

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.006

# 多角度偏振成像仪相对光谱响应定标方法

翁建文<sup>1,2</sup>, 袁银麟<sup>1\*</sup>, 康 晴<sup>1</sup>, 涂碧海<sup>1</sup>, 李健军<sup>1</sup>, 洪 津<sup>1</sup>, 郑小兵<sup>1</sup>

( 1 中国科学院安徽光学精密机械研究所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 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026 )

**摘 要:** 相对光谱响应是检测和评估多角度偏振成像仪性能的基本参数之一。采用基于激光泵浦氙灯光源的单色仪、消偏器、参考探测器和 45° 分束镜, 搭建了一套多角度偏振成像仪相对光谱响应测量装置。采用分束镜同步测量的方法, 降低光源的非稳定性影响; 针对测试过程繁琐和测试时间长的问题, 在基于现有不同开发平台开发的单色仪和数据采集系统的基础上, 采用 ActiveX 控件与动态链接库技术, 研制了一套相对光谱响应自动测试系统, 降低时间非稳定性影响, 提高测量精度和效率。采用多角度偏振成像仪 490 nm 和 865 nm 偏振通道作为应用案例, 开展了相对光谱响应的整机测试实验。实验结果表明多角度偏振成像仪中心波长测量极差值与带宽均值的比值精度在 0.11% 以内, 满足响应非一致性优于 0.6% 的定标要求。

**关键词:** 光谱; 偏振成像仪; 单色仪; 同步测量; 自动测试系统

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)01-0057-09

## Calibration Methods of Relative Spectral Response of Directional Polarization Camera

WENG Jianwen<sup>1,2</sup>, YUAN Yinlin<sup>1\*</sup>, KANG Qing<sup>1</sup>, TU Bihai<sup>1</sup>,  
LI Jianjun<sup>1</sup>, HONG Jin<sup>1</sup>, ZHENG Xiaobing<sup>1</sup>

( 1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The relative spectral response is one of the basic parameters for detection and evaluation of the performance of the directional polarization camera. A set of devices to measure relative spectral response of the directional polarization camera was assembled, which consisted of laser pumping xenon light source monochromator, depolarizer, reference detector and 45° beam splitter. The synchronization measurement method of beam splitter was utilized to reduce the instability of the light source. On the basis of monochromator and data acquisition system developed by different development platforms, an automatic testing system for the relative spectral response was developed by using ActiveX

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41605021), Natural Science Foundation of Anhui Province of China(安徽省自然科学基金, 1708085QF131)

**作者简介:** 翁建文 (1990 - ), 江西贵溪人, 博士研究生, 主要从事光学传感器数据处理技术、软件技术方面的研究。

**E-mail:** wjw1990@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 郑小兵 (1969-), 男, 汉族, 研究员, 主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。 **E-mail:** xzheng@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2018-09-29; **修改日期:** 2018-12-30

\* **通信联系人.** **E-mail:** ylyuan@aiofm.ac.cn

and dynamic link library technology to solve problems of complex testing process and long testing time. This automatic testing system has reduced the impact of time stability, and improved accuracy and efficiency of the measurement. Taking 490 nm and 865 nm channel of the directional polarimetric camera as an example of application, the experiment of relative spectral response in instrumental level measurements was carried out. The experimental results showed that the accuracy of the ratio between measured range value of the center wavelength and the average value of the bandwidth of directional polarimetric camera is within 0.11%, which meets the responsivity non-uniformity calibration requirement of less than 0.6%.

Key words: spectrum; polarization camera; monochromator; synchronization measurement; automatic testing system

## 1 引言

多角度偏振成像仪 (Directional polarization camera, DPC) 通过滤光片 - 偏振片组合转轮, 采用  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$  偏振解析实现目标光谱辐亮度、偏振度和偏振方位角等多维度信息探测, 为气溶胶和气候变化等科学应用研究提供有效数据。多角度偏振成像仪的精确实验室定标是实现定量化应用的基本前提, 其中响应非一致性<sup>[1-2]</sup>是影响多角度偏振成像仪偏振探测精度的关键参数之一。

响应非一致性是偏振探测器不同偏振通道对应的相同光谱通道有效中心波长差值与带宽均值的比值。根据法国地球反射偏振仪<sup>[3-4]</sup> (Polarization and directionality of the earth's reflectances, POLDER) 多年运行效果, 国际遥感界普遍建议: 当探测器的偏振测量精度优于 0.5%<sup>[5-6]</sup> 时, 才能满足气溶胶粒子分布和微观物理特性反演精度提升的要求。根据有关理论分析研究推算<sup>[7-9]</sup>, 偏振探测器响应非一致性应小于 0.6%<sup>[10]</sup>, 这就意味着其相对光谱响应的测量精度应显著提高。

传统光学探测器相对光谱响应测试大致可归纳为四种基本方法<sup>[11]</sup>: 直接比较法、宽带滤光片法、傅里叶变换法, 以及标准替代法。这四种方法各有优缺点: 直接比较法将参考探测器始终置于系统中, 无需反复拆卸, 但要求参考探测器、光谱条件具有高稳定性; 宽带滤光片法无需标准探测器, 方法简单, 但测量精度与准确度不高; 傅里叶变换法利用傅里叶光谱仪直接测量, 具有灵敏度高、测量迅速和操作简便等优点, 但该方法需要一个准确且已知分光比谱曲线的分束镜, 而且测量结果中还包含标准探测器的幅频特性, 影响了测量准确度; 标准替代法采用一个已知相对光谱响应的标准探测器, 通过位置替换进行测量, 将其光谱响应传递给被测探测器, 测量准确度较高, 但光源需具有较高稳定性和单色仪具有较好的重复性。单色仪系统技术成熟, 商业型的单色仪系统可实现程序控制操作, 提供二次开发接口, 定标流程简单, 周期短, 目前主流的相对光谱响应定标方法仍基于单色仪系统。综合考虑以上多种测试方法的优缺点后, 选择改进的基于单色仪系统单光路标准替代法进行多角度偏振成像仪相对光谱响应测量。

对于多角度偏振成像仪相对光谱响应的测量而言, 传统的相对光谱响应定标手段不足以满足高精度的偏振通道定标要求, 主要体现在<sup>[12-13]</sup>: 1) 单色仪系统内部为反射式光学系统, 根据菲涅尔定律和前期的实验研究, 单色仪的光路系统会改变入射光的偏振特性, 因此单色仪输出的偏振特性需要准确表征并校正。2) 传统的卤钨灯照明的单色仪系统在紫外和蓝光波段强度明显偏低, 测量信噪比很难满足高精度的定标需求。

针对多角度偏振成像仪偏振定标精度的应用要求, 介绍了多角度偏振成像仪偏振测量的数学模型, 利用激光泵浦氙灯光源和卤钨灯光源组合作为单色仪的输入, 提高紫外至蓝光波段的辐射通量; 通过消偏器消除单色仪输出的偏振特性; 采用分束镜分光, 以标准探测器作为监视和参考, 利用同步测量的方法, 降低光源稳定性的影响, 建立了适用于 350~2500 nm 波段的多角度偏振成像仪相对光谱响应的测量装置; 通过软件编程技术, 设计并实现了多角度偏振成像仪相对光谱响应自动化测试软件系统, 降低光源及探测器

时间稳定性影响。最后, 测量了多角度偏振成像仪 490 nm 和 865 nm 偏振通道的相对光谱响应, 并进行了数据分析。

## 2 偏振定标模型和响应非一致性定义

多角度偏振成像仪采用偏振片和滤光片组合的偏振遥感器, 可通过系统 Mueller 矩阵<sup>[14]</sup>和偏振响应矩阵进行定标, 辐射和偏振定标模型为

$$\begin{bmatrix} I^k \\ Q^k \\ U^k \end{bmatrix} = \frac{3}{\sum_{k=0}^2 (D_N^k - S_{OOB}^k - D_C^k)/T^k} \mathbf{M}_k^{-1} \begin{bmatrix} (D_N^0 - S_{OOB}^0 - D_C^0)/T^0 \\ (D_N^1 - S_{OOB}^1 - D_C^1)/T^1 \\ (D_N^2 - S_{OOB}^2 - D_C^2)/T^2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $I$  为辐射强度,  $Q$  为水平方向偏振分量强度,  $U$  为方位角为  $45^\circ$  方向上的偏振分量强度, 3 个元素的列矩阵表示一个三维矢量。  $k$  为偏振通道编号,  $S_{OOB}^k$  为偏振通道  $k$  的带外响应,  $T^k$  为偏振通道  $k$  的相对透过率,  $\mathbf{M}_k$  为系统 Mueller 矩阵,  $D_N^k$  为偏振通道  $k$  的偏振响应,  $D_C^k$  为偏振通道  $k$  的本底响应。  $S_{OOB}^k$  为滤光片截止区的泄露散射光所致。目前带外响应  $S_{OOB}^k$  对偏振遥感器偏振定标不确定度贡献通过使用高截止性能的滤光片进行抑制。

相对透过率  $T^k$  是指偏振通道间带内响应的相对比值, 以其中一个通道的带内响应作为参考, 其它两个通道关于该参考通道进行归一化<sup>[7]</sup>, 有

$$T^k = \int_{\lambda_l}^{\lambda_u} L(\lambda)R^k(\lambda)d\lambda / \int_{\lambda_l}^{\lambda_u} L(\lambda)R^r(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

式中  $R^k(\lambda)$  和  $R^r(\lambda)$  分别为偏振通道  $k$  和参考偏振通道  $r$  的相对光谱响应,  $\lambda_l$  和  $\lambda_u$  分别为待测通道带通范围的上、下限波长, 一般取相对光谱响应 1% 处对应的波长。

带内定义为光谱响应大于最大响应 1% 的连续光谱范围<sup>[15]</sup>。中心波长为带内光谱范围内的权重波长, 光谱带宽为光谱响应的峰值半高全宽<sup>[16-17]</sup>, 如图 1 所示。

从式 (2) 可以看出, 当待测和参考偏振通道的相对光谱响应存在差异, 随着目标辐亮度的变化, 相对透过率将会发生明显的变化。这种带内响应非一致性是影响偏振遥感器偏振定标精度的关键因素。

根据有关分析, 当偏振通道  $k$  的中心波长  $\lambda_{ncw}^k$  和参考偏振通道  $r$  的中心波长  $\lambda_{ncw}^r$  的偏差与参考偏振通道  $r$  带宽比值小于 0.6% 时, 可保证偏振定标精度优于 0.5%<sup>[10]</sup>, 即

$$\rho = |\lambda_{ncw}^k - \lambda_{ncw}^r| / \Delta\lambda^r < 0.6\%, \quad (3)$$

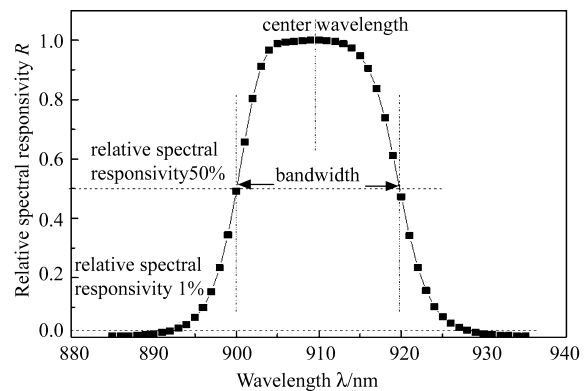


图 1 带内、中心波长和光谱带宽的定义

Fig.1 Definition of in-band, center wavelength and spectral bandwidth

这就对带内相对光谱响应的测量精度提出了很高的要求。偏振通道  $k$  的中心波长  $\lambda_{ncw}^k$  为

$$\lambda_{ncw}^k = \int_{\lambda_l}^{\lambda_u} R^k(\lambda) \lambda d\lambda / \int_{\lambda_l}^{\lambda_u} R^k(\lambda) d\lambda . \quad (4)$$

参考偏振通道  $r$  带宽  $\Delta\lambda^r$  为

$$\Delta\lambda^r = |\lambda_{\tau_1}^r - \lambda_{\tau_2}^r| , \quad (5)$$

式中  $\Delta\lambda^r$  为参考偏振通道  $r$  的光谱带宽,  $\lambda_{\tau_1}^r$  为半峰值处对应的短波波长点,  $\lambda_{\tau_2}^r$  为半峰值处对应的长波波长点。

### 3 相对光谱响应的定标方法与实验

#### 3.1 相对光谱响应的整机定标实验

多角度偏振成像仪相对光谱响应测量装置由 EQ99 单色仪、参考探测器、45° 分束镜和标准探测器组成。该装置具有多角度偏振成像仪和参考探测器同步测量光路, 通过消偏器消除单色仪输出的偏振特性, 采用分束镜同步测量的方法, 降低光源的非稳定性影响, 提高测量精度和效率。多角度偏振成像仪相对光谱响应的整机测量示意图如图 2 所示。

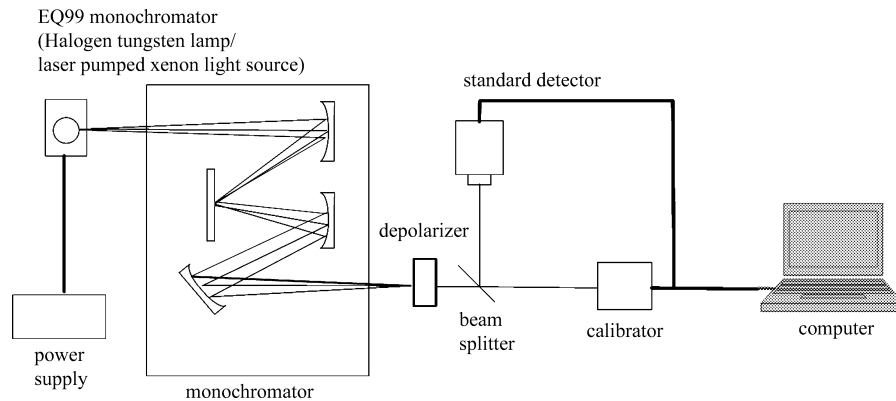


图 2 EQ99 单色仪测量多角度偏振成像仪相对光谱响应测试示意图

Fig.2 Test diagram for EQ99 monochromator testing the in-band relative spectral responsivity of the directional polarimetric camera

EQ99 单色仪具有 2 种输入光源, 激光泵浦氙灯光源和卤钨灯光源。光谱范围在 400~700 nm 时, 采用激光泵浦氙灯光源; 卤钨灯光源作为单色仪的输入时, 可实现 350~2500 nm 波段的相对光谱响应的测量。激光泵浦氙灯光源在紫外至蓝光波段输出的辐射通量高出卤钨灯光源近 1~2 个量级, 有效提高多角度偏振成像仪测量值的信噪比; 采用分束镜同步测量的方法, 降低光源稳定性的影响, 进而提升相对光谱响应测量精度。设计了自动化测量软件系统, 提高测量效率。

多角度偏振成像仪进行通道相对光谱响应测量时, 在 400~700 nm 光谱范围使用激光泵浦氙灯光源; 其他光谱波段相对光谱响应测量时, 使用卤钨灯光源。测量时, 经稳压稳流电源供电的光源发出的光辐射经前光学系统入射到单色仪的入射狭缝, 从单色仪出射狭缝输出的单色光经光学准直系统后, 入射到多角度偏振成像仪和参考探测器中。

测量时光谱带宽设置为通道带宽的 1/10, 间隔设置为通道带宽的 1/20, 扫描光谱范围为各通道理论波段范围的 2 倍。以测量多角度偏振成像仪 490 nm 和 865 nm 通道为例, 首先单色仪的输入光源为激光泵

浦氙灯光源测量 490 nm 通道相对光谱响应, 设置单色仪的扫描光谱范围为 470~510 nm、设置光谱带宽 2 nm 和间隔 1 nm, 采集并记录成像区域多角度偏振成像仪和参考探测器的输出值各 20 次; 每个光谱波段相对光谱响应测量 3 次。完成 490 nm 通道相对光谱响应的测量后, 切换单色仪的输入光源为卤钨灯光源进行 865 nm 通道相对光谱响应的测量。

### 3.2 相对光谱响应定标实验数据采集系统设计

单色仪官方 SDK 采用 ActiveX 控件来实现控制, 并提供 C++、C#、VB、LabVIEW 四种编程方式来进行单色仪二次开发; 数据采集器采用动态链接库技术封装仪器的操作函数, 采用 VISA (Virtual instrument software) 驱动程序软件架构, VISA API 提供了常见编程语言的实现, 如 C、C++、C#、LabVIEW 等。由于还需要实现与多角度偏振成像仪进行联动测控, 数据采集系统的采集与控制选择使用 C++ 进行开发。

#### 3.2.1 仪器库使用

单色仪控制库所需使用的是文件名为 ZolixOmniSpec.ocx 的 ActiveX 控件, 所使用的控件接口根据测试所需控制部分来进行选择。单色仪可控制的硬件包括光栅、滤光片, 此外, 还需要通讯接口选择, 查找设置单色仪地址, 单色仪的打开 / 关闭以及波长切换等功能, 通过内部接口的不同组合来控制单色仪, 从而满足自动化测控时所有关于单色光的要求。

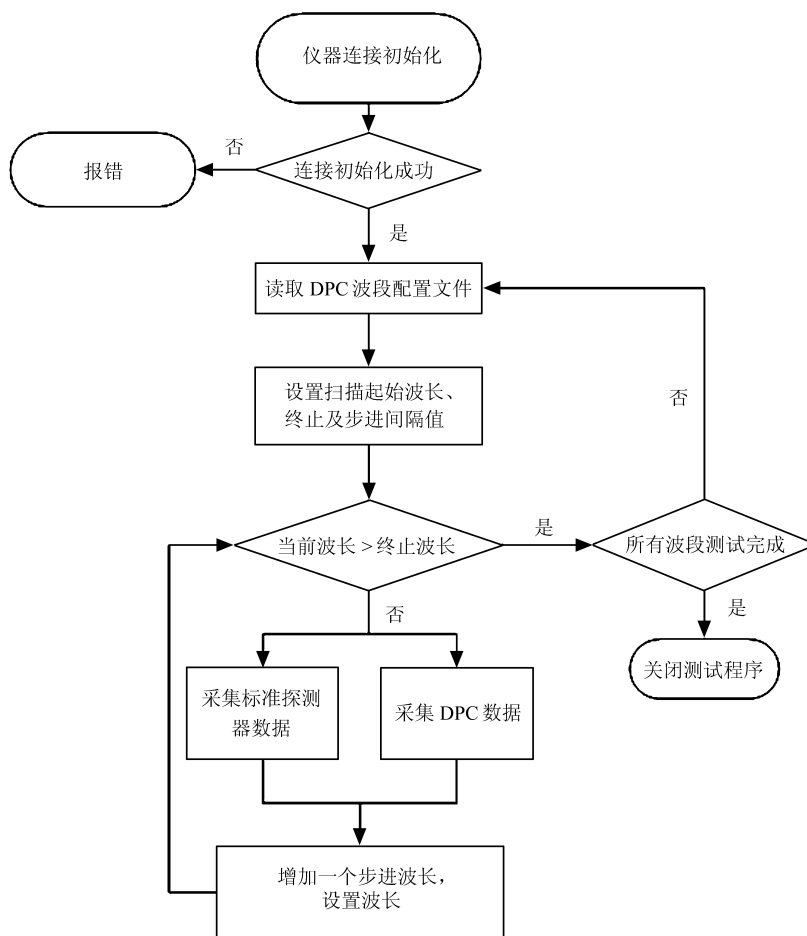


图 3 相对光谱响应测试系统软件流程

Fig.3 Relative spectrum response test system software process

标准探测器的输出数据使用安捷伦 34970 数据采集器进行数据采集工作。由于 34970 数据采集器使用 GPIB 转 USB 线与电脑进行连接, 使用 NI 公司的 VISA 仪器编程标准 I/O 函数库时会出现连接失败问题, 因此选择适用于安捷伦的修改版 VISA 库 AGVISA(Agilent virtual instrument software), 将 AGVISA32.DLL 动态链接库提供给数据采集系统软件使用。选择使用的 AGVISA 库接口函数主要有仪器地址查找、仪器打开、指令发送、数据接收、仪器关闭五部分, 通过发送不同的指令组合来控制数据采集器, 从而满足自动化测控时所有关于标准探测器的要求。

### 3.2.2 软件流程设计

在 Visual C++ 开发平台上, 通过添加控制单色仪的 ActiveX 控件与控制数据采集器的动态链接库设计多角度偏振成像仪相对光谱响应测试系统软件, 系统软件流程如图 3 所示。

多角度偏振成像仪相对光谱响应测试系统软件设计时, 首先进行单色仪系统、标准探测器数据采集系统及多角度偏振成像仪数据采集系统初始化。若任一仪器初始化失败, 则报错, 查明原因后再重新进行初始化。初始化成功后, 选择需要测试的波段, 设置当前波段的起始波长、终止波长及步进间隔波长值, 通过 ActiveX 控件接口将单色仪设置到指定波长, 再通过动态链接库接口采集标准探测器响应信号, 同时通过多角度偏振成像仪数据采集系统采集多角度偏振成像仪响应信号。重复进行以上过程, 直到所有测试波长点测试完成, 整个循环通过计算机进行控制测试, 测试过程中进行数据的实时保存。

## 4 定标实验结果与不确定度评定

### 4.1 相对光谱响应定标实验结果

多角度偏振成像仪的相对光谱响应  $R_{b\lambda}$  [18] 为

$$R_{b\lambda} = K \frac{V_{b\lambda} - V_{bo\lambda}}{V_{p\lambda} - V_{po\lambda}} R_{\lambda}, \quad (6)$$

式中  $R_{b\lambda}$  为多角度偏振成像仪的相对光谱响应,  $V_{b\lambda}$  为多角度偏振成像仪的输出信号,  $V_{bo\lambda}$  为多角度偏振成像仪暗信号,  $V_{p\lambda}$  为标准探测器的输出信号,  $V_{po\lambda}$  为标准探测器的暗信号,  $R_{\lambda}$  为标准探测器的光谱响应度,  $K$  为调整系数。

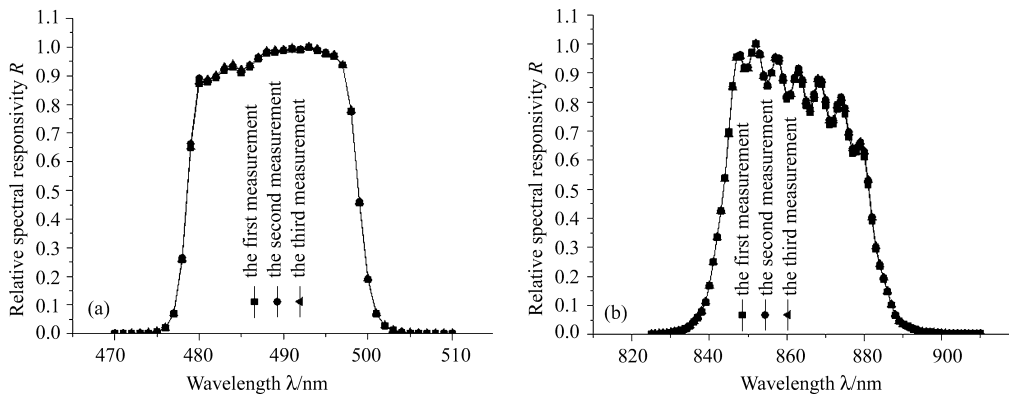


图 4 相对光谱响应测量曲线。(a) 490 nm P2 通道; (b) 865 nm P2 通道

Fig.4 Measurement curve of relative spectral responsivity. (a) Channel of 490 nm P2; (b) channel of 865 nm P2

应用中常用相对光谱响应最大值对各谱段响应进行归一化, 得到被测探测器的归一化相对光谱响应曲线。采用激光泵浦氙灯光源 EQ99 的 490 nm 和采用卤钨灯光源 EQ99 的 865 nm 的归一化相对光谱响应的测量曲线、标准探测器的测量输出电压值如图 5 所示。

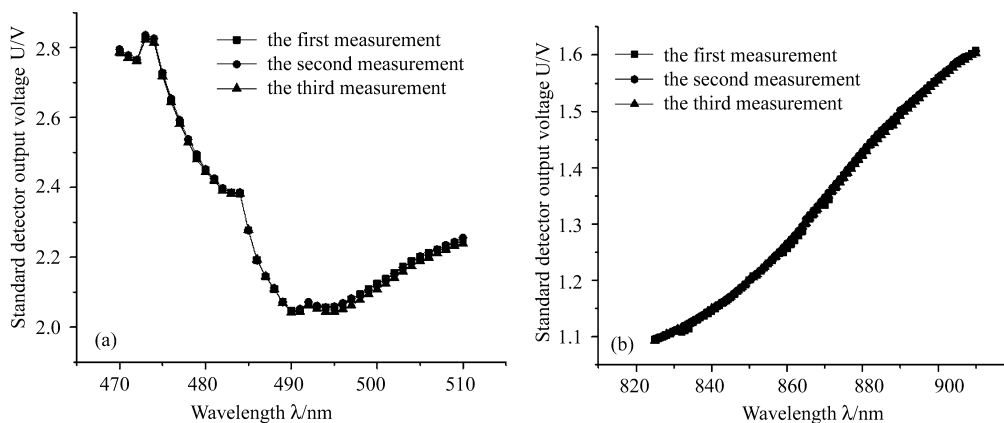


图 5 标准探测器的测量输出电压值。(a) 490 nm 通道; (b) 865 nm 通道

Fig.5 Output voltage of the standard detector. (a) Channel of 490 nm; (b) channel of 865 nm

由图 4、5 可知, 激光泵浦氙灯光源 EQ99 的 490 nm 和采用卤钨灯光源 EQ99 的 865 nm 的相对光谱响应均满足相对光谱响应测量精度要求。865 nm 的相对光谱响应曲线优于 490 nm 的相对光谱响应曲线, 这是因为标准探测器 490 nm 的相对光谱响应比 865 nm 低, 卤钨灯光源 865 nm 比激光泵浦氙灯光源 490 nm 更稳定, 以及单色仪的波长点定位精度不够高, 具体原因有待进一步分析。对于同一光谱波段三次测量曲线存在一定的差异, 这是单色仪光源波动造成的, 光源波动性小于 0.5%, 由此可见采用分束镜同步测量的方法, 降低光源稳定性的影响, 进而提升相对光谱响应测量精度。

4.2 响应非一致性

多角度偏振成像仪的中心波长和带宽计算参考式(4)、(5), 每个光谱波段相对光谱响应测量 3 次, 取偏振通道  $k$  的中心波长  $\lambda_{ncw}^k$  的极差值  $\Delta_{max}$  和带宽均值  $\Delta_{\lambda}^r$ , 进行响应非一致性计算, 即

$$\rho = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{\lambda}^r}, \tag{7}$$

多角度偏振成像仪的中心波长和带宽的测试结果如表 1 所示。

表 1 中心波长和带宽检测结果

Table 1 Test results of the center wavelength and bandwidth

Wavelength (nm)	Channel	Center wavelength(nm)			$\Delta_{max}$	Bandwidth(nm)			$\Delta_{\lambda}^r$	$\rho$ (%)
		First	Second	Third		First	Second	Third		
490	P1	489.58	489.59	489.58	0.01	19.45	19.43	19.45	19.44	0.05
	P2	489.16	489.17	489.18	0.02	20.1	20.1	20.11	20.10	0.10
	P3	489.71	489.7	489.71	0.01	19.59	19.59	19.61	19.60	0.05
865	P1	860.88	860.85	860.89	0.04	35.73	35.7	35.78	35.74	0.11
	P2	861.66	861.64	861.63	0.03	36.76	36.65	36.65	36.69	0.08
	P3	861.12	861.16	861.15	0.04	35.81	35.92	35.87	35.87	0.11

由表 1 可知, 490 nm 波段 P1、P2 和 P3 三个偏振通道中心波长和参考偏振通道 490 nm 的中心波长 490 nm 的偏差的极差值分别为 0.01 nm、0.02 nm 和 0.01 nm, P1、P2 和 P3 三个偏振通道带宽分别为 19.44 nm、20.10 nm 和 19.60 nm, P1、P2 和 P3 三个偏振通道响应的非一致性分别为 0.05%、

0.10% 和 0.05%。865 nm 波段 P1、P2 和 P3 三个偏振通道中心波长和参考偏振通道 865 nm 的中心波长 865 nm 的偏差的极差值分别为 0.04 nm、0.03 nm 和 0.04 nm, P1、P2 和 P3 三个偏振通道带宽分别为 35.74 nm、36.69 nm 和 35.87 nm, P1、P2 和 P3 三个偏振通道响应的非一致性分别为 0.11%、0.08% 和 0.11%。实验结果表明多角度偏振成像仪 490 nm 和 865 nm 中心波长测量极差值与带宽的比值精度在 0.11% 以内, 满足响应非一致性 0.6% 定标要求。

## 5 结 论

实现多角度偏振成像仪量化应用的前提是对其进行精确的定标, 相对光谱响应是对多角度偏振成像仪的光谱响应非一致性检测和评估的基本参数。提出了多角度偏振成像仪偏振测量模型, 搭建了一套多角度偏振成像仪相对光谱响应测量装置, 该装置采用消偏器消除单色仪输出的偏振特性。采用分光同步测量方法, 降低光源的非稳定性影响, 提高测量精度和效率。采用软件编程技术, 设计并实现了多角度偏振成像仪相对光谱响应测量系统软件, 避免人工测量失误, 进一步提高测量精度和效率。以多角度偏振成像仪 490 nm 和 865 nm 作为应用示范, 开展了分别以激光泵浦氙灯光源和卤钨灯光源作为单色仪输入的相对光谱响应的整机定标实验。实验结果表明, 多角度偏振成像仪 490 nm 和 865 nm 中心波长测量极差值与带宽的比值精度在 0.11% 以内, 满足响应非一致性 0.6% 定标要求。

在进一步的工作中, 考虑提高激光泵浦氙灯光源在紫外至蓝光波段的稳定性, 减少光源非稳定性产生的影响, 提高相对光谱响应测量精度; 提高标准探测器在 490 nm 的相对光谱响应, 减少标准探测器对测量结果的影响; 分析单色仪的波长点定位精度对相对光谱响应测量精度的影响, 提高单色仪波长定位精度; 进一步分析多角度测量角度对相对光谱响应的影响, 提高多角度间光谱响应一致性。相对光谱响应在多角度偏振成像仪的实验室定标方面具有良好的应用前景, 为多角度偏振成像仪的量化实际应用提供了重要基础。

## 参考文献:

- [1] Liu Xiao, Zhang Lei, Wang Feng, *et al.* Non-uniform calibration method in polarization imaging detection system [J]. *Computer Engineering*, 2009, **35**(18): 209-211(in Chinese).  
刘 晓, 张 磊, 王 峰, 等. 偏振成像探测系统的非一致性校正方法 [J]. *计算机工程*, 2009, **35**(18): 209-211.
- [2] Ji Eryou, Gu Guohua, Bai Lianfa *et al.* Three-channel polarization imaging systems and system error correction method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 111002(in Chinese).  
季尔优, 顾国华, 柏连发, 等. 三通道偏振成像系统及系统误差校正方法 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 111002.
- [3] Deschamps P Y, Herman M, Podaire A, *et al.* The POLDER instrument: mission objectives [C]. *Proceedings of SPIE*, 1992, **1747**: 72-91.
- [4] Goloub P, Deuze J L, Herman M, *et al.* Analysis of the POLDER, airborne polarization measurements performed over clouds covers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(1): 78-87.
- [5] Diner D J, Chipman R A, Beaudry N A, *et al.* An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing from space [C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5659**: 88-96.
- [6] Thierry B D, Yves A, Laherrere J M. Pre-flight calibration of the POLDER instrument [C]. *Proceedings of SPIE*, 1993, **2553**: 218-231.
- [7] Kang Qing, Yuan Yinlin, Li Jianjun, *et al.* Polarization calibration methods of channel-type polarization remote sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2015, **10**(7): 343-349(in Chinese).



- 康 晴, 袁银麟, 李健军, 等. 通道式偏振遥感器偏振定标方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2015, **10**(7): 343-349.
- [8] Yuan Yinlin. *Design and Application of a Spectrally tunable Integrating Sphere Reference Source with Large Exit Aperture* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, 2014: 75-107(in Chinese).
- 袁银麟. 大口径光谱可调积分球参考光源的研制与应用 [D]. 合肥: 安徽光学精密机械研究所博士论文, 2014: 75-107.
- [9] Fuqua P D, Panetta C J, Barrie J D, et al. Out of band scatter measurements from OLI optical bandpass filters [C]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8510**: 851009.
- [10] Kang Qing, Yuan Yinlin, Li Jianjun, et al. Filtration and precision verification of optical filters on atmospheric synchronous corrector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(3): 0312003(in Chinese).
- 康 晴, 袁银麟, 李健军, 等. 大气同步校正仪的滤光片筛选方法与精度验证实验研究 [J]. 光学学报, 2017, **37**(3): 0312003.
- [11] Jiang Bin, Ying Chengping, Liu Hongyuan, et al. A relative spectral responsibility auto-testing system of infrared focal plane array [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2016, **36**(6): 40-44, 69(in Chinese).
- 姜 斌, 应承平, 刘红元, 等. 一种红外焦平面阵列相对光谱响应自动测试系统 [J]. 宇航计测技术, 2016, **36**(6): 40-44, 69.
- [12] Kang Qing. *Research on System-Level Radiometric and Polarized Calibration Methods in Laboratory of Polarization Remote Sensors* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of University of Science and Technology of China, 2018: 49-55(in Chinese).
- 康 晴. 偏振遥感器实验室系统级辐射与偏振定标方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学博士论文, 2018: 49-55.
- [13] Zhu Bingqing, Yuan Yinlin, Kang Qing, et al. Research on calibration method of in-band relative spectral responsivity of polarization remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(7): 0712005(in Chinese).
- 朱冰青, 袁银麟, 康 晴, 等. 偏振遥感器带内相对光谱响应度定标方法研究 [J]. 光学学报, 2018, **38**(7): 0712005.
- [14] Li Jianhui, Zheng Meng, Zhang Xuebing, et al. Study on calibration and error compensation of Mueller matrix imaging polarimeter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(2): 021202(in Chinese).
- 李建慧, 郑 猛, 张雪冰, 等. Mueller 矩阵成像偏振仪的误差标定和补偿研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, **53**(2): 021202.
- [15] Efremova B, Wu A S, Xiong X. Relative spectral response corrected calibration inter-comparison of S-NPP VIIRS and Aqua MODIS thermal emissive bands [C]// *Earth Observing Systems XIX. International Society for Optics and Photonics*, 2014, **9218**: 92180.
- [16] Barnes R A, Eplee Jr, R E, Yeh E N, et al. *SeaWiFS Technical Report Series* [R]. Volume 40; SeaWiFS Calibration Topics.
- [17] Liu Shenggang, Weng Jidong, Tao Tianjiong. Superhigh spectral resolution measurement of spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(4): 903-905(in Chinese).
- 刘盛刚, 翁继东, 陶天炯. 超高分辨光谱仪的分辨率检测方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(4): 903-905.
- [18] Yan Feng, Zhou Yue, Zhang Mingchao, et al. Test equipment for relative spectral response of CCD [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(10): 2865-2868(in Chinese).
- 闫 丰, 周 跃, 章明朝, 等. CCD 器件相对光谱响应测试仪 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(10): 2865-2868.