

# 双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像系统设计

刘 敬 金伟其 王亚慧 王 霞

北京理工大学光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 为了实现对动态目标场景的偏振成像, 设计了双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像系统。该系统将分振幅与分孔径相结合, 在两个探测器上同时获得四幅偏振分量图像, 实现动态场景的偏振成像。在简述系统设计原理的基础上, 重点介绍系统光学系统、核心器件以及系统光机结构的设计, 并分析系统的偏振成像实验。实验结果表明: 系统偏振分光性能较好, 四幅8 bit偏振消光图像的残留灰度均在15以下; 外触发信号同步控制透射和反射光路, 系统最高帧频可达90 Hz, 在帧频为25 Hz时同步采集了动态场景的偏振图像, 并分析了场景的偏振度和偏振方位角信息, 实现了动态场景的偏振成像; 系统能够对最近成像距离以外的任意距离的目标清晰成像, 系统分辨率达到76.9 cyc/mrad。

**关键词** 成像系统; 同时偏振成像; 渥拉斯顿棱镜; 光机设计

中图分类号 TN202; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0511001

## Design of Simultaneous Imaging Polarimetry with Double Separate Wollaston Prism

Liu Jing Jin Weiqi Wang Yahui Wang Xia

Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** In order to realize polarization imaging of dynamic scene, a simultaneous imaging polarimetry with double separate Wollaston prism is designed. This system is a combination of division-of-amplitude and division-of-aperture, which can achieve four polarization images simultaneously on two detectors synchronized by external trigger. The principle of the system is briefly illustrated, and the design of optical system, choice of core devices and opto-mechanical design are emphatic introduced. The polarization imaging experiments of system are analyzed. The experimental results show that system performance on polarization splitting is well, and the residual gray level of polarization extinction image is under 15 with four 8 bit detector; the maximum frame rate can reach 90 Hz with external trigger, and polarization image of dynamic scene is sampled at 25 Hz; the system can focus on any distance larger than the nearest image distance, and system resolution reaches 76.9 cyc/mrad.

**Key words** imaging systems; simultaneous imaging polarimetry; Wollaston prism; opto-mechanical design

**OCIS codes** 110.2970; 110.5405; 120.5410

## 1 引 言

偏振成像技术利用光电成像设备获取目标景物辐射的偏振态信息, 与传统光电成像探测技术相比, 不仅可获得目标光辐射的强度信息, 还可获得偏振度、偏振角、偏振椭率等参数信息, 增加被探测目标场景的信息量。因而, 偏振成像技术在地质勘探<sup>[1]</sup>、海面目标探测和分类<sup>[2]</sup>、水面波纹测量<sup>[3]</sup>、生物医学<sup>[4]</sup>、空间探测<sup>[5]</sup>等领域展现出广泛的应用前景。

1974年, Johnson<sup>[6]</sup>在美国政府AD报告中首次提出偏振成像技术。随着偏振成像技术应用需求的增加

收稿日期: 2014-11-20; 收到修改稿日期: 2014-12-26

基金项目: 国家863计划(2014AA7031068A)、国家自然科学基金(61231014)

作者简介: 刘 敬(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事偏振成像、光电图像处理等方面的研究。E-mail: bitliujing@163.com

导师简介: 金伟其(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电图像处理、夜视与红外技术、光电检测与仪器等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn(通信联系人)

以及光电成像器件和技术的发展,偏振成像技术和系统得到迅速的发展。分时偏振成像技术是首先发展起来的模式,典型的系统构成是旋转偏振片方式<sup>[7]</sup>和旋转波片方式<sup>[8]</sup>,由于存在运动部件,系统的稳定性较差,且难以适应动态场景偏振成像。近年来出现的液晶空间光调制器偏振探测系统也属于分时偏振成像方式<sup>[9]</sup>,系统中没有运动部件,系统的稳定性和探测速度有所提高。同时偏振成像系统一次曝光可获得场景的四幅不同偏振态图像<sup>[10]</sup>,不受被测目标或场景与偏振成像系统的相对运动、被测目标自身偏振特性变化等因素的影响,可用于运动场景、动态偏振目标的偏振探测。同时偏振成像系统中无运动部件,稳定性和可靠性高,成为偏振成像系统的必然发展趋势。典型的的同时偏振成像技术有分振幅方式<sup>[11]</sup>、分孔径方式<sup>[12]</sup>和分焦平面方式<sup>[13-14]</sup>。分振幅方式能量利用率低;分孔径方式会损失分辨率;分焦平面方式对制造工艺的要求高。

鉴于目前国内尚不具备成熟的生产分焦平面方式偏振探测器的制造工艺,为适应动态目标偏振成像探测的需求,本文提出了一种双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像系统(SIP-DSWP)设计<sup>[15]</sup>,相对于分振幅方式提高了能量利用率,相对于分孔径方式提高了分辨率。在简述系统设计原理的基础上,重点介绍系统光学系统、核心器件以及系统光机结构的设计,并分析系统的偏振成像实验。

## 2 偏振成像原理介绍

斯托克斯矢量  $\mathbf{S}$  是描述光偏振态的  $4 \times 1$  矢量

$$\mathbf{S} = [I \quad Q \quad U \quad V]^T, \quad (1)$$

式中  $I$  表示光强,  $Q$  和  $U$  分别表示线偏振分量,  $V$  表示圆偏振分量。

光学元件对光偏振态的改变可用  $4 \times 4$  的穆勒矩阵描述

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{S}_{\text{in}}$  表示入射光的斯托克斯矢量,  $\mathbf{S}_{\text{out}}$  表示出射光的斯托克斯矢量,  $\mathbf{M}$  表示光学元件的穆勒矩阵。

由于通常光电成像器件是能量积分器件,只对入射辐射的总光强敏感,因此,光电成像探测器的输出图像灰度与入射辐射的偏振态满足

$$I_{\text{out}} = [M_{11} \quad M_{12} \quad M_{13} \quad M_{14}] \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (3)$$

式中  $I_{\text{out}}$  为出射光斯托克斯矢量  $\mathbf{S}_{\text{out}}$  的第一个分量。

对于四偏振态同时偏振成像系统,入射光的斯托克斯矢量和同时偏振成像系统四路输出图像之间的关系为

$$[I_0 \quad I_{45} \quad I_{90} \quad I_{135}]^T = \mathbf{M}_{\text{ins}} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{M}_{\text{ins}}$  称为偏振成像系统的仪器矩阵

$$\mathbf{M}_{\text{ins}} = \begin{bmatrix} M_{11}^1 & M_{12}^1 & M_{13}^1 & M_{14}^1 \\ M_{11}^2 & M_{12}^2 & M_{13}^2 & M_{14}^2 \\ M_{11}^3 & M_{12}^3 & M_{13}^3 & M_{14}^3 \\ M_{11}^4 & M_{12}^4 & M_{13}^4 & M_{14}^4 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

图 1 给出 SIP-DSWP 的原理图。景物辐射在镜头 3 的焦平面成像,在镜头 3 的焦平面放置视场光阑,其后放置单色滤光片;镜头 2 与 2 个镜头 1 分别构成双路中继光学系统,分别将镜头 3 的像成像到探测器 1 和探测器 2;在镜头 2 和镜头 1 之间依次放置消偏振分光棱镜、 $1/2$  波片、渥拉斯顿棱镜;镜头 3 的像经过镜头 2 后变为平行光线出射,经过消偏振分光棱镜分光,分为透射光路和反射光路,透射光依次经过快轴方位角为  $0^\circ$  的  $1/2$  波片、渥拉斯顿棱镜和镜头 1 后,在探测器 1 的宽度方向形成左右两幅图像,分别对应  $0^\circ$  和  $90^\circ$  的偏振图像;反射光经过快轴方位角为  $22.5^\circ$  的  $1/2$  波片、渥拉斯顿棱镜和镜头 1 后,由于反射时的镜像效应,在探测器 2 上形成的左右两幅图像分别对应  $135^\circ$  和  $45^\circ$  的偏振图像。反射光路放置快轴方位角为  $22.5^\circ$  的  $1/2$  波片,相对于透射光路引入了  $45^\circ$  的偏振方位变化;透射光路放置快轴方位角为  $0^\circ$  的  $1/2$  波片,用于平衡光程。当采用外触发方式,实现探测器 1 和探测器 2 的同步成像时,可同时在两个探测器上获得同一场景的四种不同偏振态图像<sup>[15-17]</sup>。

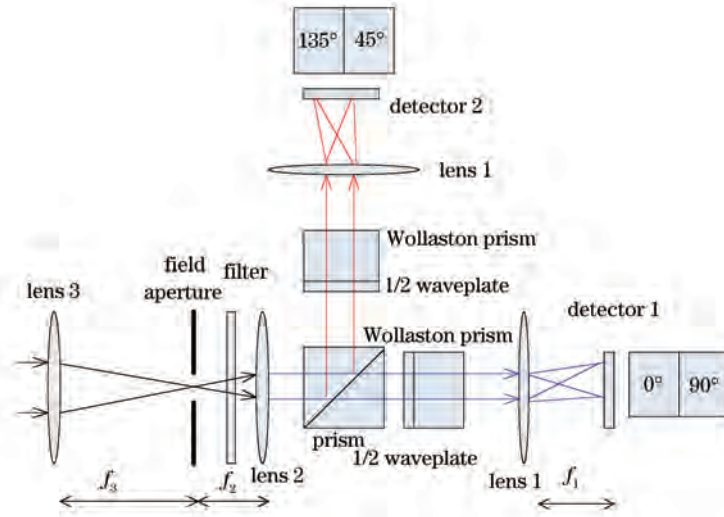


图 1 SIP-DSWP 原理图

Fig.1 Diagram of SIP-DSWP

1/2 波片的穆勒矩阵为

$$M_{\lambda/2,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 4\theta & \sin 4\theta & 0 \\ 0 & \sin 4\theta & -\cos 4\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $\theta$  为快轴方位角。

渥拉斯顿棱镜的分光原理如图 2 所示<sup>[18]</sup>,入射光被分为偏振态正交、振动方向分别平行和垂直于入射面并以特定夹角出射的两路光,用透光轴在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向线偏振片的穆勒矩阵描述为

$$M_{WP//} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$M_{WP\perp} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

根据(2)~(8)式得到系统的仪器矩阵

$$M_{ins} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

仪器矩阵的前三列不全为零,可完全探测场景辐射的线偏振信息;但第四列全为零,故不能探测圆偏振信息。

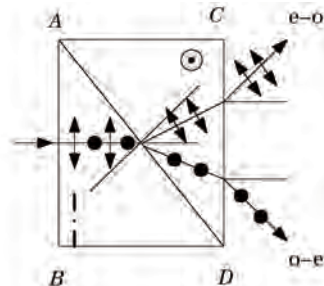


图 2 渥拉斯顿棱镜的分光原理

Fig.2 Diagram of Wollaston prism for polarization beam splitting

### 3 偏振成像系统设计及器件选型

SIP-DSWP轴外光路如图3所示,其中 $a_w \times a_h$ 为视场光阑的尺寸; $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 分别为镜头1、镜头2、镜头3的焦距; $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 分别为消偏振分光棱镜、1/2波片、渥拉斯顿棱镜到镜头2(主平面)的距离; $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 分别为消偏振分光棱镜、1/2波片、渥拉斯顿棱镜的半口径; $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 分别为透镜3和透镜1的物方半视场; $2h$ 为像面高度(或像面宽度)。图3中,①为探测器;②为镜头1;③为渥拉斯顿棱镜;④为 $1/2$ 波片;⑤为消偏振分光棱镜;⑥为镜头2;⑦为视场光阑;⑧为镜头3。

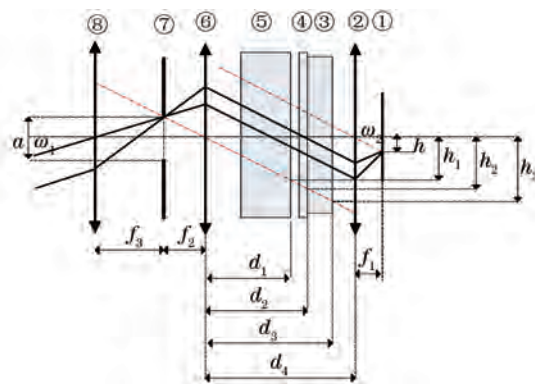


图3 SIP-DSWP轴外光路图

Fig.3 Off-axis optical path diagram of SIP-DSWP

根据望远成像系统的成像关系,有

$$\tan \omega_1 = \frac{a_w}{2f_3} \quad (10)$$

若选取 $f_1=f_2$ ,则中继透镜构成1:1的平移成像,成像像面的半高度 $h$ 与透镜1满足

$$\tan \omega_2 = \frac{h}{f_1} = \frac{a_w}{2f_2} = \frac{h_1}{d_1} = \frac{h_2}{d_2} = \frac{h_3}{d_3}, \quad (11)$$

即成像宽度等于视场光阑的宽度 $2h = a_w$ ,同理像高等于视场光阑的高度,成像面尺寸等于视场光阑。

成像面的尺寸由所选成像探测器决定。选择德国Ueye公司UI 3240CP-M-GL黑白CMOS相机,其探测器像元数为1280 pixel×1024 pixel(SXGA, 5:4),像元尺寸5.3 μm,光敏尺寸为1/1.8" [6.784 mm×5.427 mm],灰度等级8、10、12 bit可选,实验选择8 bit模式采集图像。选择渥拉斯顿棱镜在探测器宽度方向分光,形成左右两幅对称的子图像,则子图像的理想幅面尺寸为3.392 mm×5.427 mm,像元数为1024 pixel×640 pixel。实际视场光阑的尺寸略小于此范围。

图4为渥拉斯顿棱镜分光图,在探测器宽度方向,两幅子图像的中心位置不在探测器的物理中心 $O_d$ ,而是分别向两侧各偏移 $l$ 位移

$$l = f_1 \cdot \tan \frac{\omega}{2}, \quad (12)$$

式中 $\omega$ 为渥拉斯顿棱镜的分光角度。

图5为探测器光敏面与视场光阑的关系,为避免两幅子图像交叠,又保证其不超出探测器的光敏范围,视场光阑的尺寸和探测器光敏区域应满足

$$\begin{cases} a_h \leq B; a_w \leq A/2 \\ 0 < l \leq A/2 - a_w/2 \end{cases} \quad (13)$$

式中 $A$ 、 $B$ 分别为探测器光敏面的宽度和高度, $a_w$ 和 $a_h$ 分别为视场光阑的宽度和高度。由图5可知,取 $l = A/4 = 6.784/4 \text{ mm} = 1.6960 \text{ mm}$ 为最佳方案,对应镜头1的焦距 $f_1 = 38.8448 \text{ mm}$ 。

为了保证镜头1和镜头2焦距的一致性,选择1/2"定焦镜头。以Computar工业镜头为例,典型镜头焦距为5、16、25、35、50、75 mm等,典型渥拉斯顿棱镜的分光角度 $\omega$ 为5°、10°、15°、20°等,对应的视场偏移量 $l$ 如表1所示。结合探测器光敏尺寸, ( $\omega=5^\circ, f_1=35 \text{ mm}$ )或( $\omega=15^\circ, f_1=12 \text{ mm}$ )是可选方案。进一步计算两种方案要求的光学元件(消偏振分光棱镜、波片、渥拉斯顿棱镜)最小口径如表2所示,渥拉斯顿棱镜分光角度越大,要

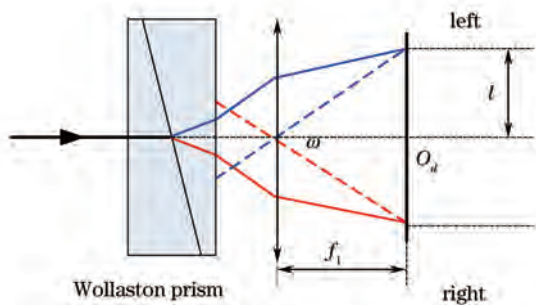


图4 渥拉斯顿棱镜分光与子光路成像

Fig.4 Wollaston prism beam splitting and focusing of sub path

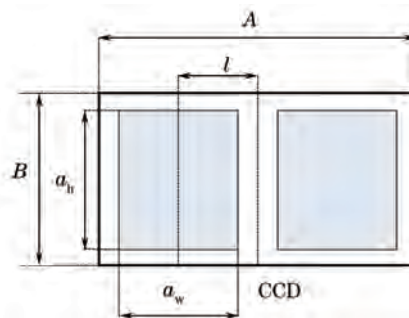


图5 视场光阑和探测器光敏区域的关系

Fig.5 Relationship between field aperture and size of detector

求的光学元件口径越大。在现有镜头和光学元件产品条件下,选择了 $\omega=5^\circ, f_1=35\text{ mm}, l=1.5281\text{ mm}$ 的方案,可充分利用探测器光敏区域,并避免两幅子图像的交叠。

表1 渥拉斯顿棱镜分光角度 $\omega$ 、焦距 $f_1$ 和视场偏移 $l$

Table 1 Possible of  $l$  when  $\omega$  and  $f_1$  are chosen

	$l/\text{mm}$					
	$f_1=5$	$f_1=16$	$f_1=25$	$f_1=35$	$f_1=50$	$f_1=75$
$\omega=5^\circ$	0.2183	0.6986	1.0915	1.5281	2.1830	3.2746
$\omega=10^\circ$	0.4374	1.3998	2.1872	3.0621	4.3744	6.5616
$\omega=15^\circ$	0.6583	2.1064	3.2913	4.6078	6.5826	9.8739
$\omega=20^\circ$	0.8816	2.8212	4.4082	6.1714	8.8163	13.2245

表2 渥拉斯顿棱镜分光角度、焦距和光学元件口径的关系

Table 2 Relationship among  $\omega, f_1$  and diameter  $h_1, h_2$  and  $h_3$  of Wollaston prism

	$2h_1/\text{mm}$	$2h_2/\text{mm}$	$2h_3/\text{mm}$
$\omega=5^\circ, f_1=35\text{ mm}$	6.90	8.47	12.89
$\omega=15^\circ, f_1=12\text{ mm}$	26.24	33.72	43.70

相应地,视场光阑的尺寸应满足 $a_w \leq 2 \times 1.5281\text{ mm} = 3.0562\text{ mm}$ 、 $a_h \leq 5.427\text{ mm}$ ,据此设计了 $4.0\text{ mm} \times 2.9\text{ mm}$ 和 $2.9\text{ mm} \times 2.9\text{ mm}$ 两种光阑(如图6所示),本文给出了采用 $2.9\text{ mm} \times 2.9\text{ mm}$ 光阑进行偏振成像实验的结果。

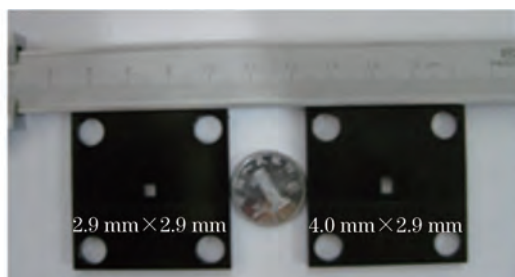


图6 设计的两种视场光阑

Fig.6 Two kinds of designed field aperture

表2中,渥拉斯顿棱镜的最小口径为 $12.89\text{ mm}$ , $1/2$ 波片的最小口径为 $8.47\text{ mm}$ ,消偏振分光棱镜的最小口径为 $6.90\text{ mm}$ 。以此作为元件参数的设计依据,系统各元件的选型参数如表3所示。为了减小非偏振光学元件残余偏振对成像效果的影响,选用大恒光电的窄带消偏振分光棱镜GCC-403012,该消偏振分光棱镜对光能量有一定的吸收,斜面上镀混合消偏振分光膜,对偏振态很不敏感,入射光和出射光偏振态相同。

进一步考虑图3中光学元件的口径对系统渐晕的影响。当光学元件口径不是足够大时,元件之间的轴向距离 $d_1, d_2, d_3, d_4$ 越大,系统渐晕就越严重,如图7所示。进行光机结构设计时,在保证能够放置各器件的前提下,应尽量缩短各器件之间的距离,减小系统渐晕,并减小系统的体积、重量。最终设计的系统如图8所示。需要指出,由于线偏振度和偏振方位角是由斯托克斯分量的比值确定<sup>[19]</sup>,故渐晕不影响偏振参量的计算结果。

表 3 元件型号及参数

Table 3 Parameters of optical elements

Element	Parameter
Field aperture	2.9 mm×2.9 mm
Depolarization beam splitting prism	GCC-403012 25.4 mm×25.4 mm×25.4 mm
1/2 waveplate	Quartz multistage wave plate, $\Phi 25.4$ mm
Wollaston Prism	16 mm×18 mm×18 mm, $\omega=5^\circ$
Lens1 and lens2	$f=35$ mm, C-mount
Filter	$\Phi 25.4$ mm, CWL 532 nm±2 nm FWHM 10 nm±2 nm
Lens 3	Change with application

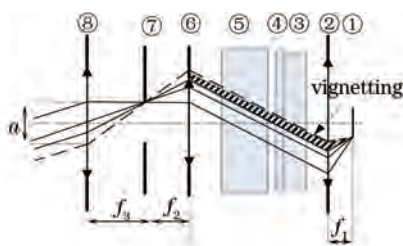


图 7 SIP-DSWP 的渐晕

Fig.7 Vignetting of SIP-DSWP

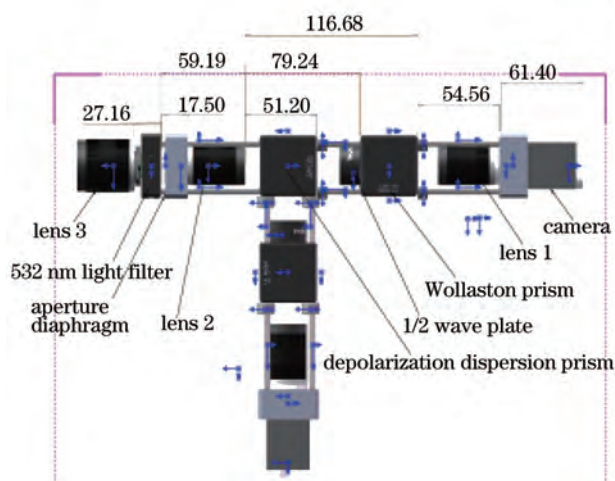


图 8 SIP-DSWP 结构设计和原理样机

Fig.8 Structural design and prototype of SIP-DSWP

## 4 偏振成像实验及其分析

### 4.1 偏振分光特性分析及偏振定标

理论上,透射光路的左/右半部分、反射光路的左/右半部分分别探测场景  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $45^\circ$  偏振分量图像。为了检验中继平行光路中偏振分光模块的偏振分光特性,采用 532 nm 单色光照明,并在镜头 3 前放置线偏振片作为起偏器,旋转线偏振片到  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  分别采集棋盘格靶标的图像(如图 9)。

当线偏振片在  $0^\circ$  方向时,理想成像效果应为透射光路左半部分最亮、右半部分图像消失,反射光路左/右半部分亮度相同、但低于透射光路左半部分的亮度;同理分析线偏振片在  $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  方向的成像效果。图 9 给出的实际成像效果与理想成像效果预期是基本一致的。

为了定量分析系统的偏振分光特性,统计图像消失区域(实线框)和视场光阑遮挡区域(虚线框)的灰度统计对比图如图 10 所示。由于存在探测器噪声和暗背景,背景区域存在灰度不为 0 的像素,实测背景区域的

灰度均在 10 以下。成像图像消失区域的灰度统计特性比背景区域稍微向高灰度级扩展,但图像灰度级基本均在 15 以下。实验数据说明系统的偏振分光特性较好。

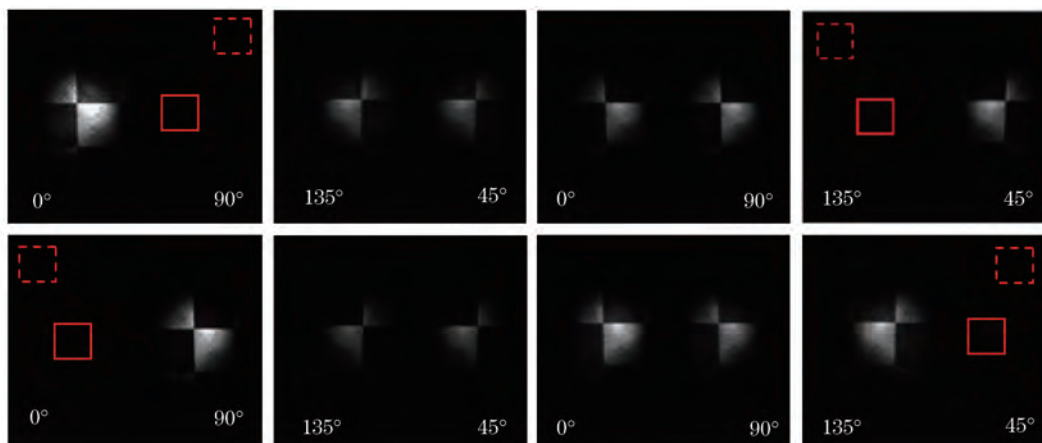


图 9 起偏线偏振片在 0°, 45°, 90°, 135° 方向的场景图像  
Fig.9 Polarization images with polarizer at 0°, 45°, 90°, 135°

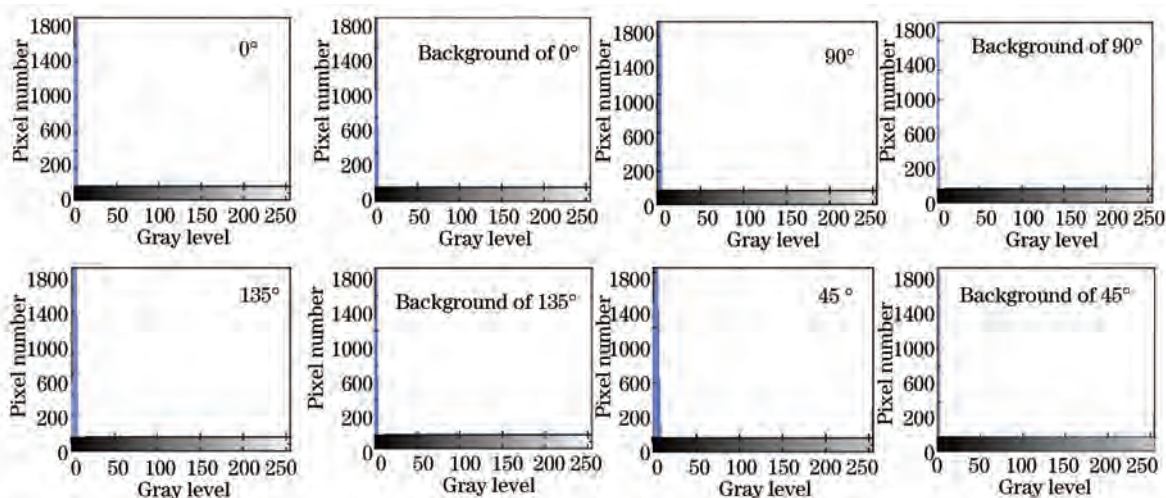


图 10 系统偏振分光特性分析

Fig.10 Polarization characteristic analysis of the system

在采集的偏振图像中,透射光路图像的亮度略大于反射光路图像,这是因为透射和反射光路中光学元件的透过率或者探测器的响应存在一定的差异,可通过标定的方法消除这一差异。另外,由于在实验系统加工、装调过程不可避免的误差、透射和反射光路 1/2 波片不严格满足快轴方向角相差 22.5°、镜头和消偏振棱镜的残余偏振<sup>[20-21]</sup>等,均使得系统的实验数据与理论数据存在一定的偏差。因此需要进行辐射定标和偏振定标,通过标定系统的仪器矩阵实现。

利用上述检偏图像,用 4 点标定法<sup>[22-23]</sup>进行偏振定标,得到的归一化的仪器矩阵为

$$M_{ins\_calibration} = \begin{bmatrix} 1 & 0.9942 & -0.3251 & 0 \\ 0.4061 & 0.0255 & 0.3422 & 0 \\ 0.8011 & -0.7556 & 0.0939 & 0 \\ 0.4528 & 0.1390 & -0.4503 & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中定标仪器矩阵与(9)式中理论仪器矩阵存在偏差。仪器矩阵的第一行和第三行来自透射光路,第二行和第四行来自反射光路。定标仪器矩阵第一列中第二行和第四行矩阵元素的绝对值明显小于第一行和第三行,这是由于透射光路和反射光路的透过率不同引起的辐射偏差。理论仪器矩阵前三列的 0 元素对应位置,在定标仪器矩阵中均有非 0 取值,这是由于光学元件偏振分光的残余偏振引起的。

#### 4.2 动态场景偏振成像

通过外接触发信号,控制透射光路探测器和反射光路探测器同步触发,相机的最高帧频可达 90 Hz。图

11 给出帧频 25 Hz 的动态场景的偏振图像,图 11(a)是透射光路的倒像,图 11(b)是反射光路的镜像。场景中包含静态场景(建筑物、水泥地面等)和动态场景(行人、行驶的自行车等),场景信息丰富。对原始偏振图像进行分割和配准,得到了如图 12 所示 4 幅偏振方向的图像,分别利用理论仪器矩阵和定标得到的仪器矩阵,计算场景的斯托克斯参量,进一步计算得到的偏振度(DoLP)和偏振角(AoP)图像(图 13),标定后的偏振度和偏振角图像较标定前有所改善。

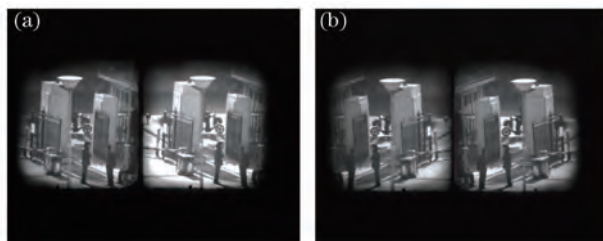


图 11 动态场景的偏振图像。(a) 透射光路的倒像; (b) 反射光路的镜像

Fig.11 Polarization images of dynamic scene. (a) Reverse image of transmission; (b) mirror image of reflection

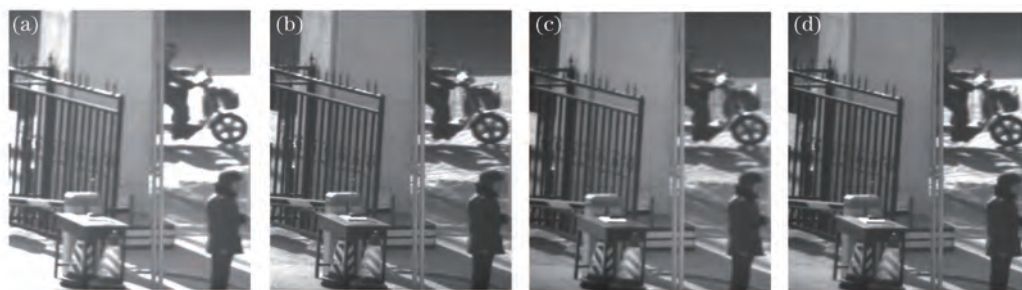


图 12 分割、配准后的偏振图像。(a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°

Fig.12 Polarization images after segmentation and registration. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°

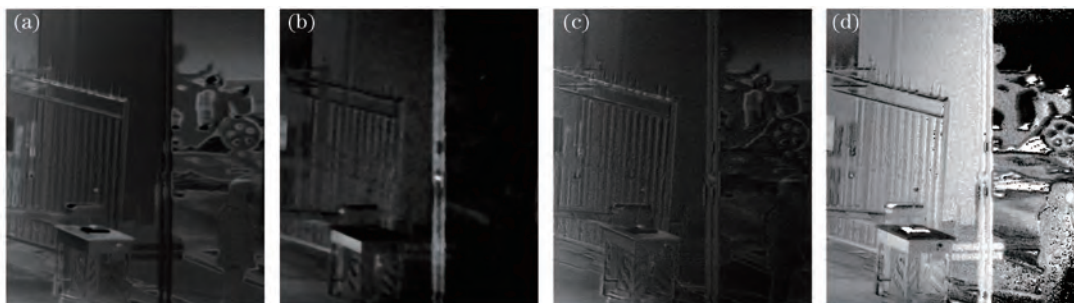


图 13 动态场景的偏振度和偏振角。(a) 标定前 DoLP; (b) 标定前 AoP; (c) 标定后 DoLP; (d) 标定后 AoP

Fig.13 DoLP and AoP of dynamic scene. (a) DoLP before calibration; (b) AoP before calibration; (c) DoLP after calibration;

(d) AoP after calibration

### 4.3 系统几何参数分析

由于偏振分光过程是在中继透镜内部完成,构成相对独立的模块,系统的成像视场由物镜焦距和视场光阑共同决定。对于确定的视场光阑,物镜焦距 $f_3$ 越大,系统的视场越小,即通过物镜焦距 $f_3$ 可方便地调整系统的视场。

在室外阳光下采集 USAF1951 标准分辨率靶标的偏振图像(靶标尺寸为 1 m×1 m)。物镜焦距 $f_3 = 50$  mm 时,视场为 3.322°,分别采集了物距为 0.75(最近成像距离)、9、21 m 的图像(图 14)。图 14(a)能分辨靶标第 5 组第 6 对条纹,图 14(b)能分辨靶标第 3 组第 4 对条纹,图 14(c)能分辨靶标第 2 组第 3 对条纹,即系统分辨率达到 76.9 cyc/mrad。

## 5 结 论

为了适应动态场景偏振成像系统的应用需求,针对传统四探测器分光路偏振成像方式体积重量大、成



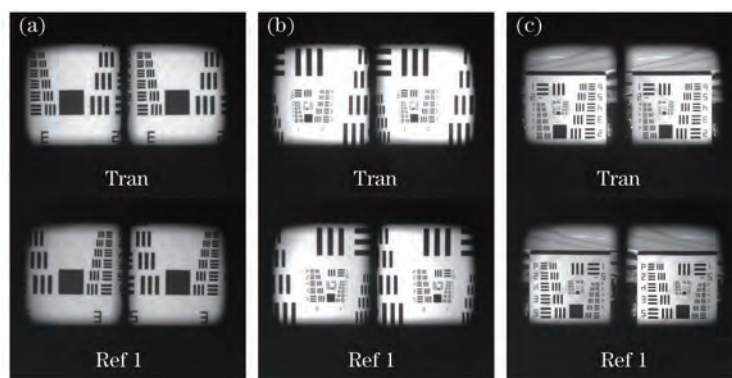


图 14 三种距离上的偏振图像( $f_s=50$  mm)。(a) 物距为 0.75 m; (b) 物距为 9 m; (c) 物距为 21 m

Fig.14 Polarization images ( $f_s=50$  mm). (a) Object distance of 0.75 m; (b) object distance of 9 m; (c) object distance of 21 m

像存在视差,传统四探测器共光路分振幅偏振成像方式能量利用率低、体积重量大,单一探测器面分孔径偏振成像方式分辨力低、光学系统复杂等问题,提出了一种共光路分振幅和分孔径结合的双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像方法,可在两个探测器上同时获得场景的4幅不同偏振分量图像。论述了系统设计和核心器件选型方法,研制了双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像系统,并进行了系统分析以及实验验证。结果表明:系统具有偏振分光效果好、分辨率高、模块化设计等特点;在8 bit的偏振消光图像中残留灰度在15以下;能够实现动态场景的偏振成像,成像帧频最高可达90 Hz;实测系统分辨率达到76.9 cyc/mrad。偏振分光成像部件属于相对独立的模块,可通过改变物镜焦距方便地调整系统视场。进一步标定系统的仪器矩阵,系统仪器矩阵的标定值和理论值存在偏差,体现了透射光路和反射光路的透过率不同引起的辐射偏差,以及光学元件偏振分光的残余偏振。

#### 参 考 文 献

- 1 Tan S, Narayanan R M. Design and performance of a multiwavelength airborne polarimetric lidar for vegetation remote sensing[J]. Appl Opt, 2004, 43(11): 2360-2368.
- 2 Harchanko J S, Chenault D B. Water-surface object detection and classification using imaging polarimetry[C]. SPIE, 2005, 5888: 588815.
- 3 Zappa C J, Banner M L, Schultz H, *et al.*. Retrieval of short ocean wave slope using polarimetric imaging[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(5): 055503.
- 4 Cheng Yi, Tang Zhilie. Study of confocal microscopy imaging system based on Stokes parameters measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0611005.  
程 怡, 唐志列. 基于斯托克斯参量测量的偏振共焦显微成像技术的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0611005.
- 5 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.
- 6 Johnson J L. Infrared polarization signature feasibility tests[R]. Repts. TR-EO-74-1 and ADC 00113. U.S. Army Mobility Equipment Research and Development Center, 1974.
- 7 Matchko R M, Gerhart G R. High-speed imaging chopper polarimetry[J]. Opt Eng, 2008, 47(1): 016001.
- 8 Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing[J]. Appl Opt, 2006, 45(22): 5453-5469.
- 9 Gendre L, Foulonneau A, Bigué L. Imaging linear polarimetry using a single ferroelectric liquid crystal modulator[J]. Appl Opt, 2010, 49(25): 4687-4699.
- 10 Garlick F J. Differential Optical Polarization Detectors: U. S. , 3992571[P]. 1976-11-16.
- 11 Pezzaniti J L, Chenault D, Roche M, *et al.*. Wave slope measurement using imaging polarimetry[C]. SPIE, 2009, 7317: 73170B.
- 12 Pezzaniti J L, Chenault D B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[C]. SPIE, 2005, 5888: 58880V.
- 13 Nordin G P, Meier J T, Deguzman P C, *et al.*. Micropolarizer array of infrared imaging polarimetry[J]. Journal of the Optical Society of American, 1999, 16(5): 1168-1174.

- 14 Kituta H, Nunatal K, Arimitsu H, *et al.*. Imaging polarimetry with a micro-retarder array[C]. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. Japan: ToKyo, 2002, 4: 2510–2511.
- 15 Jin Weiqi, Liu Jing, Wang Xia, *et al.*. High Resolution Simultaneous Imaging Polarimetry with Double Separate Wollaston Prism: China, CN201210227934. X[P]. 2012–10–03.  
金伟其, 刘 敬, 王 霞, 等. 双分离渥拉斯顿棱镜高分辨力同时偏振成像系统: 中国, CN201210227934. X[P]. 2012–10–03.
- 16 Liu Jing, Xia Runqiu, Jin Weiqi, *et al.*. Review of imaging polarimetry based on Stokes vector[J]. Optical Technique, 2013, 39(1): 56–62.  
刘 敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. 光学技术, 2013, 39(1): 56–62.
- 17 Du L, Liu J, Wang X, *et al.*. Dual CCD complete Stokes simultaneously imaging polarimeter and expereimental data analysis[J]. Key Engineering Materials, 2013, 552: 305–312.
- 18 Xie Jinghui, Zhao Dazun, Yan Jixiang. Physical Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 311.  
谢敬辉, 赵达尊, 阎吉祥. 物理光学教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 311.
- 19 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 45–63.  
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 45–63.
- 20 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. A method on measurement of Muller matrix elements for polarization correction[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0628001.  
李占峰, 王淑荣, 黄 煜, 等. 用于偏振修正的穆勒矩阵元素的测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0628001
- 21 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Calibration of rotating quater-wave method based polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912005.  
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 旋转波片法偏振检测装置器件参数校准[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912005.
- 22 Azzam R M A, Masetti E, Elminyawi I M, *et al.*. Construction, calibration, and testing of a four-eterctor photo polarimeter[J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(1): 84–88.
- 23 Zhang Yong, Huang Zuohua, Zhao Zhentang, *et al.*. In- place calibration of Stokes ellipsometer's instrument matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0212002.  
张 勇, 黄佐华, 赵振堂, 等. 斯托克斯椭偏仪仪器矩阵在位定标方法[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0212002.

栏目编辑: 苏 岑