

# 高光谱全偏振成像快捷测量技术研究

薛鹏<sup>1,2,3</sup> 王志斌<sup>1,2,3</sup> 张瑞<sup>2,3</sup> 王耀利<sup>2,3</sup> 刘顺<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中北大学理学院, 山西 太原 030051

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

**摘要** 为了实现声光可调滤波器(AOTF)和液晶可调相位延迟器(LCVR)相结合的新型高光谱偏振成像系统全 Stokes 参量的快捷准确获取,提出了一种新的测量方法。该方法采用一个驱动信号源同时控制系统中两个 LCVR,当 LCVR 在不同波长下进行相位调制时,依次取 4 个固定的驱动电压,求得不同波长下 LCVR1 和 LCVR2 的 4 组相位延迟,通过相应的数学计算即可快速精确求得目标光全部 Stokes 参量。波长为 632 nm 时,以偏振方向分别为 0°、90°、45° 的偏振片和 1/4 波片为目标物,毛玻璃为背景,通过系统成像后获取了全部 Stokes 参量的图像。结果表明,该测量方法不仅可以快速准确地获取目标物全部 Stokes 参量,而且系统成像质量良好。对 532 nm 波长下的真假树叶进行高光谱偏振成像,进一步验证了该测量方法的快捷准确和系统的可靠性。理论分析了影响 Stokes 参量测量精度的因素,为提高系统测量精度提供了理论基础。

**关键词** 光谱学; 高光谱偏振成像; Stokes 参量; 声光可调滤波器; 液晶可调相位延迟器

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0811001

## Highly Efficient Measurement Technology Based on Hyper-Spectropolarimetric Imaging

Xue Peng<sup>1,2,3</sup> Wang Zhibin<sup>1,2,3</sup> Zhang Rui<sup>2,3</sup> Wang Yaoli<sup>2,3</sup> Liu Shun<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Science, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of the Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>3</sup>Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In order to acquire the full Stokes parameters in the new hyper-spectropolarimetric imaging system quickly and accurately, which is filtered by the acousto-optic tunable filter (AOTF) and modulated by the liquid crystal variable retarder (LCVR), we propose a new measurement method that two LCVRs are controlled by one driving signal source, and we take four fixed driving voltages in turn when the LCVR phase modulation is carried out under different wavelengths. The full Stokes parameters about incident light via the corresponding mathematical calculation are obtained. In order to verify the accuracy of this method, we take three polaroids with the polarization directions of 0°, 90°, and 45° respectively and a quarter-wave plate as the target, with a sheet of frosted glass as the background. Images of all the Stokes parameters are obtained by the imaging system. The results show that the proposed method can obtain all Stokes parameters with high imaging quality. In addition, we further verify the feasibility of the system and the accuracy of the method with the aid of hyper-spectropolarimetric imaging of true

收稿日期: 2016-03-22; 收到修改稿日期: 2016-04-11

基金项目: 国际科技合作项目(2013DFR10150)、国家自然科学基金(61127015)、山西省青年科技研究基金(2014021012)

作者简介: 薛鹏(1991—),男,硕士研究生,主要从事光信息的获取和处理与声光成像方面的研究。

E-mail: xuepeng20062006@126.com

导师简介: 王志斌(1966—),男,硕士,教授,主要从事光谱成像技术及遥感方面的研究。

E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn(通信联系人)

leaves and false leaves with different colors. The factors that influence the measurement accuracy of Stokes parameters are analyzed theoretically, providing a theoretical basis for further improving measurement accuracy.

**Key words** spectroscopy; hyper-spectropolarimetric imaging; Stokes parameters; acousto-optic tunable filter; liquid crystal variable retarder

**OCIS codes** 300.6190; 300.6550; 110.3010; 110.3175

## 1 引 言

高光谱偏振成像是一种集目标空间影像、光谱、偏振信息于一体的新型光信息探测技术<sup>[1]</sup>,该技术可获取传统方法无法获取的目标光独有的光谱偏振特性,多维信息的综合利用有效地提高了对目标物的识别能力,尤其是经过隐蔽伪装的目标。目前该技术被广泛应用于军事探测、医疗检测和大气污染监测等领域<sup>[2-4]</sup>。

基于声光可调滤波器(AOTF)滤波和液晶可调相位延迟器(LCVR)相位调制的新型高光谱偏振成像探测系统<sup>[5]</sup>,具有电调谐、无机械活动部件、成像波段可任意选择等优点,得到越来越广泛的研究。偏振成像的关键技术在于获取目标光的 Stokes 参量<sup>[6]</sup>,现有的一些 AOTF 和 LCVR 相结合的光谱偏振成像系统获取 Stokes 参量的方法如下。在 AOTF 切换不同波长进行测量时,LCVR 选取的是一些固定的相位延迟,然后根据这些固定的相位延迟求得 Stokes 参量<sup>[7-8]</sup>。但 LCVR 对不同波长光波进行相位调制产生相同的相位延迟需要的驱动电压不同,因此要在不同波长下获得相同的相位延迟,必须不断地更换驱动电压。此方法不仅繁琐耗时,而且不断更换驱动电压会使精度降低。一些系统采用两个 CCD 同时对 AOTF 的±1 级衍射光成像<sup>[9-10]</sup>,但目前大部分声光晶体由于加工工艺等原因,在晶体出射面加光楔只能消除+1 级衍射光由于色散而产生的漂移,-1 级衍射光漂移无法消除<sup>[11]</sup>,严重影响成像质量。双 CCD 同时探测±1 级衍射光也增加了系统搭建的复杂程度。鉴于该系统采用的 AOTF 只能消除+1 级图像漂移并简化系统的复杂程度,系统只采用一个 CCD 对+1 级衍射光进行探测。

为了能够快速准确地获取目标光全部 Stokes 参量,本文提出只采用一个 CCD 对 AOTF 的+1 级衍射光进行成像,采用一个驱动信号源同时控制两个 LCVR;当 LCVR 对光波进行相位调制时,每个波长下只需依次加载 4 个固定的驱动电压,且当 AOTF 切换到其他波长时,依然保持这 4 个驱动电压不变,然后求得这 4 个电压下对应的 4 组 LCVR 相位延迟,即可求出全部 Stokes 参量。该测量方法有效地避免了因切换波长而不断更换驱动电压带来的时间损耗,大大提高了测量精度。

## 2 高光谱全偏振成像系统原理

### 2.1 AOTF 工作原理

AOTF 是基于声波与光波在各向异性介质中相互作用而发生反常布拉格衍射的一种新型电调谐滤波器。当入射光波与超声波满足动量匹配时<sup>[12]</sup>,入射光波将发生衍射,衍射光波长  $\lambda_0$  与声速  $V_a$ 、声波频率  $f_a$ 、入射光极角  $\theta_i$  之间的关系为

$$\lambda_0 = \frac{V_a(n_e - n_o)}{f_a} (\sin^4 \theta_i + \sin^2 2\theta_i)^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $n_o$  和  $n_e$  分别为 o 光和 e 光的折射率,在晶体的出射面产生光矢量相互垂直的两束线偏振光,即±1 级衍射光,其声光相互作用矢量布局如图 1 所示。其中  $\mathbf{k}_i$ 、 $\mathbf{k}_d$ 、 $\mathbf{k}_a$  分别为入射光波矢量、衍射光波矢量和超声波矢量, $\theta_i$  和  $\theta_d$  分别为入射光极角和衍射光极角。

### 2.2 LCVR 工作原理

LCVR 通过改变加载在两端的驱动电压来实现对光波的相位调制。当加载在 LCVR 两端的电压大于阈值电压时,光轴发生偏转,导致 e 光的折射光发生改变,从而实现了对不同光波的相位调制,光波相位延迟公式为<sup>[13]</sup>

$$\delta(\lambda, U) = \frac{2\pi}{\lambda} [n_e(\alpha) - n_o] d = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o) \int_0^d \cos^2 \alpha dz / d = \delta_o(\lambda) \delta(U), \quad (2)$$

$$\delta_{\text{norm}}(U) = \frac{\delta(\lambda, U)}{\delta_o(\lambda)} = \delta(U), \quad (3)$$

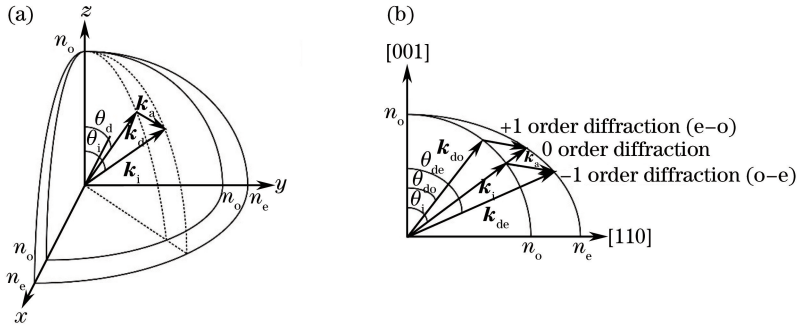


图 1 非共线 AOTF 衍射波矢量图

Fig. 1 Wave diagram of anisotropic AOTF diffraction

式中  $\alpha$  为光轴随驱动电压偏转的角度,  $d$  为 LCVR 液晶层的厚度,  $\lambda$  为光波波长,  $U$  为驱动电压。由(2)式可知,不同波长的相位延迟只与 LCVR 的静态相位延迟和驱动电压有关,当对相位延迟作归一化处理,如(3)式所示,归一化的相位延迟只与驱动电压有关。根据(3)式,要想求得不同波长的光波在不同驱动电压下的相位延迟,只需求得该波长在 LCVR 中的静态相位延迟即可。

### 2.3 系统结构与偏振分析

基于双 LCVR 相位调制和 AOTF 滤波的高光谱偏振成像光学系统如图 2 所示,以起偏器  $P_1$  透振方向为  $0^\circ$  参考方向,LCVR1 和 LCVR2 快轴方向分别为  $90^\circ$  和  $-45^\circ$ 。目标光波分别经过前置光学镜头组、LCVR1、LCVR2、 $P_1$ 、AOTF、 $P_2$ ,最后经成像透镜成像于 CCD 上进行图像的采集。

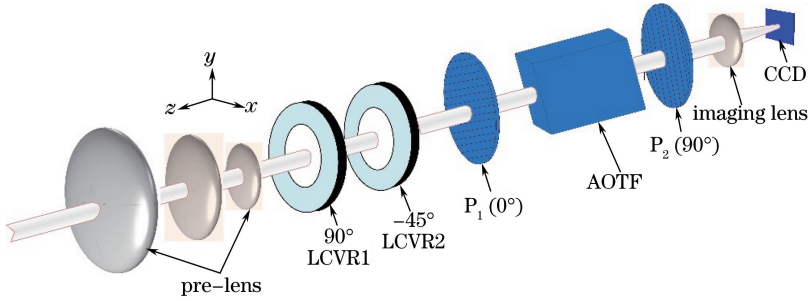


图 2 双 LCVR 和 AOTF 高光谱偏振成像探测光学系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of hyper-spectropolarimetric imaging detection system using two LCVRs and one AOTF

Stokes 矢量不仅可以描述完全偏振光、部分偏振光、非偏振光,而且 4 个参量都是光强的平均值,易于测量,其 Stokes 参数(归一化)表达式为

$$\begin{cases} I = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} = I_{45^\circ} + I_{-45^\circ} = I_R + I_L (0 \leq I \leq 1) \\ M = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} (-1 \leq M \leq 1) \\ C = I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} (-1 \leq C \leq 1) \\ B = I_R - I_L (-1 \leq B \leq 1) \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $I$  为总光波强度,  $M$  为光在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向的线偏振分量强度差,  $C$  为光在  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  方向的线偏振分量强度差,  $B$  为光的左旋圆偏振分量和右旋圆偏振分量的强度差,偏振度、线偏振度、圆偏振度和线偏振角公式为

$$\begin{cases} D_P = \frac{\sqrt{M^2 + C^2 + B^2}}{I} \\ D_{LP} = \frac{\sqrt{M^2 + C^2}}{I} \\ D_{CP} = \frac{|B|}{I} \\ A_{LP} = \frac{1}{2} \arctan \frac{C}{M} \end{cases}. \quad (5)$$

当被测目标光经双 LCVR 相位调制和 AOTF 滤波后,出射光的 Stokes 参量为

$$\mathbf{S}' = \eta(\lambda) \mathbf{M}_{P_1} \mathbf{M}_{LCVR2} \mathbf{M}_{LCVR1} \mathbf{S}, \quad (6)$$

式中  $\eta(\lambda)$  是与系统透过率和 AOTF 衍射效率有关的系数,  $\mathbf{M}_{P_1}$ 、 $\mathbf{M}_{LCVR2}$ 、 $\mathbf{M}_{LCVR1}$  分别为起偏器  $P_1$ 、LCVR2 和 LCVR1 的穆勒矩阵<sup>[14-15]</sup>,  $\mathbf{S}$  为入射光 Stokes 参量,  $\mathbf{S} = [I(\lambda) \ M(\lambda) \ C(\lambda) \ B(\lambda)]^T$ , 由(6)式可得

$$\mathbf{S}(\lambda) = \begin{bmatrix} I'(\lambda) \\ M'(\lambda) \\ C'(\lambda) \\ B'(\lambda) \end{bmatrix} = \eta(\lambda) \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cos \delta_2 & \sin \delta_2 \sin \delta_1 & \sin \delta_2 \cos \delta_1 \\ 1 & \cos \delta_2 & \sin \delta_2 \sin \delta_1 & \sin \delta_2 \cos \delta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I(\lambda) \\ M(\lambda) \\ C(\lambda) \\ B(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $\delta_1$  为 LCVR1 的相位延迟,  $\delta_2$  为 LCVR2 的相位延迟。因为系统出射光 Stokes 参量的第一个参量  $I'$  为 CCD 记录的光强大小, 经过分析可知, 只需 4 幅光强图(4 组相位延迟  $\delta_{ij}$ ) 即可求得入射光全部 Stokes 参量  $\mathbf{S}$ , 由(6)式和(7)式可得

$$\begin{bmatrix} I(\lambda) \\ M(\lambda) \\ C(\lambda) \\ B(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \delta_{12} & \sin \delta_{12} \sin \delta_{11} & \sin \delta_{12} \cos \delta_{11} \\ 1 & \cos \delta_{22} & \sin \delta_{22} \sin \delta_{21} & \sin \delta_{22} \cos \delta_{21} \\ 1 & \cos \delta_{32} & \sin \delta_{32} \sin \delta_{31} & \sin \delta_{32} \cos \delta_{31} \\ 1 & \cos \delta_{42} & \sin \delta_{42} \sin \delta_{41} & \sin \delta_{42} \cos \delta_{41} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{S} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{I}, \quad (8)$$

式中相位延迟  $\delta_{ij}$  ( $i=1, 2, 3, 4, j=1, 2$ ),  $i$  代表组数,  $j$  代表 LCVR 序号,  $I_1 \sim I_4$  分别为所采集的 4 幅图的光强。通过(8)式计算得到入射光全部 Stokes 参量为

$$\begin{cases} I = I_1 - M \cos \delta_{12} - C \sin \delta_{12} \sin \delta_{11} - B \sin \delta_{12} \cos \delta_{11} \\ M = [(I_1 - I_2) - \Gamma_2 C - \Gamma_3 B] / \Gamma_1 \\ C = \{(\Gamma_6 \Gamma_7 - \Gamma_4 \Gamma_9) I_1 - [\Gamma_7(\Gamma_6 + \Gamma_3) - \Gamma_9(\Gamma_1 + \Gamma_4)] I_2 + [\Gamma_3(\Gamma_4 + \Gamma_7) - \Gamma_1(\Gamma_9 + \Gamma_6)] I_3 - \\ (\Gamma_3 \Gamma_4 - \Gamma_1 \Gamma_6) I_4\} / [\Gamma_2(\Gamma_6 \Gamma_7 - \Gamma_4 \Gamma_9) + \Gamma_5(\Gamma_1 \Gamma_9 - \Gamma_3 \Gamma_7) + \Gamma_8(\Gamma_3 \Gamma_4 - \Gamma_1 \Gamma_6)] \\ B = \{(\Gamma_5 \Gamma_7 - \Gamma_4 \Gamma_8) I_1 - [\Gamma_7(\Gamma_2 + \Gamma_5) - \Gamma_8(\Gamma_1 + \Gamma_4)] I_2 + [\Gamma_2(\Gamma_7 + \Gamma_4) - \Gamma_1(\Gamma_8 + \Gamma_5)] I_3 - \\ (\Gamma_2 \Gamma_4 - \Gamma_1 \Gamma_5) I_4\} / [\Gamma_3(\Gamma_5 \Gamma_7 - \Gamma_4 \Gamma_8) + \Gamma_6(\Gamma_1 \Gamma_8 - \Gamma_2 \Gamma_7) + \Gamma_9(\Gamma_2 \Gamma_4 - \Gamma_1 \Gamma_5)] \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \cos \delta_{12} - \cos \delta_{22}, \Gamma_2 = \sin \delta_{11} \sin \delta_{12} - \sin \delta_{21} \sin \delta_{22}, \Gamma_3 = \cos \delta_{11} \sin \delta_{12} - \cos \delta_{21} \sin \delta_{22}, \\ \Gamma_4 &= \cos \delta_{22} - \cos \delta_{32}, \Gamma_5 = \sin \delta_{21} \sin \delta_{22} - \sin \delta_{31} \sin \delta_{32}, \Gamma_6 = \cos \delta_{21} \sin \delta_{22} - \cos \delta_{31} \sin \delta_{32}, \\ \Gamma_7 &= \cos \delta_{32} - \cos \delta_{42}, \Gamma_8 = \sin \delta_{31} \sin \delta_{32} - \sin \delta_{41} \sin \delta_{42}, \Gamma_9 = \cos \delta_{31} \sin \delta_{32} - \cos \delta_{41} \sin \delta_{42}. \end{aligned} \quad (10)$$

由(8)式和(9)式可知, 要想求得入射光的全部 Stokes 参量, 只需 4 组相位延迟(即 8 个相位延迟)即可。由于 LCVR 的相位延迟与驱动电压有关, 为了能够快速而精确地获取全部 Stokes 参量, 系统采用一个驱动信号源同时控制 LCVR1 和 LCVR2, 每加载一个驱动电压信号  $U$ , 可同时获得 LCVR1 和 LCVR2 的相位延迟  $\delta_1$  和  $\delta_2$ 。若要获得 8 个相位延迟, 只需加载 4 个不同驱动电压即可; 进行不同波长偏振光谱成像时, 可以保持这 4 个驱动电压不变, 求得不同波长在这 4 个驱动电压下所对应的相位延迟即可获取 Stokes 参量。

## 3 实验分析

### 3.1 验证实验

为了验证该测量方法的准确性和系统的可行性, 按图 2 原理图搭建了实验样机, 实验在室温(25 °C)下进行, 所用偏振片全部为美国 Thorlabs 公司生产的 LPVISE100-A 型复合薄膜偏振片(工作波长范围为 400~700 nm, 400~500 nm 波长范围内消光比大于 100:1, 500~700 nm 波长范围内消光比大于 1000:1), 采用 WPQ05M-632 零级 1/4 波片(相位延迟精度小于  $\lambda/300$ )。LCVR1 和 LCVR2 分别为 LCC1221-A 型半波液晶延迟器和 LCC113-A 全波液晶延迟器(波长选择为 350~700 nm, 输出电压为 0~25 V), AOTF 为中国电子科技集团公司第 26 研究所研制的 LSGDN-3Z 型滤光器(波长范围为 450~900 nm, 视场角为  $\pm 3^\circ$ ), CCD 采用北京大恒公司工业相机(响应波长为 400~1000 nm)。

实验所选测量目标物以毛玻璃为背景, 以偏振方向分别为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$  的三个偏振片为具有线偏振特性



的线偏振物[图 3(a)中  $P_1, P_2, P_3$ ],以光轴方向为  $90^\circ$  的  $1/4$  波片( $\lambda = 632 \text{ nm}$ )为具有圆偏振特性的圆偏振物[图 3(a)中  $W$ ],该波片光轴与  $45^\circ$  方向偏振片的透振方向夹角为  $45^\circ$ ,测量物图如图 3(a)所示。当 AOTF 衍射波长  $\lambda = 632 \text{ nm}$ ,加载在 LCVR1 和 LCVR2 两端的驱动电压依次取 1,2,3,4 V 时,LCVR1 和 LCVR2 在这 4 组电压下对应的相位延迟如表 1 所示,测量物由图 2 所示的系统透射成像后,通过(4)式和(5)式进行计算,偏振光谱探测各参数图如图 3(b)~(i)所示。

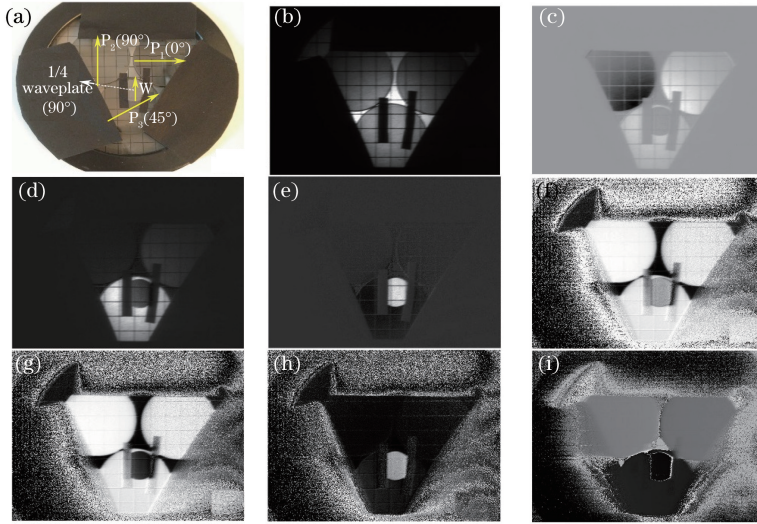


图 3 偏振探测各参数图。(a) 测量目标; (b)  $I$ ; (c)  $M$ ; (d)  $C$ ; (e)  $B$ ; (f)  $D_P$ ; (g)  $D_{LP}$ ; (h)  $D_{CP}$ ; (i)  $A_{LP}$

Fig. 3 Figures of different parameters. (a) Target; (b)  $I$ ; (c)  $M$ ; (d)  $C$ ; (e)  $B$ ; (f)  $D_P$ ; (g)  $D_{LP}$ ; (h)  $D_{CP}$ ; (i)  $A_{LP}$

表 1 不同电压对应的 LCVR1 和 LCVR2 的相位延迟

Table 1 Phase delay of LCVR1 and LCVR2 under different driving voltages

Driving voltage /V	632 nm		550 nm	
	$\delta_1/\text{rad}$	$\delta_2/\text{rad}$	$\delta_1/\text{rad}$	$\delta_2/\text{rad}$
1	3.6547	6.4850	3.9385	8.1020
2	2.6116	2.3360	3.2840	2.9190
3	1.7666	1.3130	2.1953	1.6400
4	1.2215	0.9277	1.4952	1.1590

根据(4)式,Stokes 参量  $I$  为目标物总光强,所以  $P_1, P_2, P_3, W$  处和背景都亮[图 3(a)]。 $M$  为光  $0^\circ$  和  $90^\circ$  线偏振分量的光强差,所以  $P_1$  处最亮。 $C$  为光  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  线偏振分量的光强差,所以  $P_3$  最亮, $B$  为光右旋圆偏振分量和左旋圆偏振分量的光强差,所以  $W$  处最亮。由(5)式可知,在偏振度图中,具有线偏振度的  $P_1, P_2, P_3$  处和具有圆偏振度的  $W$  处都亮,且大大拉伸了目标与背景的对比度,而线偏振度图中,因为  $W$  处具有圆偏振度,所以不亮。圆偏振度图中,由(5)式可知, $W$  处亮, $P_1, P_2, P_3$  处不亮。由于三偏振片  $P_1, P_2, P_3$  处偏振方向各不相同,根据(5)式,在线偏振角图中, $P_1, P_2$  亮度相同,且  $P_1, P_2$  处亮度与  $P_3, W$  处不同。

经过上述分析,该高光谱偏振成像系统原理正确可行,该测量方法快速精确,为下一步进行的实物目标检测奠定了基础。

### 3.2 系统可靠性验证实验

为了进一步测试该测量方法应用于实际物体的可行性,通过实验获取图 4(a)所示假红叶(左上一)、真绿叶(右上一)、假绿叶(下面两个)的 81 通道高光谱偏振图像,光谱范围为  $400 \sim 800 \text{ nm}$ ,AOTF 扫描间隔为  $5 \text{ nm}$ ,图像背景、假红叶、真绿叶、假绿叶的光谱图如图 4(b)所示。根据光谱图,对真假树叶进行波长  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ,LCVR 驱动电压依然依次取 1,2,3,4 V(LCVR1 和 LCVR2 对应的相位延迟如表 1 所示)的偏振光谱成像, $D_{LP}$ 图和  $A_{LP}$ 图分别如图 4(c)、(d)所示。

从图 4(b)目标光谱分析可知,大气中的一些气体及尘埃在波长  $600, 685, 760 \text{ nm}$  处对太阳光有明显的吸收,且真树叶在波长大于  $700 \text{ nm}$  后反射强度增强,这与植被的分析谱段范围相吻合,进一步说明了系统进行光

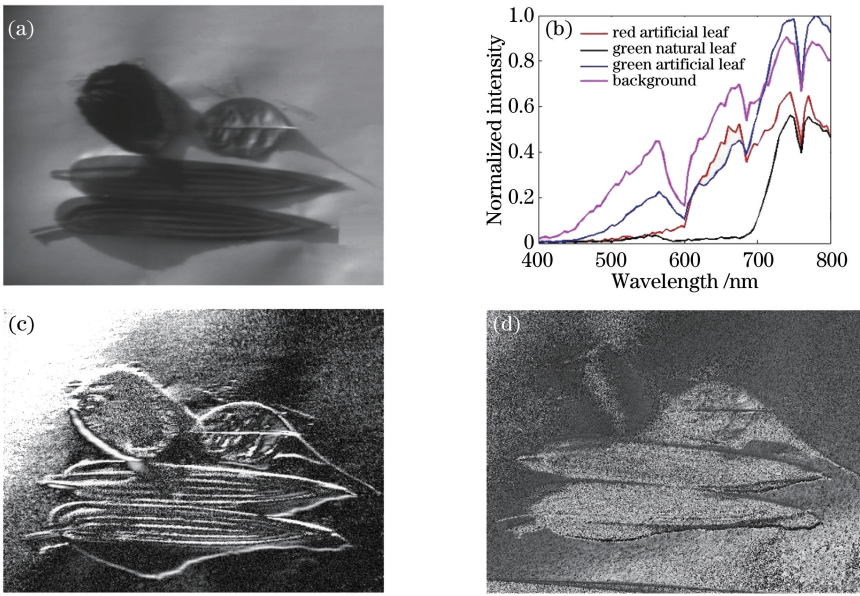


图 4 目标树叶光谱图和偏振图。(a) 强度；(b) 光谱；(c)  $D_{LP}$ ；(d)  $A_{LP}$

Fig. 4 Spectra and polarimetric images of leaf targets: (a) Light intensity; (b) spectra; (c)  $D_{LP}$ ; (d)  $A_{LP}$

谱成像的准确性和可靠性。

偏振成像探测可以有效识别具有不同偏振特性的客观物体,由于人造物体的偏振特性比自然物体更强,所以假绿叶的表面纹理和边缘特征比真绿叶更为明显[图 4(c)],与图 4(a)相比表面纹理特征更为凸显,可以很直观地区分自然物体和人造物体。因为假红叶表面比较粗糙且在波长 550 nm 处的反射较少,所以其表面纹理特性不明显。在线偏振角图[图 4(d)]中,可以很容易地看出真假树叶的边缘信息。

#### 4 系统偏振测量精度分析

为了进一步优化系统,对系统偏振测量精度的分析不可忽略。由(7)~(9)式可以看出,影响 Stokes 参量测量精度的主要因素是 LCVR 快轴与  $x$  轴的夹角  $\theta$  及 LCVR 的两个相位延迟  $\delta_1$  和  $\delta_2$ 。在图 2 所示系统中,决定偏振测量精度的主要因素是 LCVR2 快轴与  $x$  轴的夹角,所以搭建系统时,尽量将该夹角控制在  $\pm 1^\circ$  偏差范围内。LCVR 的调制电压精度和光波的入射角都会对  $\delta_1$  和  $\delta_2$  的测量产生影响。在该系统中,LCVR 视场角为  $\pm 3^\circ$ ,LCVR 的调制电压精确度为 0.01 V,通过对 LCVR 的定标分析和计算可知,由 LCVR 切换电压引起的相位延迟测量偏差  $\Delta\delta(U)$  约为  $\pm 0.012$  rad,入射角度引起的相位延迟测量偏差  $\Delta\delta(\beta)$  约为  $\pm 0.05$  rad。为了简化计算表达式,系统测量 Stokes 参量的相对误差公式为

$$|\Delta S|/S = |f(\theta + \Delta\theta, \delta + \Delta\delta) - f(\theta, \delta)|/f(\theta + \Delta\theta, \delta + \Delta\delta), \quad (11)$$

式中 LCVR2 快轴与  $x$  轴夹角  $\theta = -45^\circ$ , 夹角偏差  $\Delta\theta = \pm 1^\circ$ ,  $\delta$  为 LCVR 测量得到的相位延迟,  $\Delta\delta$  为 LCVR 测量引起的相位延迟偏差。综合考虑这两个因素,经 Matlab 计算得到这两个偏差对 4 个 Stokes 参量所造成的相对误差如图 5 所示。

从图 5 可以看出,利用该系统和测量方法对目标光进行偏振测量时,LCVR2 快轴与  $x$  轴夹角的偏差和 LCVR 相位延迟的测量偏差都会对 4 个 Stokes 参量产生影响,其中参量  $I$  的最大相对误差小于 4.2%,  $M$  的最大相对误差小于 4.6%,  $C$  的最大相对误差小于 3.2%,  $B$  的最大相对误差小于 5.0%。探测器的噪声、光波不稳定性等因素也会对系统 Stokes 参量的测量产生影响,为了减小噪声和光波波动引起的测量误差,可以多次测量取平均值。

综合考虑系统误差和随机误差对测量结果带来的影响,提高 LCVR 电压调制精度和 LCVR 相位延迟的测量精度,优化 LCVR 快轴与  $x$  轴的夹角,可以进一步提高该方法测量 Stokes 参量的精度。

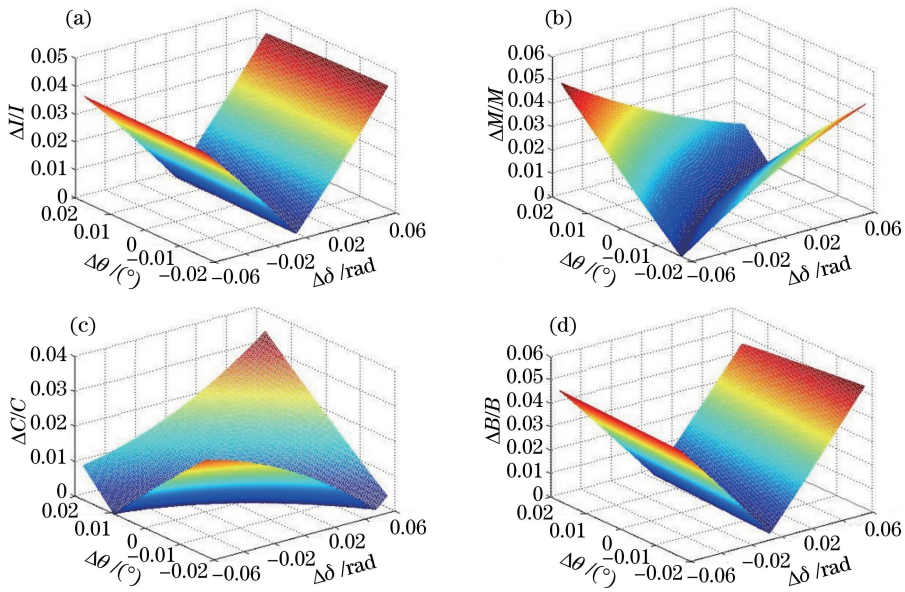


图 5 各 Stokes 参量相对误差。(a)  $\Delta I/I$ ; (b)  $\Delta M/M$ ; (c)  $\Delta C/C$ ; (d)  $\Delta B/B$

Fig. 5 Relative error of each Stokes parameter. (a)  $\Delta I/I$ ; (b)  $\Delta M/M$ ; (c)  $\Delta C/C$ ; (d)  $\Delta B/B$

## 5 结 论

鉴于现有 AOTF 和 LCVR 相结合的光谱偏振成像系统在获取目标光 Stokes 参量时比较繁琐耗时,提出了采用一个 AOTF 和两个 LCVR 共同作用的新型高光谱偏振成像系统。该系统只对 AOTF+1 级衍射光成像,用一个驱动电源同时控制两个 LCVR,并且在进行高光谱偏振成像时,驱动电压不变,是一种改变相位的 Stokes 参量测量方法。用偏振片和波片进行了实验验证,结果表明该测量方法能够快捷准确地获取全部 Stokes 参量,系统成像质量良好。最后对真假树叶进行了偏振图像识别,进一步验证了该系统的可靠性和该测量方法的准确性。

## 参 考 文 献

- Kim J, Escuti M J. Snapshot imaging spectropolarimeter utilizing polarization gratings[C]. SPIE, 2008, 7086: 708603.
- Zhao Yongqiang, Pan Quan, Cheng Yongmei. Imaging spectro-polarimetric remote sensing and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 15-18.  
赵永强, 潘 泉, 程永梅. 2011 成像偏振光谱遥感及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 15-18.
- 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.
- Kurosaki H. Earth observation by the adaptive wavelength optical image sensor[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(1): 185-189.
- 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): 66-69.  
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): 66-69.
- Hu Qiaoyun, Yang Weifeng, Hu Yadong, *et al.* Principle and simulation of a spatially modulated full Stokes parameters polarization imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211004.  
胡巧云, 杨伟锋, 胡亚东, 等. 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理及仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211004.
- Gupta N, Suhre D R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability[J]. Applied Optics, 2007, 46(14): 2632-2637.
- Gupta N. Development of spectropolarimetric imagers from 400 to 1700 nm[C]. SPIE, 2014, 9099: 90990N.

- 9 Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *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.  
李克武, 王志斌, 张 瑞, 等. 基于声光滤光和液晶相位调谐的高光谱全偏振成像新技术[J]. *物理学报*, 2015, 64(14): 140702.
- 10 Wang Yaoli, Zhang Rui, Wang Zhibin, *et al.* A new strategy of spectrum and polarization measuring based on LCVR and AOTF[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8): 2362-2367.  
王耀利, 张 瑞, 王志斌, 等. LCVR 和 AOTF 的光谱偏振测量新策略[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(8): 2362-2367.
- 11 Zhao Zhao, An Zhiyong, Gao Duorui, *et al.* De-dispersion design of acousto-optic tunable filter based on TeO<sub>2</sub>[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 062301.  
赵 昭, 安志勇, 高铎瑞, 等. 基于 TeO<sub>2</sub> 晶体的声光可调滤波器消色散设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 062301.
- 12 Yu Kuanxin, Ding Xiaohong, Pang Zhaoguang. Acousto optic principle and acousto optic device[M]. Beijing: Science Press, 2011: 257.  
俞宽新, 丁晓红, 庞兆广. 声光原理与声光器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 257.
- 13 Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.* Study of birefringence dispersion based on liquid crystal variable retarder[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0108001.  
李克武, 王志斌, 张 瑞, 等. 液晶可变延迟器的双折射色散研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0108001.
- 14 Liao Yanbiao. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 57.  
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 57.
- 15 Zhang Ying, Zhao Haibo, Cheng Xuan, *et al.* Design of full polarized and multi-spectral imaging system based on LCVR [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1375-1378.  
张 颖, 赵海博, 程 宣, 等. 基于 LCVR 调谐的全偏振多谱段成像系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1375-1378.