

太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究

翟文超¹ 李健军¹ 郑小兵¹ 李正强² 孟炳寰¹ 张 伟¹ 王先华¹

(¹ 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)
² 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要 利用可调谐激光器作为光源,以溯源于低温绝对辐射计的标准辐照度探测器作为传递标准,将可调谐激光导入积分球,通过功率稳定、退相干等措施,形成均匀、稳定、无偏的辐照度场。利用替代定标技术,对太阳辐射计 CE318 的 870 nm 直射通道的三个偏振通道(P1、P2 和 P3)和无偏通道(UP)的绝对光谱辐照度响应度进行了光谱扫描定标,获得这四个通道的光谱辐照度响应度,并预测了大气层顶太阳辐照度的信号值。最后,对定标过程的不确定度进行评价,三个偏振通道和无偏通道的定标不确定度分别达到了 1.83%、1.98%、1.73% 和 1.2%,与 Langley 定标法定标精度相当。

关键词 测量;定标;光谱辐照度;响应度;太阳辐射计

中图分类号 O432.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0412004

Research on Method of Calibrating Sun Channels of Sun Radiometers

Zhai Wenchao¹ Li Jianjun¹ Zheng Xiaobing¹ Li Zhengqiang² Meng Binghuan¹
Zhang Wei¹ Wang Xianhua¹

¹ Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China

² Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract A new calibration method of absolute spectral irradiance responsivity of sun radiometer named CE318 is described. In this method, a tunable laser and a standard irradiance detector which can be traced from the cryogenic absolute radiometer are used as source and transferring standard, respectively. In the experiment, to acquire the uniform, stable and unpolarized irradiance field, the laser which is stabilized by a laser power controller, wavelength by wavelength, is steered into an integrating sphere with which a speckle-removal device is equipped. By the vicarious calibration technique, the spectral irradiance responsivities of the 870 nm sun channels of CE318 consisting of three polarized channels (P1, P2 and P3) and an unpolarized channel (UP) are obtained and used to predict the top-of-the-atmosphere signals, respectively. In the last, the uncertainties of calibration are evaluated and reach to 1.83%, 1.98%, 1.73% and 1.2%, which are comparable to the counterparts of Langley method, the main method of calibration in this field.

Key words measurement; calibration; spectral irradiance; responsivity; sun radiometer

OCIS codes 120.4280; 120.5630; 120.3940; 120.0280

1 引 言

太阳辐射计广泛地应用于各种目的的局域及全球观测,可以测量太阳的直射照度和天空的漫射亮度,可以对气溶胶进行被动遥感观测,获得气溶胶的光学厚度、相函数、单次散射反射率和粒子数分布

等,对研究全球气候变化意义重大。目前,太阳辐射计已广泛用于气溶胶自动观测网(AERONET)全球观测网络^[1]。

目前,太阳辐射计的辐照度响应度定标主要使用 Langley 定标法^[2,3],通过拟合太阳辐射计的观测

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2011-11-21

基金项目: 国家 973 计划(2010CB950801)资助课题。

作者简介: 翟文超(1985—),男,博士研究生,主要从事光学辐射定标方面的研究。E-mail: wczhai@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、光学遥感和海洋光学等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

信号的对数值与大气质量随太阳高度角的线性关系,取纵截距的反对数即为太阳辐射计在大气层顶的信号读数值或电压值 $V_0(\lambda)$ 。严格按照 Langley 法定标的太阳辐射计称为主仪器。AERONET 目前的定标策略主要是通过主仪器传递定标的方法 (Master-travelling)^[1],传递的站点主要有美国国家航空和航天局 (NASA) 的戈达德航天飞行中心 (GSFC) 站和 Carpentras 站,传递的标准来自 Mauna_loa 和 Izane 高山站的主仪器,其定标的不确定度约为 2%^[4]。Langley 法属于外场定标,对于日照、海拔、大气、气象条件有严格要求,全球范围内能够满足要求的场地也仅有几处(全部位于国外),这导致 Langley 法的定标应用受到限制。

实验室定标因条件可控而不受上述苛刻因素的制约。通过模拟太阳辐照度光场可以获得太阳辐射计的绝对光谱辐照度响应度,实现对太阳辐射计直射通道定标。目前,太阳辐射计实验室定标方法主要有三种:灯-单色仪系统、使用均匀光源的光谱辐照度和辐亮度定标系统 (SIRCUS)^[4~6] 以及可调谐激光扫描形成均匀照度场定标系统。第一种方法光谱辐射通量低,典型的值约为 $1 \mu\text{W}$,不利于信噪比的提高,也制约了系统的动态范围^[5]。第二种方法,由于激光具有单色性好、波长连续可调和波长准确性高等优点,使之成为代替灯-单色仪系统的极佳选择。第三种方法是利用激光在太阳辐射计的有效孔径面上扫描形成网格阵列,如果能控制激光的稳定性,在合适的扫描间隔条件下,就可以得到一个均匀的照度场^[7]。这种方法最大的优点就是光通量极高,信噪比很好,但由于激光本身的偏振特性,对于偏振通道的定标有一定的局限性。

本文重点介绍实验室发展的上述第二种太阳辐射计实验室定标方法。利用可调谐激光器,将激光导入积分球,借助积分球及特殊设计的消相干装置,得到一个均匀、稳定、无偏的照度场,以标准辐照度探测器作为传递标准^[8~11],利用替代定标技术,实现对太阳辐射计 870 nm 通道的三个偏振通道(分别简称为 P1、P2、P3 通道)和一个无偏通道(简称为 UP 通道)的绝对辐照度响应度定标,联合大气层顶的太阳辐照度光谱,获得太阳辐射计直射通道在大气层顶端信号值 V_0 (定标系数)。

2 太阳辐射计的实验室定标原理

用来定标的太阳辐射计型号为 CE318-2,由法国 CIMEL 公司研制。

太阳辐射计实验室定标采用可调谐激光导入积分球形成均匀照度场作为定标光源,以溯源于低温辐射计的标准传递探测器作为传递标准。利用替代定标技术,获得太阳辐射计通道内的绝对光谱辐照度响应度,联合大气层顶的太阳辐照度光谱,获得太阳辐射计在大气层顶的信号值 V_0 。

该方法的基本原理如下。

标准传递辐照度探测器由陷阱探测器和精密孔径光阑构成。假设标准照度探测器的孔径光阑面积为 S ,测量的照度场的光谱辐照度为 $E(\lambda)$,其测量到的电压值为 $V(\lambda)$,假设标准探测器接收到的光功率为 $P(\lambda)$,则标准探测器的光谱辐照度响应度可表示为

$$R_E(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{E(\lambda)} = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)/S} = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)} S, \quad (1)$$

式中 $V(\lambda)/P(\lambda)$ 为陷阱探测器的功率响应度,用 $R_P(\lambda)$ 表示,即(1)式可以改写为

$$R_E(\lambda) = R_P(\lambda) S. \quad (2)$$

陷阱探测器的绝对功率响应度 $R_P(\lambda)$ 直接溯源于低温绝对辐射计^[8],孔径光阑的精确面积可以由光纤探头接触式测量^[12]或激光点阵扫描法非接触式测量^[13,14]。

假定标准辐照度探测器孔径光阑与积分球出口距离为 l_{trap} ,测量到的信号值(电压值)为 $V(\lambda)$,则标准探测器孔径光阑处的辐照度值 $E_{\text{trap}}(\lambda)$ 可表示为

$$E_{\text{trap}}(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{R_E(\lambda)}. \quad (3)$$

假定太阳辐射计孔径光阑与积分球出口距离为 l_{CE318} ,则根据平方反比定律就可以得到太阳辐射计 CE318 孔径光阑处的辐照度值 $E_{\text{CE318}}(\lambda)$:

$$E_{\text{trap}}(\lambda) l_{\text{trap}}^2 = E_{\text{CE318}}(\lambda) l_{\text{CE318}}^2. \quad (4)$$

太阳辐射计通道内的绝对光谱辐照度响应度 $R_{\text{CE318}}(\lambda)$ 可表示为

$$R_{\text{CE318}}(\lambda) = \frac{D_N(\lambda)}{E_{\text{CE318}}(\lambda)}, \quad (5)$$

式中 $D_N(\lambda)$ 为太阳辐射计测量的信号值。

由(5)式得到太阳辐射计通道内的绝对光谱响应度,乘以大气层顶端太阳辐照度值,在 870 nm 通道内积分,即可得太阳辐射计在大气层顶的信号值 V_0 ,

$$V_0 = \int R_{\text{CE318}}(\lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

式中 λ 为定标过程中所设置的波长, $R_{\text{CE318}}(\lambda)$ 为太阳辐射计的光谱辐照度响应度, $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 为大气层顶的太阳辐照度。

此处获得的 V_0 值和利用 Langley 法定标获得的 V_0 值,意义是完全一样的。

3 太阳辐射计直射通道实验室定标系统概述

如图 1 所示,可调谐激光通过分束镜,一束入射至波长计,进行激光波长的测量及监视,另一部分则经透镜聚焦、起偏、激光功率稳定后入射到积分球中,形成稳定、均匀且波长可连续调谐的照度场。由于激光光源固有的相干特性,会出现激光散斑效应,这会影响到积分球出射的光辐射的稳定性和均匀性,因此必须对激光光源进行退相干处理。实验装置中的退相干设备就是图 1 中的旋转漫反射板,旋转漫反射板由电机带动旋转,漫反射板本身可以作为积分球内壁的一部分(材料均为聚四氟乙烯),当电机的转速达到一定的程度时,就可以很好地退相干,达到去除激光散斑的效果^[15]。

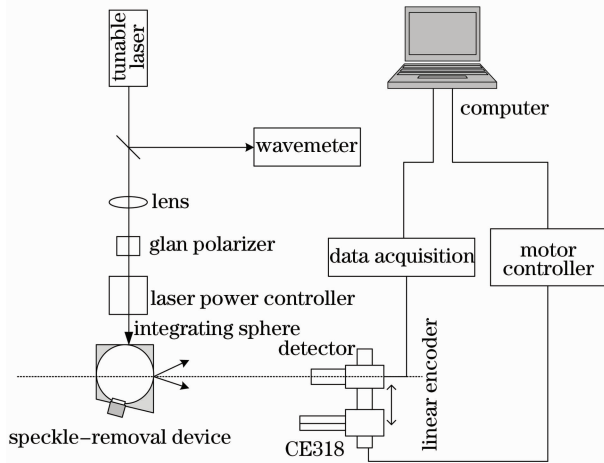


图 1 基于可调谐激光器的光谱辐照度响应度定标系统
Fig. 1 Tunable laser-based facility of spectral irradiance responsivity calibration system

标准照度探测器和太阳辐射计 CE318 固定在二维平移台上,调整太阳辐射计、标准辐照度探测器光轴与积分球中心法线方向重合,以消除“余弦效应”对定标结果的影响。

4 结果及不确定度分析

4.1 标准照度探测器的光谱辐照度响应度

标准辐照度探测器在 865 nm 和 900 nm 波段进行了绝对光谱功率响应度定标,在该波长范围内其他波段的绝对光谱功率响应度是通过内部插值方法获得的。标准探测器设计完成后,对增益阻抗进

行定标,以获得标准探测器在不同增益情况下的绝对光谱功率响应度。利用激光扫描精密测量孔径面积^[11,12]的方法获得标准辐照度探测器孔径光阑的面积,利用(1)式可以获得标准辐照度探测器在 860~880 nm 波段范围的绝对光谱辐照度响应度,如图 2 所示。

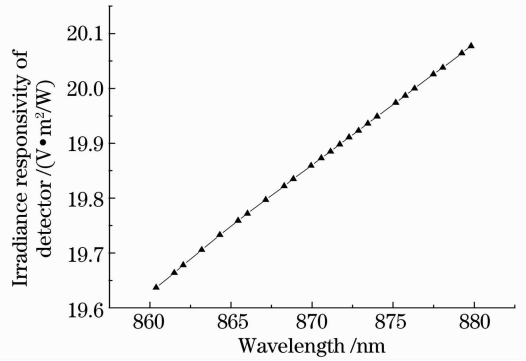


图 2 标准辐照度探测器光谱辐照度响应

Fig. 2 Spectral irradiance responsivity of the standard irradiance detector

4.2 太阳辐射计电子学增益的定标

本次定标是对太阳辐射计的太阳直射通道进行定标,为了提高信噪比,将 870 nm 通道的用户增益^[16]设置为 $F_2 = 50$,而实际对日观测时,增益设置为 $F_2 = 15$,因此,需要对此增益进行定标。但由于太阳辐射计是滤光片式辐射计,滤光片的半峰全宽约为 10 nm,即中心区域透射率高,边缘部分透射率低,因此滤光片会对该通道内不同波长的用户增益产生影响。定标时对用户增益比进行了波长扫描定标。

实验室使用的太阳辐射计为 CE318-2,其增益转化定义为^[1]

$$\frac{G_x}{G_y} = \frac{50F_x + 6}{50F_y + 6} \quad (7)$$

在相同的实验条件下,分别测量两种增益下的 D_N 值,得到用户增益比。两者测量并不同步,但间隔很小(约 1 min),近似认为实验条件完全相同。

从图 3 可以看出,增益比在中心区域几乎是常数,但在边缘变化很明显,这主要是测量信噪比低的原因所致,尤其是滤光片边缘区域。因此边缘部分并不能真实地反映用户增益之比。取中心区域的用户增益比的平均值作为最后的增益比,定标的太阳辐射计电子学增益与(7)式计算值的相对偏差为 1.76%。

4.3 太阳辐射计的非线性测量

太阳辐射计的非线性测量主要用来评估不同的

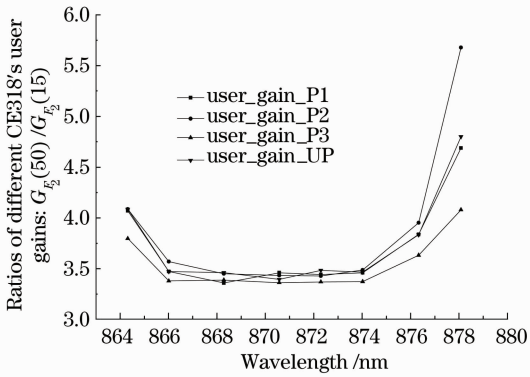


图 3 太阳辐射计 CE318 的用户增益比定标

Fig. 3 Calibration of the user-defined gains of CE318

入射光功率情况下,太阳辐射计响应变化情况。基于激光导入积分球形成的照度场比太阳经大气层后的照度场约低 2 个量级,因此,实验室定标过程中,进行太阳辐射计的非线性测量是很有必要的。

定标时,将激光波长设置在太阳辐射计 870 nm 通道的中心波长附近,递减激光器的输出功率,标准探测器和太阳辐射计交替测量,利用标准辐照度计的非线性测量结果来衡量 CE318 的非线性度,因为标准辐照度计的线性度是经过定标的^[17]。结果如图 4 所示。

由于标准辐照度探测器的非线性测量的联合不确定度优于 3.2×10^{-4} ,从图 4 可以看出,870 nm 的四个通道的响应线性优良。拟合结果也显示,线性相关度为 1。

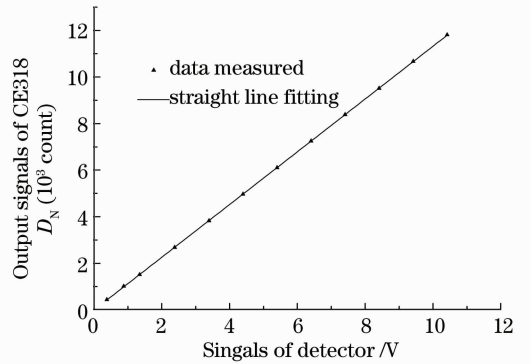


图 4 太阳辐射计的非线性测量

Fig. 4 Nonlinearity scales of sun radiometer

4.4 太阳辐射计孔径光阑位置

利用替代定标技术对太阳辐射计进行定标,由(4)式可知,需要确定太阳辐射计有效孔径光阑的位置。由于太阳辐射计孔径光阑封装于仪器内部,不易进行直接接触式测量,定标时,利用照度平方反比原理,获得测量信号值与位移的关系曲线,通过最小二乘法进行参数拟合获得太阳辐射计孔径光阑位置^[5]。

图 5 中,设积分球出口直径为 D ,积分球出口到光阑筒前端的距离为 l' ,光阑筒前端到孔径光阑的距离为 d 。设积分球出口处的辐亮度为 $L(\lambda, T)$,太阳辐射计孔径光阑处的辐照度为 E' ,则有如下关系成立:

$$E' = \pi L(\lambda, T) \sin^2 \theta = \pi L(\lambda, T) \frac{D^2}{4(l' + d)^2 + D^2} \quad (8)$$

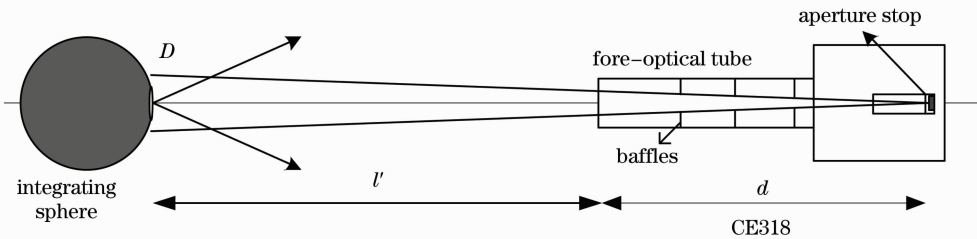


图 5 太阳辐射计 CE318 定标实验中有关距离的定义

Fig. 5 Definitions of the relational distances used for calibration of sun radiometer

通过测量不同距离 l' 下的信号值,用非线性最小二乘法拟合,得到 d ,拟合结果为 380.079 mm。

4.5 太阳辐射计的光谱辐照度响应度及定标系数

利用图 1 所示的装置,以约 1 nm 的波长间隔对太阳辐射计 870 nm 通道进行光谱扫描定标,获得太阳辐射计的光谱辐照度响应曲线,如图 6 所示。

将太阳辐射计四个通道的光谱辐照度响应度扫描定标数据以及美国材料试验协会 (ASTM) 2000

年的 E-490 太阳光谱数据^[18]代入到(6)式中,分别得到太阳辐射计的定标系数 $V_0(\lambda)$,四个通道的结果分别为:P1 通道为 12661;P2 通道为 12173;P3 通道为 12106;无偏通道(UP)为 25140。

由此可知,利用图 1 所示的装置,按照前文所述的定标原理可以在实验室条件下获得太阳辐射计的光谱辐照度响应度,并预测太阳辐射计在大气层顶的信号值 $V_0(\lambda)$,说明了这种定标方法的可行性。

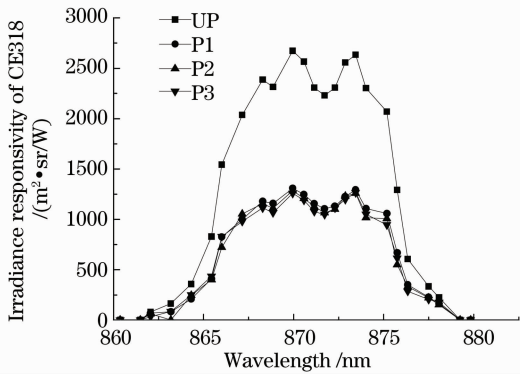


图 6 太阳辐射计的四个通道的光谱辐照度响应度
Fig. 6 Four spectral irradiance responsivities of the 870 nm channel of sun radiometer

4.6 不确定度分析

参照国际通用的测量不确定度评估和表述规

范^[19],对激光导入积分球方法定标太阳辐射计直射通道光谱辐照度响应度的不确定度进行评价,如表 1所示。

从表 1 可知,实验室对 CE318 的 870 nm 四个通道定标的合成不确定度接近 Langley 法定标的不确定度(约 2%)。在不确定度贡献中,太阳辐射计测量时的重复性不确定度贡献较大,这主要是信噪比较低的缘故,一方面是由于太阳辐射计的辐照度响应度本来就非常低,另一方面是由于激光导入积分球形成的照度场量级较低(比太阳照射约低 2 个量级),尤其是 P1、P2 和 P3 三个偏振通道,更加明显。另外,杂散光也是一个重要因素。提高照度积分球照度场的量级,并进一步减少杂散光,有望进一步降低定标的不确定度。

表 1 不确定度成分及贡献

Table 1 Components of uncertainty and their contributions

Components of uncertainty		Contributions	
Measurement of distances	Distance between integrating sphere and detector	4.82×10^{-4}	
	Distance between integrating sphere and CE318's fore-optical tube	8.14×10^{-4}	
	Position of CE318's aperture stop	6.8×10^{-3}	
Detector's characterizations	Interpolation of responsivity of detector	2.15×10^{-3}	
	I-V gain	1.76×10^{-3}	
	Measurement of aperture stop's area	2.38×10^{-3}	
	Repeatability	4.85×10^{-4}	
CE318's characterizations	Repeatability	P1	1.5×10^{-2}
		P2	1.68×10^{-2}
		P3	1.39×10^{-2}
		UP	6×10^{-3}
	Linearity of CE318	P1	3.18×10^{-4}
		P2	3.18×10^{-4}
		P3	3.18×10^{-4}
		UP	3.18×10^{-5}
Source's characterizations	Stability (2 h)	2.37×10^{-3}	
	Uniformity	1.2×10^{-3}	
	Polarization	6.35×10^{-3}	
Combined uncertainties	P1	1.83×10^{-2}	
	P2	1.98×10^{-2}	
	P3	1.73×10^{-2}	
	UP	1.2×10^{-2}	

5 结 论

利用激光导入积分球的方法,在实验室条件下,以溯源于低温绝对辐射计的标准辐照度探测器作为传递标准,利用替代定标的原理对太阳辐射计 CE318 870 nm 的四个通道在太阳直射模式(SUN

模式)下进行了绝对光谱辐照度响应度的定标,得到了太阳辐射计 870 nm 四个通道的定标系数,P1、P2、P3 和 UP 通道定标的不确定度分别达到了 1.83%、1.98%、1.73% 和 1.2%,与 Langley 定标方法相当。这种溯源于低温绝对辐射计的绝对定标方法是获取太阳辐射计通道精细光谱响应的有效技

术途径,初步验证了该方法在实验室定标中的可行性。通过进一步提高积分球输出照度场的量级及严格限制杂散光,有望进一步降低定标的不确定度。

参 考 文 献

- 1 Zhengqiang Li, Luc Blarel, Thierry Podvin *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
- 2 Beat Schmid, Christoph Wehrli. Comparison of sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21): 4500~4512
- 3 Wang Xianhua, Qiao Yanli, Philippe Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sun photometer system applied to aerosol robotic network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91
王先华, 乔延利, Philippe Goloub 等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 87~91
- 4 Steven W. Brown, George P. Eppeldauer, Joseph P. Rice *et al.*. Spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources (SIRCUS) facility at NIST[C]. *SPIE*, 2004, **5542**: 363~374
- 5 Steven W. Brown, George P. Eppeldauer, Keith R. Lykke. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(32): 8218~8237
- 6 Jinan Zeng, Howard W. Yoon, George P. Eppeldauer *et al.*. Spectral irradiance responsivity calibration of InSb radiometers using the improved IR-SIRCUS at NIST[C]. *SPIE*, 2009, **7453**: 74530N
- 7 Ville Ahtee, Steven W. Brown, Thomas C. Larason *et al.*. Comparison of absolute spectral irradiance responsivity measurement techniques using wavelength-tunable lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(20): 4228~4236
- 8 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%的绝对光谱响应率标准探测器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 749~752
- 9 Yang Zhaojin, Yu Shuai, Xie Qi. Radiation metrology technology after into 21 century [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(3): 031210
杨照金, 于 帅, 解 琪. 迈入 21 世纪的光辐射计量测试技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(3): 031210
- 10 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Advanced calibration method for sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1337~1342
徐秋云, 郑小兵, 张 伟 等. 太阳辐射计先进定标方法研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1337~1342
- 11 Chen Hongyao, Zhang Liming, Zou Peng *et al.*. 400~900 nm spectral irradiance of cryogenic radiometer-based irradiance standard lamp using system level calibration method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3349~3353
陈洪耀, 张黎明, 邹 鹏 等. 系统级定标方法实现基于低温辐射计的标准灯 400~900 nm 波段光谱辐照度 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3349~3353
- 12 B. Muralikrishnan, J. A. Stone, J. R. Stoup. Area measurement of knife-edge and cylindrical apertures using ultra-low force contact fibre probe on a CMM [J]. *Metrologia*, 2008, **45**(3): 281~289
- 13 E. Ikonen, P. Toivanen, A. Lassila. A new optical method for high-accuracy determination of aperture area [J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 369~372
- 14 Sheng Jianjun, Zhang Liming, Li Shuang *et al.*. Optical method for determination of aperture area at high accuracy [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(2): 117~120
盛建军, 张黎明, 李 双 等. 光阑面积的精确测量方法 [J]. *大气与环境光学学报*, 2006, **1**(2): 117~120
- 15 Xu Qiuyun, Li Yanan, Zhai Wenchao *et al.*. Quantitative analysis of laser speckle removal [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(5): 32~36
徐秋云, 李雅男, 翟文超 等. 激光散斑去除效果定量分析 [J]. *光电工程*, 2010, **37**(5): 32~36
- 16 CIMEL Corporation SunPhotometer User Manual. Version 4.6 [M]. Paris: CIMEL électronique, 2001
- 17 Chen Feng, Li Shuang, Wang Ji *et al.*. Linearity measurement of accurate photodetector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 878~893
陈 风, 李 双, 王 骥 等. 高精度光电探测器的线性测量 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 878~893
- 18 American Society for Testing and Materials. 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00 [EB/OL]. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/ASTM2000.html>, 2000
- 19 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

栏目编辑: 何卓铭