

基于超消色差 1/4 波片和 AOTF 的高光谱全偏振成像技术

张 瑞^{1,2,3}, 解琨阳^{1,2,3}, 景 宁^{1,2,3}, 王志斌^{1,2,3}, 陈媛媛^{1,2,3}, 李克武^{1,2,3}, 乔 亚^{1,3}

- (1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
3. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对环境温度、电压、入射角等因素变化对基于声光可调谐滤波器 (Acousto-optic tunable filter, AOTF) 和液晶可变延迟器 (Liquid crystal variable retarder, LCVR) 的光谱偏振成像测量精度影响大, 且整个系统实现复杂等缺点; 考虑到超消色差波片对温度和波长依赖小, 结合 AOTF 高光谱成像的优点, 提出了基于超消色差 1/4 波片和 AOTF 的高光谱全偏振成像新方法。详细分析了该方法的工作原理, 并结合可购买到的最好超消色差 1/4 波片中相位延迟和快轴随波长的微小波动, 进而分析了该波动对偏振测量的影响, 并针对这些影响研究了修正策略。搭建了原理样机, 对 450~950 nm 波段进行了偏振测量, 修正后偏振度测量误差 $\leq 1\%$, 对偏振方向的测量偏差 $\leq 1.8^\circ$, 以 633 nm 为例, 对其全 Stokes 参量图像进行了具体原理及修正测量验证实验, 结果表明, 该新技术原理正确, 修正策略可行。该研究可为复杂条件下高精度、高光谱全偏振成像技术提供新的理论和实现方案。

关键词: 光谱偏振成像; 声光可调谐滤波器; 超消色差波片; Stokes 参量

中图分类号: O431.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0814004

Technology of hyperspectral full polarization imaging based on superachromatic 1/4 wave plate and acousto-optic tunable filter

Zhang Rui^{1,2,3}, Xie Kunyang^{1,2,3}, Jing Ning^{1,2,3}, Wang Zhibin^{1,2,3}, Chen Yuanyuan^{1,2,3}, Li Kewu^{1,2,3}, Qiao Ya^{1,3}

- (1. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Optical-electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Lab of Instrument Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. State Key Laboratory For Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The measurement accuracy of spectropolarimetric imaging is severely affected by ambient temperature, voltage, and incident angle based on acousto-optic tunable filter (AOTF) and liquid crystal variable retarder (LCVR). The spectropolarimetric imaging system is more complex. However, the superachromatic wave plate has the advantage that the retardation varies very little with temperature and wavelength. According to it, a new method of full polarization hyperspectral imaging based on

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金(61127015); 国际科技合作项目(2013DFR10150)

作者简介: 张瑞(1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光谱成像方面的研究。Email: zhangrui@nuc.edu.cn

superachromatic wave plate and acousto-optic tunable filter was proposed. The working principle of the method was analyzed in detail. According to the slight fluctuation of retardation and the fast axis of the superachromatic 1/4 wave plate, the effect of this fluctuation on the polarization measurement was analyzed in detail. For these errors, a correction strategy was proposed. The specific principle of all the Stokes parameters images and the modified measurement verification experiment were performed for 633 nm waveband. The experiment result shows that the measurement error of the polarization degree of the system is less than 1% in the band of 450–950 nm, and the measurement deviation of the polarization orientation is less than 1.8°. The experimental results show that the new technology principle is correct and the correcting strategy is feasible. This research can provide new theory and implementation scheme for high-precision, high-resolution, full-polarization imaging technology under complex conditions.

Key words: spectropolarimetric imaging; AOTF; superachromatic wave plate; Stokes parameters

0 引言

光谱偏振成像技术 (Spectropolarimetric Imager, SPI) 是目前国际上先进的光学探测技术之一, 其将成像、光谱和偏振技术融为一体, 能够同时获得被测目标图像、光谱、偏振信息。与传统成像光谱仪相比, SPI 把信息量从三维(光强、光谱和空间)扩充到四维(光强、光谱、空间和偏振), 大大提高了目标物体的探测信息量, 且偏振探测具有提高目标对比度、提供形状方向信息、降低散射等特点, 可在复杂背景下提高识别能力。因此光谱偏振成像在环境检测、生物医学、农业和天文等领域有重要的应用前景^[1-7]。

由于声光可调谐滤波器 (Acousto-optic tunable filter, AOTF) 具有体积小、波长稳定性好、扫描范围宽、调节速度快、衍射效率高、无运动部件等优点, 在光谱成像中被广泛应用^[8-10]。其中基于 AOTF 的 SPI 主要是结合液晶可变延迟器 (Liquid crystal variable retarder, LCVR) 实现光谱偏振成像, Neelam 等人提出 AOTF 外加两个 LCVR 调谐的 SPI 设计, 获得了 Stokes 参量 4 元素的光谱全偏振图像^[11-12], 中北大学张瑞、王志斌等人也对该方案进行了研究, 并设计了原理样机^[13-14]。同时本课题组李克武、王志斌等人提出 AOTF 加一个 LCVR 调谐的 SPI 设计^[15], 但需采用两个 CCD 同时对 AOTF 正负一级探测, 由于 AOTF 无法同时消除 AOTF 正负一级图像漂移问题, 导致测量精度下降。且上述方法中采用的

AOTF+LCVR 光谱偏振成像都存在的问题是: 环境温度、电压波动、入射角度、长时间工作稳定性对 LCVR 的相位延迟有影响, 这将严重影响整个系统的偏振测量精度。另外一种方法是 AOTF 结合弹光调制器实现光谱偏振成像^[8,16], 但该方法结构和控制比较复杂, 且体积大, 多个反射界面导致光能利用率低, 实现比较困难。

为同时获得 Stokes 参量 4 元素全偏振测量精度、空间分辨率、光谱分辨率和探测灵敏度都较高光谱偏振成像, 并降低系统的难度和减小对温度依赖问题, 考虑到新型的超消色差波片可大大降低相位延迟对温度和波长的依赖性的特点, 文中提出采用 AOTF 滤光和超消色差 1/4 波片偏振调制的高光谱全偏振成像新方法。分析了基本原理, 讨论了影响测量精度的因素及其解决策略; 设计了原理样机, 并进行实验验证。该方案可为宽温度范围、高偏振精度、高光谱分辨率、高灵敏度、高速的 SPI 提供新的理论和方案。

1 基于超消色差 1/4 波片和 AOTF 的光谱偏振成像理论分析

1.1 超消色差 1/4 波片和 AOTF 工作机理及偏振态分析

消色差波片按结构特点可分为两类: 全内反射型消色差波片和双折射型消色差波片, 相对而言双折射消色差波片具有通光孔径大的特点, 而文中的光谱偏

振成像需要大孔径。目前市场上普通消色差波片的延迟精度可达 $\lambda/100$ ，但该精度对要求严格的场合还无法使用；基于 Pancharatnama 的设计方案，美国 Thorlabs 公司生产的超消色差波片(Superachromatic wave plate), 每个超消色差波片由三块石英波片和三块氟化镁波片组成。对比于其它波片, 超消色差波片在更宽的范围上提供更平坦的延迟, 该超消色差波片延迟精度可达 $\lambda/300$ 。图 1 为超消色差 1/4 波片与普通消色差 1/4 波片相位延迟对比图。

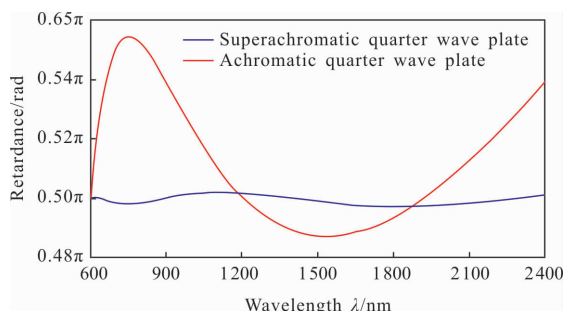


图 1 超消色差与普通消色差 1/4 波片相位延迟

Fig.1 Phase retardance of superachromatic quarter-wave plate comparison with achromatic plate

声光可调谐滤波器(AOTF) 利用声光相互作用原理研制的新型滤光器件, 主要由声光晶体和压电换能器组成。在压电换能器上加一定频率的驱动电压, 并产生同频率的超声波, 衍射光的波长与驱动信号频率一一对应, 因此改变驱动频率就可改变衍射光的波长。根据 AOTF 的工作原理, 出射光除了 0 级光之外, 还会产生 ± 1 级衍射光, 其中 +1 级和 -1 级衍射光始终为偏振方向互成 90° 的线偏振光, 且入射光为 e 光(或 o 光)时, 衍射光只有 +1 级(或 -1 级), 且入射光偏振方向与衍射光偏振方向互相垂直, 如图 2 所示。

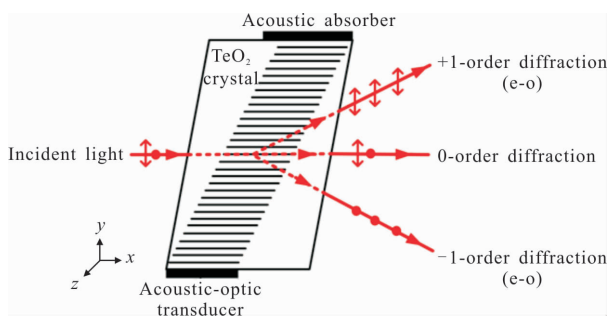


图 2 AOTF 衍射后的光学偏振特性

Fig.2 Optical polarization properties of AOTF

1.2 基于超消色差 1/4 波片和 AOTF 的高光谱全偏振成像机理

基于超消色差 1/4 波片和 AOTF 的光谱偏振成像原理如图 3 所示, 整个系统主要由前置光学系统、超消色差 1/4 波片、两个偏振方向互相正交的偏振片(P1 和 P2)、AOTF、后置成像透镜、CCD 相机组成。被测目标光进入前置光学系统后进入超消色差 1/4 波片和偏振片 P1 进行偏振调制, 再通过 AOTF 实现可调谐 +1 级衍射滤光, 出射光依次通过偏振片 P2 和后置成像透镜成像在 CCD 相机, 通过 AOTF 超声换能器扫频, 实现不同波长的偏振成像, 最终实现光谱偏振成像。其中, 超消色差 1/4 波片是一种可在宽波段范围内都能起到 1/4 波片的作用, 且温度对其影响较小, 两个偏振方向互相正交的偏振片 P1 和 P2 可消除 AOTF 的 0 级和 -1 级衍射光对成像的干扰。具体的理论推导如下。

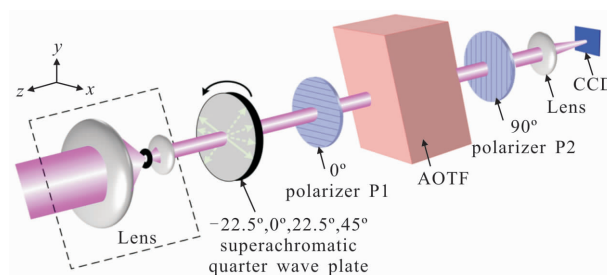


图 3 基于超消色差波片和 AOTF 的光谱偏振成像原理图

Fig.3 Schematic diagram of polarization hyperspectral imaging based on superachromatic wave plate and AOTF

在以下的推导中都以 x 轴正方向为参考 0° 方向, 结合图 3, 被测光依次经过快轴与 x 轴正方向成 θ 角的超消色差 1/4 波片、偏振方向为 0° 的偏振片 P1 后的 Stokes 参量为:

$$S' = M_P M_W S = [I', Q', U', V']^T \quad (1)$$

式中: $S = [I, Q, U, V]^T$ 为被测入射光 Stokes 参量; $S' = [I', Q', U', V']^T$ 为经过超消色差波片和偏振片 P1 后的 Stokes 参量; M_P 和 M_W 分别为偏振方向为 0° 的偏振片 P1 和超消色差 1/4 波长的 Mueller 矩阵, 分别为:

$$M_P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) + \cos\delta \sin^2(2\theta) & (1 - \cos\delta)\sin(2\theta)\cos(2\theta) & -\sin\delta \sin(2\theta) \\ 0 & (1 - \cos\delta)\sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) + \cos\delta \cos^2(2\theta) & \sin\delta \cos(2\theta) \\ 0 & \sin\delta \sin(2\theta) & -\sin\delta \cos(2\theta) & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： θ 为超消色差波片快轴与 x 轴方向的夹角； δ 为超消色差波片的相位延迟值。由于 CCD 只能接受到总的光强 I' ，将公式(2)代入公式(1)可得：

$$I' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{2}[\cos^2(2\theta) + \cos\delta \sin^2(2\theta)]Q + \frac{1}{2}[(1 - \cos\delta)\sin(2\theta)\cos(2\theta)]U - \frac{1}{2}\sin\delta \sin(2\theta)V \quad (3)$$

对于超消色差 1/4 波片来说，相位延迟值 $\delta = \pi/2$ ，因此公式(3)可写为：

$$I' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{2}\cos^2(2\theta)Q + \frac{1}{2}\sin(2\theta)\cos(2\theta)U - \frac{1}{2}\sin(2\theta)V \quad (4)$$

转动超消色差 1/4 波片，分别取 $\theta = -22.5^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 22.5^\circ$ 、 $\theta = 45^\circ$ 代入公式(4)对应的调制后被 CCD 探测的光强为：

$$\begin{cases} I_{-22.5^\circ}' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{4}Q - \frac{1}{4}U + \frac{\sqrt{2}}{4}V \\ I_{0^\circ}' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{2}Q \\ I_{22.5^\circ}' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{4}Q + \frac{1}{4}U - \frac{\sqrt{2}}{4}V \\ I_{45^\circ}' = \frac{1}{2}I - \frac{1}{2}V \end{cases} \quad (5)$$

由公式(5)可求得被测光 Stokes 参量中的 I 、 Q 、 U 和 V 分别为：

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 2 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 \\ 2\sqrt{2} & -2 & -2\sqrt{2} & 2\sqrt{2} + 2 \\ 2 & -2 & 2 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{-22.5^\circ}' \\ I_{0^\circ}' \\ I_{22.5^\circ}' \\ I_{45^\circ}' \end{bmatrix} \quad (6)$$

在偏振成像中经常采用对被测目标的线偏振度 (Degree of linear polarization, DOLP)、圆偏振度 (Degree of circular polarization, DOCP)、偏振度 (Degree of polarization, DOP) 和偏振方向 (Polarization orientation, POR) 成像，分别为：

$$\begin{aligned} \text{DOLP} &= \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \text{DOCP} = \frac{\sqrt{V^2}}{I} \\ \text{DOP} &= \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}, \text{POR} = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \end{aligned} \quad (7)$$

上述是该系统偏振测量的原理，再通过图 1 中

AOTF 扫频获得不同波长的偏振测量，最终实现高光谱全偏振成像测量。

2 误差及实验分析

2.1 误差分析及修正策略

为了更好地满足 AOTF 成像特点、消除色差、减小成像畸变，整个成像系统采用自行设计的一次成像光学系统结构如图 4 所示。



图 4 整体光学系统结构图

Fig.4 Entire optical system structure

其中前置光学系统为无焦系统，将 $\pm 10^\circ$ 视场压缩 $\pm 3^\circ$ ，使其满足 AOTF 视场角要求，色差和畸变如图 5 所示。由于 $\pm 10^\circ$ 视场外的光进入系统会导致 AOTF 的 0 级与 1 级光重叠，影响成像质量，为此添加遮光罩避免 $\pm 10^\circ$ 视场外的光进入该系统。

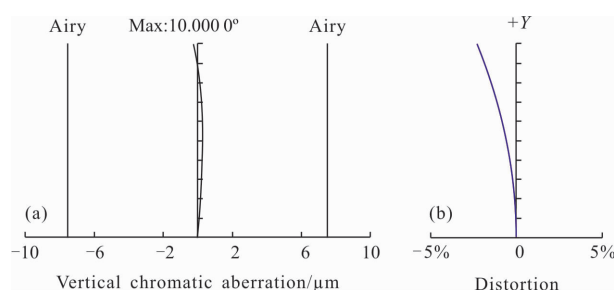


图 5 垂轴色差(a)及畸变图(b)

Fig.5 Vertical chromatic aberration (a) and distortion (b)

根据上述理论分析，搭建了原理样机，原理样机内部结构如图 6 所示。其中，波片采用 Thorlabs 公司的 SAQWP05M-700 型超消色差 1/4 波片；AOTF 采用中国电子科技集团公司第二十六研究所生产的 LSGDN-32 型，AOTF 光谱范围：450~950 nm，谱线宽带： $\Delta\lambda \leq 8$ nm， $\Delta\lambda = 4.5$ nm@ $\lambda = 550$ nm，衍射效率： $\geq 60\%$ 。

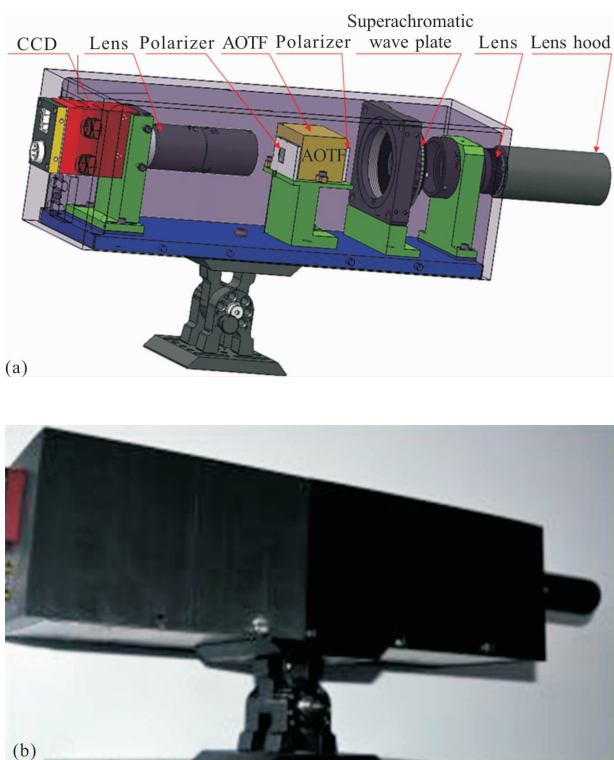


图 6 原理样机
Fig.6 Prototype

根据公式(4)~(5)的推导可知,最终实验结果的准确性与超消色差 1/4 波片的快轴方向角 θ 及相位延迟值 δ 有很大关系。虽然超消色差 1/4 波片可很大程度上减小延迟量对波长的依赖,减小色差的影

响,但是还是存在一定的色差,并且快轴也随波长有微小的变化;虽然 Thorlabs 公司超消色差波片的延迟精度可达 $\lambda/300$,但不同波长的延迟精度会略微不同,为进一步提高偏振测量精度,采用实验测得了实验样机中采用的超消色差 1/4 波片的快轴的相对方向角 $\Delta\theta$ (以 633 nm 的快轴为参考轴)及延迟量随波长的变化如图 7 所示。

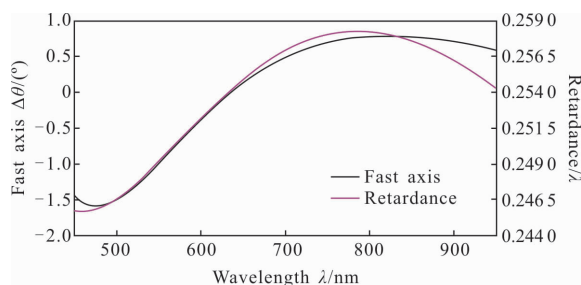


图 7 超消色差 1/4 波片的快轴方向角 θ 及延迟量
Fig.7 Fast axis direction angle θ and retardation of the superachromatic quarter-wave plate

由于超消色差波片虽然相位延迟随波长影响较小,但不同波长的相位延迟量还存在微小的差别,而且不同波长下的相位延迟厂家已给出,根据公式(3),相位延迟量如果不等于 1/4 波片(即 $\delta \neq \pi/2$),这样公式(4) Q 、 U 和 V 前面的系数将有变化。因此,结合公式(3),取 $\theta = -22.5^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 22.5^\circ$ 、 $\theta = 45^\circ$ 代入公式(5)对应的修正后调制光强为:

$$\begin{cases} I_{-22.5^\circ}' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{2}[\cos^2(2\Delta\theta - 45^\circ) - \sin(\Delta\delta)\sin^2(2\Delta\theta - 45^\circ)]Q - \frac{1}{4}[1 + \sin(\Delta\delta)]\cos(4\Delta\theta)U - \frac{1}{2}\cos(\Delta\delta)\sin(2\Delta\theta - 45^\circ)V \\ I_{0^\circ}' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{2}[\cos^2(2\Delta\theta) - \sin(\Delta\delta)\sin^2(2\Delta\theta)]Q + \frac{1}{4}[1 + \sin(\Delta\delta)]\sin(4\Delta\theta)U - \frac{1}{2}\cos(\Delta\delta)\sin(2\Delta\theta)V \\ I_{22.5^\circ}' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{2}[\cos^2(45^\circ + 2\Delta\theta) - \sin(\Delta\delta)\sin^2(45^\circ + 2\Delta\theta)]Q + \frac{1}{4}[1 + \sin(\Delta\delta)]\cos(4\Delta\theta)U - \frac{1}{2}\cos(\Delta\delta)\sin(45^\circ + 2\Delta\theta)V \\ I_{45^\circ}' = \frac{1}{2}I + \frac{1}{2}[\sin^2(2\Delta\theta) - \sin(\Delta\delta)\cos^2(2\Delta\theta)]Q - \frac{1}{4}[1 + \sin(\Delta\delta)]\sin(4\Delta\theta)U - \frac{1}{2}\cos(\Delta\delta)\cos(2\Delta\theta)V \end{cases} \quad (8)$$

因此公式(8)可写为:

$$[I_{-22.5^\circ}' \ I_{0^\circ}' \ I_{22.5^\circ}' \ I_{45^\circ}']^T = A * [I, Q, U, V]^T \quad (9)$$

其中,

$$A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos^2(2\Delta\theta - 45^\circ) - \sin(\Delta\delta)\sin^2(2\Delta\theta - 45^\circ) & -\frac{1}{2}[1 + \sin(\Delta\delta)]\cos(4\Delta\theta) & -\cos(\Delta\delta)\sin(2\Delta\theta - 45^\circ) \\ 1 & \cos^2(2\Delta\theta) - \sin(\Delta\delta)\sin^2(2\Delta\theta) & \frac{1}{2}[1 + \sin(\Delta\delta)]\cos(4\Delta\theta) & -\cos(\Delta\delta)\sin(2\Delta\theta) \\ 1 & \cos^2(45^\circ + 2\Delta\theta) - \sin(\Delta\delta)\sin^2(45^\circ + 2\Delta\theta) & \frac{1}{2}[1 + \sin(\Delta\delta)]\cos(4\Delta\theta) & -\cos(\Delta\delta)\sin(45^\circ + 2\Delta\theta) \\ 1 & \sin^2(2\Delta\theta) - \sin(\Delta\delta)\cos^2(2\Delta\theta) & -\frac{1}{2}[1 + \sin(\Delta\delta)]\sin(4\Delta\theta) & -\cos(\Delta\delta)\cos(2\Delta\theta) \end{bmatrix}$$

因此,修正后获得的被测光 Stokes 参量中的 $I_{修正}$ 、 $Q_{修正}$ 、 $U_{修正}$ 和 $V_{修正}$ 为:

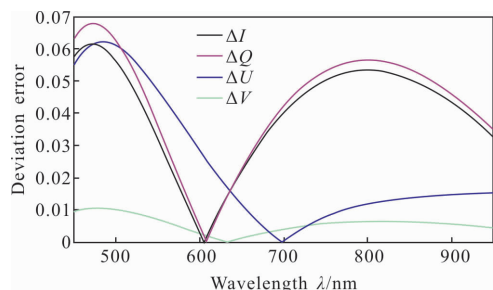
$$\begin{bmatrix} I_{修正} \\ Q_{修正} \\ U_{修正} \\ V_{修正} \end{bmatrix} = A^{-1} * \begin{bmatrix} I_{-22.5'} \\ I_{0'} \\ I_{22.5'} \\ I_{45'} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由公式(10)可得公式(6) I 、 Q 、 U 和 V 偏差为:

$$\begin{cases} \left| \frac{DOLP_{修正} - DOLP}{DOLP_{修正}} \right| = \left| 1 - \frac{I_{修正} \sqrt{Q^2 + U^2}}{I \sqrt{Q_{修正}^2 + U_{修正}^2}} \left(\frac{\sqrt{Q_{修正}^2 + U_{修正}^2}}{I_{修正}} - \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \right) \right| \\ \left| \frac{DOCP_{修正} - DOCP}{DOCP_{修正}} \right| = \left| 1 - \frac{I_{修正} \sqrt{V^2}}{IV_{修正}} \right| \\ \left| \frac{DOP_{修正} - DOP}{DOP_{修正}} \right| = \left| 1 - \frac{I_{修正} \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I \sqrt{Q_{修正}^2 + U_{修正}^2 + V_{修正}^2}} \right| \\ \Delta POR = |POR_{修正} - POR| = |\text{actan}(U_{修正}/Q_{修正}) - \text{actan}(U/Q)| \end{cases} \quad (12)$$

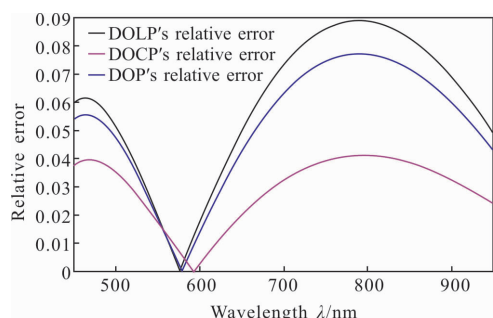
假设归一化后的 $I=1.0$ 、 $Q=0.6$ 、 $U=0.6$ 、 $V=0.5$, 将图 6 中 Thorlabs 公司的超消色差 1/4 波片的相关参数带入公式(6)、(10)~(12)得到的偏差 ΔI 、 ΔQ 、 ΔU 、 ΔV 、 ΔPOR 、DOLP、DOCP 和 DOP 的相对误差如图 8 所示。

由超消色差 1/4 波片快轴方向和延迟量随波长的微小变化所导致各个偏振参数的测量误差如图 6 所示,可通过公式(10)及图 5 数据进行修正。



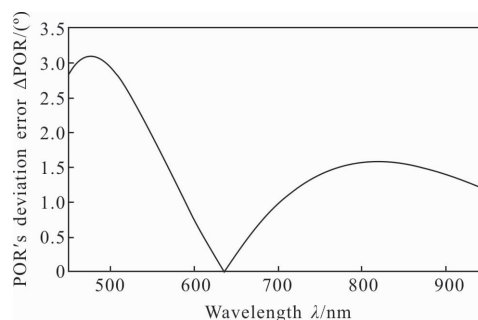
(a) 偏差 (ΔI 、 ΔQ 、 ΔU 、 ΔV)

(a) Deviation error (ΔI 、 ΔQ 、 ΔU 、 ΔV)



(b) 相对误差 (DOLP、DOCP、DOP)

(b) Relative error (DOLP、DOCP、DOP)



(c) 偏差 (ΔPOR)

(c) Deviation error (ΔPOR)

图 8 误差

Fig.8 Error

2.2 实验及分析

为验证上述理论和修正策略的正确可靠性,采用图 6 的样机进行了理论验证实验,为验证 2.1 节修正策略的正确性,采用准直白光光源加可旋转的格兰泰勒(Glan-Taylor, GT)实现不同偏振态的入射光,通过实验,结合公式(6)和公式(10)分别获得修正前后的 Stokes 参量,并结合公式(7)获得修正前后的 DOLP 和 POR,并根据 GT 棱镜的方向计算理论值,与实验结果进行对比,具体实验结果如表 1 所示,其中:

$$\begin{cases} \text{DOLP 误差} = \left| \frac{DOLP_{实验(或 DOLP_{修正})} - DOLP_{理论}}{DOLP_{理论}} \right| \\ \text{POR 偏差} = |POR_{实验(或 POR_{修正})} - POR_{理论}| \end{cases}$$

为验证系统样机的可行性,采用偏振片和波片实现已知 Stokes 参量的被测目标,如图 9(a)所示,测

量目标物以毛玻璃为背景,偏振方向分别为 0°、90°、45°的三个偏振片,作为具有线偏振特性的线偏振目标,快轴方向为 45°的 1/4 波片(@633 nm)作为具有圆偏振特性的圆偏振目标。设置 AOTF 超声驱动频

率,使其衍射波长 $\lambda=633\text{ nm}$,通过旋转超消色差 1/4 波片在 CCD 获得对应光强,代入修正公式(10)和公式(7)获得该样机的偏振测量结果如图 9(b1)~9(b4)和图 9(c1)~9(c4)所示。

表 1 修正前后实验结果及误差

Tab.1 Results of experiments and error before and after rectification

Wavelength λ/nm	GT Polarizer direction $/(\circ)$	Theoretical value		Experiment result				Correction result			
		DOLP _{theory}	POR _{theory} $/(\circ)$	DOLP _{experiment}	POR _{experiment} $/(\circ)$	DOLP error	POR deviation $/(\circ)$	DOLP _{rectification}	POR _{rectification} $/(\circ)$	DOLP error	POR deviation $/(\circ)$
500	0	1.00	0	0.95	3.2	5%	3.2	0.99	0.5	1%	0.5
	150	1.00	150	1.01	153.2	1%	3.2	1.00	151.4	0%	1.4
600	30	1.00	30	1.01	31.3	1%	1.3	1.00	30.2	0%	0.2
	120	1.00	120	1.02	119.1	2%	0.9	1.01	120.1	1%	0.1
700	0	1.00	0	1.10	179.0	1%	1.0	1.01	179.7	1%	0.3
	90	1.00	90	1.01	90.8	1%	0.8	1.00	90.2	0%	0.2
800	60	1.00	60	1.05	63.1	5%	3.1	1.01	61.8	1%	1.8
	135	1.00	135	1.03	137.2	3%	2.2	1.01	135.3	1%	0.3

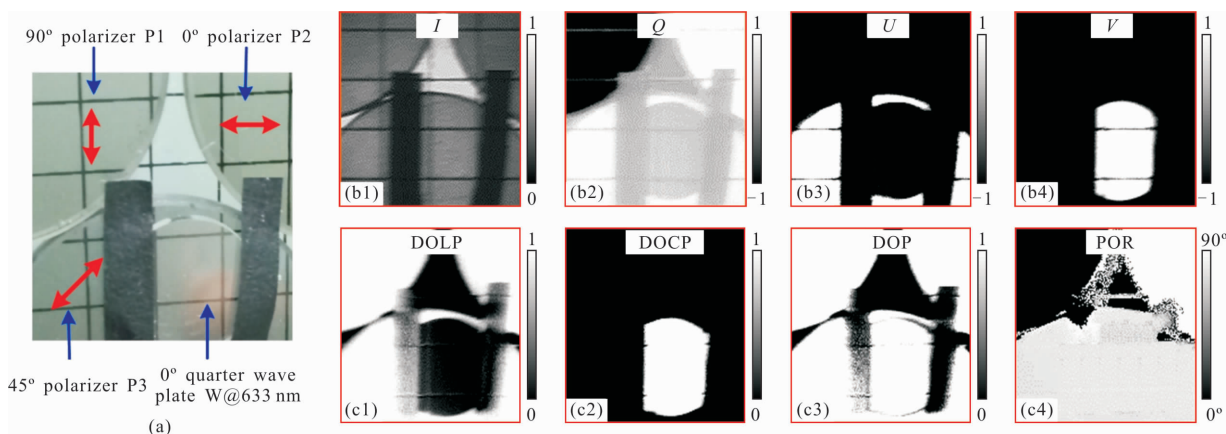


图 9 原理验证实验目标及结果($\lambda=633\text{ nm}$)

Fig.9 Experiment object and verification results of measuring principle ($\lambda=633\text{ nm}$)

根据偏振理论可知,Stokes 参量 I 为目标物总光强,所以 P1、P2、P3、W 和背景都亮(如图 9(b1)所示); Q 为光 0°和 90°线偏振分量的光强差图,所以 P1 最亮(如图 9(b2)所示); U 为光 45°和 -45°线偏振分量的光强差图,所以 P3 最亮(如图 9(b3)所示); V 为光右旋圆偏振分量和左旋圆偏振分量的光强差图,所以 1/4 波片 W 最亮(如图 9(b4)所示);由公式(7)可知,线偏振度 DOLP 表示的是线偏振光的程度,所以线偏振片 P1、P2 和 P3 最亮(如图 9(c1)所示);圆偏振度 DOCP 中包含圆偏振信息的 W 最亮(如图 9(c2)所示);偏振度 DOP 中具有线偏振度 P1、P2、P3 和具

有圆偏振度的 W 都亮(如图 9(c3)所示);偏振方向 POR 中体现的是偏振方向,所以 P1、P2 和 P3 的亮度都不相同(如图 9(c4)所示)。由实验结果可看成,偏振成像大大地拉伸了目标与背景的对比度。实验结果表明,该高光谱全偏振成像系统原理正确可行,为进一步的实物目标检测奠定了基础。

3 结论

针对环境温度、电压、入射角等因素变化对基于声光可调谐滤波器(AOTF)和液晶可变延迟器(LCVR)的光谱偏振成像测量精度影响大、整个系统实现复

杂等缺点;文中提出基于超消色差 1/4 波片和 AOTF 的光谱全偏振成像新方法。结合可购买到的最好超消色差 1/4 波片中相位延迟和快轴随波长的微小波动,进而分析该波动对不同波长下偏振测量的影响,理论分析表明,该超消色差 1/4 波片对整个系统在 450~950 nm 波段的偏振度测量误差 $<9\%$,对偏振方向的测量偏差 $<3.2^\circ$;并针对此误差研究了修正策略,修正后偏振度测量误差 $\leq 1\%$,对偏振方向的测量偏差 $\leq 1.8^\circ$ 。搭建原理样机,进行原理验证、修正策略验证和光谱偏振成像测试;实验结果表明,该新技术原理正确,修正策略可行。该研究可为复杂条件下高精度、高分辨率光谱全偏振成像技术提供新的理论和实现方案。

参考文献:

- [1] Bai Caixun, Li Jianxin, Zhou Jianqiang, et al. Interferometric hyperspectral polarization imaging method based on micro-polarization array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0136003. (in Chinese)
- [2] Diner D J, Xu F, Martonchik J V, et al. Exploration of a polarized surface bidirectional reflectance model using the ground-based multiangle spectropolarimetric imager [J]. *Atmosphere*, 2012, 3: 591-619.
- [3] Wang Jiachun, Zhao Dapeng, Du Xianghua, et al. Design and experiment of hyper-spectral polarization imaging system based on AOTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0136002. (in Chinese)
- [4] Diner D J, Xu F, Garay M J, et al. The Airborne Multiangle SpectroPolarimetric Imager(AirMSPI): A new tool for aerosol and cloud remote sensing [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(8): 2007-2025.
- [5] Yang Bin, Yan Changxiang, Zhang Junqiang, et al. Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1126-1134. (in Chinese)
- [6] Wang Lingzhi, Han Yang, Pan Qian. Study on farmland soil fertility model based on multi-angle polarized hyper-spectrum [J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2018, 38(1): 240-245. (in Chinese)
- [7] Chen Yongtai, Zhang Ran, Lin Wei, et al. Design and construction of real-time all-polarization imaging detector for skylight[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 816-824. (in Chinese)
- [8] Zhang R, Wen T D, Wang Y L, et al. Spectropolarimetric detection using photoelastic modulators and acousto-optic tunable filter [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8686-8693.
- [9] Zhang Rui, Chen Youhua, Li Kewu, et al. Optical system design and spectral correction based on 3PEMs and AOTF spectropolarimetric imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 55-64. (in Chinese)
- [10] Zhang Chunguang. The technology of the acousto-optic tunable filter based on the hyperspectral imaging system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [11] Neelam G, Suhre D R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(14): 2632-2637.
- [12] Gupta N. Acousto-optic-tunable-filter-based spectropolarimetric imagers for medical diagnostic applications-instrument design point of view [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2005, 10(5): 051802.
- [13] Li X, Liu S, Wang Z, et al. New method for obtaining full-stokes parameters of high-spectral polarization imaging system [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(12): 3953-3958.
- [14] Zhang Rui. The research on high-accuracy hyper-spectral full-polarization imaging based on acousto-optic and liquid crystal variable retarder [D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)
- [15] Li Kewu, Wang Zhibin, Yang Changqing, et al. A new technique of full polarization hyperspectral imaging based on acousto-optic tunable filter and liquid crystal variable retarder[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(14): 140702. (in Chinese)
- [16] Chen Youhua, Wang Zhaobo, Wang Zhibin, et al. The research of polarized information detection for photo-elastic modulator-based imaging spectropolarimeter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 60702. (in Chinese)