

# 基于 3PEMs 和 AOTF 的光谱偏振成像系统及 光谱修正

张 瑞<sup>1,2,3</sup> 陈友华<sup>1,2,3</sup> 李克武<sup>1,2,3</sup> 王志斌<sup>1,2,3</sup> 李世伟<sup>1,2,3</sup> 王耀利<sup>1,2,3</sup> 张敏娟<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</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

<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>中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 基于弹光调制器和声光可调谐滤波器(AOTF)的新型光谱偏振成像系统部件多, AOTF入射角小,同一幅图中光谱分布不均。为此提出了一种前置光学系统由凸透镜、凹透镜和凸透镜构成的光学系统,压缩被测目标视场角,使其满足AOTF视场角要求,并将目标平行入射光变为平行光入射进AOTF,以便光谱修正。不同位置的目标以不同入射角依次进入光学系统和AOTF,在CCD上的成像位置也不同。AOTF的衍射光中心波长与入射角有关,可通过拟合测得衍射波长与入射角的关系,进而得到CCD像元与中心波长的关系,并对光谱修正方法进行了详细分析。实验结果表明,修正后的光谱测量误差比普通的AOTF光谱成像平均降低一个数量级,且成像清晰,提高了光谱偏振成像系统的光谱测量精度。

**关键词** 成像系统; 光谱修正; 光谱偏振成像; 声光可调谐滤波器; 弹光调制

**中图分类号** O433 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1011001

## Optical System Design and Spectral Correction Based on 3PEMs and AOTF Spectropolarimetric Imaging

Zhang Rui<sup>1,2,3</sup> Chen Youhua<sup>1,2,3</sup> Li Kewu<sup>1,2,3</sup> Wang Zhibin<sup>1,2,3</sup> Li Shiwei<sup>1,2,3</sup>  
Wang Yaoli<sup>1,2,3</sup> Zhang Minjuan<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Shanxi Provincial Engineering and Technology Research Center for Optical-Electric Information and Instrument,  
North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

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

<sup>3</sup>Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** The spectropolarimetric imaging system based on three photoelastic modulators and one acousto-optic tunable filter (AOTF), has many components, limited field angle of AOTF and uneven spectral distribution in one image. To overcome the disadvantages, an optical imaging system is reported, in which the front optical system is composed of convex lens, concave lens and convex lens. The field angle of measured target is compressed so as to satisfy the requirement of the AOTF field angle. The parallel incident light of the target is changed to parallel light incident into AOTF for subsequent spectral correction. Target light at different positions enters the optical system and AOTF with different incidence angles, and the imaging positions on CCD are also different. Since the central wavelength of the AOTF diffracted light is related to the incidence angle, the relationship between them can be determined by fitting, which further identifies the relationship between the central wavelength and the CCD pixel. The spectral correction method is analyzed in detail. The experimental results show that the error of corrected

**收稿日期:** 2016-03-22; **收到修改稿日期:** 2016-05-19

**基金项目:** 国际科技合作项目(2013DFR10150)、国家自然科学基金仪器专项(61127015)、国家自然科学基金青年基金(61505180)

**作者简介:** 张 瑞(1987—),男,博士研究生,主要从事光谱成像等方面的研究。E-mail: ruizhanghy@163.com

**导师简介:** 王志斌(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事光谱成像技术及遥感遥测等方面的研究。

E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn(通信联系人)

spectral value is reduced by an order of magnitude compared with that of the common AOTF spectral imaging system. The spectral imaging results are clear and the accuracy of the spectropolarimetric imaging measurement system is improved.

**Key words** imaging systems; spectral correction; spectropolarimetric imaging; acousto-optic tunable filter; photoelastic modulation

**OCIS codes** 110.2960; 230.1040; 230.4110; 300.6190; 100.4145

## 1 引 言

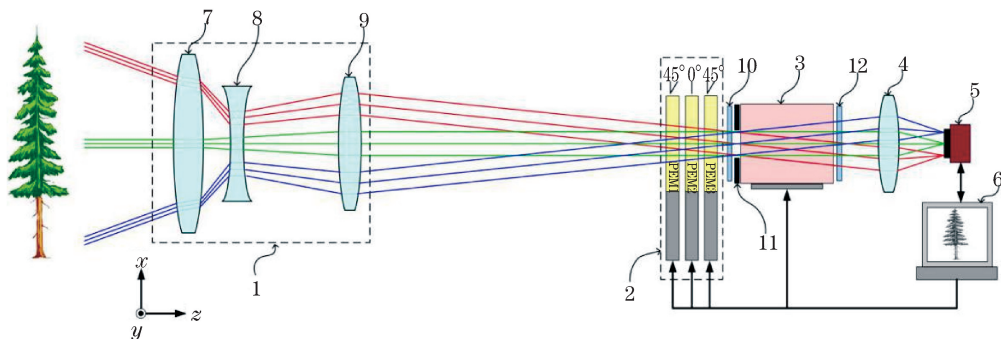
光谱偏振成像测量技术可同时获得光谱、偏振和空间信息。偏振探测能提供强度信息以及光谱探测无法提供的信息,可提高目标对比度,并提供各种形状、方向信息,降低散射,并利用目标与背景偏振信息的不同在复杂背景下提高识别准确度,在环境检测、生物医学、农业和天文等领域具有重要的应用前景<sup>[1-4]</sup>。斯托克斯参量既可以表示完全偏振光,也可表示部分偏振光和非偏振光,因此用斯托克斯参量  $\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T$  表示偏振特性。

基于弹光调制器(PEM)的偏振测量技术光谱范围宽(紫外到红外),视场角大,入射孔径大,稳定性好,在偏振测量中具有较大应用潜力<sup>[4-9]</sup>。PEM 测量偏振主要有两种方式:1)一次测量锁相 4 个不同频率分量获得斯托克斯矢量,但锁相频率是驱动频率的整数倍(大于 50 kHz),无法用阵列探测器有效采集<sup>[10]</sup>;2)通过双光弹差频调制测量,虽然差频频率低,但一次只能得到斯托克斯参量中的两个量,需要通过转动测得剩余量<sup>[1]</sup>。声光可调谐滤波器(AOTF)体积小,波长稳定性好,扫描范围宽,衍射效率高,无运动部件,广泛应用于光谱成像<sup>[11-14]</sup>。结合 PEM 和 AOTF 的优点及 PEM 偏振测量存在的问题,张瑞等<sup>[4]</sup>提出了基于 PEM 和 AOTF 的光谱偏振成像测量方法。但传统 AOTF 的光谱成像主要采用二次成像光学系统,像面每一点的光线以会聚光锥入射,光的不同入射角对应不同的衍射中心波长、衍射效率及衍射角度,因此系统的光谱分辨率受到限制。测偏振需在 AOTF 前放置 3 个 PEM,而 PEM 对光束的入射角和入射位置有一定要求,为此本文针对基于 3PEMs 和 AOTF 的光谱偏振成像测量的要求,提出了一种光学成像系统,可提高传统 AOTF 光谱的测量精度和成像质量,进而提高光谱偏振成像的测量精度。

## 2 基于 3PEMs 和 AOTF 的光谱偏振成像测量基本原理

### 2.1 基本理论

采用 3PEMs 和 AOTF 的光谱偏振成像测量基本原理如图 1 所示。系统由前置光学、3PEMs 偏振测量、AOTF、成像系统和计算机控制处理 5 个模块组成。以  $x$  轴方向为参考  $0^\circ$  方向。



1: fore-optical system; 2: 3PEMs polarization detection; 3: AOTF; 4: imaging lens; 5: CCD; 6: computer;  
7: convex lens; 8: concave lens; 9: convex lens; 10: polarizer; 11: aperture; 12: polarizer

图 1 基于 3PEMs 和 AOTF 的光谱偏振成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of spectropolarimetric imaging system based on 3PEMs and AOTF

前置光学系统对沿  $z$  方向进入的被测目标光进行角度压缩。3PEMs 偏振测量模块由 PEM1、PEM2 和 PEM3 组成,3 个 PEM 的快轴与  $x$  轴的夹角分别为  $45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ ,使得被测光偏振信息加载到 3PEMs 的差频调制信号上。AOTF 滤光模块由两个偏振片和 AOTF 组成,两个偏振片用于消除 AOTF 的 0 级和 -1 级衍

射对后面成像系统的影响。成像系统主要由成像透镜和 CCD 相机组成, CCD 位于成像透镜的焦平面处,对 3PEMs 调制和 AOTF 滤光后的信号进行探测。计算机控制处理模块的作用为:1) 控制 3 个 PEM 的驱动频率和驱动电压,使 3 个 PEM 的频率和相位延迟幅值满足偏振测量的要求;2) 根据波长要求控制 AOTF 换能器的频率;3) 处理 CCD 获得的光电信号,根据 3PEMs 的差频和相位延迟求出被测目标光的偏振信息,根据 AOTF 的频率和波长对应关系实现光谱成像,进而实现光谱偏振成像。

## 2.2 3PEMs 偏振测量基本原理

PEM 是一种弹光效应的调制器件,当光通过 PEM 时,相位延迟为

$$\delta = \delta_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

式中  $\delta_0$  为相位延迟幅值,与 PEM 的驱动电压峰值成正比。

3PEMs 差频调制偏振测量的详细理论推导参见文献[4]。如图 1 所示,被测光依次通过 3 个 PEM 和第 1 个偏振片后的斯托克斯参量为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_0 \mathbf{M}_3 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \mathbf{S}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T$  为被测光的斯托克斯参量, $\mathbf{S}' = (I', Q', U', V')^T$  为经 3PEMs 调制后的斯托克斯参量, $\mathbf{M}_0$ 、 $\mathbf{M}_1$ 、 $\mathbf{M}_2$  和  $\mathbf{M}_3$  分别为第 1 个偏振片、PEM1、PEM2 和 PEM3 所对应的穆勒矩阵<sup>[15]</sup>,表示为

$$\mathbf{M}_0 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & -b_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & a_1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & b_2 \\ 0 & 0 & -b_2 & a_2 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 & -b_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & b_3 & 0 & a_3 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中  $a_i = \cos \delta_i$ ,  $b_i = \sin \delta_i$ ,  $\delta_i = \delta_{i0} \sin \omega_i t$ ,  $\omega_i$  为频率, $i = 1, 2, 3$ ,3 个 PEM 的驱动频率不同但非常接近。

PEM 驱动频率为几万赫兹量级,高频调制信号频率高于驱动频率,CCD 难以探测,而 3PEMs 差频调制偏振测量并不需要高频部分。探测器能接收到的总光强为  $I'$ ,将(3)式代入(2)式,正余弦按贝塞尔函数展开, $I'$ 省去高频可得

$$I' \approx \frac{1}{2} I + Q \sum_n P J_n(\delta_{10}) J_n(\delta_{30}) \cos[n(\omega_1 - \omega_3)t] + U \sum_m J_m(\delta_{10}) J_m(\delta_{20}) \cos[m(\omega_1 - \omega_2)t], \quad (4)$$

式中  $m$  为奇数, $n$  为偶数, $J_x(y)$  对应  $y$  下的第  $x$  阶贝塞尔函数,当  $n = 0$  或  $n_1 = n_2 = 0$  时  $P = 1/2$ ,其他情况下  $P = 1$ 。

由(4)式可知,在低频分量中只要测得直流分量以及低频频率为  $2(\omega_1 - \omega_3)$  和  $\omega_1 - \omega_2$  的分量即可获得  $I$ 、 $Q$  和  $U$ 。对于  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  的求解,更高的频率不会提供更多信息,而且检测高频信号对硬件要求高,所需数据量大,后期处理复杂,因此由(4)式可求得

$$I = 2I'_{dc} - \frac{J_0(\delta_{10})J_0(\delta_{30})I_1}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})}, \quad (5)$$

$$Q = \frac{I_1}{J_2(\delta_{10})J_2(\delta_{30})}, \quad (6)$$

$$U = \frac{I_2}{J_1(\delta_{10})J_1(\delta_{20})}, \quad (7)$$

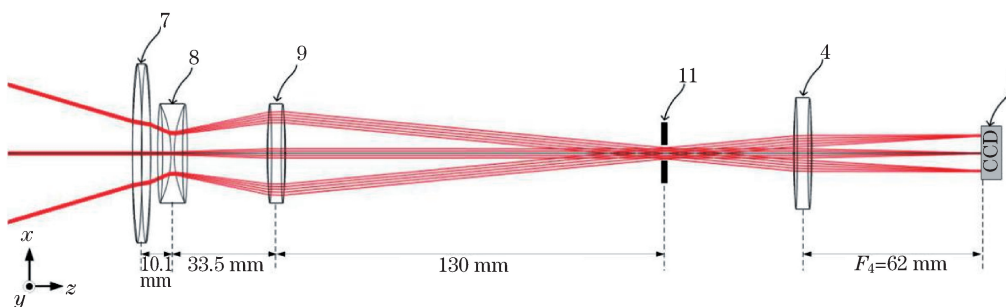
式中  $I_1$  和  $I_2$  分别为探测信号频率为  $2(\omega_1 - \omega_3)$  和  $(\omega_1 - \omega_2)$  的分量的幅值。由上述推导可知,在一次测量中,只需得到探测光电流的低频分量  $(0, 2\omega_1 - 2\omega_3, \omega_1 - \omega_2)$ ,即可实现对被测光  $I$ 、 $Q$  和  $U$  的测量。

## 3 光学系统设计及分析

### 3.1 光学系统设计

为满足 AOTF 入射角的要求,前置光学系统需要压缩被测目标视场角。为便于后续光谱修正(见 3.2 节),前置光学系统需将平行入射光变为平行光,且入射进入 AOTF。如图 2 所示,CCD 放置在后成像透镜的焦平面处,空间不同位置的目标要以不同的入射角进入光学系统,且进入 AOTF 的入射角不同,在 CCD

上的成像位置也不同。为使 CCD 各个像元的成像强度均匀,在前置光学系统会聚处放置光阑。虽然该方法对目标光进行了扩束,但实现了光谱的修正,提高了系统的测量精度。



4: imaging lens; 5: CCD; 7: convex lens; 8: concave lens; 9: convex lens; 11: aperture

图 2 光学系统光路图

Fig. 2 Optical path of the system

系统中 AOTF 视场角为  $\pm 3^\circ$ , AOTF 通光孔径为 11 mm, CCD 分辨率为  $656 \text{ pixel} \times 492 \text{ pixel}$ , 像元尺寸为  $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ , 3PEMs 偏振测量模块总长度为 35 mm。考虑到各个透镜对成像质量的影响及加工成本, 选用照相机镜头作为透镜, 采用 COMSOL 5.0 软件仿真光路。前置光学系统透镜 7、8、9 的焦距分别为  $F_1 = 80 \text{ mm}$ ,  $F_2 = -12 \text{ mm}$ ,  $F_3 = 45 \text{ mm}$ , 透镜 9 可前后移动用于调焦。需同时满足 CCD 的尺寸及 AOTF 视场角为  $\pm 3^\circ$ 。成像透镜 4 的焦距需满足

$$\tan 3^\circ = \frac{(656 \times 9.9) / 2}{F_4}, \quad (8)$$

因此成像透镜焦距  $F_4 = 62 \text{ mm}$ 。光学系统视场角为  $\pm 15^\circ$ , 畸变小于 3%, 入瞳口径为 2.1 mm, 成像品质为 50 lp/mm (大于 0.4 lp/mm)。

设计加工的 PEM 中, 弹光晶体采用正八角熔融石英晶体, PEM 尺寸为  $54.1 \text{ mm} \times 54.1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 谐振频率约为 50 kHz, 采用的有效通光孔径为 10.94 mm (PEM 调制效率大于 95%)<sup>[4]</sup>。图 3(a) 所示为 PEM 调制效率曲线, 图 3(b) 所示为 COMSOL 5.0 仿真 PEM 调制效率分布图。AOTF 视场角为  $\pm 3^\circ$ , 光阑距离 3PEMs 偏振测量模块中第 1 个 PEM 的距离为 45 mm, 结合图 3(c) 可得, PEM 调制效率大于 95% 时光阑调节的通光孔径应不大于 6.2 mm。

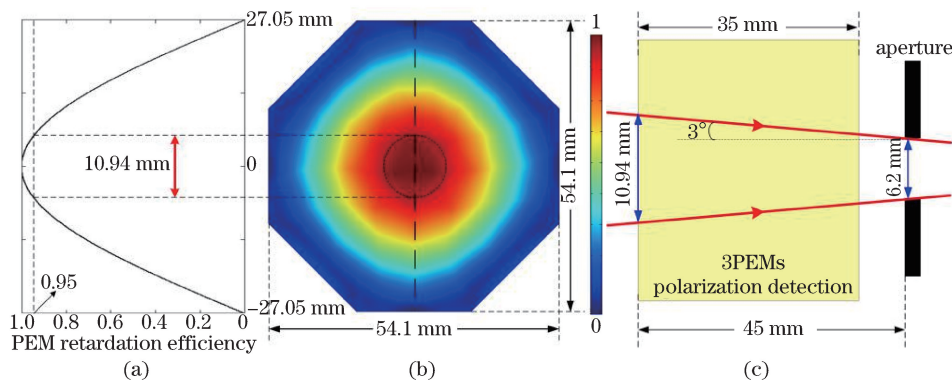


图 3 (a) PEM 调制效率曲线; (b) PEM 调制效率分布; (c) 光阑调节范围示意图

Fig. 3 (a) PEM retardation efficiency curve; (b) PEM retardation efficiency distribution; (c) diagram of aperture adjustment range

为满足可见和红外探测要求, 3 个 PEM 中弹光晶体选用硒化锌晶体。由于硒化锌的折射率较大, 波长  $\lambda = 500 \text{ nm}$  时折射率  $n = 2.73$ ,  $\lambda = 600 \text{ nm}$  时  $n = 2.60$ ,  $\lambda = 1000 \text{ nm}$  时  $n = 2.48$ , 3 个 PEM 的总厚度为 30 mm, 色散比较严重, 因此不可忽视 3PEMs 色差所引起的成像模糊。由于设计补偿该色差镜头成本较高, 因而采用步进电机调焦的方式补偿 3PEMs 色差对成像的影响, 通过实验获得不同波长对应调焦的位置, 根据探测波长通过步进电机调焦使成像清晰。



### 3.2 提高光谱测量精度的方法

目前 AOTF 光谱成像均考虑理想状态(光垂直入射 AOTF),且 CCD 上不同像元探测光的中心波长相同。实际 AOTF 衍射光中心波长除了与超声波的驱动频率有关外,还与进入 AOTF 的入射角有关。

假设 AOTF 衍射方向为  $x$  方向,由于 AOTF 只有衍射方向的波长与入射角有关,因此 CCD 上不同像元的实际中心波长如图 4 所示。

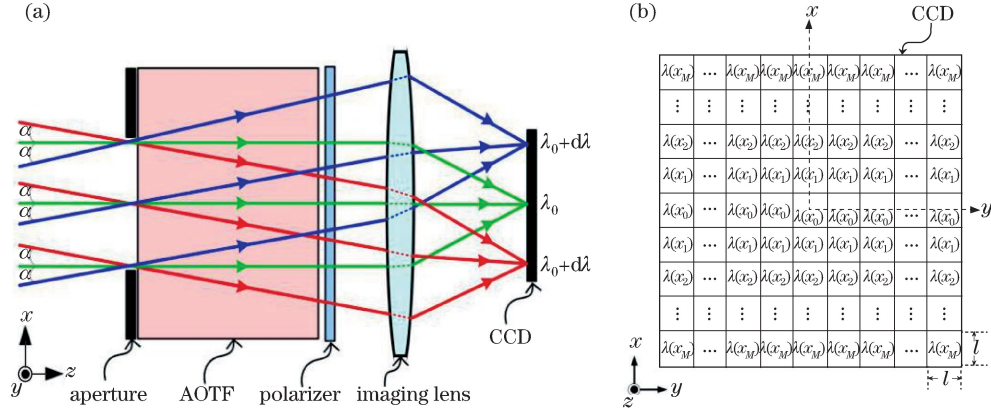


图 4 (a) 不同入射角经 AOTF 后的波长分布图; (b) CCD 光谱分布图

Fig. 4 (a) Central wavelength distribution of AOTF diffracted light for different incidence angles; (b) spectral distribution on CCD

受晶体加工及安装精度的影响,实际生产的 AOTF 与理论存在一定差异。对于实际的 AOTF,每个驱动频率下,进入 AOTF 的衍射中心波长与入射角的关系可由高精度角度测量装置和高分辨率光谱仪测得。但测量每个驱动频率和不同入射角对应的衍射中心波长的的工作量较大,因此采用拟合方式,具体方法如下。

对于实际的 AOTF,在一定光谱和入射角范围内,对于任何驱动频率  $f$  和入射角  $\alpha$ ,衍射波长  $\lambda(f, \alpha)$  都可近似为抛物线函数关系,且关于  $\alpha = 0^\circ$  对称,即

$$\lambda(f, \alpha) = A\alpha^2 + \lambda(f, 0^\circ), \quad (9)$$

式中  $\lambda(f, \alpha)$  为 AOTF 衍射光的中心波长,  $f$  为驱动频率,  $\alpha$  为入射角。  $\lambda(f, 0^\circ)$  是驱动频率为  $f$ 、垂直入射 AOTF 时衍射光的中心波长,  $\lambda(f, 0^\circ)$  也是现有 AOTF 成像光谱普遍采用的波长,忽略了入射角  $\alpha$  的影响。(9) 式中  $\lambda(f, 0^\circ)$  由 AOTF 厂家提供,也可以采用复色光垂直入射 AOTF 再由高分辨率光谱仪测得。  $A$  可采用高分辨率光谱仪和高精度角度测量装置测量数据再经最小二乘法拟合获得,具体步骤如下所述。将 AOTF 放置在高精密角度测量装置上,使 AOTF 在光谱范围内的  $n$  个驱动频率  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  下工作。在每个驱动频率  $f_i$  下,平行复色光通过 AOTF 衍射,并由高分辨率光谱仪测得不同入射角  $\alpha$  下的衍射光波长  $\lambda(f_i, \alpha)$ ,对  $\alpha$  和  $\lambda(f_i, \alpha)$  进行最小二乘拟合,并要求二次曲线必过  $[\alpha = 0, \lambda(f_i, 0^\circ)]$  点,拟合后获得(9) 式中的  $A_i$ 。不同驱动频率下  $A_i$  不同,但可近似表示为

$$A_i = B\lambda(f_i, 0^\circ) + C, \quad (10)$$

式中  $B$  和  $C$  可由前面获得的  $n$  个  $[\lambda(f_1, 0^\circ), A_1], [\lambda(f_2, 0^\circ), A_2], [\lambda(f_3, 0^\circ), A_3], \dots, [\lambda(f_n, 0^\circ), A_n]$  采用最小二乘法拟合获得。结合(9) 式和(10) 式可得

$$\lambda(f, \alpha) = [B\lambda(f, 0^\circ) + C]\alpha^2 + \lambda_0(f). \quad (11)$$

结合图 4, 可得 CCD 的  $x$  方向像元  $x_i$  与入射角  $\alpha$ 、成像透镜焦距  $F_4 = 62 \text{ mm}$  的关系为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{il}{F_4}\right) = \arctan\left(\frac{i \times 9.9 \times 10^{-3}}{62}\right) = \arctan(1.60i \times 10^{-4}), \quad (12)$$

式中  $l = 9.9 \mu\text{m}$  为 CCD 像元的边长。将(12) 式代入(11) 式即可得到任意驱动频率  $f$ 、任意 CCD  $x$  方向像元  $x_i$  对应的 AOTF 衍射中心波长为

$$\lambda(f, x_i) = [B\lambda(f, 0^\circ) + C] \arctan^2(1.60i \times 10^{-4}) + \lambda(f, 0^\circ). \quad (13)$$

## 4 实验及分析

### 4.1 成像实验分析

将 3PEMs 和 AOTF 放置在设计的光学系统中进行成像实验,实验装置如图 5(a)所示,不同波长下的成像结果如图 5(b)所示。AOTF 采用中国电子科技集团公司第 26 研究所 LSGDN-3Z 型 AOTF,波长范围为 450~950 nm,衍射效率大于 60%,分离角大于 5.6°。3 个 PEM 为实验室自行设计加工的双驱动八角型 PEM,通光范围为 0.5~25  $\mu\text{m}$ ,谐振频率约为 50 kHz。弹光晶体为硒化锌,压电晶体为 xyt-18.5°压电石英,差频为  $2f_1 - 2f_3 = 80$  Hz,  $f_1 - f_2 = 60$  Hz,  $f_i = 2\pi/\omega_i$ ,因此完成一个波长下的偏振测量时间为  $1/60 = 0.017$  s,通光 AOTF 扫频实现偏振光谱成像。

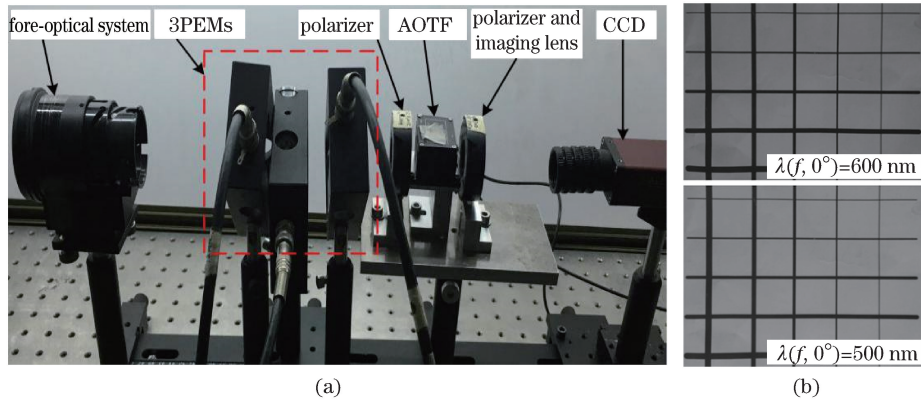


图 5 (a) 成像实验装置;(b) 成像实验结果

Fig. 5 (a) Experimental setup; (b) experimental results

由于偏振光谱成像需对 3 个 PEM 在不同波长下进行高精度定标,因此实验没有进行偏振光谱成像。对 3 个 PEM 进行高精度定标为下一个研究目标,根据不同波长所需 PEM 相位延迟幅值及 2.2 节所述理论方法可最终实现偏振光谱成像测量。

### 4.2 光谱修正实验及分析

采用 3.2 节方法对光谱进行修正。将 AOTF 放置在精飞光学仪器公司 KF-JJY1' 型高精度角度测量分光仪的载物平台上(分光仪角度测量精度为 1'),光源采用 Thorlabs 公司带准直 SL202-M 卤钨光源,在波长 300~2600 nm 内光谱连续。分别使 AOTF 在光谱范围内的 7 个驱动频率  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_7$  下工作,在每个驱动频率  $f_i$  下平行的复色光通过 AOTF 衍射,并由美国 Ocean Optics 公司 HR4000CG-UV-NIR 型光纤光谱仪得到不同入射角  $\alpha$  下的衍射波长  $\lambda(f_i, \alpha)$ ,入射角  $\alpha$  的范围为  $-3^\circ \sim +3^\circ$ ,角  $\alpha$  的间隔为  $10'$ ,即每个驱动频率下测得 37 组  $[\alpha, \lambda(f_i, \alpha)]$ 。实验装置如图 6 所示。

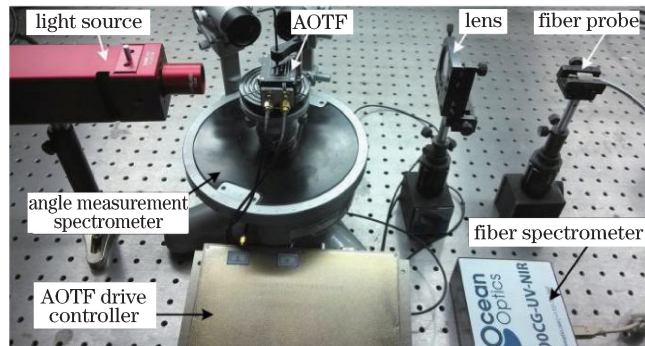


图 6 光谱修正实验装置

Fig. 6 Experimental setup for spectral correction

根据(9)式,对  $\alpha$  和  $\lambda(f_i, \alpha)$  进行 Matlab 最小二乘拟合,得到(9)式中  $A_i$  如表 1 所示。

根据(10)式和表 1,采用最小二乘一次拟合可得

$$A = 0.000800 \lambda(f, 0^\circ) - 0.3040. \quad (14)$$

表 1 不同波长拟合获得的 A 值

Table 1 A values at different wavelengths obtained by fitting

$\lambda(f, 0^\circ) / \text{nm}$	533.37	545.10	557.59	571.10	585.62	600.88	617.41
A	0.1197	0.1319	0.1482	0.1523	0.1634	0.1775	0.1891

将(14)式代入(11)式可得进入 AOTF 的入射角  $\alpha$  与衍射波长  $\lambda(f, \alpha)$  的关系为

$$\lambda(f, \alpha) = [0.000800\lambda(f, 0^\circ) - 0.3040]\alpha^2 + \lambda(f, 0^\circ). \quad (15)$$

通过实验测量和拟合,对不同结果进行对比。驱动频率为 116 MHz 和 140 MHz 时垂直入射值(即目前 AOTF 普遍采用的数值)、实际测量值(光谱仪测得的真实值)和修正值结果如图 7 所示。

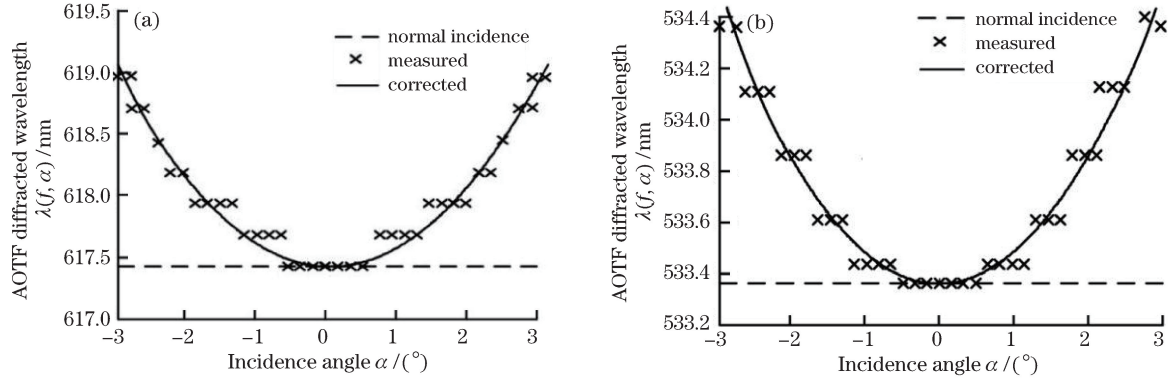


图 7 不同驱动频率下垂直入射、实际和修正后的衍射波长数值。(a) 驱动频率为 116 MHz; (b) 驱动频率为 140 MHz

Fig. 7 Wavelength under vertical incidence, real wavelength and corrected wavelength at different driving frequency.

(a) Driving frequency  $f=116$  MHz; (b) driving frequency  $f=140$  MHz

为分析该拟合修正精度,对多个波长的修正与无修正相对误差进行对比,结果如表 2 所示。表中  $\lambda_i$  为光谱仪和分光仪测得的实际波长,修正后的相对误差比修正前降低一个数量级。

表 2 不同衍射光波长下修正前后的相对误差值

Table 2 Relative error at different diffraction wavelength before and after correction

Diffraction wavelength $\lambda(f, 0^\circ) / \text{nm}$	Error before correction $\sum_{i=1}^{37} \frac{ \lambda_i - \lambda(f, 0^\circ) }{\lambda_i}$	Error after correction $\sum_{i=1}^{37} \frac{ \lambda_i - \lambda(f, \alpha) }{\lambda_i}$
617.41	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-4}$
600.88	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-4}$
585.62	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-4}$
571.10	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-4}$
557.59	$1.0 \times 10^{-3}$	$0.9 \times 10^{-4}$
545.10	$0.9 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-4}$
533.37	$0.8 \times 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-4}$

考虑到 CCD 像元尺寸及成像透镜焦距  $F_4$ , 结合(13)式可得该系统在任意驱动频率  $f$ 、任意 CCD 上  $x$  方向的像元  $x_i$  对应的 AOTF 衍射光波长为

$$\lambda(f, x_i) = [0.000800\lambda(f, 0^\circ) - 0.3040] \arctan^2(1.60i \times 10^{-4}) + \lambda(f, 0^\circ). \quad (16)$$

实验验证了系统在 CCD 成像后光谱修正的正确性。因直接探测系统 CCD 各像元处的真实光波长比较困难,所以采用间接测量方式。选择单色性较好的氦氖激光器( $\lambda=632.8$  nm, 半峰全宽  $\Delta\lambda < 0.1$  nm)作为光源,将激光光束扩束照射在有黑色横线的白纸上,即白纸上只有波长  $\lambda=632.8$  nm 的光,无其他波长的光,如图 8 所示。采用图 5(a)所示实验装置,去掉 AOTF 且使两偏振片偏振方向平行,CCD 成像如图 8(b)所示。为验证 3.2 节理论的正确性,采用图 5(a)所示有 AOTF 时的实验装置对图 8(a)中带黑横线的白纸屏进行实验。不同驱动频率下实验结果与理论值对比如图 9 所示。不同驱动频率下、白纸屏不同位置处到达 CCD 不

同像元的光波长不同。由于照射白纸屏的光源为窄带单色( $\Delta\lambda < 0.1 \text{ nm}$ )氦氖激光光源,因此 AOTF 在不同驱动频率  $f$  下在 CCD 成像  $x$  方向的亮区域不同,且亮区域对应波长为  $632.8 \text{ nm}$ ,分别如图 9(a1)~(d1) 所示。

当超声驱动频率  $f = 113.15 \text{ MHz}$  时(即垂直入射对应波长  $632.8 \text{ nm}$ ),CCD 成像在  $x$  方向的中心位置亮,如图 9(a1)所示,其他位置没有光通过,说明只有中间位置对应 AOTF 的衍射波长修正理论值  $632.8 \text{ nm}$ ,如图 9(a2)所示。当超声驱动频率  $f = 113.19 \text{ MHz}$  时(即垂直入射对应波长  $632.7 \text{ nm}$ ),CCD 成像在  $x$  方向中心位置暗,附近有两个区域亮[图 9(b1)],说明亮的区域所对应 AOTF 的衍射波长为  $632.8 \text{ nm}$ ,对应波

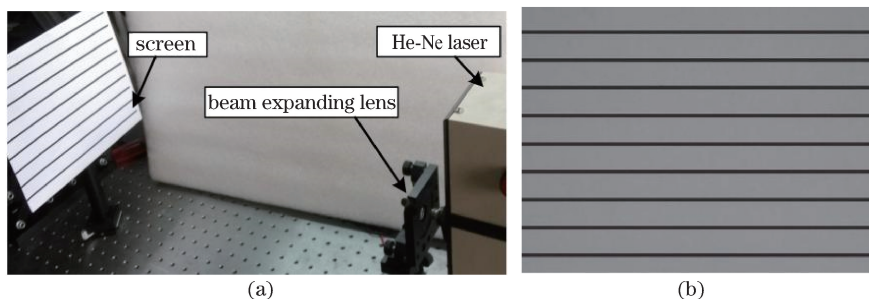


图 8 (a) 氦氖激光光源扩束装置; (b) 无 AOTF 的系统成像图

Fig. 8 (a) He-Ne laser beam expanding equipment; (b) imaging result of system without AOTF

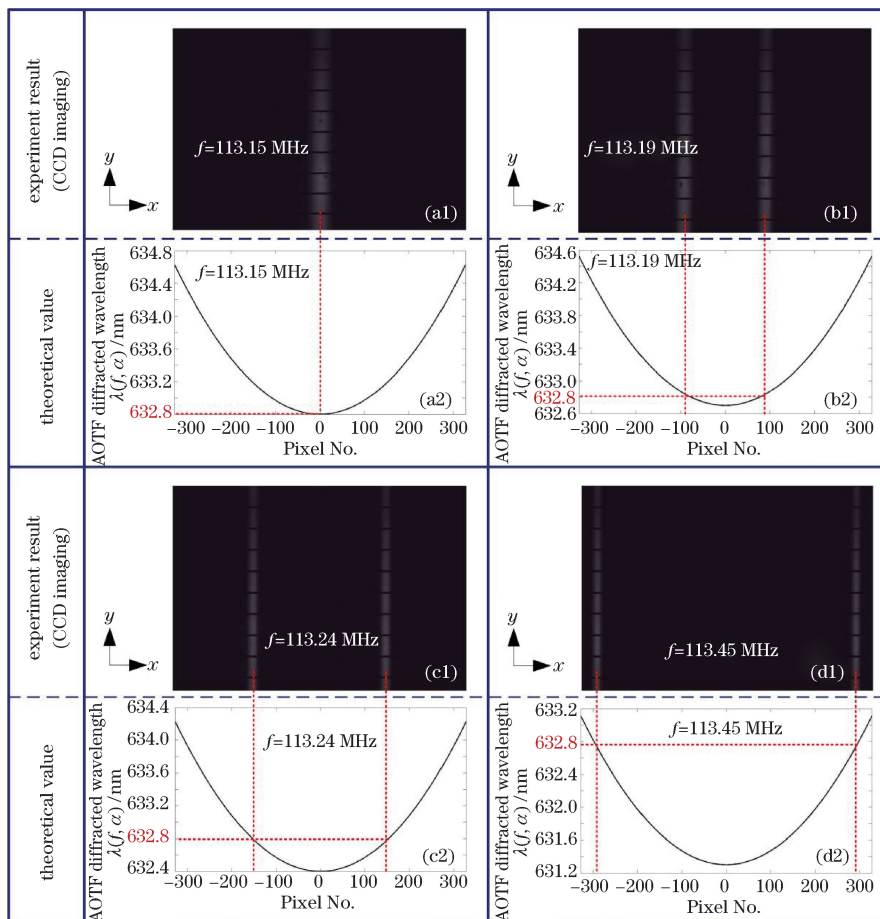


图 9 氦氖激光光源照射时系统 CCD 得到的实验结果与理论结果。(a1)~(d1) 不同 AOTF 超声驱动频率下 CCD 得到的实验结果;(a2)~(d2) 不同 AOTF 超声驱动频率下经(16)式进行光谱修正后的理论值

Fig. 9 Experimental and theoretical results when He-Ne laser is used as the light source.

(a1)-(d1) Imaging results at different AOTF driving frequency;

(a2)-(d2) theoretical wavelength corrected with the formula (16) at different AOTF driving frequency



长修正理论值,如图 9(b2)所示。从图 9 可看出,实验结果与波长修正理论值基本一致,验证了 3.2 节光谱修正理论的正确性和可行性。

## 5 结 论

针对基于 3PEMs 和 AOTF 的新型光谱偏振成像系统中部件较多、AOTF 入射角较小、光谱成像中光谱分布不均等问题,提出一种新的光学系统。该系统中前置光学系统采用凸透镜、凹透镜和凸透镜的结构,压缩被测目标视场角,使其满足 AOTF 入射要求;使经过前置光学系统的平行入射光仍然是平行光;CCD 放置在后置成像透镜的焦平面处。AOTF 衍射光中心波长与入射角近似为抛物线函数关系,可通过最小二乘拟合测得衍射波长与入射角的关系,进而得到 CCD 像元与中心波长的对应关系。实验结果表明,修正后的光谱测量误差较普通 AOTF 光谱成像测量误差平均降低一个数量级,且成像清晰。该光学系统结合光谱修正方法可提高光谱偏振成像的光谱测量精度,为偏振光谱成像系统在环境监测、生物医学和目标识别等领域的高精度测量提供了新的途径。

## 参 考 文 献

- Dine D J, Davis A, Hancock B, *et al.* Dual-photoelastic-modulator-based polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(35): 8428-8445.
- Yang Zhiwen, Gao Shenggang, Wang Peigang. Polarization of reflected light by earth objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 241-245.  
杨之文, 高胜钢, 王培纲. 几种地物反射光的偏振特性[J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 241-245.
- Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.* System design and implementation of multi-angle polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003.  
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828003.
- Zhang R, Wen T D, Wang Z B, *et al.* Spectropolarimetric detection using photoelastic modulators and acousto-optic tunable filter[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8686-8693.
- Chen Youhua, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, *et al.* The research of polarized information detection for photo-elastic modulator-based imaging spectropolarimeter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 060702.  
陈友华, 王召巴, 王志斌, 等. 弹光调制型成像光谱偏振仪中的高精度偏振信息探测研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(6): 060702.
- Zhang Minjuan, Wang Yanchao, Wang Zhaoba, *et al.* Quality factor analysis of photoelastic modulation with different resonant state[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0415002.  
张敏娟, 王艳超, 王召巴, 等. 不同谐振状态下弹光调制器的品质因数分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0415002.
- Zhang Minjuan, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, *et al.* Fast spectral rebuild garithmetic of PEM-FTS nonlinear phase interferogram data[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0515001.  
张敏娟, 王召巴, 王志斌, 等. PEM-FTS 非线性干涉信号的快速光谱反演算法[J]. *中国激光*. 2013, 40(5): 0515001.
- Wang Zhibin, Zhang Rui, Wang Yaoli, *et al.* The study of large OPD's PEM based on micro trapezoidal photo-elastic crystals[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 34(7): 569-573.  
王志斌, 张 瑞, 王耀利, 等. 基于微梯形弹光晶体的大光程差 PEM 研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 34(7): 569-573.
- Wang Zhibin, Zhang Rui, Wang Yaoli, *et al.* Research of dual-photoelastic-modulator-based beat frequency modulation and Fourier-Bessel transform imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(2): 569-573.  
王志斌, 张 瑞, 王耀利, 等. 双弹光拍频调制型 Fourier-Bessel 变换成像光谱技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(2): 569-573.
- Guan W, Cook P J, Jones G A, *et al.* Experimental determination of the Stokes parameters using a dual photoelastic modulator system[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(14): 2644-2652.
- Jiang Qinghui, Qiu Yuehong, Wen Yan. Design of data acquisition system for AOTF polarization spectral imaging instrument[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 218-222.  
姜庆辉, 邱跃洪, 文 延. AOTF 偏振光谱成像数据采集系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 218-222.
- Grulkowski I, Szulzycki K, Wojtkowski M. Microscopic OCT imaging with focus extension by ultrahigh-speed acousto-optic tunable lens and stroboscopic illumination[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31746-31760.

- 13 Agrawal P, Nandi A, Sudhakar M, *et al.* Characterization of an acousto-optic tunable filter for development of a near-IR spectrometer for planetary science[J]. *Experimental Astronomy*, 2015, 39(4): 445-460.
- 14 Gupta N, Voloshinov V B. Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(7): 1081-1088.
- 15 Zhu Qingchun, Chen Shisheng. Matrix optics introduction[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1991.  
竺庆春, 陈时胜. 矩阵光学导论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1991.