

全偏振态同时探测实时彩色偏振成像技术

巨海娟^{1,2}, 梁健^{1,2}, 张文飞^{1,2}, 白兆峰¹, 任立勇¹, 屈恩世¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 信息光子学研究室, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 偏振光学成像技术作为一种新型的光学成像技术, 通过对光波偏振特性的探测, 增加了信息的探测维度, 有利于全面、准确地获取目标的信息. 文中阐述了偏振成像的探测方法, 典型偏振成像系统的分类; 详细介绍了一种基于 Stokes 矢量方法的分孔径全偏振态同时探测的实时彩色偏振成像相机; 利用该相机进行了全偏振度成像实验和偏振去雾成像实验. 实验表明全偏振态同时探测偏振成像技术在提高成像探测距离、目标细节获取及恢复等方面具有一定优势, 能够为现代光学成像探测系统提供重要的技术补充.

关键词: 偏振成像; 全偏振态; 同时探测; 分孔径

中图分类号: 0436 **文献标识码:** A

Simultaneous, real-time, chromatic polarimetric imaging technology with full-polarization-state detection

JU Hai-Juan^{1,2}, LIANG Jian^{1,2}, ZHANG Wen-Fei^{1,2}, BAI Zhao-Feng¹, REN Li-Yong¹, QU En-Shi¹

(1. Department of Information Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a new kind of optical imaging technology, polarimetric imaging can efficiently increase the detection dimension of the information by detecting the polarization properties of the optical wave. This is useful for obtaining the target information comprehensively and accurately. Firstly, the method of polarization imaging detecting was introduced and the typical polarization imaging systems are reviewed in this paper. Then, based on Stokes Vector, a simultaneous, real-time, division of aperture chromatic polarimetric imaging camera with full-polarization-state detection was introduced in detail. Finally, the experimental results of full polarimetric imaging and polarimetric dehazing imaging using this camera were demonstrated. The experimental results indicate that the polarimetric imaging technology of full polarization states simultaneous detecting has obvious advantages on developing the detecting distance and acquiring the detail features, so it can provide important supplement for modern optical imaging system.

Key words: polarimetric imaging, full-polarization-state, simultaneous detection, division of aperture

PACS: 42. 30. -d

引言

偏振光学成像技术是一种近年来快速发展的新型光学成像技术. 传统光学强度成像是通过探测反射、辐射光强的二维空间分布来获得图像的; 偏振光学成像在传统强度成像基础上增加了偏振信息维度, 不仅能获得二维空间光强分布, 还能获得目标反

射光的每一点的偏振信息. 偏振特性作为光波的一种固有特性, 在光波与目标物质相互作用时, 由于不同物质的几何形状、表面粗糙度、结构和材质等不同, 反射光的偏振特性会存在一定的差别. 利用偏振信息可以分析目标的物理特性, 结合空间特性, 可对目标进行有效的探测和识别^[1], 或者在复杂环境中有效检测和识别常规成像技术无法识别的目标. 因

收稿日期: 2016-12-31, 修回日期: 2017-04-05

Received date: 2016-12-31, revised date: 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(61505246, 61535015, 61275149)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61505246, 61535015, 61275149)

作者简介 (Biography): 巨海娟(1988-), 女, 甘肃庆阳人, 工程师, 硕士, 主要研究领域为偏振光学技术. E-mail: juhajuan@opt.ac.cn

此,在目标探测^[2-4]、生物医学^[5-8]、三维重构^[9-10]、去雾成像^[11-14]及大气光学^[15]等领域,偏振光学成像技术展现出广泛的应用前景,成为国内外关注的研究和应用开发热点^[16-19]。

早期的偏振成像系统一般只获取目标的线偏振特性,而在一些人造目标及金属目标的探测中,目标的圆偏振特性是一个非常重要的特征信息,因此,全偏振探测成像技术成为偏振光学成像领域的一个研究热点^[20-23]。基于全 Stokes 矢量的全偏振探测成像技术,主要是通过拍摄多幅(一般三幅或四幅)经不同偏振态调制后的强度图像并进行偏振信息提取来实现的。常用的全 Stokes 矢量偏振成像方案主要有分时获取和同时获取两种。对于分时偏振成像系统,由于不能在同一时刻获取所有的偏振图像,因此只适用于静态场景偏振信息的探测,不适用于动态目标场景的探测。因此,多幅偏振图像的同时获取和偏振信息的实时提取成为偏振光学成像探测技术实用化的重要条件。

文中阐述了偏振成像的基本原理,详细介绍了一种分孔径全偏振态同时探测实时彩色偏振成像相机,实验验证了该相机在全偏振度成像实验和偏振去雾成像实验的有效性。

1 偏振成像基本原理

1.1 偏振光及其描述方法

光是一种电磁波,光的干涉和衍射现象说明了光的波动性,而光的偏振现象又揭示了光的横波特性。光的偏振特性反映的是光与物质相互作用过程中,光矢量的幅度和方向随光传播的变化情况。一般为了说明偏振光,采用与光波传播方向垂直的两个分量(例如 x , y 轴分量)的时间平均来描述偏振状态。沿 z 轴方向传播的光,可以认为是由 x 轴(水平轴)和 y 轴(垂直轴)方向振动的两支光波合成的。在一个定态的单一频率的振动中,两个分量也是定态的,且保持一定的相位关系。相互正交的两分量可以用下式表示:

$$\begin{cases} E_x(z,t) = \vec{i} E_{0x} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z + \varphi_1) \\ E_y(z,t) = \vec{j} E_{0y} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z + \varphi_2) \end{cases}, \quad (1)$$

其中, φ_1 和 φ_2 分别是 x 和 y 方向的初相位。定义 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 为 x 方向和 y 方向之间的初相位差。两分量都在 z 方向传播,合成的光波为:

$$E(z,t) = E_x(z,t) + E_y(z,t), \quad (2)$$

消去 $(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z)$, 得到下式:

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - \frac{2E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos\varphi = \sin^2\varphi. \quad (3)$$

这里,当 φ 为一个常量时,式(3)为一个椭圆方程,光矢量是椭圆偏振的(如果 φ 是 π 的整数倍,则表示光矢量是线偏振的;当 $E_{0x} = E_{0y}$, $\varphi = \pm \pi/2$ 时,光矢量是圆偏振的);当光波中既包含非偏振光,又包含偏振光,就称为部分偏振;当 φ 为随机数时,产生的光矢量为非偏振的。

定量描述光的偏振态的方法主要有 Jones 矢量法和 Stokes 矢量法。Jones 矢量主要用于描述完全偏振光,而 Stokes 矢量既可以表示完全偏振光,也可以表示部分偏振光,还可以表示非偏振光。自然界中辐射或反射光大多数为部分偏振光,其携带的丰富信息可以通过 Stokes 矢量完全地表示出来,故偏振成像探测技术中一般采用 Stokes 矢量来描述其偏振态。

1.2 偏振成像探测方法

Stokes 矢量利用 4 个独立的参量 S_0, S_1, S_2 和 S_3 描述光的偏振态。这 4 个参量均是光强的时间平均值,都具有强度量纲,可直接通过探测器来探测,且参量都是实数,计算简便。Stokes 矢量可表示为 $\mathbf{S} = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T$, 其中, S_0 表示场景总光强, S_1 表示水平和竖直方向线偏振光的强度差, S_2 表示 45° 和 135° 方向线偏振光的强度差, S_3 表示右旋与左旋圆偏振光的强度差。通常所用的 Stokes 矢量表达式为^[24]:

$$\begin{aligned} S_0 &= I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_1 &= I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_2 &= 2I(45^\circ, 0^\circ) - S_0 \\ S_3 &= 2I(45^\circ, 90^\circ) - S_0 \end{aligned}. \quad (4)$$

那么,至少需要三幅图像才能获得入射光的线偏振态信息,需要四幅图才能获得全偏振态信息。对于偏振光的物理意义,通常用偏振度和偏振角来表示。偏振度用斯托克斯参数来表示,可定义为

$$\text{DOP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (5)$$

即全偏振分量的强度和光波总强度的比值。偏振角表示全偏振分量的偏振椭圆方位角 θ , 可表示为

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (6)$$

2 实时彩色偏振成像相机

从多幅偏振图像获取的实时性来考虑,现行的

偏振成像系统主要分为两大类,一种是分时偏振成像系统,另一种是同时偏振成像系统.目前广泛采用的偏振成像系统是分时偏振成像方式,此方法简单易行,但只能对静止目标进行偏振成像探测,且探测时间较长,适用于偏振成像的原理验证性实验中.同时偏振成像系统可对运动目标进行偏振成像,主要实现方式有分振幅、分焦平面和分孔径三种.

分振幅成像方式一般利用棱镜进行分光 and 偏振调制,通过将一束光分成 4 个不同的偏振光束,各束光经过成像系统分别成像在 4 个探测器上.这种成像方式光能利用率低,分光元件多,系统复杂.

分焦平面成像方式的主要思想是:以空间换时间.将微小偏振光学元件集成到焦平面上,构成一个微偏振阵列探测器.与分振幅成像方式不同的是,此成像方式不改造成像系统光学部分,只是对探测器部分进行改造,通过探测器前的微偏振阵列使得不同像素点接收到不同偏振调制的强度图像,通过插值方式同时得到不同偏振态下的强度图像.分焦平面成像系统结构紧凑,体积重量小,但这种成像方式存在像素位置匹配误差,集成难度大,造价高.

分孔径成像方式是使用一个物镜和一个分孔径光学成像系统,经过偏振光学元件,对孔径不同区域进行偏振调制后成像在同一个探测器上.

比较以上三种成像方式可发现,分孔径成像方式系统设计简单、集成度高、可靠性高、造价低,但是只能用于远距离目标成像.因此,针对远距离目标成像,研制了一种分孔径全偏振态同时探测的实时彩色偏振成像相机.

2.1 光学系统设计

相机的光学系统由前端光学望远镜系统与后端分光聚焦系统组成.首先,入射光经过望远镜系统缩束后平行输出;其次,在输出面利用一组斜方棱镜分成四路光,偏振片固定于斜方棱镜的入射面上,四路偏振片分别为 0° 方位角偏振片, 45° 方位角偏振片, 90° 方位角偏振片和左旋圆偏振片;再次,经过四路完全对称的聚焦系统进行聚焦,并由另一组斜方棱镜进行合束;最后,在一个探测器的四个象限成像.偏振相机光学系统光路模拟示意图如图 1 所示.系统焦距为望远镜系统放大倍率与聚焦系统焦距的乘积,因此基于该设计思想,可根据实际需求来选择望远镜系统放大倍率以调整系统整体焦距.

2.2 机械结构设计

根据光学系统要求的各镜片间隔公差与同轴度要求,设计望远镜系统结构如图 2 所示.镜片间装上

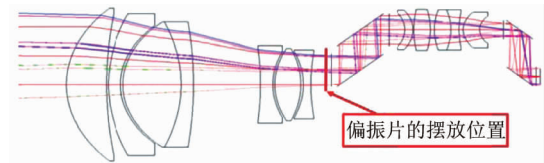


图 1 偏振相机光学系统光路模拟示意图
Fig. 1 Diagram of the optical system of polarimetric camera

隔圈,通过修切隔圈保证镜片间距公差要求,同轴度靠镜筒结构的精度来保证.末端采用螺纹压圈实现紧固,不仅牢靠而且拆装方便.孔径分光系统由于四路完全对称,要保证后端探测器上获取的四幅图像完全一致,则斜方棱镜四个贴合面必须保证严格水平,确保入射到斜方棱镜的光线在同一水平面上.因此采用整体设计的思想,将棱镜座设计为一体,采用高精度数控机床一次加工成型,不但对各个棱镜定位精度高,而且排除了人工组装调试所带来的误差.

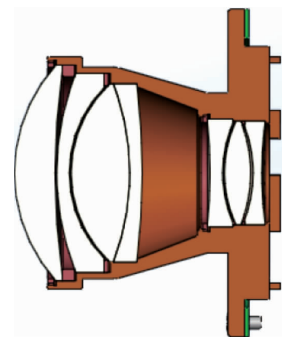


图 2 望远镜系统的机械结构设计示意图
Fig. 2 The sketch map of mechanical structure of the telescope system

2.3 电子学系统设计

电子学系统主要包括图像传感器、时序控制和信号驱动部分、图像采集部分、视频处理部分、指令接收与解析部分、缓存部分、接口部分和电源部分.在图像信号采集和偏振信息处理方面均采用 FPGA 来实现,目的在于提高硬件处理速度.研制的偏振相机所有的图像运算都在硬件中实现,以保证成像的实时性.相机采用两种输出方式,一种是 HDMI 高清模拟信号输出,用于实时视频监控;另一种是 CameraLink 数字图像输出,用于存储原始图像数据.相机输出频率设计为 25 帧/s.

2.4 相机定标

图 3 所示分别为相机共焦面偏振分布示意图和偏振成像相机样机实物图,相机外形尺寸为 $180\text{ mm} \times 86\text{ mm} \times 86\text{ mm}$.偏振相机样机的系统定标主要包

括图像配准、亮度校正和偏振校正三部分. 图 4 为偏振相机直接拍摄的原始图像, 可以看出四幅图并没有完全对准, 必须对图像进行配准之后才能用于偏振成像的计算. 首先, 对四幅图像进行快速地切割配准, 配准精度优于两个像素, 配准后的图像如图 5 所示; 其次, 对各图像亮度进行校正, 由于光学透镜本身具有光晕现象, 导致图像中心和边缘区域的强度不一致, 通过调制图像中各像素点的灰度值, 实现图像亮度校正; 最后, 进行偏振校正, 因圆偏振校正系数随机, 与工作波长有关, 只对相机进行线偏振校正. 线偏振校正包含两个因素, 一是由于各线偏振片透过率不同导致的探测误差, 二是由于线偏振片偏振化方向误差导致的探测误差. 校正后相机线偏振探测精度优于 95%. 需要说明的是, 这里并未分析相机的圆偏振校正, 主要原因是考虑了圆偏振探测误差的随机性. 偏振相机中圆偏振光的接收是由宽带圆偏振片完成的, 而宽带圆偏振片是由宽带四分之一波片与线偏振片胶合而成的. 由于线偏振片工作波段很宽, 因此, 圆偏振光探测精度实际上是由宽带四分之一波片决定的. 本偏振相机中, 宽带四分之一波片是由二氧化硅晶体和氟化镁晶体垂直胶合而成, 其在可见光 (450 ~ 650 nm) 范围内的误差小于 $\lambda/100$. 经测试, 在该工作带宽内, 圆偏振光的探测精度可达 99% 以上. 然而, 在自然环境的被动成像应用中, 彩色相机可以响应 (400 ~ 750 nm) 的波长范围, 在宽带四分之一波片工作范围之外的光波对成像圆偏振度的探测造成了较大的误差. 所以, 成像场景反射光在这些波段的强度对圆偏振光的探测将产生随机的影响.

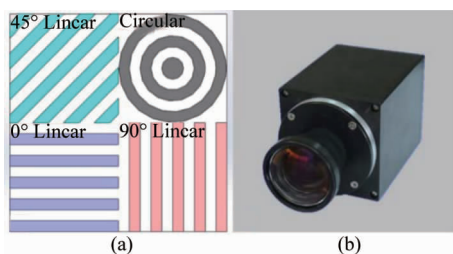


图 3 (a) 相机共焦面偏振分布示意图, (b) 偏振成像相机样机实物图

Fig. 3 (a) The sketch map of polarization distribution of the camera's confocal plane, (b) the polarimetric camera

3 实验

利用所研制的偏振相机, 开展了偏振度成像和偏振去雾成像实验研究, 相机输出效果分别如图 6



图 4 偏振相机直接拍摄的原始图像
Fig. 4 The original output images captured by the polarimetric camera

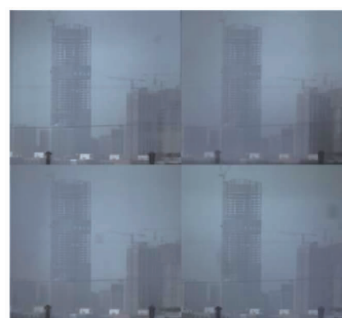


图 5 配准之后的图片
Fig. 5 The registration images

和图 7 所示. 图 6 (a) 是相机直接输出的强度图像, 可以看出图像对比度较差, 在图 6 (b) 的全偏振度图像中, 能清楚看到飞机模型的轮廓及飞机模型上的编号等细节信息. 由于相机暂未考虑圆偏振探测精度, 因此该实验仅可定性地对偏振成像和强度成像效果的差异. 图 7 (a) 是相机直接输出的强度图像, 由于图像是在雾霾天气下拍摄的, 成像视距低, 图 7 (b) 是偏振去雾之后的图片, 可以看出成像视距明显提高, 需要说明的是, 在去雾处理时我们并没有考虑圆偏振图像的影响. 另外, 为了突出偏振成像处理后的图像效果, 图 6 和图 7 对边界进行了剪裁, 因此两图与图 5 所示正方形表观上不尽相同.

根据不同的应用需求, 该偏振相机可实时输出全偏振图像或偏振去雾图像. 我们提出的偏振去雾算法具有两个创新点^[13-14, 19]: 1) 针对直接从图像中估算偏振度信息误差较大的缺点, 创新性地提出了直接采用偏振角特征参量作为估算偏振信息的判据, 有效提高了算法的去雾能力; 2) 对偏振去雾算法中关键参数的估算提出了全新的方案, 摆脱了现行偏振去雾算法都需要天空背景的束缚, 同时简化了算法, 使其更具有普适性和实时性.

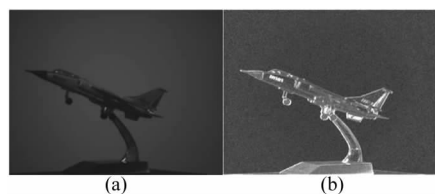


图6 (a)强度图像,(b)全偏振度图像
Fig.6 (a) The intensity image, and (b) the degree of full polarization image

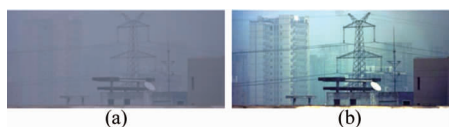


图7 (a)强度图像,(b)偏振去雾后图像
Fig.7 (a) The intensity image, and (b) the polarization-dehazing image

4 结论

实时全偏振态同时探测技术对偏振成像的实用化具有重要的意义和价值. 提出并研制的全偏振态同时探测实时彩色偏振成像相机可用于高速移动目标、隐藏/伪装目标和低信杂比情况下目标的实时跟踪与探测,也可用于烟尘、雾霾、水下等低能见度环境下目标成像视距的提升. 在军用和民用领域目标成像、实时监测等方面具有广阔的应用前景.

References

- [1] TAO Ze, LIU Jia-Min, ZHANG Chuan-Wei, *et al.* Compact polarization spectrometer based on spatial modulation of polarization state [J]. *Journal of Infrared and Millim. Waves* (陶泽,刘佳敏,张传维,等. 基于偏振态空间调制的紧凑型偏振光谱仪. *红外与毫米波学报*), 2016, **35** (5): 557-583.
- [2] Nicolas V, Francois G, Coentlin P, *et al.* Comparison of different active polarimetric imaging modes for target detection in outdoor environment [J]. *Applied Optics*, 2016, **55** (11): 2881-2891.
- [3] Guan J G, Zhu J P. Target detection in turbid medium using polarization-based range-gated technology [J]. *Optics Express*, 2013, **21** (12): 14152-14158.
- [4] ZHANG Chao-Yang, Cheng Hai-Feng, Chen Zhao-Hui, *et al.* Detecting low reflectivity camouflage net by using polarization remote sensing [J]. *Journal of Infrared and Millim. Waves* (张朝阳,程海峰,陈朝辉,等. 偏振遥感识别低反射率伪装网研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28** (2): 137-140.
- [5] Pierangelo A, Benali A, Antonelli M R, *et al.* Ex-vivo characterization of human colon cancer by Mueller polarimetric imaging [J]. *Optics Express*, 2011, **19** (2): 1582-1593.
- [6] Wang J F, Zheng W, Lin K, *et al.* Integrated Mueller-matrix near-infrared imaging and point-wise spectroscopy improves colonic cancer detection [J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, **7** (3): 1116-1126.
- [7] Alali S, Vitkin A. Polarized light imaging in biomedicine; emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, **20** (6): 061104.
- [8] Abrahamsson S, Mcquilken M, Mehta S B, *et al.* Multi focus polarization microscope (MF-PolScope) for 3D polarization imaging of up to 25 focal planes simultaneously [J]. *Optics Express*, 2015, **23** (6): 7734-7754.
- [9] Yuffa A J, Gurton K P, Videen G. Three-dimensional facial recognition using passive long-wavelength infrared polarimetric imaging [J]. *Applied Optics*, 2014, **53** (36): 8514-8521.
- [10] Kadambi A, Taamazyan V, Shi B X, *et al.* Polarized 3D: High-quality depth sensing with polarization cues [C]. *MIT Media Lab*, 2015.
- [11] Fang S, Xia X S, Huo X, *et al.* Image dehazing using polarization effects of objects and airlight [J]. *Optics Express*, 2014, **22** (16): 19523-19537.
- [12] Fade J, Panigrahi S, Carre A, *et al.* Long-range polarimetric imaging through fog [J]. *Applied Optics*, 2014, **53** (18): 3854-3865.
- [13] Liang J, Zhang W F, Ren L Y, *et al.* A polarimetric dehazing method for visibility improvement based on visible and infrared image fusion [J]. *Applied Optics*, 2016, **55** (29): 8221-8226.
- [14] Zhang W F, Liang J, Ju H J, *et al.* A robust haze-removal scheme in polarimetric dehazing imaging based on automatic identification of sky region [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, **86**: 145-151.
- [15] Zhang W J, Zhang X Z, Cao Y, *et al.* Robust sky light polarization detection with an S-wave plate in a light field camera [J]. *Applied Optics*, 2016, **55** (13): 3518-3525.
- [16] Mu T K, Zhang C M, Jia C L, *et al.* Static hyperspectral imaging polarimeter for full linear Stokes parameters [J]. *Optics Express*, 2012, **20** (16): 18194-18201.
- [17] Chen W L, Wang S H, Jin W Q, *et al.* Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory [J]. *Journal of Infrared and Millim. Waves* (陈伟力,王淑华,金伟其,等. 基于偏振微面元理论的红外偏振特性研究. *红外与毫米波学报*), 2014, **33** (5): 507-514.
- [18] Liang J, Ren L Y, Ju H J, *et al.* Visibility enhancement of hazy images based on a universal polarimetric imaging method [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**: 173107.
- [19] Liang J, Ren L Y, Qu E S, *et al.* A new method for enhancing visibility of hazy images based on polarimetric imaging [J]. *Photonics Research*, 2014, **2** (1): 38-44.
- [20] Mu T K, Zhang C M, Li Q W, *et al.* Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters [J]. *Optics Express*, 2015, **23** (8): 10822-10835.
- [21] Hsu W L, Myhre G, Balakrishnan K, *et al.* Full-Stokes imaging polarimeter using an array of elliptical polarizer [J]. *Optics Express*, 2014, **22** (3): 3063-3074.
- [22] Mu T K, Zhang C M, Jia C L, *et al.* Static hyperspectral imaging polarimeter for full linear Stokes parameters [J]. *Optics Express*, 2012, **20** (16): 18194-18201.
- [23] Zhang C M, Jian X H, Wide-spectrum reconstruction method for a birefringence interference imaging spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2010, **35** (3): 366-368.
- [24] Goldstein D. *Polarized Light* [M]. 2nd ed., Marcel Dekker Inc., 2003.