

文章编号 1004-924X(2016)08-1902-06

阵列式光谱辐射计光学参数测量

吴志峰^{1*}, 代彩红¹, 王彦飞¹, 邹巨洪²

(1. 中国计量科学研究院 光学与激光计量科学研究所, 北京 100029;

2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要:研究了阵列式光谱辐射计校准过程中涉及的杂散光和带宽等问题。实验比较了阵列式光谱辐射计在氙灯和卤钨灯照射下进行紫外辐射测量的差异,对差异的来源—杂散光部分进行了测评。采用一组已知透过率的滤光片,通过采集有滤光片和无滤光片条件下卤钨灯的光谱,对阵列式光谱辐射计的杂散光大小进行评价,并评估了杂散光在紫外辐射测量中引起的数值偏差。实验测量了不同的阵列式光谱辐射计采集窄带光源的结果,对阵列式光谱辐射计的带宽在辐射照度计算中的影响进行评估。实验结果表明:卤钨灯照射下部分阵列式光谱辐射计在紫外 300 nm 处的杂散光比例高达 30% 以上,制约了紫外辐射测量的可靠性;氙灯照射下阵列式光谱辐射计在 300 nm 的杂散光比例可以降至 5% 左右;阵列式光谱仪的带宽限制了其能够准确测量光源的最小测量半高宽,几种不同带宽的阵列式光谱辐射计在 365 nm 的测量偏差高达 4%。得到的结果表明:阵列式光谱辐射计的杂散光、带宽等光学特性对测量结果的准确性影响很大。

关键词:阵列式光谱辐射计;紫外辐射;杂散光;带宽;标定

中图分类号:O432.1;TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.1902

Measurement of optical parameters for array spectroradiometers

WU Zhi-feng^{1*}, DAI Cai-hong¹, WANG Yan-fei¹, ZOU Ju-hong²

(1. Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

2. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: wuzf@nim.ac.cn

Abstract: Several kinds of optical problems involved in calibration of an array spectroradiometer were investigated, such as ultraviolet radiation, stray light, and bandwidth. The difference of ultraviolet radiation measurement of the array spectroradiometer under a xenon lamp and a tungsten halogen lamp was compared and the stray light from the measurement was evaluated. The spectra of the tungsten halogen lamp without and with optical filters were measured by using the array spectroradiometer and the deviation caused by the stray light in the ultraviolet radiation measurement was estimated. Furthermore, the narrow spectral widths captured by different spectroradiometers were measured and the effects of the bandwidths of the spectroradiometers on irradiation calculation were discussed. The experimental results for some array spectroradiometers show that the contribution of the stray light from the tungsten halogen lamp at 300 nm can be as high as 30%, and that from the xenon lamp can be around 5%. Moreover, the bandwidth of the spectroradiometers limits its ability to measure the nar-

收稿日期:2016-03-22;修订日期:2016-05-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41305140)

row spectral width for lamps, and the measuring deviation with different bandwidths can be as high as 4% at 365 nm. These results demonstrate that the stray light and the bandwidth of array spectroradiometers are vital to its measurement accuracy.

Key words: array spectroradiometer; ultraviolet radiation; stray light; bandwidth; calibration

1 引言

光谱辐射度应用范围广泛,涉及遥感探测^[1-2]、光生物安全^[3]、材料老化^[4]等众多行业。长久以来,光谱辐射计是实现光谱辐射探测的重要仪器,用于测量光谱辐射照度、光谱辐射亮度以及色温度^[5-6]。传统的光谱辐射计通过机械扫描实现光栅或棱镜分光,经光电探测器探测从而实现不同波长的光谱辐射量测量。但受限于较大的体积和重量,以及精密的机械结构和光学系统,它们仅适合实验室操作,往往难以应用于实验室外,尤其是野外。随着电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)和光电二极管阵列(PhotoDiode Array, PDA)探测器的飞速发展,阵列式探测器被广泛应用于光谱辐射计。各种小型化、微型化的阵列式光谱辐射计不断涌现,国内许多单位也开展了基于阵列式探测器的光谱辐射计研究^[7-10]。阵列式光谱辐射计结构紧凑,无需机械控制,减轻了仪器重量,改善了移动稳定性。同时,阵列式光谱辐射计可以实现全波段数据的快速采集,大大节省了测量时间。阵列式光谱辐射计的测量快捷性和易于携带性使其应用越来越广泛。

阵列式光谱辐射计使用前,往往需要通过辐射定标,经多级量值溯源链,最终溯源至国家计量院的基标准,从而实现仪器至国际单位制的溯源,满足测量一致性的基本要求。辐射定标的准确度既取决于辐射定标光源的准确度,也依赖于仪器自身的性能。辐射定标光源的最小测量不确定度可以通过减少量值溯源链,直接溯源至国家计量院来实现。因此,阵列式光谱辐射计的测量不确定度最终归结为对该仪器光学特性的考察。目前,国内外针对阵列式光谱辐射计特性的实验和理论研究日益增多,如阵列式光谱辐射计的短期稳定性、温度稳定性、测量非线性、杂散光和带宽等^[11-16]方面。一般地,阵列式探测器的光谱响应范围、不同波段的光谱响应灵敏度、动态测量范

围、像素点的个数等指标直接关系到阵列式光谱辐射计的光学性能。另外,阵列式光谱辐射计内部的光路设置、焦距、镜片的色像差、光栅质量等,会影响到最终的杂散光、信噪比、带宽等特性。

目前,阵列式光谱辐射计常用来进行紫外波段测量,如太阳光谱测量。然而,测量的准确性与真实光谱差异较大,难以保证数据的一致性,带来了许多的问题。同时,阵列式光谱辐射计定标光源和测量光源的光谱不匹配会严重影响测量的准确性。本文针对阵列式光谱辐射计紫外测量、杂散光和带宽等问题展开了讨论,从而为光谱辐射计紫外波段的测量提供借鉴。

2 阵列式光谱辐射计的工作原理

阵列式光谱辐射计主要由入射光学系统、准直和分光系统、探测系统以及软件系统组成。入射光学系统常采用光学光纤、白板或积分球导入光辐射信号。准直和分光通过凹面镜、光学光栅或光学棱镜实现。阵列式探测器接收不同波长的光谱,经光电转换后将数值传递至计算机,最终由光谱辐射计软件处理采集到的数据。



图1 阵列式光谱仪校准装置

Fig. 1 Calibration setups of array spectroradiometer

图1给出了阵列式光谱辐射计的校准光路图。标准灯灯丝中心距离光谱辐射计的入射光学中心500 mm,标准灯灯丝主轴与光谱辐射计的入射光学主轴重合。标准灯和光谱辐射计中间设置光阑,光阑开口尺寸根据几何光路确定。测量系统位于暗室,屏蔽杂散光。

3 阵列式光谱辐射计的测量实验

3.1 紫外测量

实验采用卤钨灯和氙灯两种光源一起用于紫外测量研究。卤钨灯和氙灯在特定距离下的光谱辐射照度已知,通过采集特定距离下光谱辐射计的响应信号,对光谱辐射计的光谱响应度进行定标。

实验室比较了 300~400 nm 波段光谱辐射计采用溴钨灯和氙灯的定标系数。图 2 给出了卤钨灯和氙灯的定标差异。可以看出,测量值在 300 nm,两者差异高达 40%;在 350~400 nm 两者差异较小,在 3.5%以内。

图 3 给出了 50 cm 距离下卤钨灯和氙灯的光谱辐照度。可以看出,卤钨灯在 250~1 100 nm 光谱辐照度变化约为 3 个数量级。与卤钨灯不同,氙灯在 250~1 100 nm 的光谱辐照度变化小于 1 个数量级。很显然,卤钨灯和氙灯的光谱差异极大。图 2 中的差异是由于光谱不匹配带来的,光谱辐射计测量值偏大可能因为杂散光的干扰。

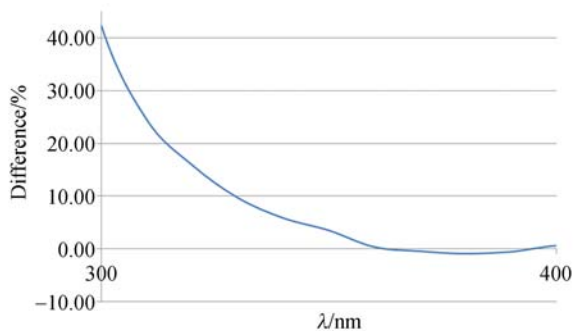


图 2 卤钨灯与氙灯的定标系数差异

Fig. 2 Difference between measurement coefficients using tungsten halogen lamp and xenon lamp

3.2 杂散光测量

杂散光通常可以分为两种:一种由测量系统设计引起,如实验室背景反射,阵列光谱辐射计接收到的辐射并非仅来自测量光源的直接入射;第二种由阵列式光谱辐射计自身带来的,仪器内部的阵列探测器接收到来自非光路设计的光谱辐射。第一种可以通过基于实验经验的系统优化设计来消除;第二种则需针对仪器进行测试。这里仅讨论了第二种杂散光的抑制。

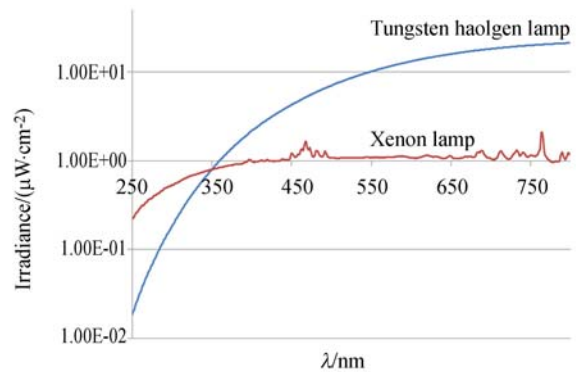


图 3 卤钨灯和氙灯的光谱辐射照度值

Fig. 3 Irradiances of tungsten halogen lamp and xenon lamp measured with of array radiometer

在 400~1 000 nm 卤钨灯的光谱辐射照度明显大于氙灯,实验采用黄玻璃-波长大于 400 nm 的长通滤光片和 365 nm 滤光片-波长小于 400 nm 的带通滤光片测试阵列式光谱辐射计。实验先测量阵列式光谱辐射计在卤钨灯下的信号,然后依次将黄色玻璃、365 nm 滤光片放置在仪器的入口前测量卤钨灯信号,最后将黄色玻璃和 365 nm 滤光片同时放置在卤钨灯前测量信号。滤光片透过率为:

$$\tau(\lambda) = \frac{S'(\lambda)}{S(\lambda)} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $\tau(\lambda)$ 是光谱辐射计测量的滤光片透过率, $S'(\lambda)$ 是采用滤光片在波长 λ 处采集的信号, $S(\lambda)$ 是无滤光片在波长 λ 处采集的信号。由于滤光片的透过率已知,可以通过比较光谱辐射计测得的透过率和真实的透过率,来判定仪器的杂散光水平。对于理想的光纤光谱仪,通过式(1)计算得到的透过率应等于真实的透过率。

图 4 蓝线是阵列式光谱辐射计测量的黄玻璃透过率,红线是 365 nm 滤光片的透过率,绿线是黄色玻璃和 365 nm 滤光片一起的透过率(彩图见期刊电子版)。黄色玻璃在 300~400 nm 的真实透过率为 0,因此阵列式光谱辐射计仅接收波长大于 400 nm 的光谱辐射信号。然而,在波长小于 400 nm 波段,阵列式光谱辐射计测量的黄色玻璃透过率显然不为 0。实验表明,卤钨灯照射下 400 nm 以后的光谱辐射信号会为紫外波段带来很严重的杂散光。因此,采用氙灯定标的仪器测量卤钨灯时,300~350 nm 采集的信号部分

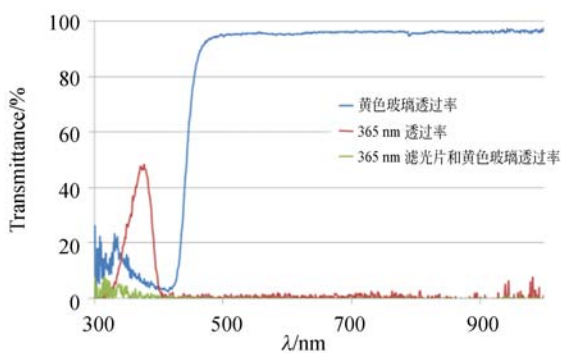


图 4 阵列式光谱辐射计测量的不同滤光片透过率
Fig. 4 Transmission of different filters measured using array radiometer

来自于杂散光,使得光谱辐射计测量值大于卤钨灯的标准值。数据表明,采用卤钨灯测量时紫外波段的杂散光不可忽略。图 4 表明,采用 365 nm 滤光片并不透过 400 nm 以后的光谱,所测得的透过率在 300~400 nm,比较接近真实的透过率,在可见光和近红外波段的透过率几乎为 0。因此,在卤钨灯照射下,300~400 nm 的紫外辐射并未对光谱辐射计在可见和近红外波段产生明显的杂散光影响;而波长大于 400 nm 的辐射对紫外波段有明显的杂散光影响。

实验对比了两台阵列式光谱辐射计的测量结果。其中一台既测量了卤钨灯照射下的杂散光水平,同时测量了氙灯照射下的杂散光水平;另一台仅测量了卤钨灯下的杂散光水平。两台仪器分为记为仪器 I 和仪器 II。图 5 中可以看到:对于仪器 I,当测量光源从卤钨灯变为氙灯,杂散光带来的贡献明显变小;对于仪器 II,采用卤钨灯在 300~400 nm 杂散光的贡献整体小于 2.0%,仪器的杂散光抑制效果明显优于仪器 I。

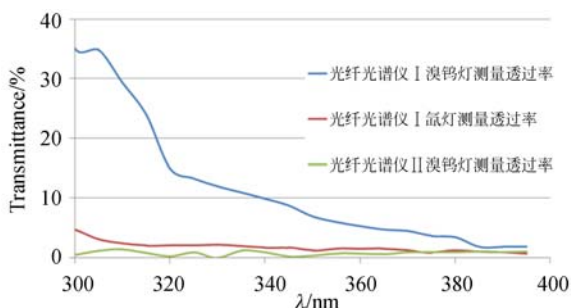


图 5 仪器 I 和仪器 II 测量的黄色玻璃透过率
Fig. 5 Transmission of different filters measured using array radiometers

对于阵列光谱辐射计杂散光的影响,数学上可以近似将 300~400 nm 光谱辐射信号和 400~1 000 nm 光谱辐射信号分别看成一个整体,杂散光影响下滤光片的透过率为:

$$\delta(\lambda) = \frac{kE(\lambda)_{400-1000}}{E(\lambda)_{300-400} + kE(\lambda)_{400-1000}}, \quad (2)$$

式中: $E(\lambda)_{300-400}$ 和 $E(\lambda)_{400-1000}$ 分别为光谱辐射计采集的 300~400 nm 和 400~1 000 nm 的光谱辐射信号; k 为耦合因子,用来描述波长大于 400 nm 波段光谱在 300~400 nm 贡献的系数。当采用黄色玻璃时,阵列光谱辐射计采集的信号为 $kE(\lambda)_{400-1000}$ 。

取 300~350 nm 波段的实际测量平均值,假定杂散光贡献的透过率系数为 0.2,对于卤钨灯,存在关系 $E(\lambda)_{300-400} : E(\lambda)_{400-1000} \approx 1 : 100$ 。根据式(2)计算得到 $k=0.0025$ 。对于氙灯,假定 $E(\lambda)_{300-400} : E(\lambda)_{400-1000} \approx 1 : 10$,计算得到氙灯杂散光贡献的透过率为 0.024,与图中氙灯的实际测量平均值接近。如果采用足够多的滤光片,原则上可以分析各个波段在其他波段的杂散光贡献。对于光谱辐射计测量得到的数据,可以通过数学计算扣除各个波段在其他波段的杂散光,最终反演得到真实的光谱数据。

3.3 带宽测量

为了准确测量光谱辐照度,阵列式光谱辐射计必须面对的一个问题是带宽。传统的双光栅光谱辐射计体积大、光谱分辨率高、带宽窄。然而,阵列式光谱辐射计大多采用 CCD 或 CMOS 阵列探测器,波长覆盖 250~1 100 nm 的探测器,假定像素点为 2 048 个,则单个像素点对应的波长约为 0.46 nm。最终的测量结果往往需要插值处理才能给出 0.1 nm 甚至更小的波长间隔。同时,阵列式光谱辐射计结构小,光路分光设计往往限制了仪器的带宽,因此仪器很难准确测量窄带宽光源的光谱。

图 6 给出了几种不同的阵列式光谱辐射计测量的 365 nm 窄带光源。从图中可以看到,绿色的光谱半高宽约为其余两种颜色的两倍。对于各个光谱仪测量的 320~390 nm 的光谱辐照度进行积分发现,其中绿线的积分辐照度比红线低 4.0%,红线较蓝线低 2.0%。采用双光栅光谱辐射计测量后,蓝线的积分辐照度与双光栅光谱辐射计的测量结果最接近。由于被测光源是一个窄带光源,随

着仪器的带宽变窄,测量的光谱分布逐渐接近被测光源的真实光谱,积分的辐照度也逐渐增大。显然,光谱辐射计的带宽对最终的光谱辐照度测量至关重要。

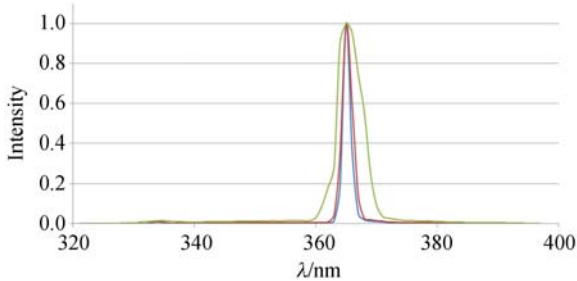


图 6 不同光谱仪采集的光谱功率分布

Fig. 6 Spectral power distribution of different filters measured using array radiometer

光谱辐射计定标中卤钨灯是连续的宽波段光源。在工业应用中,仪器常用来测量类日光光源。氙灯常被用来模拟太阳光,光源存在多个谱峰,其

光谱分布与卤钨灯区别很大。图 3 中氙灯在波长大于 400 nm 波段出现多个谱峰结构,如果光谱辐射计的带宽能力无法准确测量氙灯的谱峰,甚至两三个谱峰在测量结果上显示为单个谱峰,很容易影响到最终的测量结果。

4 结 论

本文比较了阵列式光谱辐射计在氙灯和卤钨灯下定标的差异,测量结果显示在 300 nm 波段,两者差异高达 30%。实验采用阵列式光谱辐射计测量了已知透过率的滤光片,通过与滤光片真实透过率的比较,确认卤钨灯测量结果与标准值的差异主要来源于杂散光。由于氙灯光谱辐射照度紫外与可见近红外的比值远大于卤钨灯,氙灯照射下阵列式光谱辐射计在 300 nm 处的杂散光比例小于 5.0%。当阵列式光谱辐射计测量窄带宽光源时,不同带宽测量的积分辐射照度差异高达 6.0%。这些结果可用于指导阵列式光谱辐射计的实际应用。

参考文献:

- [1] 王玉鹏,胡秀清,王红睿,等. 可在轨溯源的太阳反射波段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路[J]. 光学精密工程,2015,23(7):1807-1812.
WANG Y P, HU X Q, WANG H R, *et al.*. Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(7): 1807-1812. (in Chinese)
- [2] 孙志远,常松涛,朱玮,等. 应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标[J]. 光学精密工程,2015,23(2):356-362.
SUN ZH Y, CHANG S T, ZHU W, *et al.*. Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(2): 356-362. (in Chinese)
- [3] 代彩红,黄勃,于家琳. 材料老化领域中的光辐射度计量与量值溯源[J]. 中国计量,2010,8:14-16.
DAI C H, HUANG B, YU J L. Radiometry metrology and traceability in material aging [J]. *China Metrology*, 2010,8:14-16. (in Chinese)
- [4] 虞建栋. 光生物安全性的测试与评价研究[D]. 浙江:浙江大学,2006.
YU J D. *Testing and Evaluation of Photobiological Safety* [D]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2006. (in Chinese)
- [5] 王淑荣,邢进,李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感辐射计[J]. 光学精密工程,2006,14(2):185-190.
WANG SH R, XING J, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2): 185-190. (in Chinese)
- [6] 刘怡轩,颜昌翔,李先锋,等. 分光测色仪中的光谱仪系统 [J]. 光学精密工程,2015,23(7):1965-1971.
LIU Y X, YAN CH X, LI X F, *et al.*. Design of spectrometer in color measuring spectrophotometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1965-1971. (in Chinese)
- [7] 赵华兵,鞠挥,李也凡,等. 微型光谱仪的光谱数据分析及计算机实现[J]. 光学精密工程,2003,11(4):174-179.
ZHAO H B, JU H, LI Y F, *et al.*. Data analysis

- of spectrum and its cyber-realization in micro spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(4): 174-179. (in Chinese)
- [8] ZHANG N, LIU Y L, WU J H, *et al.*. Design of data acquisition system of miniature spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 141-147.
- [9] 徐明明,江庆五,刘文清,等. 一种新型双光栅光谱仪光学系统设计与优化[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 184-189.
- XU M M, JIANG Q W, LIU W Q, *et al.*. An improved method for optical system design and optimization of double grating spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 43(1):184-189. (in Chinese)
- [10] 王玲芳,温志渝,向敏毅. 近红外微型光谱仪光学系统设计与模拟[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(6):1721-1725.
- WANG L F, WEN ZH Y, XIANG M Y. Optical design and simulation of infrared micro spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectra Analysis*, 2009, 29(6): 1721-1725. (in Chinese)
- [11] NEVAS S, TEUBER A, SPERLING A, *et al.*. Stability of array spectroradiometers and their suitability for absolute calibrations [J]. *Metrologia*, 2012, 49: S58-S62.
- [12] WOOLLIAMS E R, BARIBEAU R'E, BIALEK A, *et al.*. Spectrometer bandwidth correction for generalized bandwidth function [J]. *Metrologia*, 2011, 48:164-172.
- [13] WU Z F, DAI C H, WANG Y F. High accuracy calibration of the fiber spectroradiometer [J]. *SPIE*, 2014, 9298: 92980Y-1-92980Y-6.
- [14] WANG Y F, DAI C H, WU Z F. A correction method for measuring spectral irradiance of light sources based on differential quadrature method [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015:1-6.
- [15] SALIM S G R, FOX N P, HARTREE W R, *et al.*. Temperature and nonlinearity corrections for a photodiode array spectrometer used in the field [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(6):866-875.
- [16] ZONG Y Q, STEVAN W B, JOHNSON B C, *et al.*. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(6):1111-1119.

作者简介:



吴志峰(1984—),男,河南卫辉人,博士,副研究员,2010年于北京大学获得博士学位,主要从光谱辐射度的研究。
E-mail: wuzf@nim.ac.cn



代彩虹(1974—),女,河南偃师人,研究员,2005年于清华大学获得博士学位,现为中国计量科学研究院光学所辐射室主任,主要从事光谱辐射度和色度等方面的研究。E-mail: daicaihong@nim.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)