

基于陷阱探测器的辐亮度探测器定标方法研究

邹 鹏 郑小兵 吴浩宇 李健军 刘恩超 洪 津 熊 伟

(中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 辐亮度探测器由陷阱探测器、滤光片和精密光阑等构成, 其辐亮度响应度可溯源于低温绝对辐射计。通过精确测量陷阱探测器绝对光谱响应度、滤光片光谱透射率、精密放大电路增益、光阑尺寸及间距等参数获取了辐亮度探测器的绝对光谱辐亮度响应度, 并对其进行了整机性能测试, 评估了绝对光谱辐亮度定标过程中的不确定度, 定标联合标准不确定度优于 1.26% (置信概率系数 $k=1$), 满足光学遥感器高精度定标应用需求。

关键词 测量; 定标; 辐亮度; 低温辐射计; 陷阱探测器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0712002

Research on Calibration of Radiance Detector Based on Trap Detector

Zou Peng Zheng Xiaobing Wu Haoyu Li Jianjun Liu Enchao

Hong Jin Xiong Wei

(Key Laboratory of Optics Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Radiance detector (RD) is composed of trap detector, interference filter and precision stops. Its radiance responsivity can be traced from the cryogenic absolute radiometer. The absolute spectral responsivity of RD is obtained by measuring absolute responsivity of trap detector, spectral transmittance of filter, gain of trans-impedance amplifier, diameters of field stop and aperture stop and the distance between them, accurately. The overall performance is measured and the uncertainties are evaluated in detail. The combined standard uncertainty in the absolute spectral radiance responsivity calibration is less than 1.26% (confidence probability coefficient $k=1$), which can meet the high-precision calibration requirement of remote sensors.

Key words measurement; calibration; radiance; cryogenic radiometer; trap detector

OCIS codes 120.0280; 120.3940; 120.5630; 120.3930

1 引 言

低温绝对辐射计的发展使辐射计量精度达到了一个全新的水平, 在 $0.25 \sim 50 \mu\text{m}$ 范围内辐射功率测量不确定度可达到 10^{-4} 量级^[1]。陷阱探测器因其性能稳定、结构紧凑和易维护等优点, 成为标准传递探测器的极好选择^[2]。通过建立相应的辐射定标装置可以将低温绝对辐射计的高精度功率基准传递到陷阱探测器, 即获得陷阱探测器的绝对光谱响应度, 在此基础上发展辐照度、辐亮度探测器, 可以将

辐射量值传递到次级标准直至光学遥感器, 从而实现光学遥感器的量值溯源^[3]。

辐亮度探测器是为实现“低温绝对辐射计→陷阱探测器→辐亮度探测器→光学遥感器”这一标准传递链而研制的, 它主要由陷阱探测器、干涉滤光片、精密光阑等部件组成, 可以实现光学遥感器高精度光谱辐亮度量值溯源。该传递链直接溯源于低温绝对辐射计, 具有更高的物理量值精度。

目前许多国家和国际标准化研究机构正致力于

收稿日期: 2013-01-18; 收到修改稿日期: 2013-03-12

基金项目: 国家 973 计划(2010CB950801)

作者简介: 邹 鹏(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光电探测与信号处理等方面的研究。E-mail: pzou@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学遥感器的高精度定标等方面的研究。E-mail: xbzhen@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

基于探测器的标准传递研究工作^[4-9],并研制了满足不同遥感器应用需求的辐亮度探测器,以提高辐亮度标准传递精度。如美国国家标准技术研究所(NIST)所研制的多波段绝对辐亮度探测器SXR,不确定度为0.6%~1.3%,满足了星载遥感器SeaWiFs的高精度定标需求^[10]。

在国内,中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了三片反射式硅光电二极管陷阱探测器作为光谱响应传递标准,并开展了一系列光谱响应度定标及标准传递方面的研究工作^[11-13]。以陷阱探测器为核心,辅以滤光片、精密光阑等部件研制了多波段辐亮度探测器(以下简称辐亮度探测器)^[14],用于辐亮度测量及辐亮度标准的传递。为实现其应用目标,需要对辐亮度探测器进行绝对光谱辐亮度响应度定标及性能测试。

本文介绍了辐亮度探测器的工作原理及构成,对辐亮度响应度定标过程中各物理量的测量装置和测量过程进行了详细说明。通过各部件的定标结果,获得了辐亮度探测器的绝对光谱响应度曲线,并对定标过程不确定度进行了评估。

2 基本原理

2.1 辐亮度探测器简介

辐亮度探测器结构如图1所示,入射光束依次经过视场光阑、孔径光阑、窄带干涉滤光片后,被陷阱探测器接收并转换为光电流信号,由微电流测量电路进行采集。辐亮度探测器(RD)共有8个测量通道,工作波段可根据使用需求选择,这里讨论的辐亮度探测器工作波段为400~1000 nm。

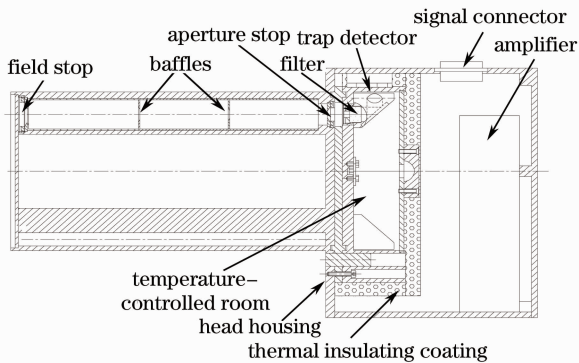


图1 辐亮度探测器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of RD

辐亮度探测器设计视场角为 2.86° ,视场光阑和孔径光阑采用膨胀系数较小的铍铜加工,直径分别为10 mm和2.8 mm,光阑间距为200 mm。为减

少杂散光的影响,在视场光阑和孔径光阑之间加入了杂散光抑制光阑。滤光片选用窄带干涉滤光片,带宽为10 nm。微电流测量电路由高灵敏度、低噪声的*I-V*放大电路实现,其增益最高可达到 10^9 量级,放大器输出的电压信号经高分辨率的模数转换器实现数据量化。为满足高灵敏度的应用,需要对探测器及滤光片进行温控,设计了由半导体制冷器及数字温度传感器构成的闭环温控系统,将温度控制在 $(23 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 范围内。

2.2 辐亮度测量原理

辐亮度探测器的测量光路如图2所示。图中, a 为孔径光阑半径, c 为视场光阑半径, H 为孔径光阑和视场光阑的间距, θ 为视场角。

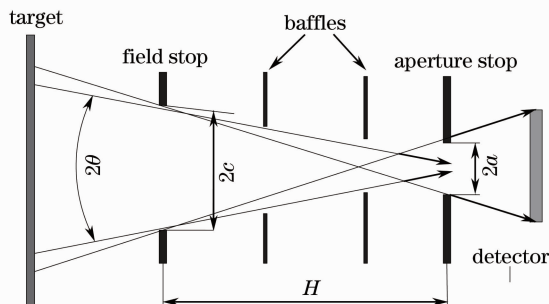


图2 辐亮度探测器的光路示意图

Fig. 2 Schematic figure of beam path of RD

辐亮度可以表示为^[15]

$$L = \frac{V}{\pi^2 (\tan^2 \theta) a^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) R(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中 L 为辐亮度值, V 为辐亮度探测器的输出电压, $T(\lambda)$ 为滤光片透射率, $R(\lambda)$ 为陷阱探测器绝对光功率响应度。

根据图2所示的几何关系,将 $\tan \theta = c/H$ 代入(1)式,得到绝对辐亮度响应度 R_L 为

$$R_L = \frac{V}{L} = \frac{\pi^2 c^2 a^2 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{H^2}. \quad (2)$$

3 辐亮度响应度定标方法及过程

由(2)式可以看出,在精确测量滤光片光谱透射率、陷阱探测器绝对光谱响应度、视场光阑半径、孔径光阑半径、光阑间距以及电子学增益系数后即可获得绝对光谱辐亮度响应度^[15]。下面对各分量的测量方法及测量过程进行介绍,对影响测量结果的不确定度因素进行评估。

3.1 滤光片光谱透射率测量

采用一套基于单色仪的宽光谱比较系统对滤光片光谱透射率进行测试,测量装置如图3所示。该系统以卤钨灯作为光源,经单色仪色散后,出射光束经离轴抛物镜准直通过样本轮,样本轮上安装被测

滤光片并保留一个通孔,步进电机控制样本轮转动,用单片硅光电探测器测量入射和透射光通量,由此得到滤光片的光谱透射率,扫描波长在滤光片标称中心波长的±15 nm范围以内,扫描步长为1 nm。

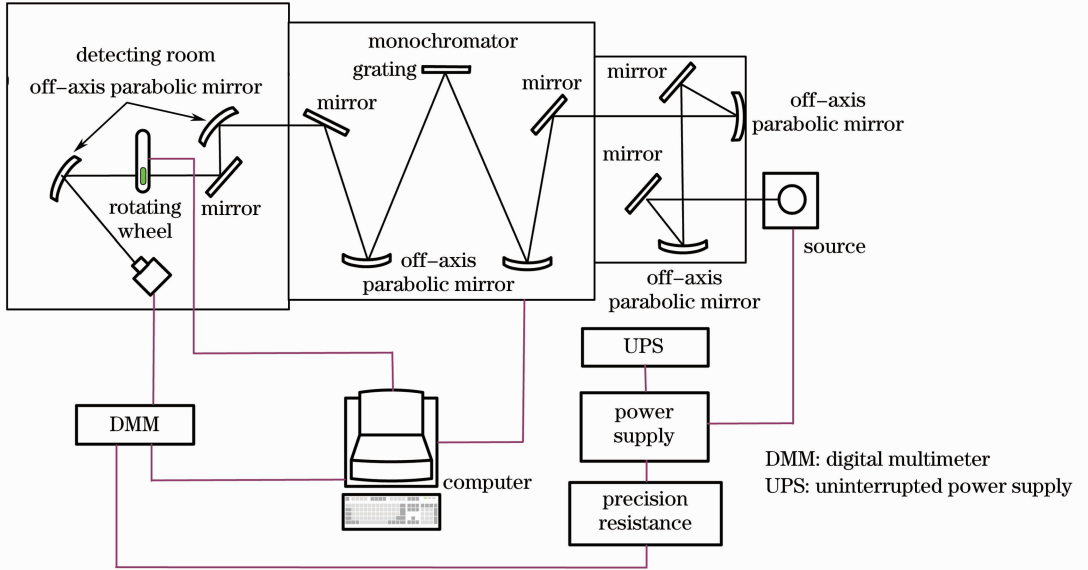


图3 滤光片光谱透射率测量装置示意图

Fig. 3 Layout of spectral transmittance measurement system

按照上述方法对8个通道所使用的滤光片进行了测量,图4为滤光片透射率测量结果,中心波长从左到右依次为510、550、620、672、753、865、900、1030 nm。按照文献[16]所述的方法对滤光片光谱透射率不确定度进行了评估,测量不确定度低于0.527%。

光谱响应度,最终以单波长绝对光谱响应度与归一化的相对光谱响应度相乘,得到探测器的绝对光谱响应度:

$$R(\lambda) = K(\lambda) \cdot R_{\Phi}(\lambda_0), \quad (3)$$

式中 $R(\lambda)$ 为陷阱探测器绝对光谱响应度, $K(\lambda)$ 为相对光谱响应度归一化系数, $R_{\Phi}(\lambda_0)$ 为探测器单波长 λ_0 处的绝对光谱响应度。

陷阱探测器单波长绝对光功率响应度定标装置如图5所示。使用一个直接溯源于低温辐射计的陷阱探测器作为参考探测器,其绝对光功率响应度为 $R_{A\Phi}(\lambda)$ 。单波长激光光束经起偏、功率稳定和空间滤波后,先后进入参考探测器和待测探测器,获得输出电压分别为 $V_A(\lambda_0)$ 和 $V(\lambda_0)$,待测探测器的单波长点处绝对光谱响应度 $R_{\Phi}(\lambda_0)$ 可表示为

$$R_{\Phi}(\lambda_0) = V(\lambda_0) \cdot R_{A\Phi}(\lambda_0) / V_A(\lambda_0). \quad (4)$$

对应于不同通道的陷阱探测器,选择尽可能接近该通道滤光片中心波长的单色激光光源进行绝对光功率响应度的定标。

陷阱探测器相对光谱响应度使用图3所示的宽光谱比较系统进行测试^[16],以1 nm为间隔测量了各探测器400~1100 nm范围内的相对光谱响应度 $R_r(\lambda)$ 。相对于 λ_0 波长处相对光谱响应度的归一化

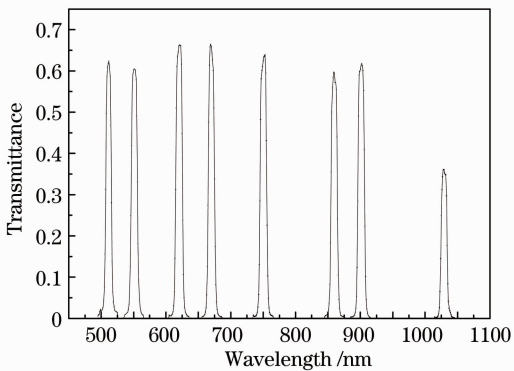


图4 滤光片光谱透射率

Fig. 4 Spectral transmittance of interference filters

3.2 陷阱探测器绝对光谱响应度定标

陷阱探测器的绝对光功率响应度定标分两步进行。首先使用激光器进行陷阱单波长绝对光功率响应度的定标,然后利用宽光谱测量系统测量其相对

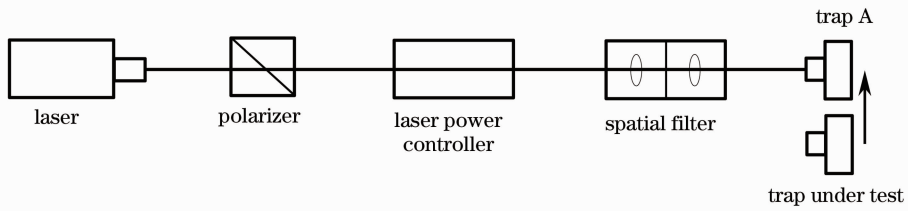


图 5 绝对光功率响应度定标示意图

Fig. 5 Layout of absolute spectral power responsivity calibration system

系数 $K(\lambda)$ 可表示为

$$K(\lambda) = R_r(\lambda)/R_r(\lambda_0). \quad (5)$$

通过上述方法获得 8 个陷阱探测器绝对光功率响应度曲线,测量结果如图 6 所示。

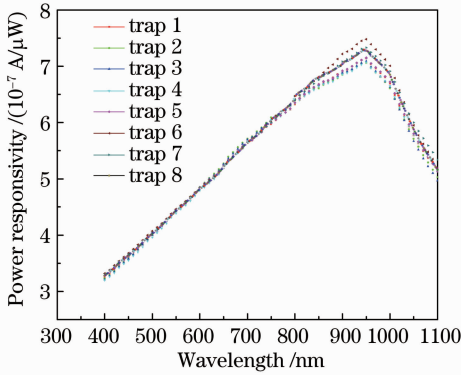


图 6 陷阱探测器绝对光功率响应度

Fig. 6 Absolute spectral power responsivity curves of trap detectors

依据文献[12,16]所述的方法对上述定标过程进行不确定度评估,陷阱探测器单波长绝对光功率定标不确定度低于 0.146%、相对光谱响应度定标不确定度低于 0.487%。

3.3 孔径光阑、视场光阑直径及其间距测量

辐亮度探测器孔径光阑、视场光阑及其间距采用非接触的光学测量方法,由万能工具显微镜测量完成。该仪器测量的绝对精度优于 0.003 mm,标尺分辨率小于 0.001 mm。测量过程中以约 45° 的间隔测量小孔多个方位的直径,取其均值作为该小孔的直径。

测量不确定度包括测量重复性引起的不确定度以及仪器误差带来的不确定度。结果表明,视场光阑测量不确定度低于 0.041%,孔径光阑测量不确定度低于 0.370%,间距测量不确定度低于 0.027%。

3.4 电子学增益系数定标

为采集辐亮度探测器输出的微弱光电流信号,研制了高增益、低噪声的微电流测量电路。使用 Keithly 公司生产的数字源表作为标准电流源对微

电流测量电路增益进行定标,依次输入 1~800 nA 的标准电流信号至微电流测量电路,以测得值与输入标准电流的相对偏差作为微电流测量电路的不确定度评估结果。电流测量不确定度低于 0.189%。

3.5 绝对光谱辐亮度响应度

将上述测量结果代入(2)式得到辐亮度探测器绝对光谱辐亮度响应度曲线,结果如图 7 所示。将各通道辐亮度响应度曲线在滤光片通道带宽内积分值作为对应通道的绝对光谱辐亮度响应度。

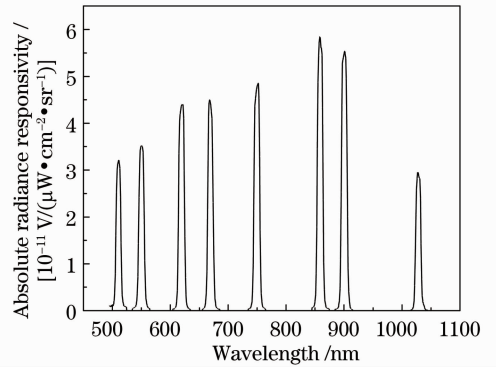


图 7 辐亮度探测器绝对光谱辐亮度响应度曲线

Fig. 7 Absolute spectral radiance responsivity curve of RD

4 辐亮度探测器整体性能测试

辐亮度响应度定标不确定度还包括辐亮度探测器非稳定性、非线性及杂散光带来的影响,以下对这几项参数的测量方法及过程进行详细介绍。

4.1 响应度的非稳定性

在辐亮度测量或标准传递过程中,辐亮度探测器的输出会随时间漂移,为此需要评价其非稳定性。测量时使用辐亮度探测器对准积分球辐射源进行观测,积分球出射面充满辐亮度探测器视场,在 1 h 内每间隔 30 s 测量一次。非稳定性按 $(V_{\max} - V_{\min})/V_{\min}$ 计算,其中 V_{\max} 、 V_{\min} 分别是辐亮度探测器输出的最大值、最小值。测量结果显示,辐亮度探测器 1 h 内非稳定性误差低于 0.354%。

4.2 响应度的非线性

辐亮度探测器的非线性测量主要用来评估不同辐亮度量级情况下辐亮度探测器输出的相对变化。将辐亮度探测器正对积分球辐射源,积分球出射面充满辐亮度探测器视场,调节积分球的输出辐亮度量级,用参考探测器监测积分球的输出变化,参考探测器的输出表示积分球不同的辐亮度等级。非线性误差 u 表示为

$$u = \left[\left(\frac{L_{1/3}}{L} \times \frac{L_A}{L_{A1/3}} \right) - 1 \right] \times 100\%, \quad (6)$$

式中 L 、 $L_{1/3}$ 分别为辐亮度探测器接近满度输出和约 1/3 满度输出, L_A 、 $L_{A1/3}$ 为参考探测器接近满度输出和约 1/3 满度输出。测量结果显示辐亮度探测器非线性误差低于 0.184%。

4.3 杂散光测试

辐亮度探测器光阑筒内设置了杂散光抑制光阑,以降低测量过程中杂散光带来的影响,但由于光阑筒染黑材料存在一定的反射率,辐亮度探测器视场外入射光线会在光阑间多次反射形成杂散光,从而产生测量误差。为评估杂散光所带来的影响,进行了杂散光测试实验。

杂散光测试原理如图 8 所示,积分球出光口直径为 200 mm,遮挡光阑孔径为 50 mm。图中积分球出口处阴影部分为辐亮度探测器有效观测区域,

白色部分为观测视场外区域,该区域内的出射光线在光阑筒内会产生杂散光。图中实线代表入射至辐亮度探测器光阑筒的有效入射光线,虚线代表产生杂散光的入射光线。

以辐亮度探测器视场光阑为坐标原点,将遮挡光阑由初始位置移动至 1000 mm 处,记录辐亮度探测器的输出变化。移动遮挡光阑过程中有两个比较特殊的位置,分别为图 8 中的 A 和 B,与视场光阑距离分别为 200 mm 和 800 mm。当遮挡光阑放置于 A 点左侧时,整个积分球出口的出射光线全部进入辐亮度探测器(包括有效入射光线及杂散光),遮挡光阑未起到抑制杂散光的作用。当遮挡光阑位于 A、B 两点之间时,遮挡光阑遮挡了部分杂散光。当遮挡光阑位于 B 点时,遮挡光阑遮住了全部杂散光且未遮挡住探测器的有效入射光路。当遮挡光阑位于 B 点右侧时遮挡光阑遮住了辐亮度探测器的有效入射光路,其输出值将明显减小。以遮挡光阑未遮挡有效入射光路情况下,辐亮度探测器输出相对变化作为杂散光评估结果。

选用稳定性较好的通道按上述方法进行了杂散光测试,辐亮度测量输出的值随距离相对变化关系如图 9 所示。杂散光带来的测量误差低于 0.86%。

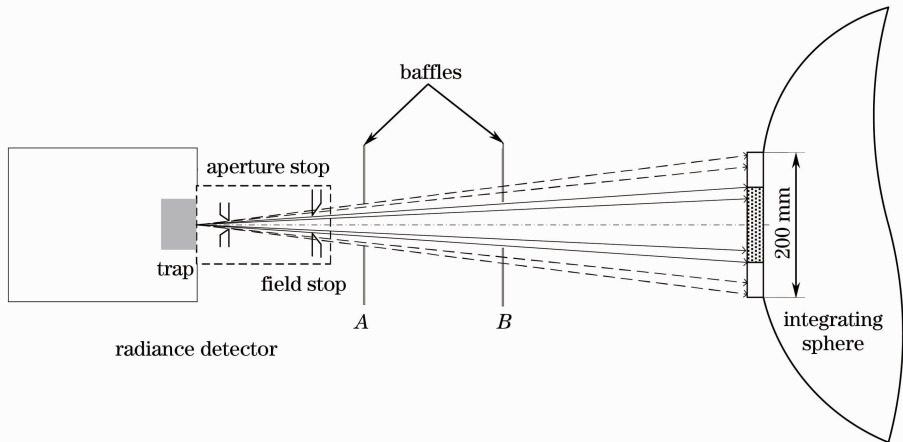


图 8 杂散光测试光路示意图

Fig. 8 Schematic figure of stray light measurement

按照通用不确定评估规范对测量不确定度进行分类及评估,结合部件级定标和整机性能测试结果,辐亮度探测器绝对光谱辐亮度响应度定标联合标准不确定度优于 1.26%(置信概率系数 $k=1$),不确定度详细评估结果在文献[14]中进行了报道。

5 结 论

辐亮度探测器是针对光学遥感器高精度定标应用需求所研制的绝对辐亮度测量装置,以低温辐射计为溯源标准对其进行了辐亮度响应度定标,获得了其绝对光谱辐亮度响应度,对影响响应度定标结

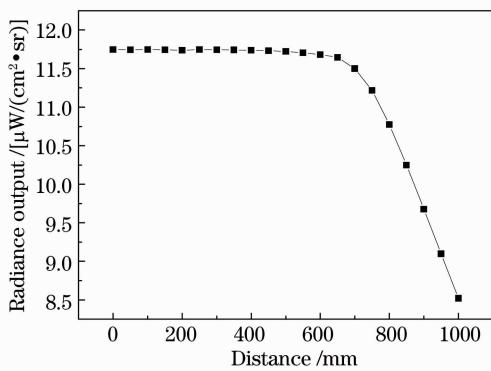


图9 辐亮度测量值随辐亮度探测器-遮挡光阑距离的变化关系

Fig. 9 Radiance versus distance between RD and baffle

果的各不确定度因素进行了分析。其中,滤光片透射率测量和探测器相对光谱响应度测量为两个主要的不确定度来源。这主要是由于宽光谱比较系统输出能量较弱、测量信噪比低所引起的,使用具有较高输出能量的基于可调谐激光器的测量装置有望进一步降低这两个参数的测量不确定度,本课题组正在进行这方面的研究工作。

以陷阱探测器为核心、溯源于低温绝对辐射计的辐亮度探测器可以在漫反射板、积分球光源的光谱辐亮度测量,以及星载遥感器的场地同步定标等应用中,建立绝对光谱辐亮度与实验室初级基准之间的溯源关系,对提高光学遥感器定标精度具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 J E Martin, N P Fox, P J Key. A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements [J]. *Metrologia*, 1985, 21(3): 147-155.
- 2 N P Fox. Trap detectors and their properties[J]. *Metrologia*, 1991, 28(3): 197-202.
- 3 B C Johnson, C L Cromer, R D Saunders, *et al.*. A method of realizing spectral irradiance based on an absolute cryogenic radiometer[J]. *Metrologia*, 1993, 30(4): 309-315.
- 4 B C Johnson, S W Brown, G P Eppeldauer, *et al.*. System-level calibration of a transfer radiometer used to validate EOS radiance scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(2): 339-356.
- 5 V Ahtee, S W Brown, T C Larason, *et al.*. Comparison of absolute spectral irradiance responsivity measurement techniques using wavelength-tunable lasers[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(20): 4228-4236.

- 6 Y J Liu, G Xu, M Ojanen, *et al.*. Spectral irradiance comparison using a multi-wavelength filter radiometer [J]. *Metrologia*, 2009, 46(S1): 81-85.
- 7 S W Brown, R D Saunders, Z Li, *et al.*. An absolute detector-based spectral radiance source [C]. SPIE, 2010, 7807: 78070A.
- 8 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Wavelength dependence of the spectral irradiance of standard lamp and bi-reflection distribution function of diffuser based on standard detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0612008.
杨小虎, 王淑荣, 黄煜, 等. 基于标准探测器研究标准灯光谱辐照度和漫反射板双向反射分布函数随波长的变化 [J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0612008.
- 9 Zhang Chunlei, Xiang Yang. Accuracy analysis of imaging spectrometer radiometric calibration using standard detector-diffuser method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 061101.
张春雷, 向阳. 成像光谱仪标准探测器-漫反射板定标法准确性分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(6): 061101.
- 10 B C Johnson, J B Fowler, C L Cromer. SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series, Volume 1. The SeaWiFS Transfer Radiometer[R]. NASA/TM-1998-206892, 1998.
- 11 Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(6): 749-752.
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应度标准探测器 [J]. *光学学报*, 2001, 21(6): 749-752.
- 12 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun, *et al.*. Absolute calibration of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 350 nm and 1064 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6273-6278.
李健军, 郑小兵, 卢云君, 等. 硅陷阱探测器在 350~1064 nm 波段的绝对光谱响应度定标 [J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6273-6278.
- 13 Zhai Wenchao, Li Jianjun, Zheng Xiaobing, *et al.*. Research on method of calibration sun channels of sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412004.
翟文超, 李健军, 郑小兵, 等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412004.
- 14 Zou Peng, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *et al.*. Development of multi-band radiance standard transfer detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0404002.
邹鹏, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 多波段辐亮度标准传递探测器的研制 [J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0404002.
- 15 Li Zhaozhou. Studies of Highly Accurate Radiometric Calibration and Application Based on Radiance Standard Detector [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
李照洲. 基于辐亮度标准探测器的高精度辐射定标方法与应用研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005.
- 16 Zhou Lei. Research of Detector-Based Absolute Spectral Irradiance Calibration [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
周磊. 400~1000 nm 波段基于探测器的绝对光谱辐照度定标方法研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2007.

栏目编辑: 何卓铭