

偏振遥感器带内相对光谱响应度定标方法研究

朱冰青^{1,2}, 袁银麟^{2*}, 康晴², 张梦雅², 郑小兵², 方勇华², 李健军², 吴浩宇², 丁蕾², 李孟凡²

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 带内相对光谱响应度是检测和评估偏振遥感器带内响应非一致性的基本参数。采用基于激光抽运氙灯光源的单色仪、消偏器、参考探测器和 45°分束镜, 搭建了一套偏振遥感器相对光谱响应度测量装置。该装置采用消偏器消除单色仪输出的偏振特性, 通过光谱偏振分析仪(SPOLA)进行消偏精度的测量和验证。采用分束镜同步测量的方法来降低光源的非稳定性影响, 提高测量精度和效率。采用成像区域大气校正仪 490 nm 和 870 nm 偏振通道作为应用案例, 开展了带内相对光谱响应度的整机测试实验。实验结果表明, 大气校正仪中心波长测量极差值与带宽均值的比值精度在 0.25% 以内, 满足带内响应非一致性小于 0.6% 的定标要求。

关键词 测量; 偏振遥感器; 带内; 响应度; 定标; 非一致性

中图分类号 TP79

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0712005

Research on Calibration Method of In-Band Relative Spectral Responsivity of Polarization Remote Sensor

Zhu Bingqing^{1,2}, Yuan Yinlin², Kang Qing², Zhang Mengya², Zheng Xiaobing²,
Fang Yonghua², Li Jianjun², Wu Haoyu², Ding Lei², Li Mengfan²

¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

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

Abstract The in-band relative spectral responsivity is a basic parameter for the detection and evaluation of the in-band response non-uniformity of a polarization remote sensor. A set of devices to measure the relative spectral responsivity of the polarization remote sensor is assembled, which consists of a laser pumping xenon light source monochromator, a depolarizer, a reference detector and a 45° beam splitter. The depolarizer is utilized to eliminate the output polarization characteristics of the monochromator, and the spectro-polarimetric analyzer (SPOLA) is utilized to measure and verify the depolarization accuracy. The synchronization measurement method of beam splitter is utilized to reduce the instability of the light source and to improve the measurement accuracy and efficiency. By taking 490 nm and 870 nm polarization channel of the atmospheric corrector as an example of application, the experiment of in-band relative spectral responsivity in instrumental level measurements is carried out. The experimental results show that the accuracy of the ratio between measured range value of the center wavelength and the average value of the bandwidth for atmospheric corrector is within 0.25%, which meets the in-band responsivity non-uniformity calibration requirement of less than 0.6%.

Key words measurement; polarization remote sensor; in-band; responsivity; calibration; non-uniformity

OCIS codes 120.0280; 300.6170; 200.4740

收稿日期: 2018-01-29; 收到修改稿日期: 2018-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(41605021)、安徽省自然科学基金(1708085QF131)

作者简介: 朱冰青(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事数字像源光亮度和辐射定标方法方面的研究。

E-mail: 1264509790@qq.com

导师简介: 方勇华(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感光电信息技术等方面的研究。

E-mail: yhfang@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: ylyuan@aiofm.ac.cn

1 引 言

偏振遥感器一般通过将偏振片和滤光片组合,采用 0° , 60° 和 120° 偏振解析来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,其偏振信息可用于大气探测和校正^[1-3],偏振探测精度在大气气溶胶及云的微物理特性参数反演等科学应用方面发挥着重要的作用^[4]。偏振遥感器的精确实验室定标是实现偏振遥感器定量化应用的基本前提,其中带内响应非一致性^[5]是影响偏振遥感器的偏振探测器精度的关键参数之一。

带内响应非一致性指偏振遥感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。根据法国的地球反射偏振测量仪(POLDER)^[6-7]多年运行效果,国际遥感界普遍建议:当遥感器的偏振测量精度优于 0.5% ^[8-9]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^[10-12]推算,偏振遥感器带内响应非一致性应小于 0.6% ^[13],这就意味着其带内相对光谱响应度的测量精度应显著提高。

传统光学遥感器带内相对光谱响应度的测量多采用部件级和系统级的测量手段。例如,美国海洋宽视场扫描仪(SeaWiFS)采用部件级测量方法^[14],以一定的波长间隔测量其光谱响应度,联合滤光片等光学元件的透过率测量结果^[15],通过卷积运算获得其相对光谱响应度。陆地成像仪(OLI)采用单色仪光源,通过参考探测器和待定标遥感器交替测量的方法进行整机相对光谱响应度检测,这种测量方法的精度与单色仪光源输出的辐射通量密切相关。可见至近红外扫描辐射计(VIIRS)利用基于激光导入积分球单色面光源技术,利用其精细光谱扫描功能实现了系统级的响应度检测。从原理上讲,目前基于可调谐激光器的光谱扫描式系统级测量方法精度最高,但可调谐激光器及其配套设备需要巨大的资金投入,对运行环境要求高,操作维护均需要专

业人员,目前这种技术手段多集中在有实力的专业计量机构,例如美国国家标准与技术研究院(NIST)和德国联邦物理技术研究院(PTB)等。受限于激光器的发展水平,紫外至蓝光波段的可调谐激光器难以获得。单色仪系统技术成熟,商品化的单色仪系统均可实现程控操作,定标流程简单,周期短,目前主流的相对光谱响应度定标手段仍基于单色仪系统。

对于偏振遥感器带内相对光谱响应度的测量而言,传统的相对光谱响应度定标手段并不足以满足高精度的偏振通道定标要求,主要体现在:1)单色仪系统内部为反射式光学系统(如典型的切尔尼-特纳光路结构),根据菲涅耳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。

针对偏振遥感器偏振定标精度的应用要求,本文推导了偏振遥感器偏振测量的数学模型,利用激光抽运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,并采用偏振分析仪评估了消偏效果;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 $350\sim 2500\text{ nm}$ 波段的偏振遥感器带内相对光谱响应度的测量装置。最后,采用成像区域大气校正仪(简称大气校正仪)作为应用示范,测量了其 490 nm 和 870 nm 偏振通道的带内相对光谱响应度,并进行了数据分析。

2 偏振遥感器偏振定标模型和带内非一致性定义

采用偏振片和滤光片组合的偏振遥感器,可通过系统米勒矩阵^[16]和偏振响应矩阵进行定标,其辐射和偏振定标模型为:

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

式中: 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 为系统米勒矩阵; 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。

(1)式中带外响应 S_{OoB}^k 由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可通过筛选高截止性能的滤光片进行抑制,也可通过带外响应度和对应目标辐亮

度进行校正。

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,其他两个通道关于该参考通道进行归一化^[10]:

$$T^k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} L(\lambda)R^k(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} L(\lambda)R^r(\lambda)d\lambda}, \quad (2)$$

式中 $R^k(\lambda)$ 和 $R^r(\lambda)$ 分别指偏振通道 k 和参考偏振通道 r 的相对光谱响应度; λ_1 和 λ_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度 1% 处对应的波长。

带内定义为相对光谱响应度大于 1% 的连续光谱范围^[17-18]。中心波长为带内光谱范围内的权重波长^[17],光谱带宽为相对光谱响应度的半峰全宽^[19],如图 1 所示。

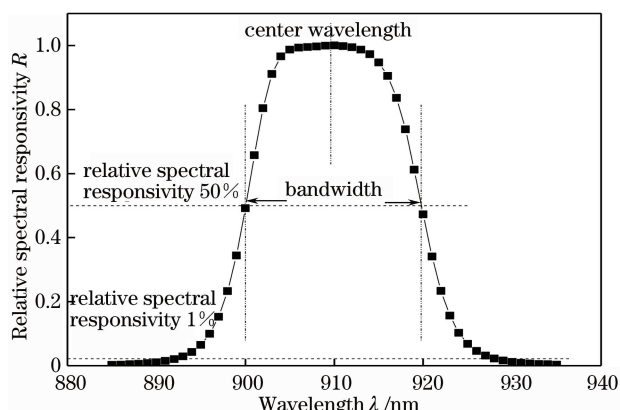


图 1 带内、中心波长和光谱带宽的定义

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

从(2)式可以看出,当待测和参考偏振通道的相对光谱响应度存在差异,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^[13],当偏振通道 k 的中心波长 λ_{new}^k 和参考偏振通道 r 的中心波长 λ_{new}^r 的偏差与参考偏振通道 r 的光谱带宽 $\Delta\lambda^r$ 的比值小于 0.6%^[9] 时,可保证偏振定标精度优于 0.5%,即:

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

这就对带内相对光谱响应度的测量精度提出了很高的要求。

偏振通道 k 的中心波长 λ_{new}^k 为:

$$\lambda_{\text{new}}^k = \int_{\lambda_1}^{\lambda_u} R^k(\lambda)\lambda d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_u} R^k(\lambda)d\lambda, \quad (4)$$

λ_{new}^r 的计算方法与 λ_{new}^k 相同,不再赘述。

参考偏振通道 r 的光谱带宽 $\Delta\lambda^r$ 为:

$$\Delta\lambda^r = |\lambda_{r_1}^r - \lambda_{r_2}^r|, \quad (5)$$

式中: $\lambda_{r_1}^r$ 为半峰值处对应的短波长点; $\lambda_{r_2}^r$ 为半峰值处对应的长波长点。

3 带内相对光谱响应度的定标方法与实验

3.1 单色仪偏振特性的检测与分析

为了检测单色仪输出的准单色光的偏振特性,本研究采用基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪(SPOLA)^[20] 测量了单色仪输出波段中 470~510 nm 波段的偏振特性,该光谱波段范围内准单色光的带宽约为 2 nm。

实验时在单色仪的输出端放置高精度的消偏器,将消偏器固定在 SPOLA 的前端,反复调试,使其光轴分别垂直于单色仪出光口面和 SPOLA 的入射光口面,且三者的中心光轴线一致。使用 SPOLA 对单色仪光源透过消偏器后的偏振特性进行检测,结果如图 2 所示。测试完成后,将消偏器移去,再次使用 SPOLA 对单色仪光源进行检测。

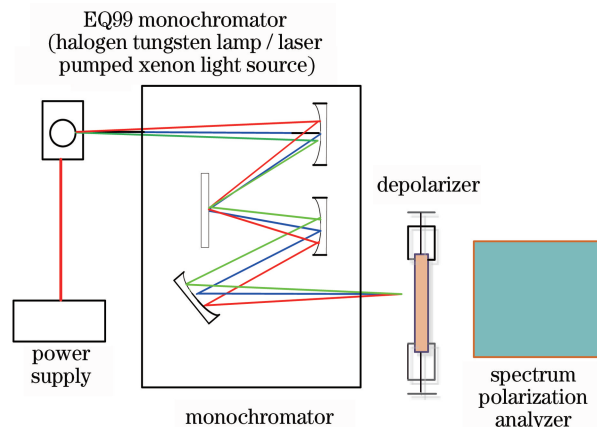


图 2 EQ99 单色仪偏振特性测试示意图

Fig. 2 Polarization characteristics test schematic diagram of EQ99 monochromator

3.2 带内相对光谱响应度的整机定标实验

偏振遥感器相对光谱响应度测量装置由 EQ99 单色仪、参考探测器、45°分束镜和标准探测器组成。该装置具有偏振遥感器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。采用大气校正仪^[21] 作为应用示范,设计了带内相对光谱响应度的整机测量方法,测量示意图如图 3 所示。

EQ99 单色仪具有两种输入光源:激光抽运氙

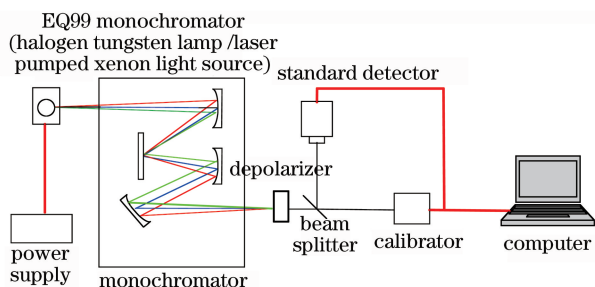


图 3 EQ99 单色仪测量大气校正仪带内相对光谱响应度测试示意图

Fig. 3 Test diagram of in-band relative spectral responsivity for atmospheric corrector by EQ99 monochromator

灯光源和卤钨灯光源。光谱范围在 400~700 nm 时,采用激光抽运氙灯光源;采用卤钨灯光源作为单色仪的输入时,可实现 350~2500 nm 波段的带内相对光谱响应度的测量。激光抽运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 个数量级,能够有效提高大气校正仪测量值的信噪比;采用分束镜同步测量的方法,降低光源稳定性的影响,进而提升带内相对光谱响应度测量精度。设计了自动化测量软件,该自动化定标的思路,实现了高效率的测量定标^[22]。

利用大气校正仪进行通道相对光谱响应度测量时,在 400~700 nm 光谱范围使用激光抽运氙灯光源,其他光谱波段使用卤钨灯光源。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,入射到大气校正仪和参考探测器中。

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。以测量大气校正仪 490 nm 和 870 nm 通道为例,首先单色仪以激光抽运氙灯光源为输入光源测量 490 nm 通道的相对光谱响应度,设置单色仪的扫描光谱范围为 470~510 nm(扫描范围太窄,1%)、设置光谱带宽为 2 nm,间隔为 1 nm,采集并记录大气校正仪和参考探测器的输出值各 20 次,并进行数据处理;每个光谱波段相对光谱响应度测量 3 次^[23]。完成 490 nm 通道相对光谱响应度的测量后,切换单色仪的输入光源为卤钨灯光源进行 870 nm 通道相对光谱响应度的测量。

4 定标实验结果与不确定度评定

4.1 单色仪偏振特性实验结果

SPOLA 测量的 470~510 nm 波段偏振特性曲

线如图 4 所示。

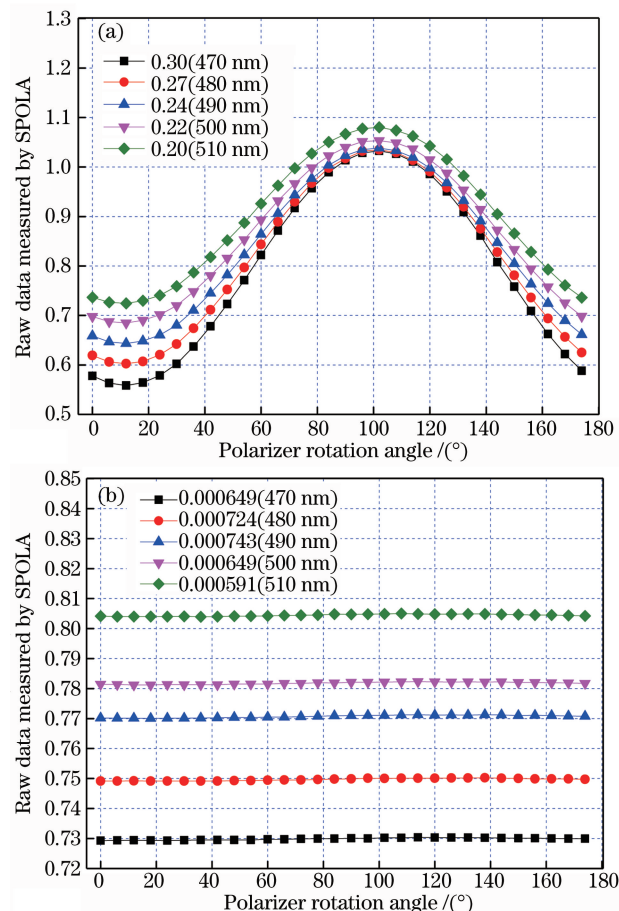


图 4 单色仪偏振特性测量结果。(a)无消偏器; (b)带消偏器

Fig. 4 Measurement results of polarization characteristics of monochromator.

(a) Without depolarizer; (b) with depolarizer

根据 SPOLA 测量的偏振特性曲线数据得到单色仪 470~510 nm 波段的强度、偏振度和偏振方位角结果如表 1 所示。可以看出,无消偏器条件下单色仪的偏振度在 0.2~0.3 之间变化,偏振方位角在 123.79°~124.76°之间变化;有消偏器条件下单色仪的偏振度在 $5.91 \times 10^{-4} \sim 7.43 \times 10^{-4}$ 之间变化,偏振方位角在 102.40°~108.37°之间变化。由表 1 可以看出偏振特性得到很好的抑制,同时避免了输出辐射通量的损失。

4.2 相对光谱响应度定标实验结果

大气校正仪的相对光谱响应度 R_{ba} ^[24] 为:

$$R_{ba} = \frac{V_{ba} - V_{bo\lambda}}{V_{pa} - V_{po\lambda}} R_{\lambda}, \quad (6)$$

式中 V_{ba} 为大气校正仪的输出信号; $V_{bo\lambda}$ 为大气校正仪暗信号; V_{pa} 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_{λ} 为标准探测器的光谱响应度。

表 1 有无消偏器条件下单色仪偏振特性测量结果

Table 1 Measurement results of polarization characteristics of monochromator with and without depolarizer

Item	Wavelength /nm					
	470	480	490	500	510	
Without depolarizer	Intensity	23.78	24.45	25.12	25.97	26.96
	Degree of polarization	0.30	0.27	0.24	0.22	0.20
	Angle of polarization /($^{\circ}$)	123.79	124.05	124.29	124.58	124.76
With depolarizer	Intensity	21.90	22.49	23.12	23.45	24.13
	Degree of polarization	6.49×10^{-4}	7.24×10^{-4}	7.43×10^{-4}	6.49×10^{-4}	5.91×10^{-4}
	Angle of polarization /($^{\circ}$)	104.70	102.40	103.62	105.17	108.37

为了验证采用激光抽运氙灯和卤钨灯作为 EQ99 单色仪输入光源的相对光谱响应度测量精度,分别选取 490 nm 和 870 nm 作为这两种光源的

应用示例进行分析。490 nm 和 870 nm 的相对光谱响应度的测量曲线、标准探测器的测量输出电压值如图 5、图 6 所示。

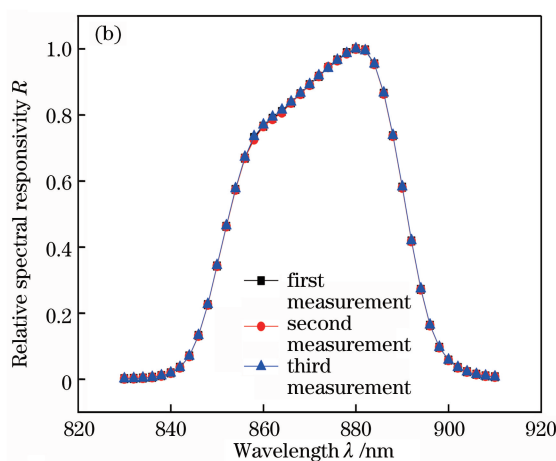
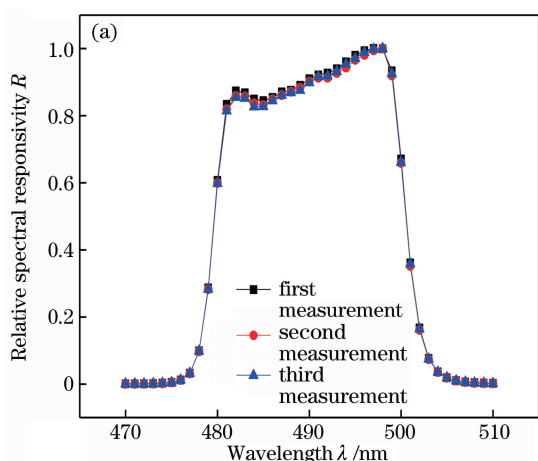


图 5 相对光谱响应度测量曲线。(a) 490 nm P2 通道; (b) 870 nm P2 通道

Fig. 5 Measurement curves of relative spectral responsivity. (a) P2 channel of 490 nm; (b) P2 channel of 870 nm

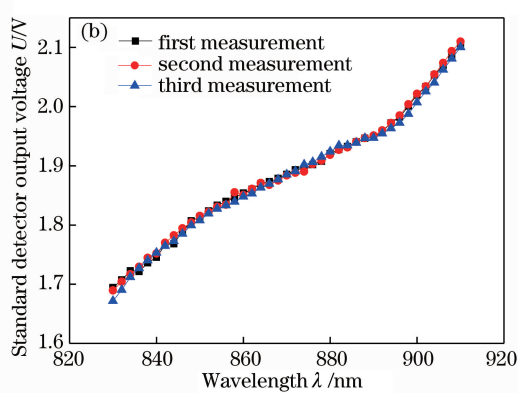
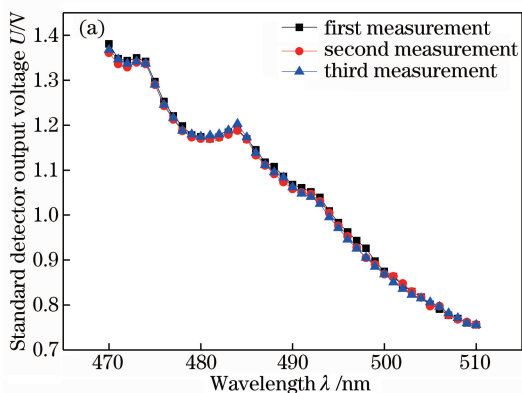


图 6 标准探测器的测量输出电压值。(a) 490 nm 通道; (b) 870 nm 通道

Fig. 6 Output voltage of standard detector. (a) Channel of 490 nm; (b) channel of 870 nm

由图 5 和图 6 可知,490 nm 和 870 nm 的相对光谱响应度均满足相对光谱响应度测量精度要求。870 nm 的相对光谱响应度曲线优于 490 nm 的相对光谱响应度曲线,可能的原因为标准探测器 870 nm 的相对光谱响应度比 490 nm 高,卤钨灯光源 870 nm 比激光抽运氙灯光源 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 3 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,可以降低光源稳定性的影响,进而提升带内相对光谱响应度测量精度。

4.3 带内响应非一致性

大气校正仪的中心波长和光谱带宽计算如(4)~(5)式所示,由于每个光谱波段相对光谱响应度测量3次,取偏振通道*k*的中心波长 λ_{new}^k 的极差值

表2 中心波长和带宽检测结果

Table 2 Test results of center wavelength and bandwidth

Channel	Center wavelength /nm				Bandwidth /nm				$\rho / \%$
	First	Second	Third	Δ_{max}	First	Second	Third	Δ_{λ}^k	
490 nm P1	490.71	490.66	490.67	0.05	20.25	20.27	20.19	20.24	0.25
490 nm P2	490.45	490.45	490.48	0.03	20.88	20.83	20.84	20.85	0.14
490 nm P3	490.36	490.38	490.35	0.03	19.92	19.90	19.94	19.92	0.15
870 nm P1	872.81	872.79	872.79	0.02	39.69	39.72	39.69	39.70	0.05
870 nm P2	872.30	872.31	872.29	0.02	38.32	38.30	38.38	38.33	0.05
870 nm P3	871.56	871.55	871.54	0.02	38.73	38.76	38.82	38.77	0.05

由表2可知,490 nm波段P1、P2和P3三个偏振通道的中心波长测量极差值分别为0.05,0.03,0.03 nm,带宽均值分别为20.24,20.85,19.92 nm,带内响应的非一致性分别为0.25%,0.14%,0.15%。870 nm波段P1、P2和P3三个偏振通道的中心波长测量极差值同为0.02 nm,带宽均值分别为39.70,38.33,38.77 nm,带内响应的非一致性同为0.05%。实验结果表明大气校正仪490 nm和870 nm中心波长测量极差值与带宽均值的比值精度在0.25%以内,满足带内响应非一致性小于0.6%的定标要求。

5 结 论

精确定标是实现偏振遥感器量化应用的基本前提,带内相对光谱响应度是偏振遥感器带内响应非一致性检测和评估的基本参数。提出了偏振遥感器偏振测量模型,搭建了一套偏振遥感器相对光谱响应度测量装置,该装置采用消偏器消除单色仪输出的偏振特性,通过SPOLA进行消偏精度测量和验证。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。以大气校正仪490 nm通道和870 nm通道作为应用示范,分别开展了以激光抽运氙灯光源和卤钨灯光源作为单色仪输入的相对光谱响应度的整机定标实验。实验结果表明,相对光谱响应度测量装置的偏振特性得到很好抑制的同时避免了输出辐射通量的损失,大气校正仪490 nm通道和870 nm通道中心波长测量极差值与带宽的比值精度在0.25%以内,满足带内响应非一致性小于0.6%的定标要求。

在进一步的工作中,提高激光抽运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

Δ_{max} 和带宽均值 Δr_{λ} ,进行带内响应非一致性计算:

$$\rho = \Delta_{\text{max}} / (\Delta \lambda_{\lambda}^k). \quad (7)$$

大气校正仪的中心波长和带宽的测试结果如表2所示。

的影响,提高相对光谱响应度测量精度;提高标准探测器在490 nm通道的相对光谱响应度,减少标准探测器对测量结果的影响;进一步分析单色仪的波长点定位精度对相对光谱响应度测量精度的影响。带内相对光谱响应度在偏振遥感器的实验室定标方面具有良好的应用前景,为偏振遥感器的定量化实际应用提供重要基础。

参 考 文 献

- [1] Tao F, Hong J, Song M X, *et al.* Geometric calibration data processing and software design of directional polarization camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091005.
陶菲, 洪津, 宋茂新, 等. 偏振成像仪几何定标数据处理及软件设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091005.
- [2] Zhang N, Wang F, Liu J, *et al.* Spatial distribution polarization pattern acquisition based on polarization imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091101.
张楠, 王飞, 刘俊, 等. 基于偏振成像技术的空间大气偏振模式分布获取[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091101.
- [3] Ye S, Fang Y H, Sun X B, *et al.* Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 999-1003.
叶松, 方勇华, 孙晓兵, 等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. *光学学报*, 2007, 27(6): 999-1003.
- [4] Qian H H, Meng B H, Yuan Y L, *et al.* Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera [J]. *Acta Physica*

- Sinica, 2017, 66(10): 100701.
- 钱鸿鹄, 孟炳寰, 袁银麟, 等. 星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析[J]. 物理学报, 2017, 66(10): 100701.
- [5] Liu X, Zhang L, Wang F, *et al.* Non-uniform calibration method in polarization imaging detection system[J]. Computer Engineering. 2009, 35(18): 209-211.
- 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.
- [6] Deschamps P Y, Herman M, Podaire A, *et al.* POLDER instrument: mission objectives[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1747: 72-91.
- [7] Goloub P, Deuze J L, Herman M, *et al.* Analysis of the POLDER polarization measurements performed over cloud covers[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1994, 32(1): 78-88.
- [8] 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[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5659: 88-96.
- [9] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Preflight calibration of the POLDER instrument[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2553: 218-231.
- [10] Kang Q, Yuan Y L, Li J J, *et al.* Polarization calibration methods of channel-type polarization remote sensor[J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2015, 10(4): 343-349.
- 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(4): 343-349.
- [11] Yuan Y L. Design and application of a spectrally tunable integrating sphere reference source with large exit aperture [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 75-107.
- 袁银麟. 大口径光谱可调积分球参考光源的研制与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 75-107.
- [12] Fuqua P D, Panetta C J, Barrie J D. Out of band scatter measurements from OLI optical bandpass filters[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8510: 851009.
- [13] Kang Q, Yuan Y L, Li J J, *et al.* Filtration and precision verification of optical filters on atmospheric synchronous corrector[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0312003.
- 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.
- [14] Zhou L, Wu H Y, Zheng X B. Calibration for relative spectral responsivity of multichannel radiometer[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(1): 37-41.
- 周磊, 吴浩宇, 郑小兵. 通道式辐射计的相对光谱响应率定标[J]. 计量学报, 2007, 28(1): 37-41.
- [15] Zhang J M, Lin Y D, Shao J, *et al.* A standard facility for spectral response measurement of silicon photodiodes[J]. Acta Metrologica Sinica, 1998, 19(3): 194-198.
- 张建民, 林延东, 邵晶, 等. 硅光电探测器光谱响应度测量标准装置[J]. 计量学报, 1998, 19(3): 194-198.
- [16] Li J H, Zheng M, Zhang X B, *et al.* Study on calibration and error compensation of Mueller matrix imaging polarimeter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021202.
- 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.
- [17] Barnes R A, Yeh E, Eplee R E. SeaWiFS calibration topics [J]. NASA Technical Memorandum, 1996, 39: 104566.
- [18] Barnes R A, Butler J J. Modeling spectral effects in earth-observing satellite instruments[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6744: 67441K.
- [19] Zhang Q G, You J H, He J. Physical mechanism and half-width of spectrum widening [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 29(1): 84-87.
- 张庆国, 尤景汉, 贺健. 谱线展宽的物理机制及其半高宽[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 84-87.
- [20] Yuan Y L, Zheng X B, Wu H Y, *et al.* A intensity modulated spectro-polarimetric analyzer based on Fourier transformation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1223001.
- 袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1223001.
- [21] Hu Y D, Hu Q Y, Sun B, *et al.* Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 652-659.
- 胡亚东, 胡巧云, 孙斌, 等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 652-659.
- [22] Qiu G G, Li X, Wei W, *et al.* Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0701001.

- 邱刚刚, 李新, 韦玮, 等. 基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标试验与分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0701001.
- [23] Chen L G. Study of laboratory calibration of the airborne polarization CCD camera with wide field of view[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 26-35.
- 陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2008: 26-35.
- [24] Fan H M, Kang Q, Qiu Z W, *et al.* Polarization calibration for multi-spectral aperture-divided simultaneous detection system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0228001.
- 范慧敏, 康晴, 裘桢炜, 等. 多光谱分孔径同时探测系统偏振定标方法[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0228001.