

文章编号: 0253-2239(2010)11-3349-05

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

陈洪耀^{1,2} 张黎明^{1,2} 邹鹏^{1,2} 谢萍^{1,2} 郑小兵^{1,2} 乔延利^{1,2}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
² 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 为提高光辐射工作标准精度和满足遥感器高精度辐射定标需要,开展了以低温辐射计为初级标准,滤光片辐射计为传递标准的标准灯光谱辐照度实现研究。通过滤光片辐射计响应的系统级定标、辐照度标准灯物理模型和递归迭代优化算法,由滤光片带宽下的积分响应得到辐照度标准灯的连续光谱分布。系统级的定标方法避免了滤光片透射率、几何因子测量和使用与标定状态不一致引入的不确定度。初步结果表明,该方法实现的400~900 nm波段标准灯光谱辐照度与基于国际温标(ITS-90)高温黑体标定的结果相对差别在后者的不确定度范围之内。在国内尝试实现了基于低温辐射计的标准灯光谱辐照度标准传递,对提高光辐射计量、辐射测温以及遥感器特别是高光谱遥感器辐射定标精度有重要意义。

关键词 遥感;低温辐射计;辐射定标;高光谱遥感;光谱辐照度;定量遥感;系统级定标

中图分类号 TN080 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3349

400~900 nm Spectral Irradiance of Cryogenic Radiometer-Based Irradiance Standard Lamp Using System Level Calibration Method

Chen Hongyao^{1,2} Zhang Liming^{1,2} Zou Peng^{1,2} Xie Ping^{1,2} Zheng Xiaobing^{1,2} Qiao Yanli^{1,2}

(¹ Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract To improve the accuracy of radiation work standards and meet the urgent need of high-accuracy remote sensors calibration, a study about establishment of irradiance of standard lamp with spectrum range from 400 to 900 nm is carried out using the cryogenic radiometer as the primary standard and filter radiometer as the transfer standard. Through with a recursive iterative optimization algorithm, a physical model of the irradiance standard lamp and a filter detector spectral response system level calibration by a laser imported integrating sphere, the continuous spectral distribution of the irradiance standard lamp can be calculated. The method of system level calibration avoids the uncertainty induced by filter transmittance, geometric factor measurement uncertainty and discord between use and calibration states. Preliminary results show that the difference between standard lamp irradiance calibrated by ITS-90 black body and calculated value by the method is within the uncertainty of calibration. The transfer stand of an irradiance standard lamp based on cryogenic radiometer is tried in China. The method could greatly improve the accuracy of current optical radiation work standard. The research has important significance in the optical radiation measurement and remote sensors, especially in hyper-spectral remote sensors calibration.

Key words remote sensing; cryogenic radiometer; radiometric calibration; hyper-spectral remote sensing; spectral irradiance; quantitative remote sensing; system level calibration

收稿日期: 2010-01-11; 收到修改稿日期: 2010-04-10

作者简介: 陈洪耀(1980—),男,博士研究生,主要从事高光谱遥感器光谱与辐射定标和漫反射标准反射率绝对测量等方面的研究。E-mail: hyaochen@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 张黎明(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感器辐射定标与标准传递等方面的研究。E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

1 引 言

随着科学研究、工业商贸和国民经济的发展,对光辐射测量的精度提出了越来越高的要求。在遥感应用领域,为了进行全球气候变化监测、地球生物圈物理化学量的反演以及不同仪器不同遥感平台上的数据比对,对提高遥感辐射定标精度有迫切需求。例如,美国计划在2014年发射的静止轨道气象卫星GOES-R上的载荷先进基线成像仪(ABI)的绝对辐射定标精度在15年内要求小于3%^[1]。传统的基于ITS-90的高温黑体辐射基准在可见波段的不确定度在0.1%~0.3%,通过标准传递,到达应用阶段不确定度往往高于5%^[2],已经制约着辐射定标等光辐射测量精度的进一步提高。

20世纪80年代发展起来的,采用电替代原理的低温辐射计被证明可以作为高精度光辐射初级标准,采用滤光片辐射计作为传递标准或者工作标准达到了0.035%的精度^[3],由于其可以选用和多光谱遥感器带宽一致的滤光片,因此在中国FY系列气象卫星和美国对地观测计划(EOS)等多光谱遥感器的辐射定标中,滤光片辐射计发挥了重要的作

用^[4,5]。最近几年,随着高光谱遥感技术的迅速发展,迫切需要得到高精度连续的辐射标准。辐照度标准灯因其具有高的稳定性,良好的重复性和连续的光谱分布是传统的辐射工作标准和传递标准^[6]。Kärhä P, Corredera and Liu等利用其近似黑体辐射的物理模型和递归迭代优化算法,通过对滤光片辐射计光谱响应、滤光片透射率和光阑面积的分立标定,由滤光片带宽内的积分响应得到了辐照度标准灯连续的光谱分布^[7~9]。但是采用对滤光片辐射计分立标定的方法会因探测器光谱响应、滤光片透射率和几何因子的测量引入不确定度。更重要的是,采用分立标定的方法标定与使用状态的不一致会引入不确定度甚至会导致错误结果。滤光片辐射计系统级的定标,避免了上述的不确定度因素。初步实验结果与传统的基于高温黑体辐射源标定的比较,验证了该方法的可行性。

2 实现原理

基于低温辐射计的标准灯光谱辐照度实现原理如图1所示。

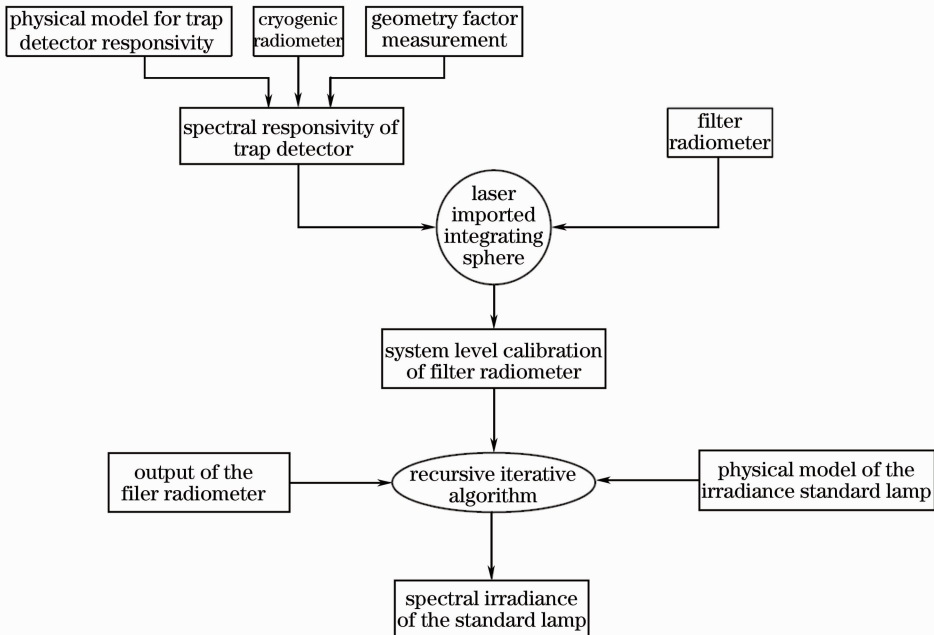


图1 光谱辐照度测量实现原理和示意图

Fig. 1 Realization scheme of the spectral irradiance measurements

研究表明,辐照度标准灯是连续光谱,没有吸收和发射谱线,其光谱分布非常接近黑体辐射^[6],可以用物理模型 $E_c(\lambda)$ 精确表示。滤光片辐射计在第 k 个滤光片下测量标准灯辐照度时,理论计算的光电流可以表示为

$$i_{c,k} = \int_{\lambda} E_c(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 $E_c(\lambda)$ 为标准灯的光谱辐照度, $R(\lambda)$ 为滤光片辐射计的系统级光谱响应函数。实际测量的光电流可表示为

$$i_{m,k} = \frac{V_{m,k}}{R_0}, \quad (2)$$

式中 $V_{m,k}$ 为第 k 个滤光片测量下探测器输出的电压值, R_0 为探测器放大电路反馈电阻。

利用递归迭代优化算法,使(2)式小于一定的阈值 ε ,可得到模型中的参数,从而得到标准灯的连续光谱辐照度:

$$E_{CW}(A;B;C) = \sum_{i=0}^N \left[\frac{i_c(\lambda_i) - i_m(\lambda_i)}{i_m(\lambda_i)} \right]^2, \quad (3)$$

式中 A, B, C 为待求模型参数, N 为滤光片的个数。(3)式的优化计算采用 Nelder-Mead 提出的单纯形算法^[10]。

Andor 等^[11~13]对辐照度标准灯物理模型进行了研究,其可以表示为包括泡壳透射率在內的灯丝等效发射率与普朗克公式相乘。在 400~900 nm 波段由于灯丝发射率与波长接近成线性关系,因此可以表示为如下形式:

$$E_c(\lambda) = (1 + A\lambda)\exp(B + C/\lambda)/\lambda^5, \quad (4)$$

式中 $\exp(B + C/\lambda)/\lambda^5$ 为 $hc/\lambda \gg KT$ 时等效普朗克函数,这里 K 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。

为了验证选用物理模型对测量辐照度标准灯的适用性,用基于高温黑体辐射源标定的同一标准灯数据,代入标准灯的模型优化计算,得到其数学表达式,然后代入波长点,计算出的结果与标定结果的相对差别如图 2 所示。其中标定的波长间隔为 10 nm,选取优化计算的四个波长分别为 412, 670, 750 和 860 nm 与测量用到的滤光片中心波长接近。除少数几个点外,大部分通过模型计算得到的辐照度值和标定的结果的相对差别在 0.5% 以内,表明选用的物理模型适合该类型辐照度标准灯。

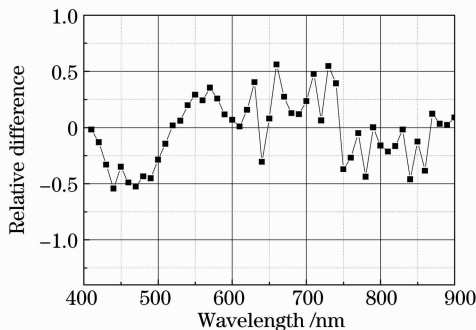


图 2 模型计算得到的辐照度和标称值之间的相对差别
Fig. 2 Relative difference between the calculated value and nominal value of the irradiance

3 实现过程

基于低温辐射计的辐照度标准灯光谱辐射的实

现主要包括滤光片辐射计的系统级定标和用该辐射计对标准灯的测量。由于条件限制,用到的辐射计是用来测辐亮度的,因此,实验中是直接测量标准灯照明的漫射板反射辐亮度,这里漫射板的作用是把测量到的辐亮度转化为标准灯的辐照度。

3.1 滤光片辐射计的系统级定标

滤光片辐射计系统级的定标如图 3 所示^[14,15]。

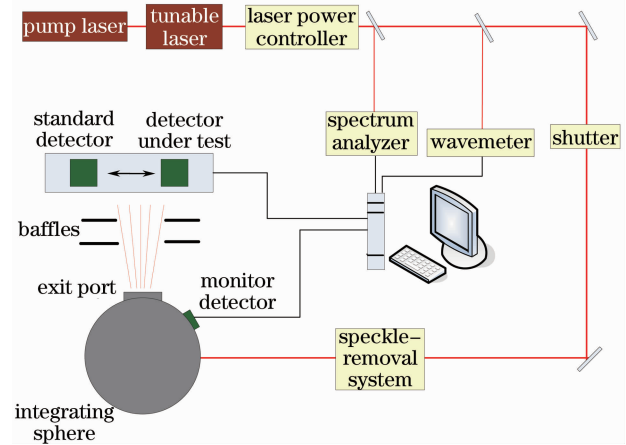


图 3 滤光片陷阱辐射计系统级定标示意图

Fig. 3 Schematic diagram of filter trap radiometer system level calibration

图中所示的标准探测器是和待标定的滤光片辐射计有相同的结构^[16],其直接溯源到低温辐射计,绝对辐亮度的得到是通过标准探测器几何因子包括光阑面积和两个光阑之间距离的精密测量得到的^[17],采用可调谐激光导入的积分球辐射源为辅助光源具有单色性好,辐射能量高,杂散光影响小等优点。定标过程中激光波长的间隔为 1 nm,优化计算用三次样条插值为 0.1 nm 间隔。

3.2 辐照度标准灯的测量

辐照度标准灯的测量如图 4 所示。首先,用准直激光器调整辐照度标准灯和漫射板,使得灯丝平面和漫射板前表面保持平行,两者距离为 50 cm 且中心高度一致,调节过程中准直激光通过灯丝平面中心。然后用另一台准直激光器和旋转台,调节滤光片辐射计,使得辐射计的测光轴与漫射板法线之间夹角为 45° ,通过辐射计测光轴的激光束在漫射板上的交点与另一激光束和漫射板的交点重合。为减少杂散光的影响,在标准灯和漫射板之间增加消杂散光光阑。标准灯采用精度为 0.05% 的恒流电源供电,用一个 0.01Ω 的标准电阻和六位半的数字电压(DVM)表监视电流波动。标准灯和滤光片辐射计稳定 30 min 后,开始自动采集数据。在测量过程中室内的温度为 24°C ,湿度为 54%,滤光片采用

精密温控使其保持温度 $(23 \pm 0.2) \text{ }^\circ\text{C}$ 。标准灯电压为 110 V , 电流为 8.65 A 。标准灯的辐照度 E 与测量的辐亮度 L 之间的关系为

$$L(\lambda) = E(\lambda)R(0,45,\lambda) \frac{1}{\pi}, \quad (5)$$

式中 $R(0,45,\lambda)$ 是漫射板在 0 入射, 45° 反射时的双向反射比因子(BRF)。

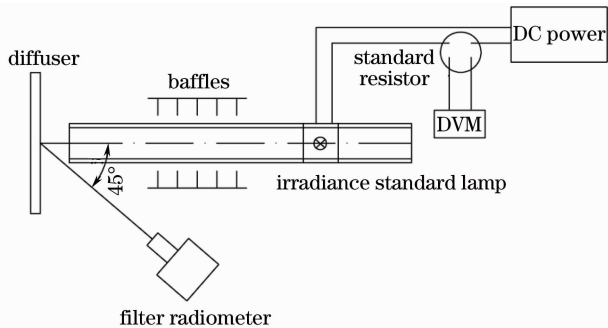


图 4 辐照度标准灯测量的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement of irradiance standard lamp

3.3 结果

通过优化计算得到辐照度标准灯在距离灯丝 50 cm 平面上的 $400 \sim 900 \text{ nm}$ 波段光谱辐照度如图 5 所示。计算得到的滤光片通道内积分响应与实际测量的相对差别如表 1 所示。

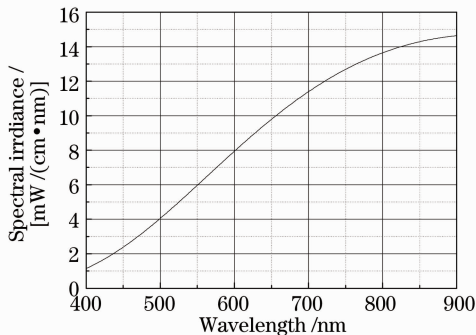


图 5 辐照度标准灯的光谱辐照度

Fig. 5 Spectral irradiance of the standard lamp

表 1 计算结果与实际测量的相对差别

Table 1 Relative difference between measured and calculated value

Effective wavelength /nm	$(i_c - i_m)/i_c (\times 10^5)$
412	-0.4149
670	6.5912
750	-9.5894
865	3.4146

4 分析讨论

为了验证该实现方法的正确性,比较了同一辐

照度标准灯在相同的条件下,基于低温辐射计计算得到的光谱辐照度(E_{cr})与基于 ITS-90 国际温标高温黑体标定的结果(E_{bb})。两者的相对差别如图 6 所示,最大的差别为 3.8% ,其中标定的不确定度在 $3.2\% \sim 4.6\%$ 之间($k=2$)。由于条件限制,基于低温辐射计的方法是通过测量漫射板反射辐亮度,由漫射板 $0/45^\circ$ BRF 转化得到标准灯辐照度的,因此,两者的差别实际还包含了 BRF 测量不确定度引起的那部分。

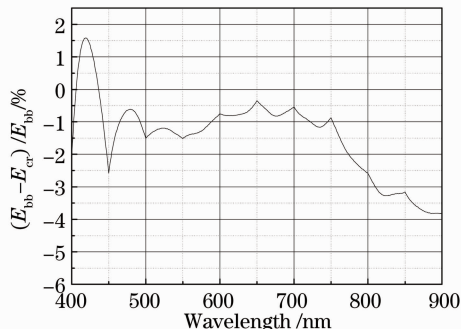


图 6 高温黑体标定的结果与低温辐射计计算结果的相对差别

Fig. 6 Relative difference between calibrated value based on blackbody and value by cryogenic radiometry

初步结果表明,以低温辐射计为初级标准,通过滤光片辐射计的系统级定标结合辐照度标准灯物理模型和优化计算得到的标准灯光谱辐照度与基于 ITS-90 高温黑体标定结果的相对差别在合理的范围之内,证明了该实现方法的可行性。由于低温辐射计其国际公认的高精度和较短的标准传递链路,该方法能很大程度提高目前光辐射工作标准的精度。为实现这一预期还需要深入的研究、全面的不确定度评估以及和权威计量实验室之间的比对。

滤光片辐射计系统级定标过程中标准探测器的精度和辐照度标准灯物理模型是该实现方法两个最大的不确定度因素。前者主要来自标准探测器几何尺寸测量的不确定度,后者主要是缺乏国际公认的准确物理模型,且为了得到模型中的几个参数,需多个通道的测量和计算。利用变温黑体和数学计算,理论上分析可以消除上述的两个最大的不确定度因素。

5 结 论

利用辐照度标准灯近似黑体辐射的物理模型和递归迭代优化算法,通过对滤光片辐射计基于低温辐射计的系统级定标,由滤光片带宽内的积分响应

得到了辐照度标准灯连续的光谱分布。采用的系统级定标方法减少了文献报道的采用分立方法标定带来的不确定度。相同条件下,基于低温辐射计采用系统级定标计算得到的辐照度与基于 ITS-90 高温黑体标定结果的相对差别最大为 3.8%,其在标定的不确定度范围之内。

致谢 感谢通用光学定标与表征技术重点实验室张伟高级工程师和刘文超在系统定标中做的辛勤工作,感谢徐秋云博士绘制了系统级定标的示意图。

参 考 文 献

- 1 J. C. Bremer, J. C. Criscione, M. S. Maxwell *et al.*. Calibration of the solar reflective channels in an integrated operational weather satellite system in the era of NPOESS and GOES-R[C]. *SPIE*, 2005, **5658**: 38
- 2 H. J. Kostkovski. *Reliable Spectroscopy* [M]. Maryland: Spectroradiometry Consulting, 1997. 162
- 3 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
- 4 Zhou Lei, Peng Nina, Zhang Liming *et al.*. Detector based field radiometric calibration for the visible band of multi-channel scanning radiometer of satellite FY-2-05 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, **22**(1): 20~25
周磊,彭妮娜,张黎明等. 基于标准探测器的 FY-2(05)星扫描辐射计可见通道外场定标[J]. *遥感技术与应用*, 2007, **22**(1): 20~25
- 5 J. J. Butler, B. L. Markham, B. C. Johnson *et al.*. Radiometric measurement comparisons using transfer radiometers in support of the calibration of NASA's earth observing system (EOS) sensors[C]. *SPIE*, 1999, **3870**: 180
- 6 J. Metzdorf, A. Sperling, S. Winter *et al.*. A new FEL-type quartz-halogen lamp as an improved standard of spectral irradiance [J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 423~426
- 7 T. Kübarsepp, H. W. Yoon, S. Nevas *et al.*. Comparison of spectral irradiance scales between the NIST and the HUT[J]. *Metrologia*, 2002, **39**(4): 399~402
- 8 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
- 9 P. Kärhä, P. Toivanen, F. Manoochchri *et al.*. Development of a detector-based absolute spectral irradiance scale in the 380-900-nm spectral range [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(34): 8909~8918
- 10 J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright *et al.*. Convergence properties of the nelder-meard simplex method in low dimensions [J]. *SIAM J. Optim.*, 1998, **9**(1): 112~147
- 11 L. K. Huang, R. P. Cebula, E. Hilsenrath. New procedure for interpolating NIST FEL lamp irradiances[J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 381~386
- 12 G. Andor. New data-reduction method in detector-based spectral-irradiance measurements[J]. *Metrologia*, 1995, **32**(6): 495~496
- 13 Dai Caihong, Lü Zheng, Yu Jialin *et al.*. Data processing method based on physical model for spectral irradiance standard lamps [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2009, **30**(1): 6~10
代彩红,吕正,于家琳等. 基于物理模型的光谱辐射照度标准灯数据处理方法[J]. *计量学报*, 2009, **30**(1): 6~10
- 14 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
- 15 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Radiometric characteristics test of integrating sphere source using wavelength-tunable laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1310~1314
徐秋云,郑小兵,张伟等. 利用可调谐激光的积分球光源辐射特性测试[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1310~1314
- 16 G. P. Eppeldauer, Miklós Rácz. Design. Characterization of a photometer colorimeter standard [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **30**(13): 2621~2631
- 17 Sheng Jianjun, Zhang Liming, Zheng Xiaobing *et al.*. Optical method for accurate measurement on the area of aperture diaphragm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3): 534~537
盛建军,张黎明,郑小兵等. 精确测量孔径光阑面积的光学方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(3): 534~537