

基于超连续激光-单色仪的绝对辐亮度响应度定标

谢臣瑜^{1,2}, 翟文超^{1**}, 李健军¹, 高放^{1,2}, 李越^{1,2}, 吴浩宇¹, 郑小兵^{1*}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 利用基于超连续激光和单色仪(SCM)的细分光谱扫描定标装置,对传感器的绝对光谱辐亮度响应度进行定标。利用两种绝对功率响应度溯源于低温绝对辐射计的辐亮度探测器(Trap-A 和 Trap-B),分别以通用的部件级定标方式和基于该定标装置的系统级定标方式(以 Trap-A 作为参考),确定了 Trap-B 的绝对光谱辐亮度响应度,两种方式下的定标不确定度分别优于 0.46% 和 1.8%。两种定标结果具有较好的一致性,在 450~900 nm 波段范围内,相对差异小于 0.9%。研究表明:基于 SCM 的细分光谱扫描定标装置适用于传感器的绝对光谱辐射定标,在遥感器的绝对光谱辐射定标方面具有重要的应用价值。

关键词 激光光学; 超连续激光; 单色仪; 细分光谱; 光谱辐射定标

中图分类号 O432.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0714002

Absolute Radiance Responsivity Calibration Based on Supercontinuum Laser and Monochromator

Xie Chenyu^{1,2}, Zhai Wenchao^{1**}, Li Jianjun¹, Gao Fang^{1,2}, Li Yue^{1,2},
Wu Haoyu¹, Zheng Xiaobing^{1*}

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A spectrally resolved scanning calibration facility based on a supercontinuum laser and monochromator (SCM) was proposed for the calibration of the absolute spectral radiance responsivity of the sensors. Two radiance meters, labeled Traps-A and Traps-B, were used herein. The absolute spectral power responsivities of the meters were traced to a cryogenic absolute radiometer. The absolute spectral radiance responsivity of Trap-B was obtained by a general unit-level calibration method, and a system-level calibration method based on the SCM with Trap-A taken as the reference. The calibration uncertainties of Traps-A and Traps-B were lower than 0.46% and 1.8%, respectively. The calibration results by the two methods were in good agreement, with a relative difference of less than 0.9% in the 450-900 nm. The results imply that a spectrally-resolved scanning calibration facility based on SCM is suitable for the absolute spectral radiometric calibration of sensors and highly applicable to the absolute spectral radiometric calibration of remote sensors.

Key words lase optics; supercontinuum laser; monochromator; spectrally-resolved spectra; spectral radiometric calibration

OCIS codes 120.5630; 010.0280; 150.1488; 120.4800

1 引 言

低温辐射计是光辐射计量领域现阶段最高精度的光功率参考基准,利用低温绝对辐射计可以实现 10^{-4} 量级绝对光功率的测量。利用光功率响应度绝

对定标的探测器和精密孔径可以实现 10^{-3} 量级绝对辐亮度和辐照度量值的标准传递。因此,溯源于低温绝对辐射计,基于标准探测器的辐射传递链路显著降低了光辐射计量的不确定度,提升了定标的精度。这种传递链路在各国计量部门得到了广泛应

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-02-21; 录用日期: 2019-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61505222)

* E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn; ** E-mail: wczhai@aiofm.ac.cn

用,如美国国家标准与技术研究院(NIST)^[1]、英国国家物理实验室(NPL)^[2]、德国物理技术研究院(PTB)^[3]和中国计量科学研究院(NIM)^[4]等。

在辐亮度和辐照度绝对度量工作标准向其他传感器传递过程中,绝对光谱辐射度的传递通常采用可调谐激光器,如美国 NIST 建立的使用均匀光源的光谱辐照度和辐亮度定标装置(SIRCUS)系统^[5]、德国 PTB 建立的光度计量可调谐激光器装置(TULIP)^[6]等。受益于激光的高通量输出(几百毫瓦至几瓦),将激光导入到积分球后,其辐射通量可以直接满足传感器辐亮度/辐照度模式的系统级定标要求^[7-9]。相对光谱辐射度的传递通常采用单色仪系统实现,如美国 NIST 建立的光谱比较装置(SCF)^[10]等。传统灯照明的单色仪系统由于光通量低(1 pW~1 μ W 量级),通常仅适用于功率模式下的传感器相对光谱响应度定标,其辐射通量水平无法满足传感器的光谱辐亮度/辐照度的系统级定标要求。可调谐激光器通常由多个激光器子系统组成。例如,覆盖 350~1000 nm 波段需要钛宝石激光器、染料激光器、倍频器等,而覆盖红外波段则需要使用红外光参量振荡(OPO)激光器,成本巨大,而且激光的调谐操作、维护较繁琐。单色仪系统则更为成熟,操作维护更方便,其主要不足在于照明光源和单色仪光

学效率导致输出光功率水平低。

超连续激光是一种宽波段连续谱输出的新型激光光源,光功率密度高(1 mW/nm 量级),覆盖波段范围宽(如 450~2400 nm),其准直输出方式容易实现与单色仪的高效率耦合,采用超连续激光与单色仪结合,有望实现几十微瓦至几百微瓦的光谱功率输出,采用合适尺寸的积分球匀光可以实现传感器光谱辐亮度/辐照度模式的系统级定标。类似的定标装置在许多国家计量院得以建立,如英国国家物理实验室(NPL)、日本国家计量院(NIMJ)和韩国国家计量院(KRISS)等^[11-13]。本文采用超连续激光和单色仪(SCM)建立了绝对光谱辐射定标装置。采用超连续激光作为单色仪的光源,经单色仪分光后的单色光被导入积分球,形成均匀的、波长可调谐的面光源,利用溯源至低温绝对辐射计的硅辐亮度计作为传递标准,在 450~900 nm 波段范围内,通过系统级定标方法得到了待测辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度,将该结果与部件级绝对定标方法进行比较,验证了该系统的系统级光谱辐射定标能力。

2 基于 SCM 的光谱辐射定标装置

建立的基于 SCM 的光谱辐射定标装置如图 1 所示。

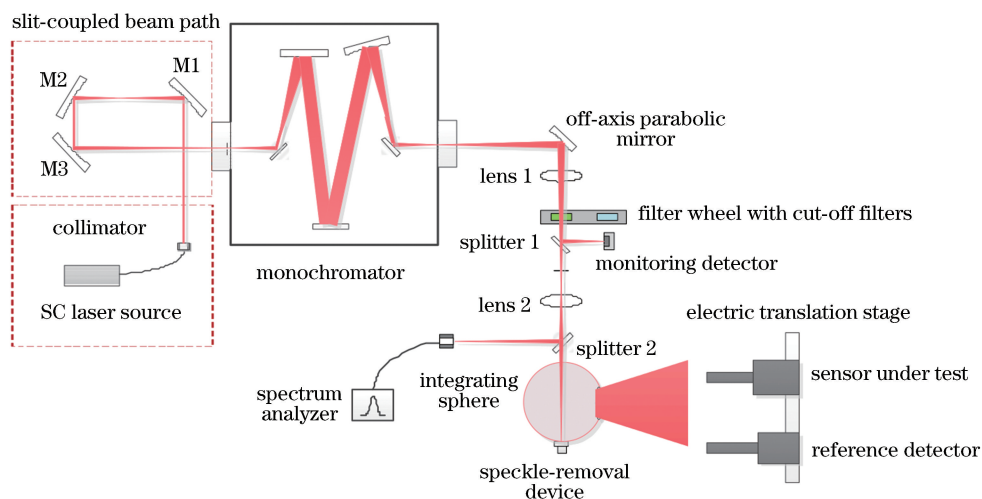


图 1 基于 SCM 的细分光谱扫描定标系统

Fig. 1 Spectrally resolved scanning calibration system based on SCM

图 1 中,超连续(SC)激光光源的光谱范围基本可覆盖 450~2400 nm。为了避免色差带来的影响,采用反射式狭缝耦合光路,激光器输出的光源经过 M1、M2 和 M3 离轴抛物面镜后会聚到单色仪的入射狭缝处由光栅进行色散分光,输出的单色光经离

轴抛物面镜准直输出后,使用透镜(lens 1)进行聚焦。透镜将准直光聚焦到滤光片转轮中的滤光片上,经过滤光片转轮后消除高级次光谱。在滤光片转轮之后放置分束器(石英窗口),分束器将一部分光($\approx 5\%$)反射后进入监视探测器,用于实时监视光

源的稳定性,其余部分进入后续光路。透镜 1 之后放置透镜 2,透镜 2 的物方焦点和透镜 1 的像方焦点重合,透镜 2 工作在有限共轭模式下,将光束聚焦到积分球中。在透镜 2 和积分球之间放置分束器(石英窗口),分束器表面反射约 5% 的光束进入波长计中,实时测量单色仪输出的波长和带宽。波长计的定标溯源至实验室的 He-Ne 激光器,其标准波长为 632.991 nm,波长计定标精度为 ± 3 pm。透镜 2 的聚焦光束被导入内径为 100 mm、开口为 35 mm 的积分球中,积分球内胆材料为聚四氟乙烯(PTFE),该涂层在可见-短波红外波段的反射率大于 95%。将标准辐亮度计和待测仪器放置在积分球出光口的电控平移台上,利用替代定标原理得到待测仪器的绝对光谱辐亮度响应度。

为了评价 SCM 定标系统的输出光辐射通量水平,采用热释电探测器(型号为 TP5-BL)作为光功率检测设备,将单色仪的输出光直接正入射到探测器的光敏面上,使入射光完全被接收,并采集每个波长点下探测器的输出信号值。该探测器在宽谱段范围内的光谱响应度曲线近似平坦,且光谱响应度定标结果溯源至美国 NIST。计算得到了不同波长下单色仪的输出光功率分布,如图 2 所示,其中,光栅 1、光栅 2、光栅 3 测量的光功率波长范围分别为 400~1100 nm、600~1600 nm、800~2500 nm。从图 2 可以看出,经过光栅分光后的单色光功率普遍在几十微瓦至几百微瓦之间。超连续激光器以 1064 nm 激光作为抽运源,因此光功率分布曲线在 1064 nm 处呈现尖峰。光栅 1 输出光通量低的主要原因在于光栅 1 的闪耀波长为 300 nm,刻线密度为 1200 line/mm,仅在 200~600 nm 区间有较高效率。光栅 2 的闪耀波长为 750 nm,刻线密度为 600 line/mm。光栅 3 的闪耀波长为 1250 nm,刻线密度为 300 line/mm。

3 辐亮度计

以硅光电二极管(Hamamatsu S1337)作为探测单元,采用三片反射式陷阱结构和 Gershun 管的设计形式^[14],研制出两套相同结构的硅辐亮度计(Trap-A 和 Trap-B)。辐亮度计的几何结构如图 3 所示,通过由视场光阑和孔径光阑组成的光学系统限制其入射孔径及立体角。

3.1 部件级定标方法

根据光谱辐亮度的定义,在如图 3 所示的几何结构中,探测器接收到的光谱绝对功率 $\phi(\lambda)$ 为

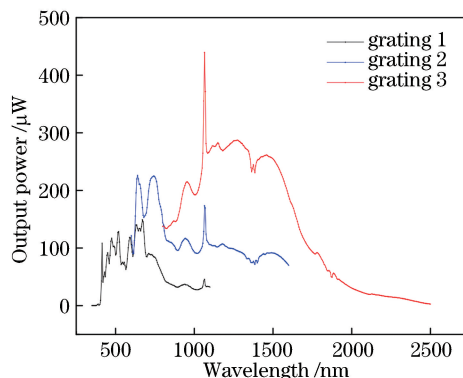


图 2 单色仪的输出光功率分布

Fig. 2 Output power distribution of monochromator

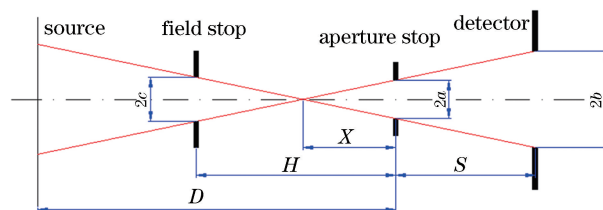


图 3 硅辐亮度计的几何结构图

Fig. 3 Geometric structure of Si radiometer

$$\phi(\lambda) = L(\lambda) \pi (D \tan \theta_v)^2 \frac{\pi a^2}{D^2} = \frac{\pi^2 a^2 c^2}{H^2} L(\lambda), \quad (1)$$

式中: $L(\lambda)$ 为探测器在波长 λ 处的辐亮度; D 为孔径光阑与物面之间的距离; a 和 c 分别为孔径光阑半径和视场光阑半径; H 为孔径光阑与视场光阑之间的距离; $2\theta_v$ 为辐亮度计的视场角。由于视场光阑和孔径光阑限制了辐亮度计的视场,因此通过精确测量其几何尺寸即可计算出辐亮度计的视场角 $2\theta_v$ 。因此,辐亮度计的绝对辐亮度响应度 $R(\lambda)_L$ 可以表示为

$$R_L(\lambda) = \frac{I_L}{L(\lambda)} = \frac{\pi^2 a^2 c^2}{H^2} R_\phi(\lambda), \quad (2)$$

式中: $R_\phi(\lambda)$ 为绝对光功率响应度; I_L 为辐亮度计的输出电流值。理论上,由于 $R_\phi(\lambda)$ 为已知量,几何因子是定值,所以可以计算得到辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度 $R_L(\lambda)$,采集辐亮度计观测积分球时得到的电流信号可以计算出当前积分球光源的光谱辐亮度 $L(\lambda)$ 。

3.2 辐亮度计的部件级绝对定标

根据上述原理,设计了 Trap-A、Trap-B 两台硅波段辐亮度计,硅辐亮度计的定标采用部件级定标方法,主要包括多激光波长点的绝对光功率响应度的定标、Gershun 管的几何因子测量以及宽谱段绝对光谱辐亮度响应度的拟合和插值。其中,探测器

绝对光功率响应度的定标可直接溯源至国防光学计量站的低温绝对辐射计,实验中测量了陷阱探测器在 450~900 nm 波段内 6 个激光波长点下的绝对光功率响应度(结果见表 1),绝对光功率响应度的结果由计量单位出具的校准报告给出。由于硅探测器在 450~900 nm 范围内的光谱响应度平滑,通过

插值拟合可以得到该谱段范围内的绝对光功率响应度。视场几何因子包括孔径光阑、视场光阑以及两光阑之间的距离,采用精密电子读数显微镜(型号为 107JPC)测量得到,通过(2)式可以计算得出硅辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度,计算结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 6 个激光波长点下 Trap-A 辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度

Table 1 Absolute spectral radiance responsivities of Trap-A at six wavelengths

Wavelength / nm	Radiant power responsivity / (A · W ⁻¹)	Diameter of aperture stop / mm	Diameter of field stop / mm	Distance / mm	Radiance responsivity / (A · mm ² · sr · nm · W ⁻¹)
488	0.3888				0.004683
514	0.4109				0.004949
633	0.5079	9.187	2.893	190.1	0.006118
785	0.6303				0.007592
808	0.646				0.007781
853	0.6812				0.008205

表 2 6 个激光波长点下 Trap-B 辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度

Table 2 Absolute spectral radiance responsivities of Trap-B at six wavelengths

Wavelength / nm	Radiant power responsivity / (A · W ⁻¹)	Diameter of aperture stop / mm	Diameter of field stop / mm	Distance / mm	Radiance responsivity / (A · mm ² · sr · nm · W ⁻¹)
488	0.3905				0.004744
514	0.4121				0.005007
633	0.5079	9.198	2.902	190.1	0.006171
785	0.6301				0.007655
808	0.6464				0.007853
853	0.6817				0.008282

表 1~2 中给出了硅辐亮度计在 6 个激光波长点下的绝对光谱辐亮度响应度,采用插值拟合得到 450~900 nm 之间完整的辐亮度响应度结果,如图 4 所示。

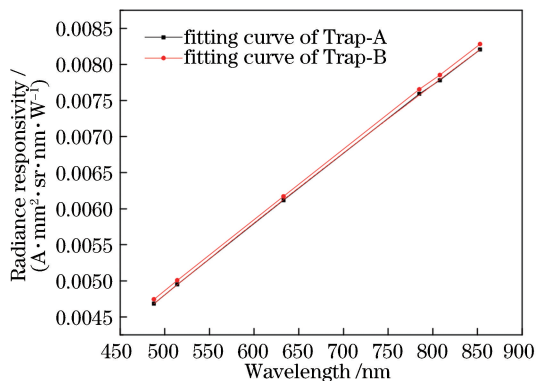


图 4 硅辐亮度计的绝对辐亮度响应度曲线

Fig. 4 Absolute radiance responsivity of Si radiometer

3.3 部件级绝对定标不确定度

硅辐亮度计定标的不确定来源主要包括硅陷阱探测器的定标不确定度、Gershun 管测量几何因子的不确定度以及辐亮度响应度的拟合偏差。Trap-A 和 Trap-B 辐亮度计的测量不确定度评估结果如表 3 所示,其中 k 为包含因子。

4 基于 SCM 的系统级绝对辐亮度响应度的传递定标

4.1 系统级定标方程

采用图 1 所示的定标装置替代定标时,将已获取定标结果的 Trap-A 作为标准辐亮度计,Trap-B 作为待定标辐亮度计,标准辐亮度计和待定标辐亮度计分别放置于积分球出光口的几何中心进行交替测量,利用量值传递的方法得到待测仪器的绝对光

表 3 硅辐亮度计定标的不确定度

Table 3 Calibration uncertainties of Si radiometers

Component of uncertainty	Contributions /%	
	Trap-A	Trap-B
Trap radiant power responsivity	0.1	0.1
Responsivity fitting	0.03	0.026
Instability	0.018	0.029
Non-linearity	0.07	0.06
Non-uniformity	0.016	0.016
Aperture stop area	0.032	0.13
Field stop area	0.126	0.15
Distance between the two stops	0.012	0.012
Combined uncertainties	0.18	0.23
Expanded uncertainty($k=2$)	0.37	0.46

谱辐亮度响应度:

$$\begin{cases} I_{L-Std}(\lambda) = L(\lambda)R_{L-Std}(\lambda) \\ I_{L-Dut}(\lambda) = L(\lambda)R_{L-Dut}(\lambda) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $I_{L-Std}(\lambda)$ 和 $I_{L-Dut}(\lambda)$ 分别为标准辐亮度计和待测仪器在波长为 λ 处的输出电流值; $R_{L-Std}(\lambda)$ 为参考辐亮度的光谱辐亮度响应度; $R_{L-Dut}(\lambda)$ 为待定标辐亮度的光谱辐亮度响应度。因此可以得到待测仪器的绝对光谱辐亮度响应度为

$$R_{L-Dut}(\lambda) = \frac{I_{L-Dut}(\lambda)}{I_{L-Std}(\lambda)}R_{L-Std}(\lambda). \quad (4)$$

实验中,测量的波长范围为450~900 nm,测量间隔为5 nm,利用静电计(型号为Keithley6517B)

采集仪器输出的电流信号值,取平均值后代入(4)式得到 Trap-B 仪器的绝对光谱辐亮度响应度,结果如图 5 所示。

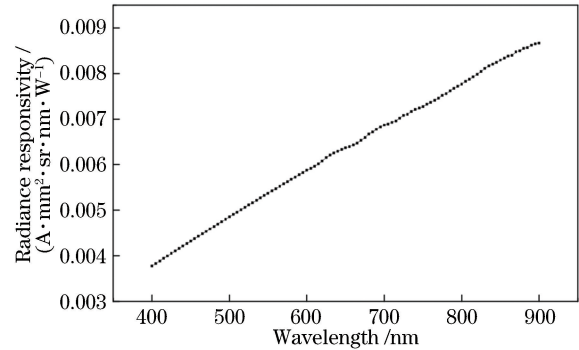


图 5 Trap-B 辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度曲线

Fig. 5 Absolute spectral radiance responsivities of Trap-B

4.2 不确定度分析

根据国家计量单位发布的测量不确定度评估和表述规范^[15],对基于 SCM 的定标系统的绝对光谱辐亮度响应度定标的不确定度进行评价,定标过程中不确定度的来源主要包括定标装置、参考辐亮度计以及待测辐亮度计三部分。其中:定标装置的不确定度主要有积分球光源的波长精度、非稳定性、平面非均匀性和角度非均匀性;参考辐亮度计的不确定度主要有其自身定标的不确定度(如表 3 所示)以及测量信号值的相对标准偏差;待测辐亮度计为系统级定标,该项不确定度主要包括其自身特性导致的不确定度(如表 3 所示)以及测量信号值的相对标准偏差。整个定标过程中的不确定度评估汇总结果如表 4 所示。

表 4 绝对辐亮度响应度定标不确定度评估的汇总结果

Table 4 Uncertainties of absolute radiance responsivity calibration

Component of uncertainty		Contribution /%
Source characterization	Wavelength accuracy	—
	Instability	0.5
	Planar uniformity	0.4
	Angular uniformity	0.57
Trap-A (reference radiance meter)	Calibration uncertainty	0.18
	Relative standard deviation	0.15
Trap-B (device under test)	Instability	0.029
	Non-linearity	0.06
	Non-uniformity	0.016
Measurement	Relative standard deviation	0.13
Combined uncertainties		0.9
Expanded uncertainties($k=2$)		1.8

总合成不确定度按照通用的不确定度评价公式进行计算,即:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_8^2 + u_9^2}, \quad (5)$$

式中: u_i 为第*i*个不确定性因素引起的不确定度, $i=1,2,\dots,9$ 。由(5)式计算得出利用该定标装置对待测辐亮度计的定标合成不确定度为0.9%,扩展不确定度为1.8%($k=2$)。在不确定度的贡献中,单色光的波长由波长计给出,精度为 ± 3 pm,该项误差引入的不确定度可以忽略,其中定标光源引入的不确定度为0.86%,参考辐亮度计的不确定度为0.23%,待测辐亮度计自身的不确定度为0.15%,总不确定度水平优于传统定标方法中利用光谱辐射计和积分球光源的定标结果^[16]。由不确定度评估可知,在基于SCM定标的装置中,定标光源引入的不确定度占主导地位,通过进一步改进光源的性能水平(如提高超连续激光单色仪系统光源的稳定性^[17]),有望进一步降低不确定度。

4.3 定标结果比对

图5给出了基于SCM的定标系统对待测辐亮度计定标的结果,总定标不确定度为1.8%。为了验证该结果的准确性,将该结果与部件级定标方法获得的Trap-B光谱辐亮度响应度进行比较,结果如图6所示。

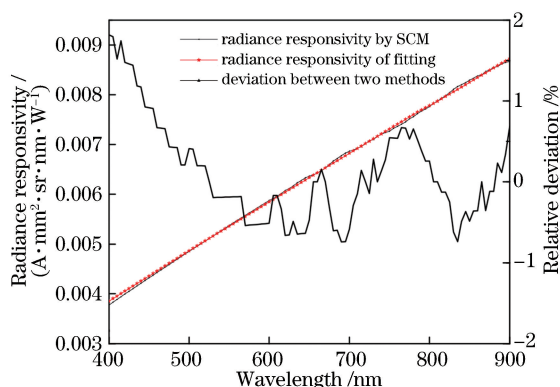


图6 定标结果比较

Fig. 6 Comparison of calibration results

图6中右侧坐标为两种方法定标仪器光谱辐亮度响应度结果的相对偏差,可知在测量波段范围内,两种方法之间的偏差优于0.9%,该偏差结果在比对验证合成不确定度的范围内,证明了该定标结果与通用的部件级定标方法具有良好的一致性,进一步验证了该装置的系统级定标能力。

5 结 论

提出了一种基于SCM的绝对辐亮度响应度定

标方法,采用高功率密度、宽光谱范围的超连续激光器作为单色仪的光源,经过单色仪分光后的单色光被导入积分球,得到均匀的单色面光源,实现了传感器光谱辐亮度响应度的系统级传递定标,定标不确定度水平达到1.8%,与目前通用的部件级定标方法的比对结果具有良好的一致性,充分说明了本系统的合理性和适用性。本研究采用硅波段的标准辐亮度计进行定标装置的定标能力验证,测量范围局限于可见光至近红外波段,相关定标方法和原理具有通用性。通过其他波段范围的标准辐亮度计(例如InGaAs和扩展InGaAs)传递定标,可进一步扩展系统的应用波段范围至短波红外波段。基于SCM的细分光谱扫描定标装置兼具使用灵活和高精度的特点,在太阳反射波段光学遥感器的实验室光谱辐射定标领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Gentile T R, Houston J M, Hardis J E, *et al.* National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(7): 1056-1068.
- [2] Stock D, Hofer H, White M, *et al.* Lowest uncertainty direct comparison of a mechanically-cooled and a helium-cooled cryogenic radiometer[J]. *Metrologia*, 2000, 37(5): 437-439.
- [3] Meindl P, Klinkmüller E, Werner L, *et al.* New UV spectral responsivity scale of the PTB based on a cryogenic radiometer and an argon plasma arc radiation source[J]. *Metrologia*, 2006, 43(2): S72-S77.
- [4] Xu N, Lin Y D, Gan H Y, *et al.* Spectral responsivity calibration of silicon photodetectors using monochromator-based cryogenic radiometer [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10155: 1015513.
- [5] Brown S W, Eppeldauer G P, Lykke K R. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(32): 8218-8237.
- [6] Schuster M, Nevas S, Sperling A, *et al.* Spectral calibration of radiometric detectors using tunable laser sources [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1950-1961.
- [7] Zeng J N, Yoon H W, Eppeldauer G P, *et al.* Spectral irradiance responsivity calibration of InSb radiometers using the improved IR-SIRCUS at NIST [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7453: 74530N.
- [8] Zhang Y N, Zheng X B, Li J J, *et al.* Research on system level calibration method of multi-band filter

- radiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812004.
- 张艳娜, 郑小兵, 李健军, 等. 多波段滤光片辐亮度计的系统级定标方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812004.
- [9] Zhai W C, Li J J, Zheng X B, *et al.* Research on method of calibrating 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.
- [10] Podobedov V B, Eppeldauer G P, Hanssen L M, *et al.* Calibration of spectral responsivity of IR detectors in the range from 0.6 μm to 24 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9819: 98190P.
- [11] Levick A P, Greenwell C L, Ireland J, *et al.* Spectral radiance source based on supercontinuum laser and wavelength tunable bandpass filter: the spectrally tunable absolute irradiance and radiance source[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(16): 3508-3519.
- [12] Yamaguchi Y, Yamada Y, Ishii J. Supercontinuum source-based system for pre-launch calibration of the hyperspectral sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8533: 85331K.
- [13] Yoo Y S, Kim G J, Park S, *et al.* Spectral responsivity calibration of the reference radiation thermometer at KRISS by using a super-continuum laser-based high-accuracy monochromatic source[J]. *Metrologia*, 2016, 53(6): 1354-1364.
- [14] Wang X X, Li Z G. Design and performance test of Gershun tube spectral radiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0612002.
- 王晓旭, 李志刚. Gershun 管光谱辐射计设计与性能检测 [J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0612002.
- [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [16] Ding L, Yuan Y L, Zheng X B, *et al.* Verification method of spectral calibration accuracy for hyperspectral remote sensors [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(3): 463-468.
- 丁蕾, 袁银麟, 郑小兵, 等. 高光谱遥感器现场光谱定标精度验证方法研究 [J]. *应用光学*, 2017, 38(3): 463-468.
- [17] Yamaguchi Y, Yamada Y, Ishii J. Supercontinuum-source-based facility for absolute calibration of radiation thermometers [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(8): 1825-1833.