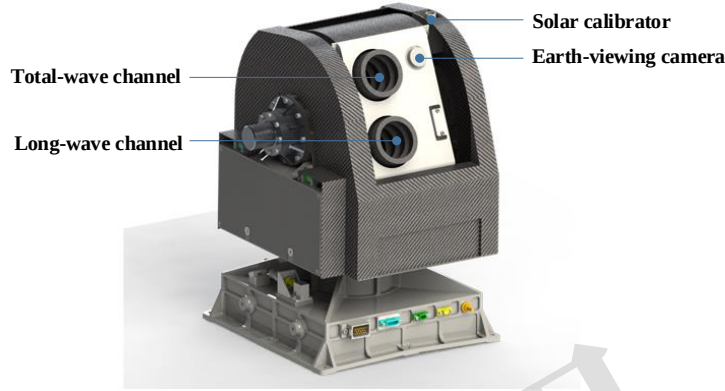


图 1 月基双通道地球辐射能谱仪整机结构示意图

Figure 1 Overall structural schematic of the Moon-based Two-Channel Spectrometer

2 太阳定标器

太阳通常被视为相对稳定的外部辐射源，用于在轨监测短波通道的响应度漂移^[8-11]。然而，太阳光谱辐照度并非恒定，其紫外波段 ($\lambda < 300 \text{ nm}$) 的辐照度在太阳活动高峰期间变化尤为显著，波动幅度最高可达 50%^[20]。太阳总辐照度则受太阳活动周期调控^[21-23]，齐瑾等^[24]的研究表明，2014 年 10 月 16 日至 23 日受太阳黑子活动影响，SIM-II 与 TIM 仪器分别监测到 TSI 下降 2.94 W/m^2 和 2.98 W/m^2 。Dasi-Espuig^[25]认为，在 27 天太阳自转和 11 年周期尺度上，TSI 相对变化分别高达 0.3%^[26]和 0.1%^[27, 28]。此外，在轨太阳定标所获取的信号受观测方位影响，因此，考虑到 TSI 动态变化与观测方位变化，以及月基双通道地球辐射能谱仪的在轨高精度测量要求，将太阳定标器作为地球反射谱段定标核心组件，通过实时提供观测平台的太阳辐照度参考值，提升地球反射谱段定标精度。同时，太阳定标器发射前在地面开展实验室定标，建立辐射响应模型；在轨运行阶段，通过与国际空间站搭载的“太阳总辐照度与光谱辐照度传感器” (TSIS-1) 开展交叉定标，动态监测并修正自身响应度漂移引入的系统误差，确保地球反射谱段定标的长期稳定性与定标精度。

太阳定标器是基于热辐射和热传导原理测量入射辐射能量。图 2 展示了太阳定标器探测器的结构示意图，主要由接收面、热连接杆和热沉三部分组成。太阳光不经过任何光学系统直接进入涂有高吸收率黑漆的接收面（不同波长下 $\alpha > 0.9$ ，具有波长一致性），用于高效吸收入射辐射；热连接杆采用高导热无氧铜，负责将热量从接收面传导至热沉。接收面与热连接杆一体化设计，通过钛合金螺钉与热沉刚性连接，热沉则通过隔热垫片固定在机壳基板上，以抑制外部热干扰。温度监测系统包括两个热敏电阻：TR₁ 位于接收面中心，用于测量辐射引起的温升；TR₂ 安装在热连接杆与热沉连接处，用于监测热沉温度，当接收面吸收辐射并转化为热能后，热量沿热连接杆传导至热沉，形成稳定的温度梯度，通过热敏电阻的温度特性，将温度变化转换为数字信号输出^[29]。

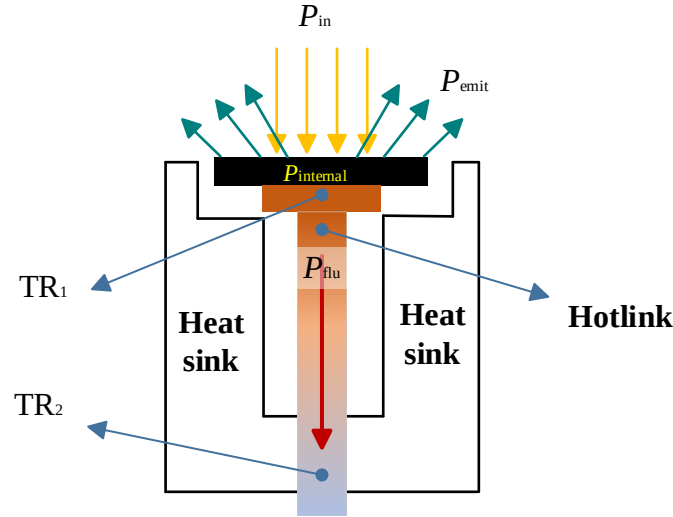


图 2 太阳定标器探测器结构示意图

Figure 2 Structural schematic of the solar calibrator detector

注：TR₁：接受面处的热敏电阻；TR₂：热沉处的热敏电阻

根据图 2 所示的探测器结构示意图可知，入射功率 P_{in} 达到探测器接收面后转化成三部分量，分别是探测器吸收能量后向外辐射的功率 P_{emit} ，探测器内能功率 $P_{internal}$ 以及热连接杆热传导功率 P_{flu} ，根据能量守恒定律建立热平衡方程，如公式(1)所示：

$$P_{in} = P_{internal} + P_{emit} + P_{flu} \quad (1)$$

根据斯特藩-玻尔兹曼定律和傅里叶传热定律有：

$$P_{in} = A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 + G_{rod}(T_1 - T_2) + Cm_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (2)$$

式中， A_1 是探测面面积， ε_1 是探测器黑漆吸收面的发射率， σ 是斯特藩-玻尔兹曼常数， T_1 是热敏电阻探测器 TR₁ 测得的接收面温度， G_{rod} 是热连接杆的热导， T_2 是热敏电阻 TR₂ 测得的探测器热沉温度， C 是探测器的热容， m_1 是探测器质量， $\partial T_1 / \partial t$ 是接收面温度的变化。

当系统处于热平衡状态时，接收面温度达到稳态， $\partial T_1 / \partial t$ 为 0，此时探测器接收面温度与入射功率呈正比例关系。对于热敏电阻型辐射计，其电阻温度变化可通过前置放大电路和模数转换器输出为数字信号 (Digital Number, DN)，通过标定输出 DN 值与入射能量之间的辐射响应关系即可将其应用于在轨太阳辐射定量测量。

3 辐射功率定标

3.1 定标方法研究

根据 2 节所述，太阳定标器属于热敏电阻型辐射计，其敏感元件在吸收太阳辐射后温度升高，引起热敏电阻阻值发生相应变化。需要注意的是，该电阻变化量与入射辐射功率之间的关系并非固有的固定对应关系，而是受到材料特性、结构以及环境条件等多种因素的影响。因此，为建立辐射功率与电信号输出之间的准确量化关系，需要采用辐射能量已知的光源对仪器进行标定。如公式 (3) 所示，通过将扣除暗背景的码值变化量除以入射光功率，即可获得太阳定标器的辐射功率响应度。

$$R = \frac{DN_{signal} - DN_{background}}{P_{in}} \quad (3)$$

式中 R 表示辐射功率响应度 (单位: $\text{DN} \cdot \text{W}^{-1}$) , P_{in} 表示入射功率 (单位: W) , DN_{signal} 表示入射功率 P_{in} 下的太阳定标器输出码值 (单位: DN) , $DN_{\text{background}}$ 表示暗背景下的太阳定标器输出码值 (单位: DN) 。

地面定标获取辐射功率响应度 R , 为在轨太阳辐照度反演提供了定量基准。在轨工作时, 太阳定标器通过观测太阳与深空, 获取输出码值变化量 ΔDN 。结合地面标定系数 R 即可反演得到探测器接收面处的入射辐射功率 P_{in} ; 进一步结合定标器有效受光面积 A 与在轨实时太阳入射角 θ , 对接收功率进行面积与入射角度修正, 最终解算得到入射的太阳辐照度 E_{solar} , 对应的在轨反演计算公式如式 (4) 所示:

$$E_{\text{solar}} = \frac{E_{\text{detector}}}{\cos \theta} = \frac{P_{\text{in}}}{A \cos \theta} = \frac{\Delta DN}{AR \cos \theta} = \frac{DN_{\text{signal}} - DN_{\text{background}}}{AR \cos \theta} \quad (4)$$

式中: E_{solar} 为在轨待测太阳辐照度; E_{detector} 为定标器接收面处辐照度; A 为太阳定标器有效受光面积; θ 为在轨太阳入射光线与定标器接收面法线的夹角。

太阳定标器辐射功率定标实验示意图如图 3 所示: 通过分束镜将入射激光光束分为两路, 一路为信号光, 入射至太阳定标器, 用于采集探测响应信号; 另一路为参考光, 入射至经中国计量科学研究院标定的陷阱探测器, 为实验提供高精度实时功率基准。其中, 分束镜的分束比是关联参考光与信号光功率的核心参数, 需精准标定, 以建立信号光与参考光的定量关联, 实时监测入射功率。基于此, 太阳定标器辐射功率定标实验流程如下: (1) 分束比标定实验: 利用分束镜对入射激光进行分光, 分别通过陷阱探测器精准测得信号光与参考光的功率值, 经多组重复测量与数据统计, 完成分束比的精确标定; (2) 辐射功率响应度定标实验: 梯度调节入射激光的输出功率, 结合已标定的分束比与陷阱探测器实时实测功率值, 解算得到太阳定标器的入射功率值, 同步记录不同功率下太阳定标器的输出码值, 计算太阳定标器辐射功率响应度。

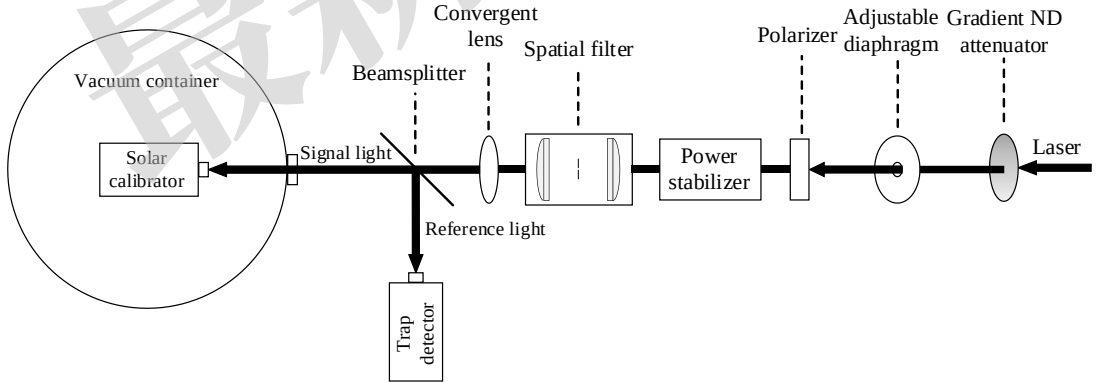


图 3 太阳定标器辐射功率定标实验示意图

Figure 3 Schematic of radiant power calibration experiment for solar calibrator

3.2 定标实验

(1) 分束比测量

分束比通过陷阱探测器在信号光与参考光路径上交替测量获得。测量过程中, 需确保陷阱探测器在各次测量时均与入射光线保持垂直。分束比 β 按公式 (5) 计算:

$$\beta = \frac{V_{\text{signal}} - V_{\text{signal-background}}}{V_{\text{reference}} - V_{\text{reference-background}}} \quad (5)$$

其中, V_{signal} 表示信号光路信号, $V_{\text{signal-background}}$ 表示信号光路背景信号, $V_{\text{reference}}$ 参考光路信

号, $V_{\text{reference-background}}$ 表示参考光路信号背景信号。分束比测量结果如表 1 所示, 多次测量相对标准差为 0.01%。

表 1 分束比测量结果

Table 1 Measurement results of beam-splitting ratio

测量序号	分束比 β
1	18.4604
2	18.4592
3	18.4617
4	18.4612
5	18.4616
6	18.4572
7	18.4626
均值	18.4606
标准差	0.0018
相对标准差	0.01%

(2) 辐射功率定标

辐射功率响应度定标实验装置如图 4 所示, 太阳定标器位于真空罐内, 陷阱探测器置于参考光路中。通过梯度调节激光输出功率, 记录不同入射功率下的太阳定标器输出码值与陷阱探测器标定的功率数据, 并结合预先标定的分束比参数, 基于公式 (3) 计算太阳定标器响应度, 太阳定标器多个激光功率点下定标的响应度结果如表 2 所示, 辐射功率响应度为 $53561.3160 \text{ DN} \cdot \text{W}^{-1}$, 相对标准差为 0.0774%, 表明多功率点下太阳定标器具有良好的响应一致性。

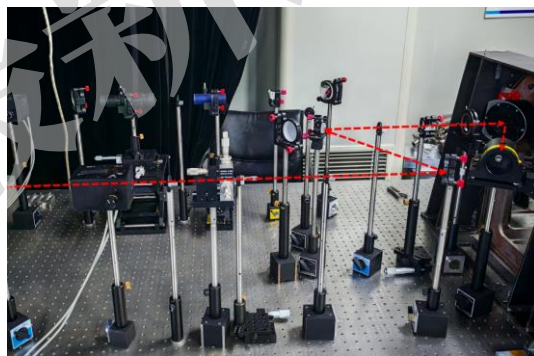


图 4 辐射功率响应度定标实验装置

Figure 4 Radiation power responsivity calibration experimental device

表 2 太阳定标器响应度定标结果

Table 2 Responsivity calibration results of solar calibrator

功率点	入射激光功率 $\bar{P}/\text{mW}$	响应度 $R/\text{DN} \cdot \text{W}^{-1}$
1	7.7080	53526.5924
2	8.5235	53584.2826
3	6.1208	53598.7817
4	7.3247	53566.7563
5	6.8302	53586.5662
6	5.6435	53541.6967
7	4.9452	53574.7865

8	4.2354	53572.7908
9	3.5326	53455.0170
10	2.8154	53597.6551
11	2.2183	53569.5504
均值	/	53561.3160
标准差	/	41.4607
相对标准差	/	0.0774%

(3) 不确定度评估

辐射功率响应度不确定度分量主要包括不同功率点之间响应度一致性引入的不确定度、单功率点测量重复性引入的不确定度以及分束比测量重复性引入的不确定度。

对于不同功率点间响应度一致性引入的不确定度 u_1 可以表示为

$$u_1 = \frac{RSD_R}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

式中, RSD_R 表示不同功率点间响应度的相对标准差, N 表示功率点数。

对于单功率点下测量重复性引入的不确定度 u_2 , 包括多次测量中激光功率的重复性和太阳定标器输出码值的重复性, 如表 3 所示。 u_2 可以表示为

$$u_2 = \frac{1}{NR} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[R_i \sqrt{\left(\frac{RSD_{\Delta DN,i}}{\sqrt{m_i}} \right)^2 + \left(\frac{RSD_{P,i}}{\sqrt{n_i}} \right)^2} \right]^2} \quad (7)$$

式中, m_i 表示第 i 功率点下的太阳定标器输出码值测量次数, n_i 表示第 i 功率点下的激光功率测量次数, $RSD_{\Delta DN,i}$ 表示第 i 个功率点下多次测量中太阳定标器输出码值的相对标准差, $RSD_{P,i}$ 表示第 i 个功率点下多次测量中激光功率的相对标准差。

表 3 单功率点下入射激光功率和净输出 DN 值的重复性

Table 3 Repeatability of incident laser power and net output DN at single power point

功率点	$\bar{P}_i / \text{mW}$	$RSD_{P,i} / \%$	$RSD_{\Delta DN,i} / \%$
1	7.7080	0.0060	0.5154
2	8.5235	0.0070	0.4245
3	6.1208	0.0049	0.4249
4	7.3247	0.0073	0.4056
5	6.8302	0.0083	0.4624
6	5.6435	0.0066	0.2259
7	4.9452	0.0149	0.2972
8	4.2354	0.0061	0.4048
9	3.5326	0.0067	0.2805
10	2.8154	0.0104	0.3850
11	2.2183	0.0060	0.1872

对于分束比测量引入的不确定度 u_3 可以表示为

$$u_3 = \frac{RSD_{\beta}}{\sqrt{n_{\beta}}} \quad (8)$$

式中 RSD_{β} 表示分束比多次测量的相对标准差, n_{β} 表示分束比测量次数。

最终，辐射功率响应度的合成不确定度 u_c 可以表示为

$$u_c(\bar{R}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.0476\% \quad (9)$$

4 总结与展望

本文聚焦于月基双通道地球辐射能谱仪地球反射谱段定标模块中的太阳定标器，针对其发射前地面定标方法展开研究，提出了基于激光光源与陷阱探测器的辐射功率定标方法，并完成太阳定标器实验室辐射功率响应度定标与不确定度分析。实验结果表明，太阳定标器辐射功率响应度为 $53561.3160 \text{ DN} \cdot \text{W}^{-1}$ ，综合考虑多功率点下响应度一致性偏差、单功率点下测量重复性误差以及分束比测量重复性误差等多项误差分量，经合成计算可得，本文所得太阳定标器辐射功率响应度的相对不确定度优于 0.1%，可为后续月基地球辐射观测数据的精准校正与定量应用提供可靠的定标支撑。

参考文献：

- [1] TRENBERTH K E, FASULLO J T, BALMASEDA M A. Earth's energy imbalance[J]. *Journal of Climate*, 2014, **27**(9): 3129-3144
- [2] VON SCHUCKMANN K, PALMER M D, TRENBERTH K E, *et al.* An imperative to monitor Earth's energy imbalance[J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**(2): 138-144
- [3] DEWITTE S, CLERBAUX N, CORNELIS J. Decadal changes of the reflected solar radiation and the Earth energy imbalance[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(6): 663
- [4] JONES R N, RICKETTS J H. Regime change in top of the atmosphere radiation fluxes: implications for understanding Earth's energy imbalance[J]. *Climate*, 2025, **13**(6): 107
- [5] SANTER B D, BONFILS C, PAINTER J F, *et al.* Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature[J]. *Nature Geoscience*, 2014, **7**(3): 185-189
- [6] LOEB N G, HAM S H, ALLAN R P, *et al.* Observational assessment of changes in Earth's energy imbalance since 2000[J]. *Surveya in Geophysics*, 2024, **45**(6): 1757-1783
- [7] STEPHENS G L, L'ECUYER T. The Earth's energy balance[J]. *Atmospheric Research*, 2015, **166**: 195-203
- [8] FALBEL G, LANNARELLI A. Radiometric calibration for the Earth Radiation Budget Experiment instruments[C]//*Proceedings Volume 0308, Contemporary Infrared Standards and Calibration*. San Diego: SPIE, 1982
- [9] LEE III R B, BARKSTROM B R. Characterization of the Earth Radiation Budget Experiment radiometers[J]. *Metrologia*, 1991, **28**(3): 183-187
- [10] WILSON R S, PRIESTLEY K J, THOMAS S, *et al.* On-orbit solar calibration methods using the Clouds and Earth's Radiant Energy System (CERES) in-flight calibration system: lessons learned[C]//*Proceedings Volume 8866, Earth Observing Systems XVIII*. San Diego: SPIE, 2013
- [11] LEE III R B, BARKSTROM B R, SMITH G L, *et al.* The Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) sensors and preflight calibration plans[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, **13**(2): 300-313
- [12] MOSSAVATI R, KELLOCK S, MUELLER J, *et al.* Geostationary Earth Radiation Budget[C]//*Proceedings Volume 3220, Satellite Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere II*. London: SPIE, 1997: 125-135
- [13] MUELLER J. Geostationary Earth Radiation Budget (GERB) instrument calibration plans[J]. *Advances in Space Research*, 1997, **19**(9): 1307-1316
- [14] MOSSAVATI R, HARRIES J E, KELLOCK S, *et al.* Radiometric calibration of the GERB instrument[J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 603-607
- [15] EISINGER M, MARNAS F, WALLACE K, *et al.* The EarthCARE mission: science data processing chain overview[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, **17**(2): 839-862

- [16] CALDWELL M E, SPILLING D A V, DELDERFIELD J, *et al.* Radiometric characteristics of the broadband radiometer (BBR) instrument for the EarthCARE mission[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, **34**(8): 1783-1794
- [17] MATTHEWS G. Direct solar viewing calibration concept for future CERES-, GERB-, or Libera-type Earth orbital climate missions[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2022, **39**(7): 1085-1091
- [18] DOELLING D R, LOEB N G, KEYES D F, *et al.* Geostationary enhanced temporal interpolation for CERES flux products[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, **30**(6): 1072-1090
- [19] LI S Q, LUO Z T, LIU Y F, *et al.* Design and analysis of a moon-based Earth-radiation measurement system[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(18): 3540
- [20] ROTTMAN G. The SORCE mission[J]. *Solar Physics*, 2005, **230**(1/2): 7-25
- [21] CODDINGTON O, LEAN J, PILEWSKIE P, *et al.* Solar irradiance variability: comparisons of models and measurements[J]. *Earth and Space Science*, 2019, **6**(12): 2525-2555
- [22] KOPP G. Magnitudes and timescales of total solar irradiance variability[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2016, **6**: A30
- [23] ERMOLLI I, MATTHES K, DUDOK DE WIT T, *et al.* Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(8): 3945-3977
- [24] QI Jin, ZHANG Peng, QIU Hong, *et al.* Analysis of total solar irradiance observed by FY-3C Solar Irradiance Monitor-II[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(25): 2447-2454 (齐瑾, 张鹏, 邱红, 等. 风云三号 C 星太阳总辐照度观测结果分析[J]. 科学通报, 2015, **60**(25): 2447-2454)
- [25] DASI-ESPUIG M, JIANG J, KRIVOVA N A, *et al.* Reconstruction of spectral solar irradiance since 1700 from simulated magnetograms[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, **590**: A63
- [26] LEAN J L, ROTTMAN G J, KYLE H L, *et al.* Detection and parameterization of variations in solar mid- and near-ultraviolet radiation (200-400 nm)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D25): 29939-29956
- [27] YEO K L, KRIVOVA N A, SOLANKI S K. Solar cycle variation in solar irradiance[J]. *Space Science Reviews*, 2014, **186**(1/2/3/4): 137-167
- [28] SOLANKI S K, FLIGGE M. Solar irradiance variations and climate[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(5/6): 677-685
- [29] WU D, FANG W, WANG K, *et al.* Spaceborne relative radiometer: instrument design and pre-flight test[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(12): 3085

作者简介

第一作者:

董瑞瑞, 女, 1997 年 1 月出生于安徽省亳州市, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士, 主要研究方向为辐射定标, 地球辐射收支探测等。

通讯作者:

吴铎, 男, 1992 年生于吉林省长春市, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员, 主要研究方向为地球辐射收支探测、空间遥感量化探测与辐射定标等。