

多波段滤光片辐亮度计的系统级定标方法研究

张艳娜 郑小兵 李健军 张 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 为了满足遥感仪器的高精度辐射定标需求,实现“低温绝对辐射计→多波段滤光片辐亮度计→积分球→遥感器”的辐亮度传递链,对多波段滤光片辐亮度计进行了定标方法的研究。利用可调谐激光导入积分球产生的均匀、稳定、无偏的面光源作为定标光源,使用溯源于低温辐射计的标准辐亮度探测器作为传递标准,通过系统级的定标方法对滤光片辐亮度计的 753、865、900、1030 nm 四个工作波段进行了绝对光谱响应度定标,不确定度优于 0.58%。与溯源于法国黑体辐射源的太阳辐射计 CIMEL CE318 进行了比对实验,结果表明,在四个定标波段,滤光片辐亮度计测得的积分球辐亮度与由 CE318 测得的辐亮度差值分别为 -0.216%、-2.564%、-4.248% 和 2.226%,验证了该系统级定标方法的合理性。

关键词 遥感;辐亮度;系统级定标;滤光片辐亮度计;积分球

中图分类号 O432.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0812004

Research on System Level Calibration Method of Multi-Band Filter Radiometer

Zhang Yanna Zheng Xiaobing Li Jianjun Zhang Wei

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

Abstract To meet the requirement of high-precision radiation calibration for remote sensor and to achieve the radiance transfer chain “cryogenic radiometer→ multi-band filter radiometer→ integrating sphere → remote sensor”, a calibration method of multi-band filter radiometer is developed. In this method, the uniform, stable and unpolarized surface source is acquired from the tunable laser-illuminated integrating sphere, and the standard radiance detector that is traced from the cryogenic absolute radiometer is used as transferring standard, and the absolute spectral radiance responsibility of a multi-band filter radiometer is obtained at 753, 865, 900 and 1030 nm by the system level calibration, and the calibration uncertainty is below 0.58%. The multi-band filter radiometer and the solar radiometer CIMEL CE318 which is traced from blackbody radiation in France are used to measure radiance of integrating sphere respectively, and the results show that the differences of the four calibration bands are -0.216%, -2.564%, -4.248% and 2.226%, which validate the rationality of the calibration method.

Key words remote sensing; radiance; system level calibration; filter radiometer; integrating sphere

OCIS codes 120.0280; 120.3940; 120.5630; 120.3930

1 引 言

近年来,高精度的遥感仪器不断地应用到气候监测、资源探测和海洋卫星等领域,在遥感器的发射前定标、星上定标和场地替代定标中,常采用稳定性和均匀性好的积分球/漫射板来进行辐亮度定标^[1-4],这就需要将积分球/漫射板的绝对辐射量溯

源到高精度的物理量值基准。传统的基于标准辐射源的方法,通过“黑体→标准灯→积分球/漫射板”来实现辐亮度的传递,由于传递过程中受到辐照度到辐亮度的转换以及几何尺寸的近似等因素的影响,不确定度往往高达 5%^[1-2]。近年来逐步发展起来基于标准探测器的辐射定标方法^[1,5],以低温绝对

收稿日期: 2013-03-13; **收到修改稿日期**: 2013-04-28

基金项目: 国家 973 计划(2010CB950801)、国家自然科学基金(61275173)

作者简介: 张艳娜(1987—),女,博士研究生,主要从事光学辐射定标方面的研究。E-mail: zynbao@mail.ustc.edu.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、光学遥感和海洋光学等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

辐射计作为初级标准,采用高稳定的半导体探测器作为传递标准,可以有效地提高卫星传感器的定标精度,在定量化遥感中具有广泛的应用前景。

在基于探测器的辐亮度标准传递中,高精度和高稳定的标准传递辐亮度探测器的研制以及定标是其核心研究内容之一。目前美国国家标准技术研究所(NIST)等研究机构研制的基于陷阱探测器的标准辐亮度探测器,如 VXR、SXR、SWIXR 等^[6-7],使用窄带滤光片分光来实现不同波段的辐亮度测量,将低温辐射计的初级辐射标准精确地传递到高精度的遥感器^[6]。在我国的“风云”系列气象卫星中,滤光片辐亮度计也作为星上定标和外场定标的核心设备发挥了重要作用^[4],要实现“低温绝对辐射计→多波段滤光片辐亮度计→积分球/漫射板→遥感器”的辐亮度标准传递链,需要对其传递标准(多波段滤光片辐亮度计^[8])进行高精度的定标方法研究,从而提高积分球和遥感器的量值传递和测量精度。

滤光片辐亮度计的传统定标方法通常是对它的各个功能部件进行单元级的定标,主要包括探测器绝对光谱响应度、滤光片透射率和限制辐亮度几何量等,然后再通过拟合和插值得到整体的辐亮度响应度。但是在定标过程中,光功率差异和插值计算引起的探测器绝对光谱响应度的定标误差,倾斜因子引起的滤光片透射率测量误差以及定标设备本身的不足等都会产生较大的不确定度,如李照洲^[9]报道的部件级定标不确定度优于 2%,邹鹏等^[8]报道的八通道滤光片辐亮度计的定标不确定度达到了 1.26%。另外,部件级定标忽略了各单元之间的相互影响(如杂散光等),对装调过程中实际位置与理论位置的差异也不能进行准确的定量分析,并且这种方法只能用于辐亮度计装调之前的定标,在使用过程中如果滤光片等其他部件的性能发生变化,其

绝对辐亮度的改变将难以准确评估。

为了解决传统定标方法中出现的问题,本文提出了一种系统级的定标方法,利用可调谐激光导入积分球产生的高亮度、均匀的、波长可调谐的、偏振度低的面光源^[10],通过替代法将溯源于低温辐射计的全波段辐亮度探测器的量值,高精度传递到滤光片辐亮度计。这种方法可以避免部件级定标中不确定度来源多的局限性,减少因定标状态与使用状态不一致带来的偏差和理论计算忽略的内容,并且缩短了传递链,可以大大降低量值传递过程中的不确定度。通过和法国同类辐射计的比对实验,证明了该定标方法的合理性。

2 多波段滤光片辐亮度计定标方法

辐亮度是光源在垂直其辐射传输方向上单位表面积单位立体角内发出的辐射通量^[11],即

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\theta} \quad (1)$$

这里根据(1)式,研制了“传递标准探测器”,即高精度的多波段滤光片辐亮度计^[8],它通过视场光阑和孔径光阑组成的光学系统来限制入射孔径以及入射立体角,使用高精度的硅陷阱探测器实现辐射通量的精确测量,并利用窄带滤光片进行分光,由此来实现 400~1030 nm 波段范围内八个通道的辐亮度测量。对它进行的定标,就是实现低温绝对辐射计的绝对辐射通量到辐亮度的标准传递过程。

2.1 定标原理

滤光片辐亮度计的系统级定标,是通过光谱替代定标的方法将标准辐亮度探测器复现的物理量值传递到滤光片辐亮度计。其中标准辐亮度探测器由硅陷阱探测器、精密视场光阑和孔径光阑组成^[9],其内部几何结构如图 1 所示。

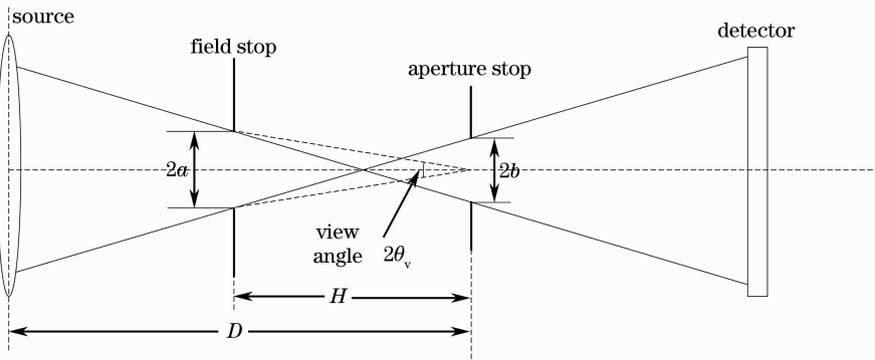


图 1 标准辐亮度探测器结构图

Fig. 1 Structure of standard radiance detector

图 1 中 a 和 b 分别是视场光阑半径和孔径光阑半径, H 是孔径光阑与视场光阑之间的距离, D 是孔径光阑与光源之间的距离, $2\theta_v$ 为视场角, 探测器接收到的光谱辐通量 $\phi_s(\lambda)$ 为

$$\phi_s(\lambda) = L_s(\lambda)\pi(D\tan\theta_v)^2\frac{\pi b^2}{D^2} = \frac{\pi^2 a^2 b^2}{H^2}L_s(\lambda). \quad (2)$$

式中 $L_s(\lambda)$ 为探测器在波长 λ 处的辐亮度。这样, 标准探测器的辐亮度响应度 $R_{L-s}(\lambda)$ 可以使用硅陷阱探测器的光谱辐通量响应度 $R_{\phi-s}(\lambda)$ 表示为

$$R_{L-s}(\lambda) = \frac{\pi^2 a^2 b^2}{H^2}R_{\phi-s}(\lambda). \quad (3)$$

在替代法定标时, 标准辐亮度探测器和滤光片辐亮度计在积分球中心进行交替测量, 测得的电压值可表示为

$$V_s(\lambda) = L(\lambda)R_{L-s}(\lambda), \quad (4)$$

$$V(\lambda) = L(\lambda)R_L(\lambda), \quad (5)$$

式中 $V_s(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$ 分别为标准辐亮度探测器和滤光片辐亮度计在波长 λ 处的输出电压, $L(\lambda)$ 为激光-

积分球光源的辐亮度, $R_L(\lambda)$ 为滤光片辐亮度计在波长 λ 处的辐亮度响应度, 由此可以得到滤光片辐亮度计的光谱辐亮度响应度为

$$R_L(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_s(\lambda)}R_{L-s}(\lambda), \quad (6)$$

根据(6)式表述的光谱响应度, 就可以计算得到滤光片辐亮度计在通道 λ_0 内的定标系数 $R_L(\lambda_0)$:

$$R_L(\lambda_0) = \int R_L(\lambda)d\lambda. \quad (7)$$

2.2 实验系统

图 2 为滤光片辐亮度计的系统级定标示意图。532 nm(Verdi-V18, Coherent)激光抽运钛宝石可调谐激光器(MBR110, Coherent)产生 700~1060 nm 波段连续可调谐的激光, 通过透镜进行聚焦、经偏振棱镜起偏后, 进入到分束镜。一束反射光入射至波长计, 利用迈克耳孙干涉技术对入射的激光波长进行测量及监视, 其波长测量精度可达 0.001 nm; 另一束透射光则进入到激光功率控制器, 它可以在 400~1100 nm 的波长范围实现激光功率的测量、调

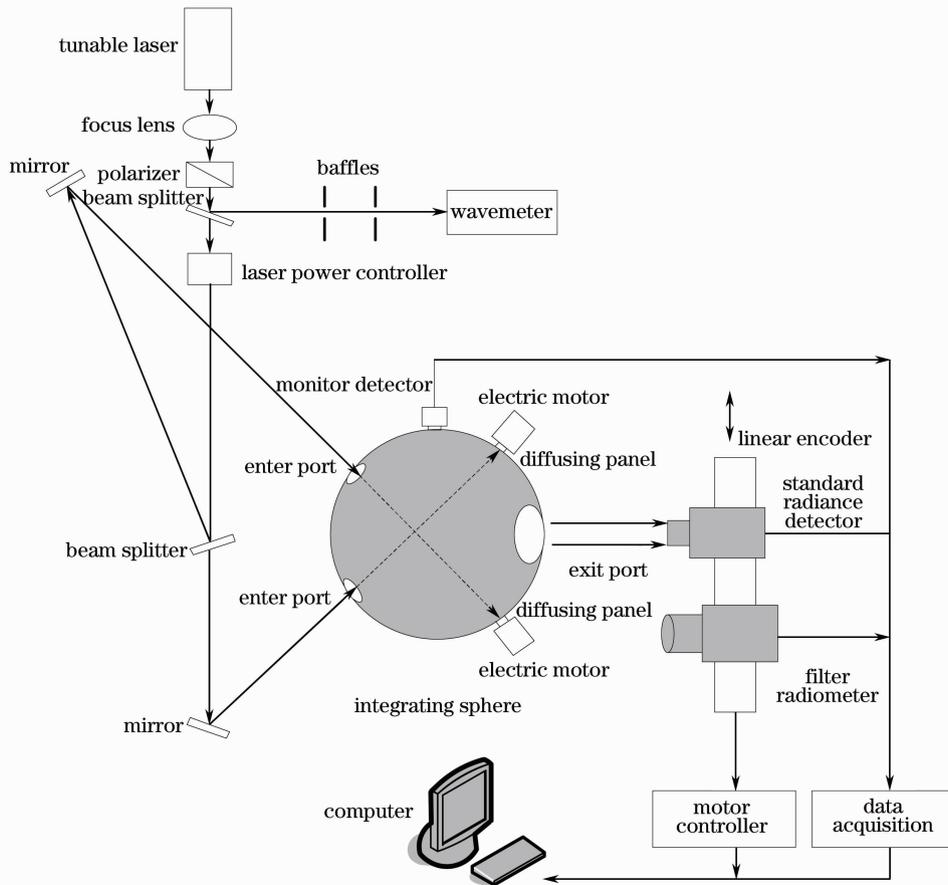


图 2 滤光片辐亮度计系统级定标示意图

Fig. 2 Schematic diagram of system level calibrating filter radiometer

节和稳定。稳定的激光束通过分束镜后分成两束不同方向的激光,然后采用双光路导入方式,利用反射镜将功率近似相等的两路光入射到积分球内置的漫反射板上。其中积分球的内径为 250 mm,入口直径为 10 mm,出口直径为 80 mm,漫射板安装在直流电机上,通过直流电机带动漫射板旋转可以去除激光空间相干效应产生的散斑^[10],最终在积分球出口处产生均匀性好、稳定度高、偏振度低且波长连续可调的面光源。

另外,在双光路导入时,为了减小激光干涉效应对积分球输出的稳定性和均匀性影响,两路光束避免相交。同时在积分球内壁上安装了单片的硅光电探测器作为监视探测器,来修正定标过程中由于入射激光功率波动引起的积分球光源辐亮度的变化。

定标时首先需要调节标准辐亮度探测器和滤光片辐亮度计的光轴,使其分别与积分球光源的中心法线方向重合。在每个测量波长点,通过电动平移台控制两台仪器移动,使其交替对准积分球出口中心进行测量,测得的数据通过数据采集器记录,由此计算出滤光片辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度。

3 结果及分析

3.1 标准传递辐亮度探测器定标

标准辐亮度探测器的光谱辐亮度响应度使用光

谱辐通量响应度、光阑面积以及两光阑之间的距离来进行计算。光谱辐通量响应度溯源于低温绝对辐射计,不确定度优于 0.065%^[12]。视场光阑、孔径光阑的直径以及两光阑之间的距离使用万能工具显微镜,通过非接触光学测量方法获得,其测量精度可达到 3 μm。另外,在定标过程中根据光源的光通量大小,选用不同的增益来进行测量,相对于低温辐射计定标时,增益阻抗为 9.9686 kΩ,而相对于积分球定标时,增益阻抗为 99.951515 MΩ。由此可以计算得到标准辐亮度探测器在 700~1064 nm 范围内的绝对光谱辐亮度响应度,如图 3 所示。

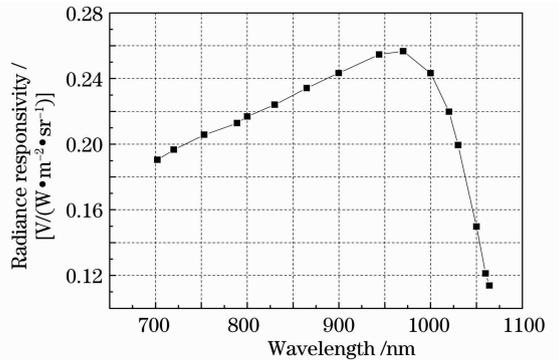


图 3 标准辐亮度探测器的绝对光谱辐亮度响应曲线
Fig. 3 Absolute spectral radiance responsivity graph of standard radiance detector

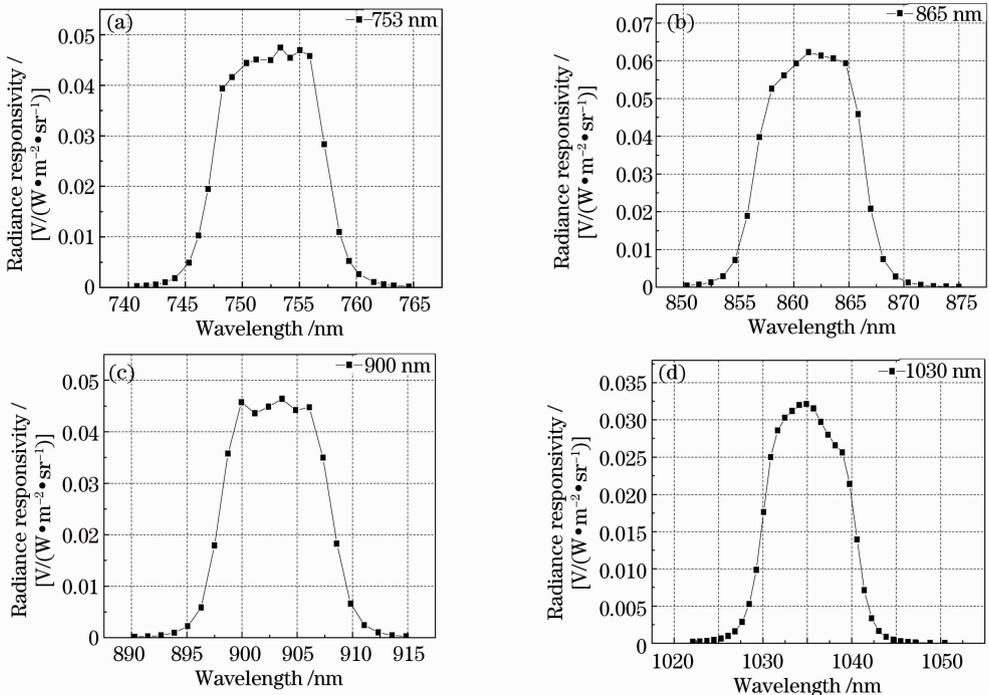


图 4 滤光片辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应曲线。(a) 753 nm; (b) 865 nm; (c) 900 nm; (d) 1030 nm
Fig. 4 Absolute spectral radiance responsivity graphs of filter radiometer. (a) 753 nm; (b) 865 nm; (c) 900 nm; (d) 1030 nm

3.2 滤光片辐亮度计定标结果与不确定度分析

按照图 2 所示的实验装置,在 753、865、900、1030 nm 四个波段对滤光片辐亮度计进行了光谱辐亮度响应度的测量,每个通道扫描时约以 1 nm 为间隔,在中心波长的 ± 10 nm 波段范围内进行光谱扫描最终得到这四个波段的绝对光谱辐亮度曲线如图 4 所示。

由图 4 所示的光谱响应曲线以及(7)式,可以计

算得到这四个通道的定标系数。由于滤光片辐亮度计在经过一定时间的使用之后,滤光片本身会出现老化现象,其中心波长会与标称波长相比有所漂移,通过光谱响应曲线可以计算得到实际的中心波长(质心波长),具体结果如表 1 所示。

根据国际通用的测量不确定度的评估和表述规范^[13],对滤光片辐亮度计系统级定标过程的不确定度进行评价,如表 2 所示。

表 1 滤光片辐亮度计定标系数

Table 1 Calibration coefficients of filter radiometer

Channel /nm	Center wavelength /nm	Calibration coefficient / $[V/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})]$
753	754	0.496
865	862	0.630
900	904	0.489
1030	1035	0.332

表 2 滤光片辐亮度计定标不确定度评估

Table 2 Uncertainty of filter radiometer calibration

Components of uncertainty		Contribution / 10^{-3}	
Source's characterizations	Wavelength stability	753 nm	0.24
		865 nm	0.00327
		900 nm	0.235
		1030 nm	0.0241
	Radiance stability	0.747	
	Planar uniformity	1.23	
	Angular uniformity	0.850	
	Standard radiance detector's characterizations	Trap radiant power responsivity	0.65
		Responsivity interpolation	2.15
		$I-V$ gain	1.76
Aperture stop area		2.38	
Field stop area		2.45	
Distance between the two stops		3.99	
Filter radiometer's characterizations	Non-linearity	Instability	2.18
		753 nm	0.63
		865 nm	1.14
		900 nm	0.27
	Instability	1030 nm	1.84
		753 nm	1.41
		865 nm	0.74
		900 nm	1.03
Combined uncertainties		1030 nm	2.65
		753 nm	4.97
		865 nm	4.89
		900 nm	5.77
		1030 nm	5.02

由表 2 可以看出,对滤光片辐亮度计的四个定标通道,总的不确定度优于 0.58%。在不确定度的贡献中,定标光源引起的不确定度优于 0.17%,标准辐亮度探测器的不确定度优于 0.45%,滤光片辐

亮度计的不确定度优于 0.32%,其中标准辐亮度探测器的光阑面积引起的不确定度较大,可以通过改进测量手段来进一步减小测量的不确定度。

3.3 积分球观测比对实验

为了验证定标结果的准确性,与 CIMEL 公司的太阳辐射计 CE318 进行了比对实验,它是测量大气光学特性的滤光片辐射计^[14],有六个测量通道,中心波长分别为 440、500、675、870、1020、1640 nm。比对实验之前,在法国里尔科学技术大气光学实验室(LOA),按照 AERONET(全球气溶胶监测网)的标准流程进行了定标^[14-15],定标光源是灯照明的积分球光源,它通过“黑体→标准灯/漫射板→积分球”将辐射标准传递到 CE318,定标之后没有进行过室外实验,可以认为仪器的状态没有改变。

在比对实验中,使用灯-积分球作为观测光源,滤光片辐亮度计和 CE318 同时对该光源进行观测,CE318 使用日晕观测(AUR)和天空散射观测(SKY)两个模式进行辐亮度的测量,滤光片辐亮度计使用 753、865、900、1030 nm 四个通道进行辐亮度的测量,通过定标系数将测量得到的灰度值转化为辐亮度值。

由于 CE318 和滤光片辐亮度计的测量通道不同,为了将两者比对,就需要把 CE318 的测量数据

进行拟合运算,来得到滤光片辐亮度计四个测量通道的积分球辐亮度。灯-积分球的光谱分布接近于 2850 K 的黑体辐射,以普朗克公式作为拟合函数,可以得到积分球的光谱辐亮度曲线,如图 5 所示。

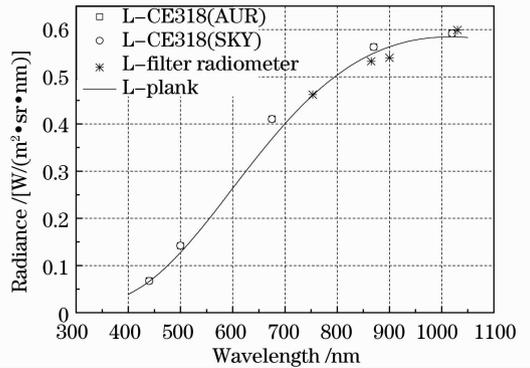


图 5 由 CE318 和滤光片测得的积分球辐亮度值对比
Fig. 5 Comparison of integrating sphere Radiance measured by CE318 and filter radiometer

根据 CE318 反演得到的积分球的辐亮度曲线,最终得到在滤光片辐亮度计的四定标波段比对结果如表 3 所示。

表 3 积分球测量辐亮度比对

Table 3 Comparison between integrating sphere radiance measured

Wavelength /nm	Radiance /[W/(m ² ·sr·nm)] (Planck-CE318 measured)	Radiance /[W/(m ² ·sr·nm)] (filter radiometer measured)	Difference /%
754	0.462	0.461	-0.216
862	0.546	0.532	-2.564
904	0.565	0.541	-4.248
1035	0.584	0.597	2.226

由表 3 的结果可以看出,在这四个波段处,两者的偏差在 4.25% 以内,差异产生的原因包括 CE318 溯源不确定度(3%~5%)^[14-15],滤光片辐亮度计溯源不确定度(小于 0.58%),灯-积分球光源的性能(0.084%),以及拟合算法所带来的误差。总体来说,两者的定标偏差(小于 4.25%)是在允许的偏差范围内的,与 NIST 在 2003 年使用 SIRCUS(激光导入积分球均匀光源)和灯-积分球定标太阳辐射计的偏差(2.5%~6%)^[16]相当,由此说明该方法是合理的。由于比对仪器 CE318 的测量通道过少,且其本身的定标不确定度较大,会影响比对实验的结果,所以下一步的工作将通过使用不确定度小且通道多的辐亮度计作为比对仪器,改进积分球辐亮度的反演算法,并和权威计量实验室之间进行比对实验来开展更加深入的研究。

4 结 论

本文针对遥感仪器高精度定标的要求,使用激光导入积分球光源来对多波段滤光片辐亮度计四个波段进行了系统级的定标,可调谐激光具有光谱带宽窄、光谱辐通量高的优点,且通过标准辐亮度探测器直接溯源于低温绝对辐射计,定标不确定度优于 0.58%。在四个波段的比对实验中,与 CE318 同时对积分球光源进行辐亮度的测量,相同通道反演的辐亮度差异仅在 4.25% 以内,说明了该方法的可行性。相较于基于标准辐射源的标准灯/漫射板的定标方法以及部件级的定标方法,该定标方法具有传递标准链短、不确定度来源少的优点,可以有效地提高辐亮度标准传递过程中的定标精度。滤光片辐亮度计可定期对实验室的定标积分球或星上定标的积分球进行辐射量值的监测,以反映积分球的老化、衰退等,并实

现对传感器的高精度辐射定标和量值传递。

参 考 文 献

- 1 H W Yoon, C E Gibson. Comparison of the absolute detector-based spectral radiance assignment with the current NIST-assigned spectral radiance of tungsten strip lamps [J]. *Metrologia*, 2000, 37(5): 429—432.
- 2 Li Youping, Yu Bingxi, Wang Yupeng, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 822—828.
李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 822—828.
- 3 Song Zongxi, Zhao Baochang, Gao Wei, *et al.*. Focal plane design of Chang'e-1 satellite CCD stereo-camera and laboratory radiation calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3508—3514.
宋宗玺, 赵葆常, 高伟, 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机焦平面设计与辐射定标[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3508—3514.
- 4 Yang Benyong, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. System design of the integrating sphere used for on-board calibration of visible-SWIR hyperspectral remote sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3545—3550.
杨本永, 张黎明, 陈洪耀, 等. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3545—3550.
- 5 S W Brown, G P Eppeldauer, K R Lykke. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(32): 8218—8237.
- 6 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 J Remote Sensing*, 2003, 24(2): 339—356.
- 7 J J Butler, R A Barnes. The use of transfer radiometers in validating the visible to shortwave infrared calibrations of radiance sources used by instruments in NASA's earth observing system [J]. *Metrologia*, 2003, 40(1): S70—S77.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, *et al.*. Development of laser illuminated integrating sphere source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 738—744.
徐秋云, 郑小兵, 李健军, 等. 外部导入激光的积分球辐射源的研制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 738—744.
- 11 Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiometric Photometric Chromaticity and Its Measurement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 7—8.
金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 7—8.
- 12 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun, *et al.*. Accurate 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 Barry N Taylor, Chris E Kuyatt. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. NIST Technical Note 1297 [M]. Darby: DIANE Publishing, 1994.
- 14 B N Holben, T F Eck, I Slutsker, *et al.*. AERONET—federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1—16.
- 15 Zhengqiang Li, Luc Blarel, Thierry Podrin, *et al.*. Transferring the calibration of direct solar irradiance to diffuse-sky radiance measurements for CIMEL sun-sky radiometers [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(10): 1368—1377.
- 16 Nordine Souaidia, Christophe Pietras, Giulietta Fargion, *et al.*. Comparison of laser-based and conventional calibrations of sun photometers [C]. *SPIE*, 2003, 5155: 61—72.

栏目编辑: 何卓铭