

基于双 Amici 棱镜设计的多狭缝偏振成像光谱仪

裴琳琳¹, 相里斌^{1,2}, 吕群波^{2*}, 邵晓鹏¹

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

²中国科学院光电研究院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094

摘要 偏振成像光谱技术可以获取目标景物的七维空间信息,其获取丰富数据信息的能力使它的应用越来越广泛。基于双 Amici 棱镜对多狭缝偏振成像光谱仪的光学系统进行设计,采用双 Amici 棱镜作为系统的分光元件提供宽视场平行光束色散,以满足多狭缝的需求;宽视场的多狭缝结构是基于常规狭缝式成像光谱仪结构进行优化的。本系统中宽视场的多狭缝光谱仪结构须做好与前置望远物镜的光瞳衔接。成像系统和偏振光谱仪系统均采用远心结构,以便与光瞳匹配,系统总长度为 279 mm,系统光路共轴,结构紧凑;通过调制传递函数(MTF)和点列图对光学系统的像质进行评价。结果表明:全系统在各视场典型波长处的 MTF 均接近衍射极限,MTF 在 39 lp/mm处超过了 0.75;各典型波长处的点列图均在艾里斑内,接近完美成像;3 条狭缝对应 3 个不同的偏振态,可通过推扫获取目标景物的偏振信息、空间信息和光谱信息。

关键词 光学设计; 成像光谱仪; 双 Amici 棱镜; 偏振成像; 多狭缝

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1122001

Multi-Slit Polarization Imaging Spectrometer Based on Double Amici Prism

Pei Linlin¹, Xiangli Bin^{1,2}, Lü Qunbo², Shao Xiaopeng¹

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²Key Laboratory of Computational Optics Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract Seven-dimensional spatial information of a target scene can be obtained with utilization of the polarization imaging spectroscopy. The polarization imaging spectroscopy is applied more and more widely due to its ability of getting rich data information. We design an optical system of multi-slit polarization imaging spectrometer based on the double Amici prism. As a light splitting element, the double Amici prism can provide parallel beam dispersion of wide field to meet the needs of the multi-slit. We optimize the optical structure of the multi-slit based on the conventional slit imaging spectrometer. The pupil of wide field in the multi-slit spectrometer structure must match with the pupil of the front telescope. The imaging system and polarization spectrometer system adopt telecentric structure to match the pupil. The total length of the system is 279 mm. The system has coaxial optical path, and its structure is very compact. We evaluate the image quality of the optical system by using modulation transfer function (MTF) and spot diagrams. The results show that the MTF at typical wavelengths in each typical field is close to the diffraction limit, and the MTF is over 0.75 at 39 lp/mm. The spot diagram at each typical wavelength is in the Airy spot, which means that the imaging is almost perfect. Three slits correspond to three different polarization states. Polarizations information, spatial information, and spectral information of the target scene can be obtained by pushing-brooming.

Key words optical design; imaging spectrometer; double Amici prism; polarization imaging; multi-slit

OCIS codes 220.2740; 230.5480; 230.2035

收稿日期: 2017-05-22; **收到修改稿日期:** 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61505220)、中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-15S156)

作者简介: 裴琳琳(1987—),女,博士,工程师,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: pll@aoe.ac.cn

导师简介: 相里斌(1967—),男,博士,研究员,主要从事计算成像光谱技术方面的研究。E-mail: xl@aoe.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: lvqunbo@aoe.ac.cn

1 引 言

偏振成像光谱仪能够同时获取目标景物的偏振信息、图像信息和光谱信息,是偏振成像技术与成像光谱技术的有机结合。从复杂的环境中快速、有效地识别出异常目标,是目前偏振成像技术的一个重要研究方向^[1]。偏振信息能够反映目标景物材料的理化特征,如材料属性、表面粗糙度、电导率及含水量等^[2];光谱信息可以反映目标景物的种类、材质及状态;借助图像信息可以直观地判断目标景物的形貌。偏振成像光谱技术因能获取目标景物丰富的属性信息而被广泛用。

偏振成像技术的针对性强,但遮挡伪装对其探测准确性的影响较大,退偏振化效果明显,导致部分目标的漏检率很高^[3]。成像光谱技术具有一定的反伪装能力,但其依赖于光谱分布范围与目标光谱提取算法的选择,因此在整个二维图像区域内实现光谱数据识别时需要处理大量数据,容易出现数据赘余和过量运算的问题^[4]。可见,上述两种目标识别技术都具有其各自的局限性。

双 Amici 棱镜是完全对称的棱镜结构,将其应用在平行光路中可以使出射光束平行输出,从而得到同轴光学系统。将具有这种结构特点的双 Amici 棱镜应用在狭缝式成像光谱仪中可以扩大狭缝像面的二维视场,即在同轴光路中可以同时实现三狭缝的清晰色散成像。狭缝式成像光谱仪通过推扫的工作方式获取目标景物的光谱信息,因此本文设计了一种基于双 Amici 棱镜的多狭缝偏振成像光谱仪,在成像光谱仪工作方式不变的状态下,在共光路中实现了多狭缝成像;在每条狭缝位置增加不同的偏振膜后,可以通过推扫和配准而最终获得目标景物的多维信息。该偏振成像光谱仪的结构紧凑,且兼具偏振成像与光谱成像的优点,保障了目标判断的准确性和稳定性。

2 光学系统原理

2.1 系统构成

基于双 Amici 棱镜的多狭缝偏振成像光谱系统的原理图如图 1 所示,系统包括前置望远物镜、偏振三狭缝、准直镜、双 Amici 棱镜、成像镜和电荷耦合器件(CCD)探测器。整机结构放置在匀速转台上推扫成像,以获取目标景物的多维混合信息,最终通过配准、计算获取可视性结果。

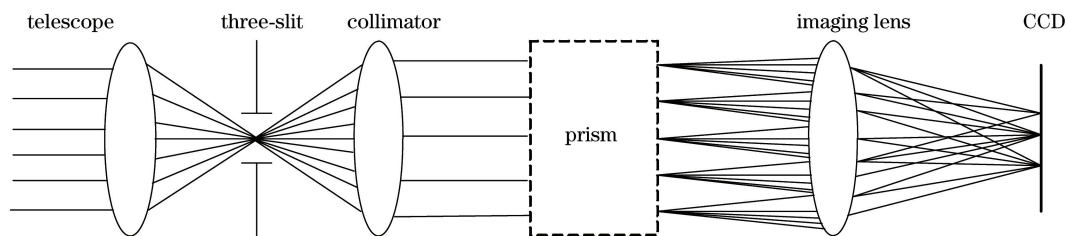


图 1 基于双 Amici 棱镜的多狭缝偏振成像光谱系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of multi-slit polarization imaging spectrometer based on double Amici prism

光学系统的原理如下:前置望远物镜将无穷远处的目标成像在一次像面位置,通过偏振三狭缝滤波后,3个偏振状态的光束分别通过准直镜输出,并共用光路,所有光线通过棱镜色散后再通过成像镜,最后在探测器的不同位置上获取具有不同偏振信息的光谱。

2.2 偏振信息的获取原理

根据光波矢量末端轨迹的形状,可将偏振光分为线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光^[5]。光波矢量末端轨迹为直线,且矢量大小随相位变化的光是线偏振光;光波矢量末端轨迹为圆,且矢量方向随相位变化的光是圆偏振光;光波矢量末端轨迹为椭圆,且矢量大小和方向都随相位变化的光是椭圆偏振光。

偏振光有两种定量化表示方法,即 Jones 矢量表示法和 Stokes 矢量表示法。Jones 矢量表示法主要用于表示完全偏振光,而 Stokes 矢量表示法可表示完全偏振光、部分偏振光和非偏振光^[6-7];因此 Stokes 矢量表示法是一种简单、有效的描述方法。

Stokes 矢量表示法采用 4 个参量 I 、 Q 、 U 、 V 来表征光波的偏振态,实际上需要 3 个独立的参量。 I 为光波的总辐射强度, Q 为 0° 和 90° 线偏振光强度的差值, U 为 $+45^\circ$ 和 -45° 线偏振光强度的差值, V 为左旋圆

偏振光强度 I_l 与右旋圆偏振光强度 I_r 的差值。本课题组采用 Stokes 矢量 \mathbf{S} 表示偏振光, \mathbf{S} 是一个四维向量, 每个参量都有光波强度的量纲, \mathbf{S} 的定义^[8]为

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle E_x^2(t) \rangle + \langle E_y^2(t) \rangle \\ \langle E_x^2(t) \rangle - \langle E_y^2(t) \rangle \\ 2\langle E_x(t)E_y(t) \cos \varphi \rangle \\ 2\langle E_x(t)E_y(t) \sin \varphi \rangle \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 E 为振幅, t 为时间, x 和 y 为坐标轴, φ 为相位, $\langle \rangle$ 为取均值运算符。则 Stokes 矢量满足:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_l + I_r \end{pmatrix}. \quad (2)$$

在偏振成像探测过程中, 通过光学系统出射光的 Stokes 矢量可求出入射光的 Stokes 矢量, 进而可以得到目标景物的偏振信息。

偏振态是二维希尔伯特空间中的一个矢量, 三个实参数才能确定一个偏振态^[9]。为了实现三个实参数的精确测量以及偏振态与空间点之间的一一对应, 实验中采用偏振三狭缝。三狭缝对应不同的偏振态, 通过转台整机推扫可以分时获取目标景物的偏振成像光谱信息, 然后对数据进行配准和计算, 最终可以得到目标景物的多维空间信息。

2.3 光谱信息的获取原理

成像光谱技术有多种分类方式, 基于分光原理, 可将成像光谱技术分为棱镜色散、光栅衍射、滤光片和干涉^[10], 其中棱镜色散的原理简单且应用方便, 是目前获取目标光谱信息最成熟的方式。

正常色散的玻璃材料的折射率与波长呈非线性关系, 在紫外光到近红外光波长范围内, 棱镜折射率因波长不同而具有显著性差异。利用棱镜的这一特性, 可将入射光束散开。但这种非线性关系使得单棱镜色散存在很多缺陷, 如: 光谱分辨率的非线性性质导致短波与长波处的光谱分辨率相差 10 倍之多; 空间方向的不同视场对应的空间入射角的不同导致谱线弯曲; 不同谱段的角放大率的不同导致色畸变等^[11]。为了克服单棱镜的这些缺陷, 将双 Amici 棱镜作为分光元件来设计偏振成像光谱仪。双 Amici 棱镜的结构如图 2 所示, 双 Amici 棱镜由 3 块棱镜构成, 结构基于中线完全对称。第 1 块和第 3 块棱镜均为中等冕牌玻璃, 第 2 块棱镜为高色散火石玻璃。光线经过该棱镜结构后能增大光线的色散角。棱镜的对称结构使得出射光线与入射光线平行, 便于系统光阑的匹配。

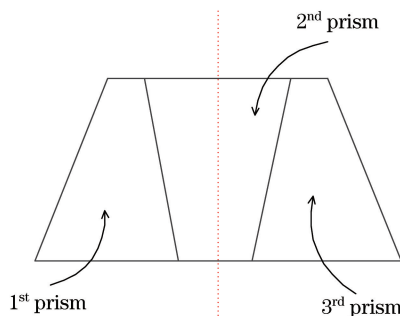


图 2 双 Amici 棱镜结构图

Fig. 2 Structure diagram of double Amici prism

3 光学系统设计

根据光路原理, 基于双 Amici 棱镜的多狭缝偏振成像光谱仪由成像系统和偏振光谱仪系统两部分构成。成像系统将无穷远处的目标呈现在近处, 偏振光谱仪系统将近处不同偏振态的图像进行进一步色散, 以获取目标景物的偏振光谱信息。为了使进入光学系统的光线能够顺利通过光谱仪系统且保证像质, 必须做好这两个光学系统的光阑匹配, 因此前置望远系统采用像方远心结构设计^[12]。光学系统设计参数如下: 焦

距为 50 mm,视场角为 10.6° , F 数为 5。

如果选用库克三片的初始结构,则在仅将镜片曲率、厚度和间隔作为变量来优化系统的情况下,无法获得良好的成像质量。为了保证光学系统在全视场的像质良好,需要增加镜片和更换玻璃材料,在优化过程中需要限制光学镜片的空间距离及玻璃厚度,以确保镜片的可加工和可装调。不断地对优化目标参数进行调整,最终获得的光学结构如图 3 所示。出瞳在无穷远处,各个视场主光线垂直于入射像面,该像方远心结构由 3 个具有常规曲率和厚度的双胶合透镜构成,易于工程实现。

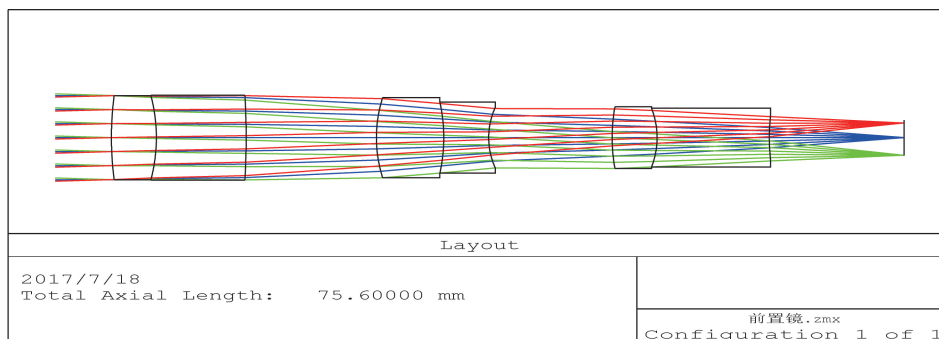


图 3 前置望远系统的结构

Fig. 3 Structure of front telescope system

图 4 所示为前置望远系统的调制传递函数(MTF)和点列图。由图 4 可知,光学系统的 MTF 值接近衍射极限,全谱段点列图在艾里斑内。根据瑞利准则判断后可知,该系统可获得完美成像。

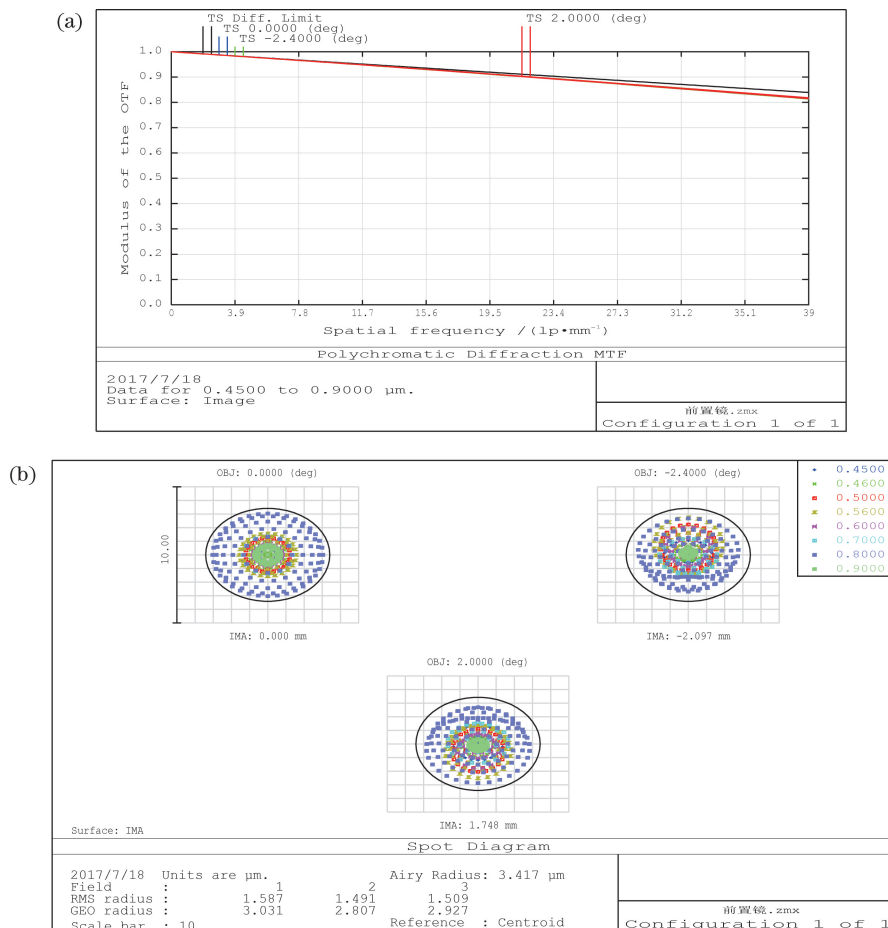


图 4 前置望远系统的(a)MTF 和(b)点列图

Fig. 4 (a) MTF and (b) spot diagram of front telescope system

在前置望远系统的像面处放置偏振三狭缝,此时入射光束带有偏振信息,光束经光谱仪结构色散后成像于探测器上。光谱仪部分包括狭缝、准直镜、棱镜和成像镜。准直镜的作用是使狭缝光束准直输出,以确保平行光进入棱镜,其光路原理是一个望远系统的倒用。实验设计的前置望远系统结构为像方远心结构,将其倒置即可作为光谱仪的准直镜部分,并且可以匹配良好。光谱仪结构的成像镜部分以前置望远系统结构为初始结构,在全系统中独立优化,从而可以确保全波段、全视场的像质良好。最后在整体的光学系统中,对成像系统和光谱仪系统分别独立优化,得到的光学系统如图 5 所示。

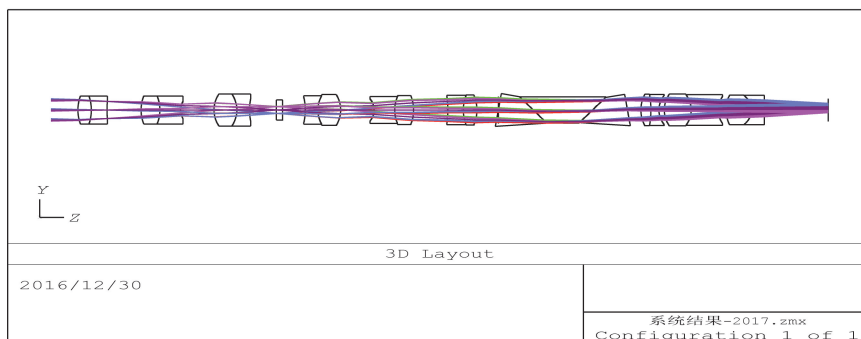


图 5 基于双 Amici 棱镜的多狭缝偏振成像光谱仪结构

Fig. 5 Structure of multi-slit polarization imaging spectrometer based on double Amici prism

全系统由 3 组镜头、1 个偏振狭缝和 1 个棱镜构成,系统光路共轴,结构紧凑且简洁。系统的光谱范围为 450~900 nm,色散距离为 1.161 mm。因篇幅有限,只列出了中心波长处的像质评价,图 6 所示为中心波长处的 MTF 和点列图。由图 6 可知,光学系统的 MTF 接近衍射极限,点列图在艾里斑以内,系统像质接近完美成像,像质良好。

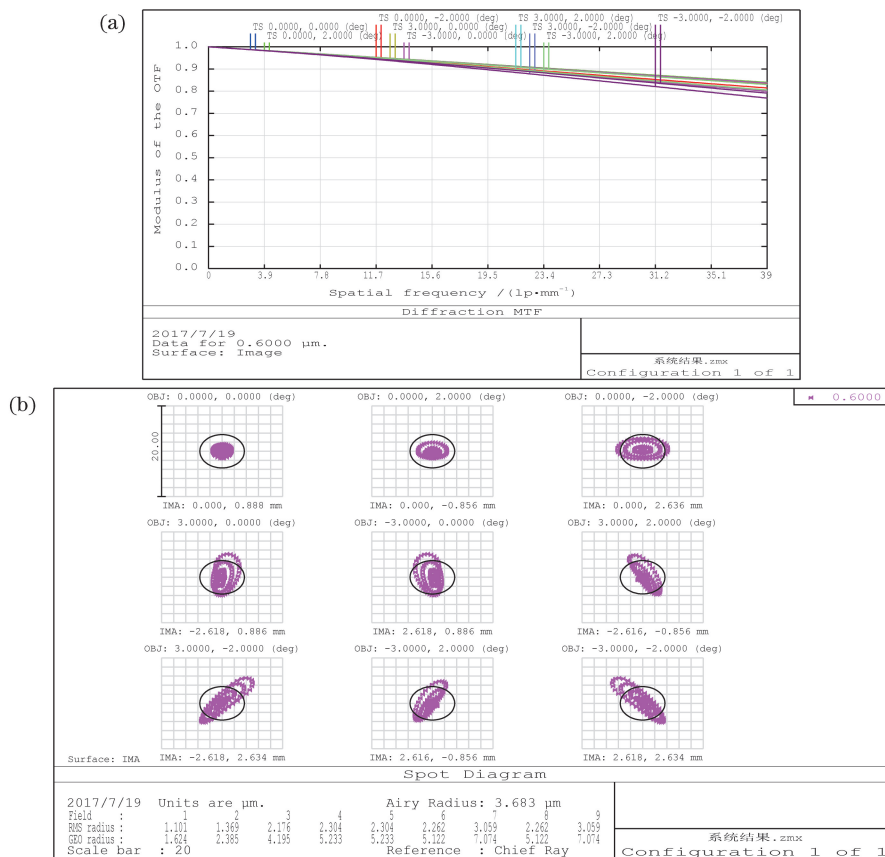


图 6 系统中心波长处的(a)MTF 和(b)点列图

Fig. 6 (a) MTF and (b) spot diagram of system at central wavelength

图 7 所示为全谱段点列图,图 8 所示为系统最终像面处的脚印图。由图 7 和图 8 可知,各视场色散一致。若系统结构采用单棱镜作为色散元件,则必然会导致严重的色散非均匀性,而双 Amici 棱镜的复合结构可以对此进行适当补偿。通过光线追迹的方式计算光谱带宽与波长的关系,绘制图 9,横坐标为像元标号,系统色散为 90 个像元,纵坐标为光谱分辨率,短波的光谱分辨率为 1.6 nm,长波的光谱分辨率为 11.2 nm,全谱段范围内的平均光谱分辨率为 5 nm。可见,复合棱镜光谱分辨率的非均匀性为单棱镜的 7 倍。

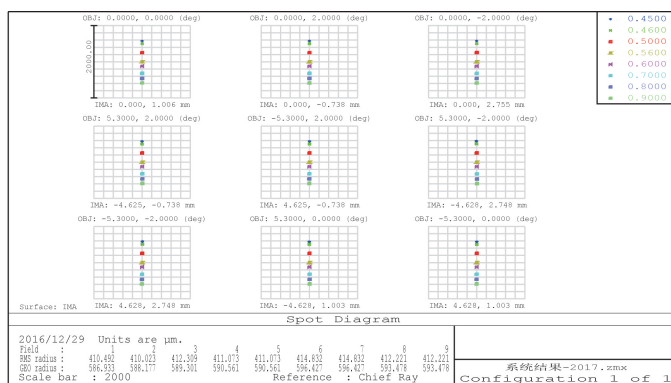


图 7 全谱段点列图

Fig. 7 Spot diagram of all wavelengths

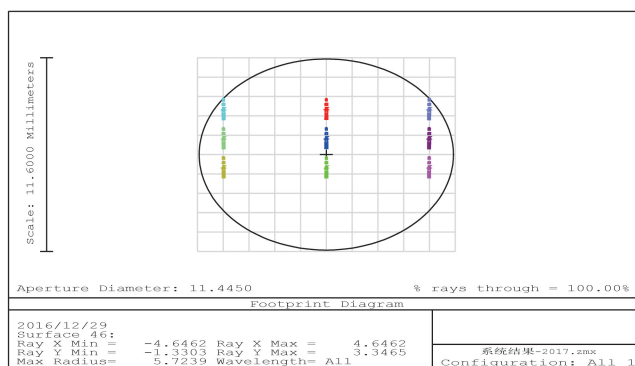


图 8 系统最终像面处的脚印图

Fig. 8 Footdiagram of the system at final image plane

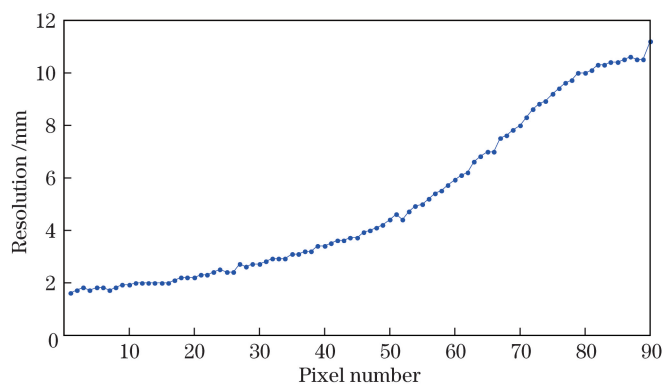


图 9 光谱分辨率

Fig. 9 Spectral resolution

光学系统的像元尺寸是微米级的,点列图和脚印图只能观察整体的色散效果,而标尺均为毫米级的,因此将各个视场典型波长处的具体透射位置(谱线弯曲、谱带弯曲)量化后才可作为评价光学系统的标准。

谱线弯曲指的是同一波长的狭缝像经过光谱仪后在像面上不再是一条直线,而是一条 Smile 线。谱带弯曲是全谱段的点像经过光谱仪后色散开,在像面上不与狭缝方向垂直,而是出现了弯曲和倾斜。通过光线

追迹的方式读取各典型波长的具体透射位置,从而可以计算出光学系统的谱线弯曲和谱带弯曲。由表 1 可知,光学系统的谱线弯曲在 900 nm 波长处达到最大值,为 0.00604 mm,相对于系统像元尺寸 13 μm ,该谱线弯曲值小很多。由表 2 可知,光学系统的谱带弯曲在下狭缝的 0.7 视场到全视场已经达到 1 个像元尺寸,在其他位置处均小于 1 个像元尺寸。如果谱线弯曲和谱带弯曲控制良好,就会有利于后续数据的处理。

表 1 光学系统的谱线弯曲
Table 1 Smile of optical system

Wavelength /nm	Raytrace position /mm				Smile /mm
	0 field	0.5 field	0.7 field	1.0 field	
450	1.58176	1.58150	1.58128	1.58111	0.00066
650	0.77478	0.77364	0.77256	0.77027	0.00451
900	0.42142	0.41991	0.41846	0.41537	0.00604

表 2 光学系统的谱带弯曲
Table 2 Keystone of optical system

Position		Raytrace position /mm		Keystone /mm
		Wavelength of 450 nm	Wavelength of 900 nm	
Middle	0 filed	0	0	0
	0.7 filed	-3.46191	-3.45876	0.00315
	1.0 filed	-4.94946	-4.94200	0.00746
Top	0 filed	0	0	0
	0.7 filed	-3.45277	-3.44965	0.00312
	1.0 filed	-4.93614	-4.92737	0.00876
Bottom	0 filed	0	0	0
	0.7 filed	-3.46528	-3.45239	0.01290
	1.0 filed	-4.90945	-4.92759	0.01814

多狭缝的设计需要保证光束经过光谱仪色散后既不会重叠,又不会分离太远,这使得成像镜头的设计难度增大。经过核算最终确定狭缝的相对位置如图 10 所示。通过纳米光刻实现偏振狭缝时,偏振波长的范围为 450~900 nm,在宽波段起偏,这对于偏振膜层的设计很有挑战性,3 条狭缝对应 3 个偏振态,中心狭缝为 0° 偏振态,对称的位置分别为 45° 偏振、90° 偏振。狭缝组件将狭缝与偏振功能集于一体,结合光谱仪可通过推扫实现偏振成像和光谱成像。

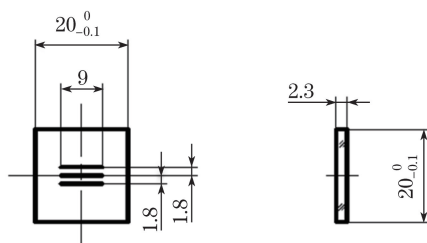


图 10 偏振多狭缝的相对位置
Fig. 10 Relative position of polarization multi-slit

4 结 论

偏振成像技术的针对性较强,但遮挡伪装对其探测准确性的影响较大。成像光谱技术具有一定的反伪装能力,但在整个二维图像区域实现光谱数据识别时,需要处理大量数据。本课题组结合这两种成像技术,设计了基于双 Amici 棱镜的多狭缝偏振成像光谱仪。相比于单棱镜,双 Amici 棱镜的对称结构既容易实现更高的色散能力,又可使出射光线对称、平行地进入成像镜,从而实现共轴光路。分析了全系统的像质,通过

MTF 和点列图对光学系统的像质进行评价后可知,该光学系统接近完美成像,而且与光谱性能密切相关的谱线弯曲和谱带弯曲也控制得比较好,易于后续的数据处理。偏振多狭缝将狭缝与偏振功能集于一体,使得整个光学系统的结构更简单,功能更强。

参 考 文 献

- [1] Quan Naicheng, Zhang Chunmin, Mu Tingkui. Channeled spectropolarimetry based on division of aperture and field of view[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(8): 080703.
权乃承, 张淳民, 穆廷魁. 基于孔径分割与视场分割的通道型成像光谱偏振技术[J]. *物理学报*, 2016, 65(8): 080703.
- [2] Li Jie, Zhu Jingping, Qi Chun, *et al.* Large aperture static hyperspectral imaging full polarimetry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 574-578.
李杰, 朱京平, 齐春, 等. 大孔径静态超光谱全偏振成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 574-578.
- [3] Tang Peijun, Chen Feihu, Tang Zhilie. Visualization of polarization state and its imaging method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0826002.
唐珮珺, 陈飞虎, 唐志列. 偏振态的可视化及其成像技术的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0826002.
- [4] Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli, *et al.* Analyzing of optical remote polarization imaging simulation based on intensity images and surface polarized bidirectional reflectance data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1028001.
黄红莲, 易维宁, 乔延利, 等. 基于强度图像和地物偏振反射率数据的光学遥感偏振成像仿真分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1028001.
- [5] Wang Qichao, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, *et al.* Design of hyperspectral polarization image system based on acousto-optic tunable filter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(1): 66-71.
王启超, 时家明, 赵大鹏, 等. 基于 AOTF 的高光谱偏振成像系统设计[J]. *光电工程*, 2013, 40(1): 66-71.
- [6] Zhao Haibo, Li Huan, Lin Xuling, *et al.* Research on spectral polarization imaging system based on static modulation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(4): 1129-1133.
赵海博, 李欢, 林栩凌, 等. 静态调制的光谱偏振成像系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(4): 1129-1133.
- [7] Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, *et al.* Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809.
李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 803-809.
- [8] Yan Xiaoyan. Research on target recognition system based on Fourier spectrum polarization imaging techniques[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015: 28-29.
闫晓燕. 基于傅里叶光谱偏振成像技术目标识别系统研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 28-29.
- [9] Han Jiefei, Xia Min, Sun Liying, *et al.* Influence of underwater targets with different polarization properties on the resolution of imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0311001.
韩捷飞, 夏珉, 孙立颖, 等. 水下目标不同偏振特性对成像系统分辨率的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0311001.
- [10] Yuan Yan. Theoretical and technical study of the imaging spectrometry[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2005: 3.
袁艳. 成像光谱理论与技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005: 3.
- [11] Pei Linlin, Huang Min, Lü Qunbo, *et al.* Effect of angle error of the double Amici prism on dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122003.
裴琳琳, 黄旻, 吕群波, 等. 分析双 Amici 棱镜角度误差对色散的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122003.
- [12] Pei Linlin, Lü Qunbo, Wang Jianwei, *et al.* Optical system design of the coded aperture imaging spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 210702.
裴琳琳, 吕群波, 王建威, 等. 编码孔径成像光谱仪光学系统设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 210702.