

# 目标光源差异对阵列式光谱辐射计测量的影响及 紫外杂散辐射修正研究

李 玲, 吴志峰, 王彦飞, 代彩红

中国计量科学研究院光学与激光计量研究所, 北京 100029

**摘 要** 应对气候变化预测与灾害天气防范等科学难题, 空间观测领域提出高精度的光谱辐射度定标需求。阵列式光谱辐射计存在内部结构缺陷和光学元器件不理想等问题, 导致杂散辐射, 严重影响光谱辐射度测量结果的准确性。测量多种典型阵列式光谱辐射计的杂散辐射特性, 考虑外场目标光源与实验室定标光源不一致对杂散辐射修正的影响, 分别基于带通滤光片和可调谐激光器研究紫外杂散辐射修正方法。首先, 利用不同光谱透过率的带通滤光片, 测量可见及红外光谱辐射引起的紫外杂散信号。针对杂散辐射分布特点, 建立数学修正模型, 实现高效快捷的杂散辐射修正。地基验证场的光谱辐射亮度测量结果修正后, 紫外杂散辐射信号显著降低。对于连续分布的宽波段光源, 带通滤光片修正法具有实验简便易行、测试过程高效等优点。然而, 实现非连续分布或窄带光源的高精度杂散辐射修正存在困难。为此, 建立基于可调谐激光器的杂散辐射测量系统, 解决了各个像素点杂散辐射射线扩展函数的测量难题。改变可调谐激光器的输出波长, 精细化测量各个像素点的杂散辐射射线扩展函数, 再推导出杂散辐射信号分布函数, 通过 MATLAB 软件将矩阵反演运算, 得到各像素点的杂散辐射修正结果, 实现杂散辐射的高精度修正。利用不同类型的阵列式光谱辐射计验证了该修正方法, 对于非连续分布的窄带光源, 测量结果修正后杂散辐射信号降低了一个数量级, 并且谱线两边的杂散宽峰显著消除, 大幅降低了紫外波段的测量偏差。针对不同光谱分布的光源, 建立了两种优势互补的杂散辐射修正方法, 有效改善了阵列式光谱辐射计的紫外测量结果偏差, 进一步确保我国地球观测数据的准确性和国际等效互认。

**关键词** 阵列式光谱辐射计; 带通滤光片; 可调谐激光器; 杂散辐射修正

**中图分类号:** TH744 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)03-0837-05

## 引 言

对地观测技术作为研究空间环境生态系统的重要手段<sup>[1]</sup>, 通过测量地球系统的光谱辐射度、反射率等物理量, 反演计算地表碳水循环和云层覆盖率等信息<sup>[2-4]</sup>。无论星上在轨遥感器还是地面同步观测设备, 全面、高质量的光谱辐射度定标是获得有效遥感观测数据的必要前提<sup>[5]</sup>。阵列式光谱辐射计因机械结构紧凑, 以及全波段数据的快速采集, 广泛应用于空间对地观测和遥感技术等领域<sup>[6-7]</sup>。然而, 阵列式光谱辐射计内部元件在设计加工中, 会出现由光栅刻槽精度误差、光学元件反射等原因造成的杂散辐射, 严重影响光谱辐射度测量的准确性。

另一方面, 外场光谱辐射计的目标光源是地表太阳辐

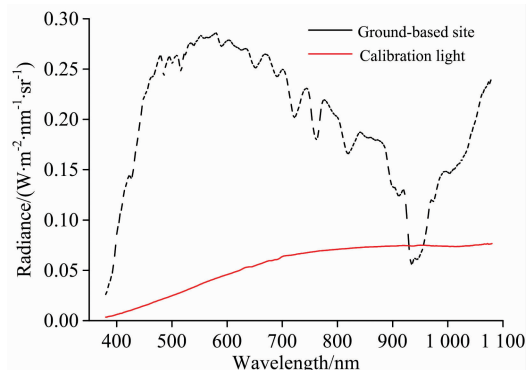


图1 实验室定标光源与地基验证场的光谱辐射亮度测量结果

Fig. 1 The radiance measurement results of calibration lamp in laboratory and solar radiance in ground-based site

收稿日期: 2019-01-16, 修订日期: 2019-04-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0200304)资助

作者简介: 李 玲, 1991年生, 中国计量科学研究院光学与激光计量研究所副研究员 e-mail: liling@nim.ac.cn

射,其光谱分布与实验室的定标光源<sup>[8]</sup>(光谱辐射照度标准灯)存在较大差异。实验室测的紫外杂散辐射比例不能直接应用于外场杂散辐射修正。因此,光谱辐射计的高精度杂散辐射修正,是地基验证场光谱辐射测量仪器获得真实可靠遥感数据的重要前提。

## 1 光谱辐射计紫外杂散辐射测量

### 1.1 实验

为研究光谱辐射计紫外杂散辐射性能,本文选取多种典型的光谱辐射计进行实验,包括:AvaSpec-ULS2048(Avantes), Maya2000 Pro(Ocean Optics), HAAS-2000(Everfine Corp.), BLACK-Comet C-50(StellarNet), CR280(Colorimetry Research), PSR+3500(Spectral Evolution), 和 HR-1024i(SVC)。每台光谱辐射计定标后测量光谱辐射照度( $E_c$ )或光谱辐射亮度( $L_c$ ),再在光路中增加截止滤光片(450 nm 前截止),并保持其他实验条件和参数设置(积分时间、平均次数等)不变,测量光谱辐射照度( $E_x$ )或光谱辐射亮度( $L_x$ ),最后计算不同光谱辐射计在紫外波段的杂散辐射比例  $\sigma/\%$ ,其中  $\sigma = E_x/E_c \times 100$  或  $\sigma = L_x/L_c \times 100$ 。

### 1.2 结果分析

如图 2 所示,与扫描式光谱辐射计 OL756(Gooch & Housego)测量结果对比,实验中的阵列式光谱辐射计在紫外波段都存在杂散辐射。尤其在 250~260 nm 波段杂散辐射比

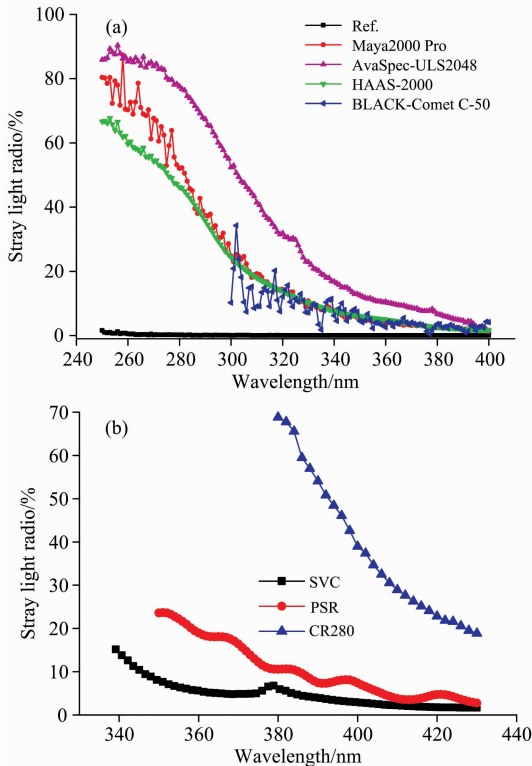


图 2 (a) 光谱辐射计杂散辐射比例;  
(b) 地物光谱辐射计杂散辐射比例

Fig. 2 (a) The stray light ratios of array spectroradiometers;  
(b) The stray light ratios of field spectroradiometers

例高达 80% 左右。地基验证场同步观测设备中常用的光谱辐射计 CR280,在 380 nm 的杂散辐射比例为 70% 左右。

## 2 光谱辐射计紫外杂散辐射修正方法研究

杂散辐射是限制光谱辐射计高精度测量的重要原因,由于实验室定标光源与太阳辐射光谱分布不同,实验室测量的紫外杂散辐射比例不能直接应用于外场杂散辐射修正。本文针对光源的光谱分布特点,分别基于带通滤光片和可调谐激光器,研究光谱辐射计紫外杂散辐射修正方法。

### 2.1 基于带通滤光片

利用多组具有特定光谱透过率的带通滤光片,即 420, 550, 650 和 800 nm 带通(长波通短波截止)滤光片,分别测量不同滤光片下光谱辐射计 CR280 的杂散辐射信号比例。如图 3 所示,使用 420 nm 长通滤光片后,仪器测得 380, 382, 384, ..., 420 nm 的信号值  $Y_{\text{stray}1}$ , 实际为 420 nm 至红外波段引起的杂散辐射信号。使用 550 nm 长通滤光片后,仪器测得的 380, 382, 384, ..., 420 nm 的信号值  $Y_{\text{stray}2}$ , 实际为 550 nm 至红外波段引起的杂散辐射信号。将  $Y_{\text{stray}1} - Y_{\text{stray}2} = Y_{\text{stray}}$ , 即可获得 420~550 nm 之间光谱辐射信号总和,对 380, 382, 384, ..., 420 nm 造成的杂散辐射影响。

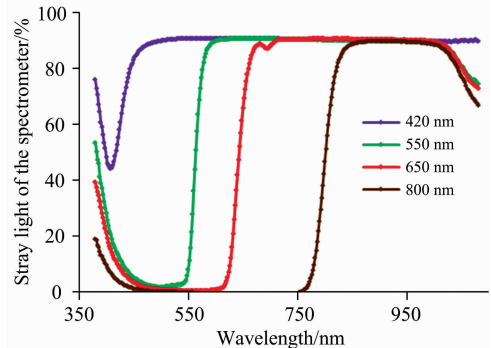


图 3 不同带通滤光片下 CR280 的杂散辐射信号比例  
Fig. 3 Stray light ratios of CR280 with different bandpass filters

用  $Y_{\text{stray}}$  除以 420~550 nm 内光谱辐射总信号,得到杂散辐射比例

$$R_{\text{stray}, 380, 420 \sim 550 \text{ nm}} = (Y_{\text{stray}1, 380} - Y_{\text{stray}2, 380}) / Y_{\text{meas}, 420 \sim 550 \text{ nm}}$$

以此类推,使用 550, 650 和 800 nm 带通滤光片可以分别计算出 550~650 以及 650~800 nm 对 380, 382, ..., 420 nm 测量值的杂散辐射比例。

$$Y_{\text{true}, 380} = Y_{\text{meas}, 380} - Y_{\text{stray}, 380} = Y_{\text{meas}, 380} - [Y_{\text{stray}, 380, 420 \sim 550 \text{ nm}} + Y_{\text{stray}, 380, 550 \sim 650 \text{ nm}} + Y_{\text{stray}, 380, 650 \sim 800 \text{ nm}} + Y_{\text{stray}, 380, 800 \sim 1080 \text{ nm}}] = Y_{\text{meas}, 380} - [R_{\text{stray}, 380, 420 \sim 550 \text{ nm}} \cdot Y_{420 \sim 550 \text{ nm}} + R_{\text{stray}, 380, 550 \sim 650 \text{ nm}} \cdot Y_{550 \sim 650 \text{ nm}} + R_{\text{stray}, 380, 650 \sim 800 \text{ nm}} \cdot Y_{650 \sim 800 \text{ nm}} + R_{\text{stray}, 380, 800 \sim 1080 \text{ nm}} \cdot Y_{800 \sim 1080 \text{ nm}}]$$

对于连续分布的宽谱段光源,相邻波长的杂散辐射影响接近,可利用上述数学模型近似计算出紫外各波长下的杂散辐射修正结果。如图 4 所示,对地基验证场地表太阳辐射的

光谱辐射亮度测量结果进行修正后,可见光对紫外 380~400 nm 的杂散辐射影响明显减少。

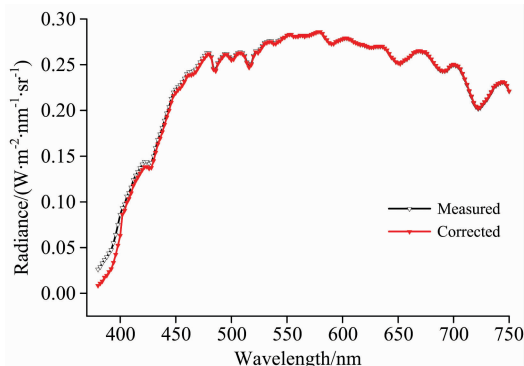


图 4 地基验证场的光谱辐射亮度测量结果和杂散辐射修正结果

Fig. 4 The measured result and corrected result of CR280 in ground-based sites

由于短波(紫外)通长波截止的滤光片工艺非常困难,实验中无法使用。上述修正模型中只考虑了长波对短波的杂散辐射影响。另一方面,修正模型中对相邻波长的杂散辐射作了近似,因此,基于带通滤光片的修正方法受光源光谱分布的影响,很难实现杂散辐射的高精度修正。

### 2.2 基于可调谐激光器

任意波长的单色光入射到光谱辐射计时都会引起杂散辐射,光谱辐射计在某像素点(波长)下光谱辐射测量结果等于真实信号与杂散辐射信号之和。本文利用可调谐激光器(EKSPLA 公司 NL242-SH/SFG),改变输出波长,获得光谱辐射计各个像素点(波长)对不同波长入射光的杂散辐射线扩展函数(LSF),实验中光谱辐射计(AvaSpec-ULS2048, UV/Vis)的辐射信号由激光器的输出功率做归一化处理,如图 5 所示,光谱辐射计的杂散信号在  $5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4}$  量级。

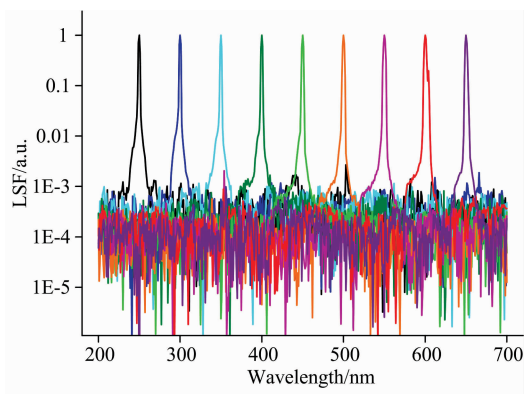


图 5 光谱辐射计 Avantes(UV/Vis)的 LSF 分布

Fig. 5 The line-spread functions of Avantes (UV/Vis) with different laser wavelengths

入射波长为 400 nm 的杂散辐射线扩展函数 LSF 如图 6 所示,将带通内 (IB) 的辐射信号设置为零,再利用式 (1)<sup>[9-10]</sup>,计算出该波长 LSF 对应的杂散辐射比例  $d_{i,j}$ ,得到

光谱杂散辐射信号分布函数(SDF)。

$$\begin{cases} d_{i,j} = \frac{f_{LSF,i,j}}{\sum_{i \in IB} f_{LSF,i,j}} & i \notin IB \\ d_{i,j} = 0 & i \in IB \\ i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

由此,各个像素点(波长)对不同入射波长的杂散辐射比例  $d_{i,j}$  可写为矩阵  $D$

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \dots & d_{1,j} & \dots & d_{1,n} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \dots & d_{2,j} & \dots & d_{2,n} \\ d_{3,1} & d_{3,2} & \dots & d_{3,j} & \dots & d_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n,1} & d_{n,2} & \dots & d_{n,j} & \dots & d_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

仪器光谱辐射度测量值及真实值用矩阵形式表示为

$$Y_m = [I + D]Y_{IB} = AY_{IB} \quad (3)$$

$$Y_{IB} = A^{-1}Y_m = CY_m \quad (4)$$

根据杂散辐射修正式(1)式(4),用 MATLAB 软件反演计算出光谱辐射计的真实值  $Y_{IB}$ 。

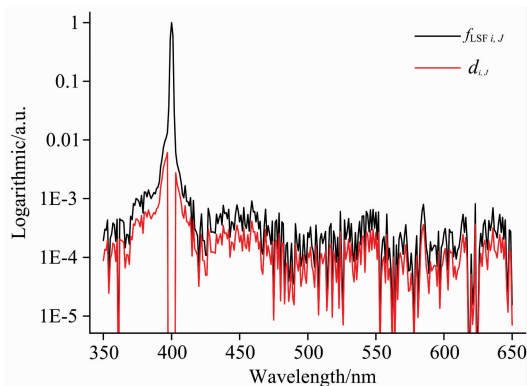


图 6 400 nm 的线扩展函数 LSF(黑色实线)及杂散辐射分布函数(SDF)(红色实线)

Fig. 6 The LSF and SDF of Avantes (UV/Vis) at 400 nm

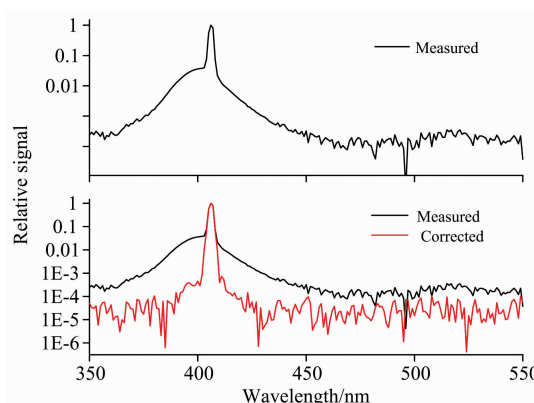


图 7 Avantes 光谱辐射计(UV/Vis)测量 405 nm 窄带光源的杂散辐射修正结果

Fig. 7 The measured signal and stray light-corrected result for 405 nm narrow-band light source of Avantes (UV/Vis)

为了验证杂散辐射修正方法,用 Avantes 光谱辐射计

(UV/Vis)测量了 405 nm 窄带光源的光谱辐射信号,如图 7 所示,利用式(1)~式(4)进行杂散辐射修正后,杂散辐射信

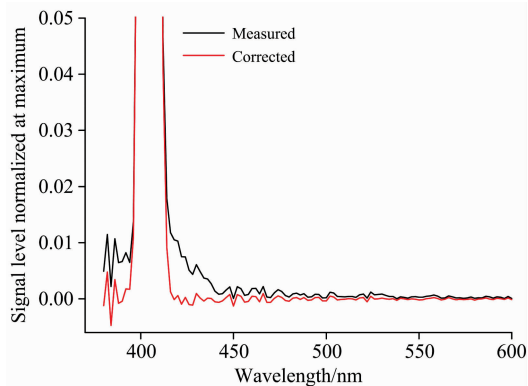


图 8 光谱辐射计 CR280 测量 405 nm 窄带光源的杂散辐射修正结果

Fig. 8 The measured signal and stray light-corrected result for 405 nm narrow-band light source of CR208

号由  $1 \times 10^{-4}$  左右降低到  $1 \times 10^{-5}$  左右,并且谱线两边的杂散宽峰也被消除。

此外,利用可调谐激光器修正方法,对地基验证场光谱辐射计 CR280 进行了紫外杂散辐射修正,如图 8 所示,修正后测量结果在窄带光源两侧的杂散信号降低了 1 个数量级。

### 3 结 论

针对不同光谱分布的光源研究了紫外杂散辐射修正方法,结论如下:

(1)利用带通滤光片获得可见及红外光谱辐射引起的紫外杂散辐射比例,建立了紫外杂散辐射数学修正模型。对于连续分布的宽谱段光源,带通滤光片修正法具有实验简便易行、测试过程高效等优点;

(2)基于可调谐激光器建立了高精度杂散辐射测量系统,解决了各个像素点杂散辐射扩展函数的测量难题,实现了光谱辐射计单像素点的高精度修正。适用于阵列式光谱辐射计对不同光源紫外测量结果的修正,修正后杂散辐射信号均降低了一个数量级,谱线两边的杂散宽峰也被显著消除。

### References

- [ 1 ] Thorne P W, Willett K M, Allan R J, et al. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2011, 92(11): 40.
- [ 2 ] Fox N, Kaiser-Weiss A, Schmutz W, et al. Phil. Trans. R. Soc. A, 2011, 369: 4028.
- [ 3 ] Shapiro A I, Schmutz W, Rozanov E, et al. Astron. Astrophys., 2011, 529: A67.
- [ 4 ] HAO Ai-hua, HU Bing-liang, BAI Jia-guang, et al(郝爱花, 胡炳樑, 白加光, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(12): 3432.
- [ 5 ] Jehle M, Hueni A, Lenhard K, et al., IEEE Geosci. & Remote Sens. Lett., 2015, 12(5): 1023.
- [ 6 ] Sanwlani N, Singh C, Chauhan P, Int. J. Remote Sens., 2012, 33(16): 4871.
- [ 7 ] Wang H, Chen Y, Song H, et al. J. Atmos. Oceanic Tech., 2014, 31: 2844.
- [ 8 ] Dai C, Khlevnoy B, Wu Z. Mapan-Journal of Metrology Society of India, 2017, 32(3): 243.
- [ 9 ] Salim S G R, Fox N P, Hartree W S, et al. Appl. Opt., 2011, 50(26): 5130.
- [ 10 ] Nevas S, Gröbner J, Egli L, et al. Appl. Opt., 2014, 53(19): 4313.

## The Effects of Light Source Differences on Array Spectroradiometer Measurements and the Research of Ultraviolet Stray Light Correction

LI Ling, WU Zhi-feng, WANG Yan-fei, DAI Cai-hong

Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**Abstract** With the goal of climate change prediction and disaster weather prevention, high accurate spectral radiance calibration is required in earth observation. Array spectroradiometers have problems such as internal structural defects and unsatisfactory optical components, resulting in stray lights, which seriously affect the spectral radiance measurements. In this paper, the stray lights of various typical array spectroradiometers were measured. The different spectrums of solar radiance and the laboratory calibration lamp were analyzed. Ultraviolet stray light correction methods were studied by using bandpass filters and tunable lasers, respectively. First, bandpass filters with specific transmittances were used to measure ultraviolet stray light signals. The mathematical correction model was established to realize the efficient evaluation and simple correction. The ultraviolet stray light of the solar radiance in ground-based verification site was obviously reduced by using this method. For the continuously distributed wide-spectrum light sources, the correction method with bandpass filter is of simple experimental conditions and efficient

work process. However, it is difficult to complete the high accurate stray light correction for the discontinuous distribution or narrow-band light source. Therefore, the stray light measurement system based on tunable laser was established, which can measure the stray light line-spread function of each pixel by changing the output wavelength of the tunable laser, and then the stray light correction results of each pixel are calculated by MATLAB matrix operations. The correction method was verified by different types of array spectroradiometers. For measuring the non-continuously distributed narrow-band source, the stray light signal was reduced by an order of magnitude, and the inter-reflection peaks beside the light source were significantly eliminated. Here, two stray light correction methods with complementary advantages were established for different spectral distribution light sources, which effectively decreased the deviation of the UV measurement results of array spectroradiometers, further ensuring the accuracy of Chinese earth observation data.

**Keywords** Array spectroradiometer; Bandpass filter; Tunable laser; Stray light correction

(Received Jan. 16, 2019; accepted Apr. 26, 2019)

---

## 本 刊 声 明

近期以来,一些不法分子假冒《光谱学与光谱分析》期刊社名义,以虚假网站等形式欺骗广大作者、读者。这些虚假网站公然假冒《光谱学与光谱分析》期刊名义进行大肆的征稿并骗取作者的审稿费和版面费。经部分作者及读者举报,现有关部门已就此介入调查。本刊将通过法律途径向假冒者追究相应的责任,维护本刊权利。

本刊官方网站已正式开通,网址为

<http://www.gpxygpx.com/>

在此郑重声明,本网址为《光谱学与光谱分析》期刊唯一开通运行的官方网站。本刊从未授权任何单位或个人以任何形式(包括网上网下)代理本刊征稿、审稿等项业务。

希望广大读者和作者切实维护好自身的合法权益,防止受骗上当。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2019年3月15日