

光学学报

紫外可见偏振成像光谱仪的光谱定标与匹配方法

石晶晶^{1,2}, 李孟凡^{2*}, 胡亚东², 池杲璠², 王相京², 洪津^{1,2}

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, 安徽 合肥 230031

摘要 紫外可见偏振成像光谱仪中沃拉斯顿棱镜的色散效应会导致探测器同一空间通道的中心坐标发生偏移, 影响目标信号探测精度。根据偏振解调算法, 利用沃拉斯顿棱镜出射的两正交分量调制光谱(S 光和 P 光)实现偏振信息解调时, 还需要完成光谱匹配。针对这一问题, 提出了一种光谱定标与匹配方法。首先利用平行光源标定了仪器视场角与空间维像元的对应关系, 提取出各空间通道对应的像元坐标集合并确定了视场定标方程; 在同一空间通道内, 通过低压汞灯标准光源对波长与像元的对应关系进行标定, 得出光谱定标方程; 利用视场定标和光谱定标结果完成正交分量光谱的匹配; 最后利用太阳光谱中 Fraunhofer 线的特征波长对定标结果进行了检验。结果表明: 紫外可见偏振成像光谱仪正交分量的光谱吸收峰位具有较好的一致性, 定标值和标准值的偏差在 0.1 nm 以内, 这验证了定标结果的准确性。

关键词 光谱学; 光谱定标; 偏振光谱仪; 视场定标; Fraunhofer 线

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0930002

Spectral Calibration and Matching Method for Ultraviolet-Visible Polarization Imaging Spectrometer

Shi Jingjing^{1,2}, Li Mengfan^{2*}, Hu Yadong², Chi Gaojun², Wang Xiangjing², Hong Jin^{1,2}

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

² Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract The dispersion effect of the Wollaston prism in the ultraviolet-visible polarization imaging spectrometer causes the center coordinates of the same spatial channel of the detector to shift and ultimately affects the accuracy of target signal detection. According to the polarization demodulation algorithm, spectral matching is also required when the modulation spectra of the two orthogonal components (S spectrum and P spectrum) exiting from the Wollaston prism are used to demodulate polarization information. In response, this paper proposes a spectral calibration and matching method. To start with, parallel light sources are used to calibrate the corresponding relationship between the field-of-view angle of the instrument and the pixel in the spatial dimension, and pixel coordinate collections corresponding to each spatial channel are extracted to determine a field-of-view calibration equation. Subsequently, in the same spatial channel, the corresponding relationship between wavelength and pixel is calibrated by the standard light source of a low-pressure mercury lamp to obtain a spectral calibration equation. Then, the results of field-of-view calibration and spectral calibration are utilized to match the orthogonal component spectra. Finally, the calibration results are tested on the characteristic wavelength of the Fraunhofer line in the solar spectra. The results show that the positions of the spectral absorption peaks of the two orthogonal components exiting from the ultraviolet-visible polarization imaging spectrometer have favorable consistency. Specifically, the

收稿日期: 2021-08-25; 修回日期: 2021-10-19; 录用日期: 2021-11-22

基金项目: 装备预研(305090306)

通信作者: *mfli@aiofm.ac.cn

deviation between the calibration value and the standard one is within 0.1 nm, which verifies the accuracy of the calibration results.

Key words spectroscopy; spectral calibration; polarization spectrometer; field-of-view calibration; Fraunhofer line

1 引言

光谱成像技术和偏振成像技术在大气气溶胶遥感探测领域中发挥着重要作用,近些年来随着光学技术的发展,一种成像技术、光谱探测和偏振探测相融合的偏振光谱成像技术得以形成,该技术能够同时获取被测目标的空间、光谱辐射和偏振等多维信息^[1-3]。偏振光谱强度调制系统是偏振光谱成像领域的研究热点^[4-5],由日本学者 Oka 等^[6-7]在 1999 年首次发明,具有体积小、重量轻、无转动部件、一次测量即可获取全斯托克斯参量的优点。2009 年,Snik 等^[8]在强度调制技术的基础上进行改进,提出了光谱调制线偏振测量方法,由于大气散射光中圆偏振分量很小,该方法更适用于大气气溶胶遥感探测。

紫外可见偏振成像光谱仪是基于光谱调制线偏振测量原理研制的一种新型气溶胶光学遥感探测仪器,将偏振光谱调制模块与 Offner 成像光谱仪进行有效的结合,通过单次成像即可获取观测区域内的偏振光谱强度数据,该方法在航空航天偏振光谱遥感中具有重要的应用价值。高精度定标决定了遥感仪器数据的有效性和可靠性,定标精度直接影响到最终的反演产品精度^[9]。光谱定标、辐射定标和偏振定标是紫外可见偏振成像光谱仪的实验室定标内容,其中光谱定标确定了仪器光谱探测波段,是辐射定标和偏振定标的前提和基础,也是大气参数高精度反演的重要保障。

紫外可见偏振成像光谱仪利用望远系统将目标成像在狭缝上,狭缝像经过分光系统后,探测器对其进行离散采样,得到条带目标的图像和光谱信息,狭缝像的色散方向为光谱维方向,与其正交的方向为空间维方向。理想情况下,探测器同一行(空间维方向)为一个光谱探测通道,同一列(光谱维方向)为一个空间探测通道,但是由于偏振调制模块中采用沃拉斯顿棱镜作为检偏器,其色散效应会使得不同波长的分束角不一致,导致空间通道的中心坐标发生偏移,像元输出信号产生偏差,因此仪器的光谱定标需要针对不同的空间通道分别进行。根据光谱调制线偏振测量技术的原理,要想利用沃拉斯顿棱镜出射的两正交分量的调制光谱对偏振信息进行解调,

在完成光谱定标的同时还需要实现光谱的匹配。为了解决上述问题,本文研究了相应的光谱定标和匹配方法,搭建了视场定标和光谱定标的实验装置,完成了仪器精确光谱定标,并实现了正交分量光谱的匹配,最后利用仪器采集的太阳光谱中的 Fraunhofer 线完成了对定标结果的验证。

2 紫外可见偏振成像光谱仪介绍

紫外可见偏振成像光谱仪是可用于对紫外-可见光波段(340~520 nm)目标偏振特性进行观测的光学遥感仪器。光学系统如图 1 所示,主要由偏振光谱调制模块、前置望远镜系统和成像光谱仪组成,其中偏振光谱调制模块示意图见图 2,包括消色差 1/4 波片 R1、多级波片 R2 和沃拉斯顿棱镜 P。光谱调制模块将入射光偏振信息调制在光谱维,经过沃拉斯顿棱镜检偏后形成两正交分量(S 光和 P 光),望远系统将正交光束成像于狭缝上,光束经过狭缝会进入 Offner 光谱仪系统,被色散重新聚焦于探测器像面,形成连续的分立波长单色图像。探测器采用长光辰芯的紫外 CMOS 面阵图像传感器,行列方向分别对应光谱维和空间维,文中对仪器的 $\pm 4^\circ$ 视场进行标定,S 光和 P 光空间维对应列号分别为 110-270(V)和 400-550(V),光谱维对应行号为 700-1500(H)。

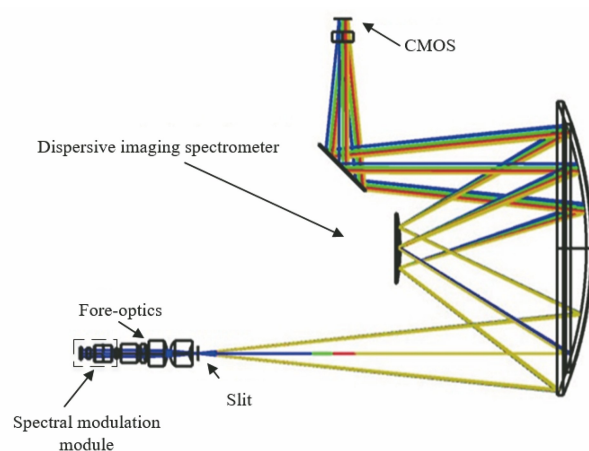


图 1 仪器光学系统

Fig. 1 Optical system of instrument

偏振光谱调制模块是仪器光学系统中的核心部分,消色差 1/4 波片的快轴和慢轴分别与沃拉斯顿棱镜两正交检偏方向平行,多级波片快轴与消色差

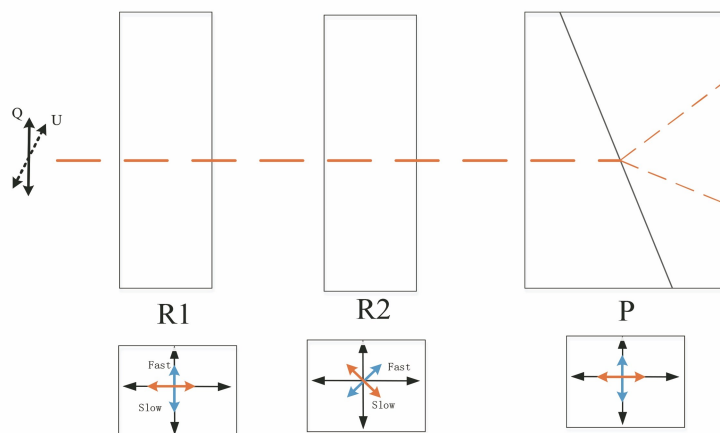


图 2 光谱调制模块示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spectral modulation module

1/4 波片快轴的相对角度为 45°。定义消色差 1/4 波片的快轴方向为 0°线偏振光方向,入射光经过 R1 时,其 Stokes 矢量中 Q 分量不发生改变,U 分量会转换成圆偏振 V 分量;多级波片 R2 将 Q、V 分量分解成两个相等的部分并将其分别投影到 R2 快轴和慢轴方向,两部分光会产生不同的相位延迟,实现对被测光偏振信息的调制;沃拉斯顿棱镜相当于两个检偏方向相互垂直的线偏振片,可完成偏振信息的解析。

光谱调制模块的穆勒矩阵由各偏振元件的穆勒矩阵级联得到,出射光的 Stokes 矢量是调制模块穆勒矩阵和入射光 Stokes 矢量的乘积,仪器理想的偏振光谱探测方程^[8]为

$$I_{s/p} = \frac{1}{2} I_{in}(\lambda) \left\{ 1 \pm P_L(\lambda) \cos \left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda} + 2\phi(\lambda) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: I_s 和 I_p 分别表示 S 光和 P 光在沃拉斯顿棱镜正交检偏方向下的理想调制光谱; I_{in} 为入射光的原始光谱; δ 为多级波片的延迟量; P_L 、 ϕ 分别为入射光的偏振度和偏振方位角。由式(1)可以看出偏振度和偏振方位角分别调制在余弦函数振幅和相位上,S 光和 P 光的调制光谱正好反相。

利用两正交分量的调制光谱可以实现偏振信息的解调^[10]。将调制光谱进行归一化处理:

$$M(\lambda) = \frac{I_s(\lambda) - I_p(\lambda)}{I_s(\lambda) + I_p(\lambda)} = P_L(\lambda) \cos \left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda} + 2\phi(\lambda) \right], \quad (2)$$

根据式(2)对测量结果进行最小二乘拟合,即可完成入射光偏振度和偏振方位角的求解。

3 视场定标实验

3.1 视场定标方法

视场定标的目的是完成探测器不同空间通道中心坐标的定位,明确探测器像元序号与入射辐射的空间位置之间的对应关系。定标基本原理就是利用仪器已知的空间位置作为视场定标标准,光源从不同角度入射至待定标仪器入瞳,探测器会输出一系列像元响应信号,采用数理统计方法完成像元序号和光源入射角度之间的回归分析,从而给探测器像元分配对应的角度^[11]。

定标装置如图 3 所示,包括离轴平行光管、氙灯光源、高精度三维调整转台及控制与数据采集计算

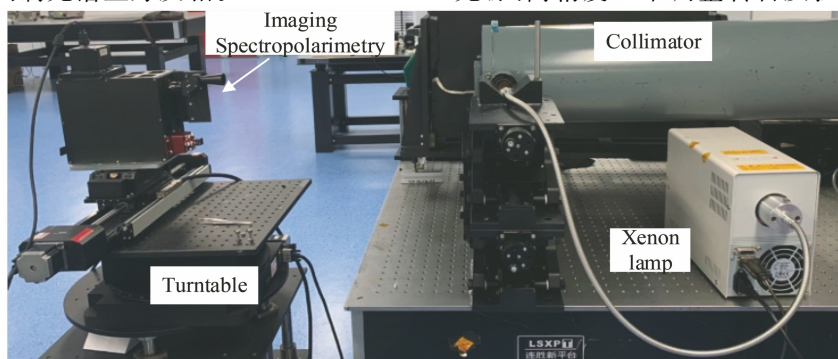


图 3 视场定标现场

Fig. 3 Field of view calibration site

机。测试前首先通过经纬仪将仪器光轴与平行光管的光轴对准,平行光以不同角度入射时,探测器会记录同一视场下 S 光和 P 光光谱。然后以 0.5° 为间隔旋转高精度旋转台,在各个角度下采集入射平行光图像,直到仪器输出基本为暗信号时结束测量,分别记录转台旋转角度和仪器采集图像,用于数据处理。

3.2 视场定标结果分析

光学系统成像过程中的点扩展函数可以用高斯函数来模拟,当将已知角度的入射平行光作为定标光源时,通过高斯函数来对空间维像素灰度值进行拟合,可以确定最大值所对应像素的位置,该位置即空间通道中心坐标,与平行光入射角度对应。图 4 是 4° 视场处探测器采集的图像。

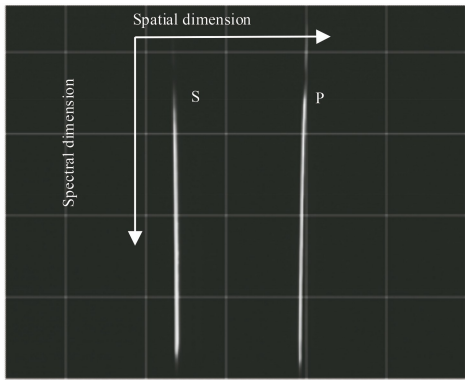


图 4 探测器采集的平行光图像场

Fig. 4 Image of parallel light acquired by detector

图 5 给出了第 1200 行归一化数据拟合结果,确定 S 光和 P 光拟合峰值中心对应的像元列号分别为 120.94 和 408.51,该像元列号与 4° 视场对应。

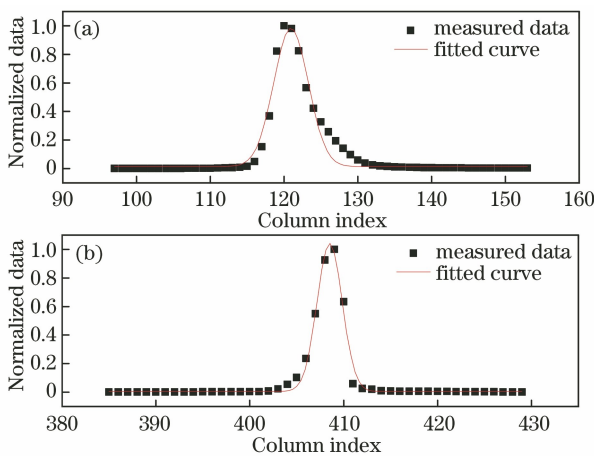


图 5 拟合结果。(a) S 光;(b) P 光

Fig. 5 Fitting results. (a) S beam; (b) P beam

为了提取出同一空间通道对应的的光谱信号,文中利用像元坐标集合来描述探测器像面的光谱分布情况。某一空间通道像元坐标集合为 $\{m(i), i\}$,

的取值范围是 $700 \sim 1500$,其中 i 为探测器行序号, m 为视场角 θ 所对应像元的列序号。图 6 是不同角度的入射平行光在探测器像面上的像元坐标集合分布,可以看出各空间通道的中心坐标并非分布在同一列,在空间维存在较大的偏移,中心视场处,第 700 行和第 1500 行所对应的中心坐标列号相差 14 左右。

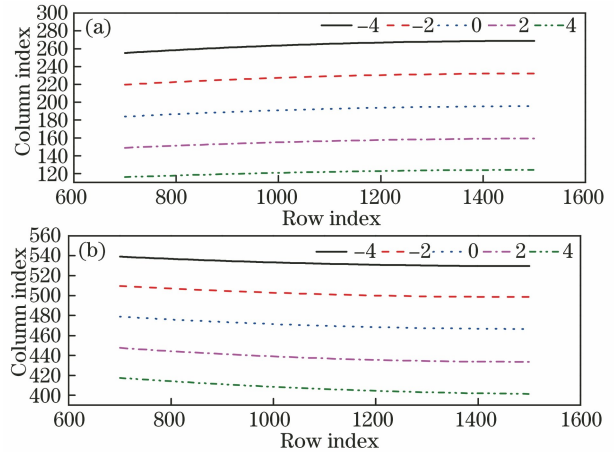


图 6 各视场像元集合。(a) S 光;(b) P 光

Fig. 6 Pixel collection at different field of view.

(a) S beam; (b) P beam

针对 S 光和 P 光的每一行数据,利用线性回归模型来拟合像元响应列序号和角度之间的关系,从而获取探测器各光谱通道内的像元对应视场角,回归模型为

$$\theta_i = \partial_0 + \partial_1 c_i, \quad (3)$$

$$\partial_1 = \frac{\sum_{i=1}^M (c_i - \bar{c})(\theta_i - \bar{\theta})}{\sum_{m=1}^n (c_i - \bar{c})^2}$$

$$\partial_0 = \bar{\theta} - \partial_1 \bar{c}, \quad (4)$$

式中: θ_i 和 c_i 分别为视场角和探测器像元列序号; $\bar{\theta}$ 和 \bar{c} 分别为 M 组测量数据视场角均值和像元列序号均值。图 7 为视场定标回归直线。以第 1000 行为例,则 S 光的回归结果为

$$\theta_s = -0.063c_i + 29.886, \quad (5)$$

相关系数 $R^2 = 0.99$;P 光的回归结果为

$$\theta_p = -0.056c_i + 10.667, \quad (6)$$

相关系数 $R^2 = 0.99$,其中 θ_s 和 θ_p 分别为 S 光和 P 光对应的视场角。

4 光谱定标实验

4.1 光谱定标方法

光栅光谱仪应用较多的光谱定标方法有单色仪

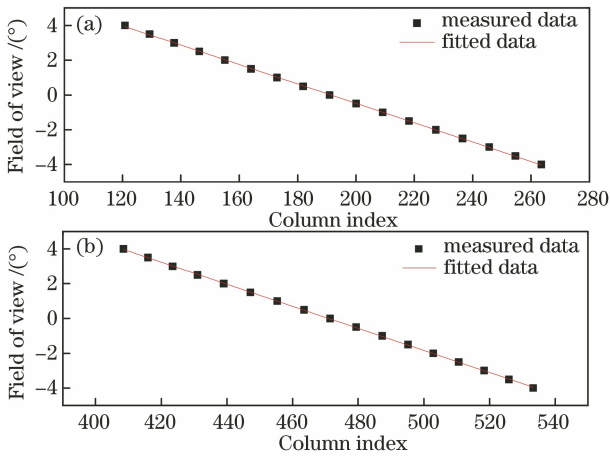


图 7 视场定标回归直线。(a) S 光;(b) P 光
Fig. 7 Field of view calibration regression lines.
(a) S beam; (b) P beam

法、可调谐激光器法和标准谱线灯法^[12-15]。单色仪法利用高分辨率单色仪的分光产生一系列连续可调的不同波长的窄带光谱并完成定标光源,实验装置搭建比较繁琐,每次测量需要调整光栅,还要对出射光波长进行精确标定,这样才能将该装置应用于仪器光谱定标中;可调谐激光器法是利用可调谐激光器输出的准直激光照射仪器、完成光谱定标,但是单次测量只能实现单个波长的标定,定标效率低,而且每次调节波长引入的误差不同,影响定标精度;标准谱线灯法利用特定化学元素放电时发出的特征谱线来进行定标,具有装置结构简单、定标效率高等特点,是一种实用的定标方法。

在光谱定标过程中,还需要考虑到定标光源偏振特性的影响。从式(1)可以看出,S 光和 P 光的光谱强度与入射光的偏振特性有关,光谱强度的最大值 $I_{\max} = \frac{1}{2} I_{\text{in}}(1 + P_L)$ (其中 I_{in} 为入射光原始光谱强度值, P_L 为入射光偏振度), 光谱强度的最小值 $I_{\min} = \frac{1}{2} I_{\text{in}}(1 - P_L)$ 。入射光偏振度较大时,可能会严重降低其中一个通道的采集光谱幅值,使得测量信号信噪比大幅降低,影响定标结果。

根据仪器工作波长范围,本文选择低压汞灯作为定标光源,其特征光谱带宽远小于仪器光谱分辨率,出射光波长经过中国计量院标定,不确定度较小。光谱定标示意图见图 8,通过将汞灯光源导入积分球,形成均匀无偏光,用均匀无偏光照射仪器,以有效地消除定标光源偏振特性的影响,同时还能实现全视场光谱的同时标定。调整仪器至合适的积分时间,采集明暗图像各 20 帧用于后续数据处理。

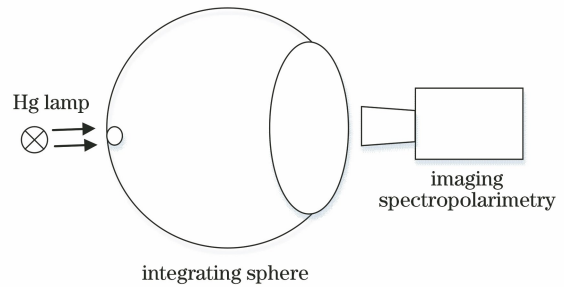


图 8 光谱定标实验示意图
Fig. 8 Schematic diagram of spectral calibration experiment

4.2 光谱定标结果分析

仪器观测到的低压汞灯积分球的原始图像见图 9,探测器像面记录的光谱包括 S 光和 P 光的全视场光谱,需要对二者分别进行处理。

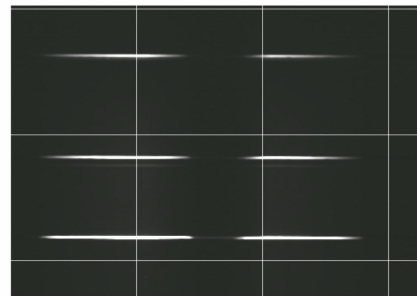


图 9 探测器采集的汞灯光谱图像
Fig. 9 Spectral image of mercury lamp acquired by detector

由第 3 节的分析可知,对光谱定标数据进行处理前,需要在视场定标基础上,提取出同一空间通道下的光谱像元集合,然后针对各特征波长进行高斯拟合,求得峰值波长对应的光谱维像元号。为了说明定标数据处理过程,文中给出中心视场处光谱定标结果。图 10 是中心视场对应的汞灯特征光谱,其中 DN 为数字量化值。

与第 3 节的寻峰方法相同,利用高斯函数拟合方式确定特征光谱的中心波长位置与像元行号之间的对应关系,图 11 给出汞灯特征谱线 404.66 nm 处的仪器光谱响应曲线。

将高斯函数拟合求得的中心波长对应的像元位置与标准灯特征波长进行匹配,结果如表 1 所示。

由于探测器列像元序号和对应的波长近似满足线性关系,采用最小二乘法对波长-像元匹配数据进行回归分析,图 12 给出了回归分析结果。

S 光和 P 光的波长定标方程分别为

$$\lambda_s = 0.27225i + 141.60973, \quad (7)$$

$$\lambda_p = 0.2723i + 141.32763, \quad (8)$$

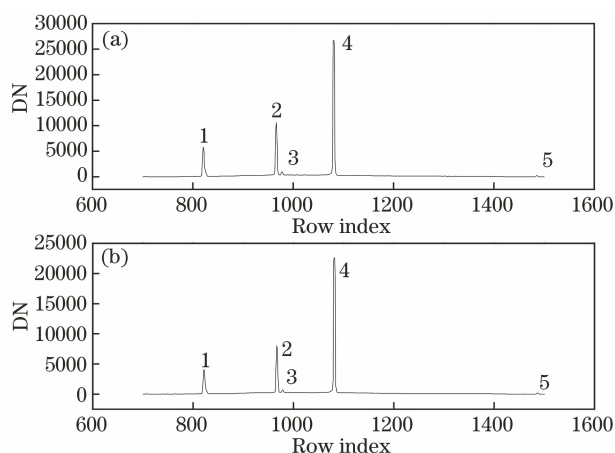


图 10 汞灯光谱。(a) S 光；(b) P 光

Fig. 10 Spectra of mercury lamp.

(a) S beam; (b) P beam

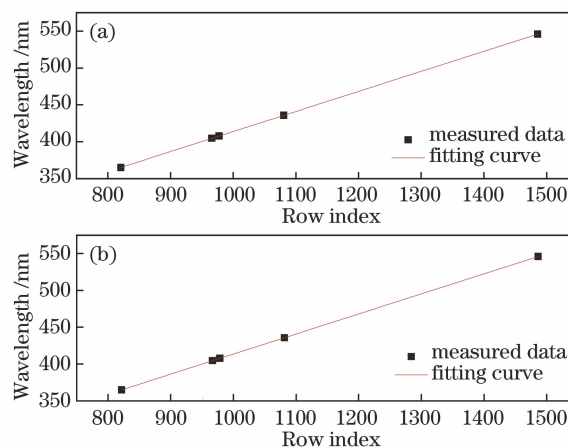


图 12 光谱定标回归直线。(a) S 光；(b) P 光

Fig. 12 Spectral calibration regression lines.

(a) S beam; (b) P beam

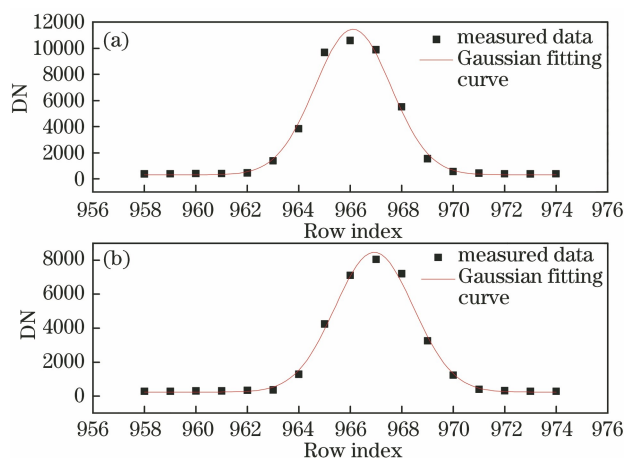


图 11 汞灯特征谱线 404.66 nm 处的仪器光谱

响应曲线。(a) S 光；(b) P 光

Fig. 11 Spectral response curves of instrument at 404.66 nm of mercury lamp characteristic spectral line. (a) S beam; (b) P beam

表 1 波长-像元匹配关系

Table 1 Wavelength-pixel matching relationship

Wavelength /nm	Pixel of center peak	
	S beam	P beam
365.02	820.79	821.72
404.66	966.11	966.93
407.78	977.57	978.42
435.83	1080.59	1081.42
546.07	1485.68	1486.46

相关系数 $R^2 = 0.99$, 其中 λ_s, λ_p 为波长, i 为探测器行号。

根据波长定标方程, 计算得到中心视场处 S 光和 P 光的光谱响应范围分别为 332.2~549.9 nm 和 331.9~549.7 nm, 满足 340~520 nm 的光谱响应设计范围。

5 光谱匹配方法

5.1 光谱匹配

通过视场定标方程和光谱定标方程可以分别确定 S 光和 P 光的探测器像元在空间维和光谱维的分布, 为了实现光谱的匹配, 需要分别完成视场和波长的配对。匹配方法如下:

1) 首先通过视场定标方程确定同一视场下 S 光和 P 光所对应的空间通道中心坐标分别为 $\theta_j \{m_s(i), i\}$ 和 $\theta_j \{m_p(i), i\}$, 其中 $i = 700, 701, \dots, 1500, j = 1, 2, \dots, N, N$ 表示视场细分数。文中在 $\pm 4^\circ$ 视场范围内以 0.1° 为步长对 S 光和 P 光进行像元坐标集合的提取, 完成视场的配对。

2) 在各空间通道像元集合内, 应用光谱定标方程确定波长与像元行序号的对应关系。完成视场配对的两正交分量调制光谱的 DN 值可以表示为 $S_p \{\theta_j, \lambda_p\}, j = 1, 2, \dots, N$ 。

3) 光学系统畸变引起的光谱弯曲会导致 S 光和 P 光在探测器上同一行对应的波长不同。为了避免解调产生虚假偏振信息, 要求正交分量的调制光谱的采样波长一致, 文中利用线性插值法对 P 光光谱进行重采样, 完成波长配对。最终得到各视场的匹配光谱为 $S_s \{\theta_j, \lambda\}$ 和 $S_p \{\theta_j, \lambda\}, j = 1, 2, \dots, N$ 。

5.2 光谱匹配精度分析

分析紫外可见偏振成像光谱仪的光谱定标和匹配过程, 可以发现光谱匹配的精度影响因素包含两个方面, 分别为视场配对的精度和波长配对的精度。

5.2.1 视场配对精度分析

由视场定标的数据处理流程可知, 视场定标不确定度来源包括视场-列像元位置寻峰不确定度和

视场-列像元位置线性回归拟合不确定度,文中以第 1000 行为例,分析如下。

1) 寻峰不确定度主要由高斯拟合误差来表征,高斯拟合可以进行精确亚像元定位,定位精度优于 0.1 pixel。紫外可见偏振成像光谱仪空间维单个像元所占角度为 0.06°,因此空间维的定位精度优于 0.006°。

2) 线性拟合不确定度由拟合直线和测量值之间的差值决定,通过残差标准差来计算。S 光和 P 光的视场拟合残差标准差分别为 0.028°和 0.027°。

由于视场定标数据处理过程中各误差源是相互独立的,根据误差传递公式来分析视场定标不确定度:

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{12}^2}, \quad (9)$$

式中: σ_{11} 、 σ_{12} 分别为寻峰定位不确定度及回归分析不确定度。S 光和 P 光的视场定标不确定度分别为 0.028°和 0.027°,因此 S 光和 P 光视场配对的偏差在 0.055°以内。

5.2.2 波长配对精度分析

光谱定标过程中不确定度来源主要包括定标光源的波长不确定度、特征光谱寻峰不确定度和线性回归拟合不确定度。分析如下。

1) 低压汞灯特征谱线波长不确定:低压汞灯特征谱线波长经过中国计量科学研究院标定,峰值波长测量不确定度为 0.01 nm。

2) 特征谱峰定位不准确:通过高斯函数拟合的方式确定汞灯特征谱峰位置,结果主要受到拟合寻峰误差、仪器稳定性的影响,不确定度优于 0.1 pixel,仪器设计的光谱采样率为 0.27 nm,不确定度优于 0.027 nm。

3) 回归分析误差:该部分误差主要是由最小二乘回归算法引起的,利用残差标准差来表征。

根据误差传递公式,可得各视场总的定标不确定度为

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{23}^2}, \quad (10)$$

式中: σ_{21} 、 σ_{22} 、 σ_{23} 分别为标准灯特征谱线波长不确定度、特征谱峰定位不确定度及回归分析不确定度。

以中心视场为例,S 光和 P 光的光谱定标不确定度见表 2,因此 S 光和 P 光的波长配对偏差在 0.091 nm 以内。

表 2 光谱定标不确定度

Table 2 Uncertainty of spectral calibration		nm		
Channel	σ_{21}	σ_{22}	σ_{23}	σ_2
S	0.01	0.027	0.0316	0.043
P	0.01	0.027	0.0386	0.048

6 定标结果验证

太阳光谱受到太阳层外大气中原子的吸收而形成一系列 Fraunhofer 线,这种较强的吸收使得太阳光谱中存在一些固定波长的吸收峰,可以利用这些特征波段来检验紫外可见偏振成像光谱仪光谱定标的准确性^[15]。在晴朗无云天气条件下开展了室外天空观测实验,实验装置如图 13 所示,由高精度转台、四象限太阳跟踪器、紫外可见偏振成像光谱仪、相关控制模块和数据采集计算机组成。将仪器安装于转台上,通过四象限太阳跟踪器确定太阳方位,控制转台在太阳主平面内扫描,通过调整合理的积分时间采集天空光谱图像。

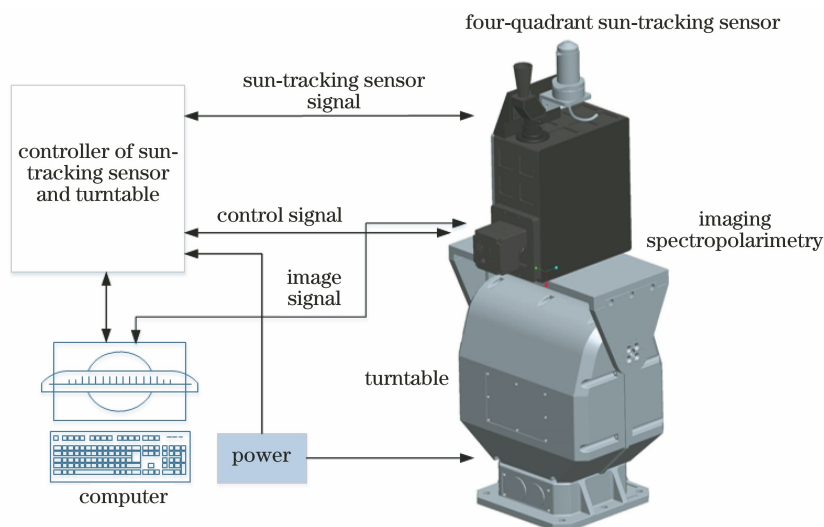


图 13 室外实验示意图

Fig. 13 Schematic diagram of outdoor experiment

根据大气散射理论模型,太阳附近的大气散射光的偏振度最低,随着散射角的增大,偏振度逐渐增大^[16]。因此本文利用临近太阳处的采集光谱来对定标结果进行验证,此时可以认为入射光偏振度很小,光谱仪两正交通道的记录光谱为原始光谱。图 14 给出了转台旋转角度偏离太阳 5°时,仪器采集图像的中心视场对应的 S 光和 P 光匹配光谱。

光谱仪仪器函数的光谱展宽使得无法清晰地分辨出单一太阳 Fraunhofer 线,光谱仪的测量光

谱是太阳 Fraunhofer 线与光谱仪仪器函数卷积的结果,因此太阳 Fraunhofer 线的位置通过光谱内插的方式给出,内插方法采用三次样条插值。S 光和 P 光的定标波长和 Fraunhofer 线标准波长对比见表 3。

从表 3 的对比结果可知,S 光和 P 光中吸收峰位具有较好的一致性并且相对于太阳 Fraunhofer 线标准波长的偏差在 0.1 nm 内,这验证了光谱定标与匹配方法的正确性。

表 3 定标值与 Fraunhofer 线标准值的对比

Table 3 Comparison of calibration value and standard value of Fraunhofer lines

nm

Absorption element	Standard wavelength	Calibration wavelength		Deviation	
		S beam	P beam	S beam	P beam
Ca ⁺	393.37	393.38	393.33	0.01	0.04
Ca ⁺	396.84	396.82	396.8	0.02	0.04
H δ	410.18	410.16	410.1	0.02	0.08
H β	434.05	434.09	434.04	0.04	0.01
Fe	466.81	466.83	466.78	0.02	0.03
H β	486.13	486.09	486.12	0.04	0.01

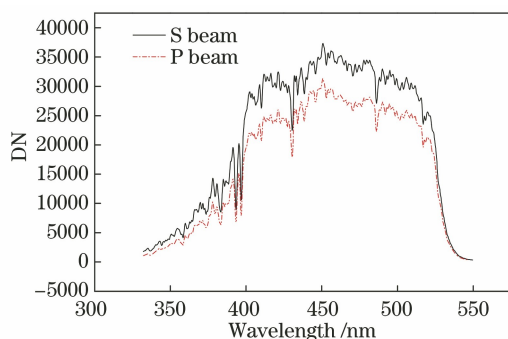


图 14 仪器采集的太阳光谱

Fig. 14 Solar spectrum acquired by instrument

7 结 论

主要研究了紫外可见偏振成像光谱仪的光谱定标和匹配方法。首先通过视场定标获取探测器不同空间通道对应的像元中心坐标集合,在对应像元集合内进行仪器光谱定标数据处理,以有效地解决沃拉斯顿棱镜色散效应引起的空间通道中心坐标偏移的问题,提高光谱定标精度;根据视场定标方程和光谱定标方程完成了正交分量光谱的匹配,这为偏振信息的准确解调提供基础;最后通过对天空散射光谱进行测量,利用太阳光谱中 Fraunhofer 线对光谱定标结果进行了检验。所提出的光谱定标方法可应用于新型偏振成像光谱仪的定标,也为同类仪器的光谱定标提供参考。

参 考 文 献

- [1] Dereniak E L, Hagen N A, Johnson W R, et al. Imaging spectropolarimetry [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5074: 272-285.
- [2] Kim J, Shen S S, Lewis P E, et al. Snapshot imaging spectropolarimeter utilizing polarization gratings [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7086: 708603.
- [3] Snik F, Craven-Jones J, Escuti M, et al. An overview of polarimetric sensing techniques and technology with applications to different research fields [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9099: 90990B.
- [4] 杨斌. 强度调制型偏振光谱成像系统测量误差及定标研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018: 42-45.
Yang B. Research on measurement error and calibration of intensity modulated spectropolarimetric imaging system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 42-45.
- [5] Craven J M, Kudenov M W, Dereniak E L. False signature reduction in infrared channeled spectropolarimetry [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7419: 741909.
- [6] Oka K, Kato T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum [J]. Optics Letters, 1999, 24 (21): 1475-1477.
- [7] Iannarilli F J, Jr., Jones S H, Scott H E, et al. Polarimetric-spectral intensity modulation (P-SIM):

- enabling simultaneous hyperspectral and polarimetric imaging[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3698: 474-481.
- [8] Snik F, Karalidi T, Keller C U. Spectral modulation for full linear polarimetry[J]. Applied Optics, 2009, 48(7): 1337-1346.
- [9] 李朕阳, 刘振海, 邹鹏, 等. 星载偏振扫描仪发射前定标及地面验证实验[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0312002.
- Li Z Y, Liu Z H, Zou P, et al. Prelaunch calibration and ground verification test of spaceborne particulate observing scanning polarimeter [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0312002.
- [10] 石晶晶, 胡亚东, 李孟凡, 等. 基于光谱调制的线偏振测量技术研究及精度验证[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0212003.
- Shi J J, Hu Y D, Li M F, et al. Research and accuracy verification of linear polarization measurement technology based on spectral modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0212003.
- [11] 毛靖华. 高分辨率紫外可见成像光谱仪地面定标技术研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2017: 42-46.
- Mao J H. Study on ground calibrations of high spectral resolution UV-VIS imaging spectrometer [D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2017: 42-46.
- [12] 金辉, 姜会林, 郑玉权, 等. 高光谱遥感器的光谱定标[J]. 发光学报, 2013, 34(2): 235-239.
- Jin H, Jiang H L, Zheng Y Q, et al. Spectral calibration of the hyperspectral optical remote sensor [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(2): 235-239.
- [13] 马亮, 危峻, 黄小仙, 等. 光栅色散型成像光谱仪的实验室光谱定标方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 023001.
- Ma L, Wei J, Huang X X, et al. Laboratory spectral calibration method of grating dispersive imaging spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 023001.
- [14] 周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱定标技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(11): 2881-2885.
- Zhou H J, Liu W Q, Si F Q, et al. Spectral calibration for space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(11): 2881-2885.
- [15] 李聪, 王咏梅. 用 PtNe 灯对大气紫外成像光谱仪进行光谱定标[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 3302-3305.
- Li C, Wang Y M. Spectral calibration of the atmosphere ultraviolet imaging spectrograph using a PtNe lamp[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(12): 3302-3305.
- [16] 邹晓辰. 不同天气下的天空散射光偏振特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 11-15.
- Zou X C. Study on polarized characteristics of scattering skylight at different atmospheric conditions [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 11-15.