

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

李克武 王志斌 杨常青 张瑞 王耀利 宋雁鹏

A new technique of full polarization hyperspectral imaging based on acousto-optic tunable filter and liquid crystal variable retarder

Li Ke-Wu Wang Zhi-Bin Yang Chang-Qing Zhang Rui Wang Yao-Li Song Yan-Peng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 140702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.140702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

编码孔径成像光谱仪光学系统设计

[Optical system design of the coded aperture imaging spectrometer](#)

物理学报.2014, 63(21): 210702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.210702>

差分偏振干涉成像光谱仪 I. 概念原理与操作

[The polarization-difference interference imaging spectrometer-I. concept principle and operation](#)

物理学报.2014, 63(11): 110704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110704>

差分偏振干涉成像光谱仪 II. 光学设计与分析

[The polarization-difference interference imaging spectrometer-II. optical design and analysis](#)

物理学报.2014, 63(11): 110705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110705>

一种卫星平台振动光谱成像数据分块校正方法

[A sectioned method to correct spectral imaging data degraded by satellite vibrations](#)

物理学报.2014, 63(1): 010701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.010701>

基于光瞳分割和角剪切的成像偏振光谱技术

[Technology of polarization interference imaging spectral based on pupil division and angle shear](#)

物理学报.2012, 61(23): 230701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.230701>

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*

李克武^{1)2)3)†} 王志斌¹⁾³⁾ 杨常青¹⁾ 张瑞¹⁾³⁾ 王耀利¹⁾³⁾ 宋雁鹏¹⁾

1)(山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051)

2)(中北大学信息与通信工程学院, 太原 030051)

3)(中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

(2015年1月28日收到; 2015年2月12日收到修改稿)

为了获取高光谱分辨率、高空间分辨率、高偏振精度、高信噪比和稳定性好的全部 Stokes 参量光谱图像, 考虑到声光可调谐滤光器 (acousto-optical tunable filter, AOTF) 的 ± 1 级衍射光的正交特性, 提出用一个 AOTF 滤光, 一个液晶可变延迟器 (liquid crystal variable retarder, LCVR) 进行相位调制和两个 CCD 相机分别对 ± 1 级衍射光成像的高光谱全偏振成像新技术. 从所采用的光学元件的穆勒矩阵出发, 阐述了该技术的基本工作原理; 理论分析表明, LCVR 不但不会影响到第一个 Stokes 参量的探测精度, 而且后 3 个 Stokes 参量的相对误差分别优于 0.064%, 0.31% 和 3.97%; 利用原理样机获取了 450—700 nm、光谱带宽为 10 nm 的 26 个光谱通道的图像数据, 成像质量良好; 以工作波长为 600 nm 的入射光为例, 对其全部 Stokes 参量图像进行了具体分析讨论. 结果表明, 该新技术原理正确, 方案可行. 该研究可为光谱偏振成像技术提供新的理论和实现方案.

关键词: 光谱, 偏振, Stokes 参量

PACS: 07.60.Rd, 07.60.Fs, 42.25.Ja, 42.81.Gs

DOI: 10.7498/aps.64.140702

1 引言

光谱偏振成像技术是对光谱成像技术和偏振成像技术的综合. 光谱偏振成像能够同时获取目标的空间、光谱和偏振信息, 对目标的几何形影特征, 反射、透射和辐射电磁波的光谱特征, 表面粗糙度、致密度、电导率、含水量等材料理化特征进行融合感知, 进而深层次地对目标实现评估、分类和识别^[1]. 近年来, 国内外对光谱偏振成像技术开展了大量的研究, 已有不少关于光谱偏振成像技术的基础理论、器件和应用研究的报道^[2-6]. 光谱成像技术在深空探测、地球资源勘查、环境监测、军事目标识别、生物医学成像和食品安全等领域已经得到初

步的应用, 并且在这些方面的应用价值和前景受到国内外科研机构的重视^[7-9].

目前, 根据光谱偏振成像方式的不同, 光谱偏振成像技术主要分为色散元件加偏振元件型、新型偏振干涉成像光谱型和滤光元件加偏振元件型三类. 色散元件主要是棱镜和光栅, 偏振元件主要是偏振片和相位调制器, 滤光元件主要是滤光片和可调谐滤光器. 对于光谱成像技术而言, 色散型成像光谱的光谱分辨率和空间分辨本领因受到狭缝宽度的制约, 限制了进入系统的光通量, 从而降低了光谱成像的信噪比; 滤光片型需旋转滤光片, 并且提供波段数有限. 对于偏振成像而言, 偏振片型需旋转偏振片, 并且只能探测到线偏振光, 即 Stokes 参量的前三个分量; 新型偏振干涉成像光谱技术能

* 国家国际科技合作专项项目 (批准号: 2013DFR1015) 和国家自然科学基金 (批准号: 61127015) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kewuli1990@gmail.com

够同时获得较高分辨率的偏振光谱, 但需仪器与探测目标的相对运动, 推扫完成目标干涉图的获取, 目标图像复原相当复杂和困难, 条带噪声严重, 空间分辨率较低^[10].

声光可调滤光器 (acousto-optical tunable-filter, AOTF) 是一种新型的滤光器件, 具有光谱分辨率高、波段调谐快、无运动部件等优点^[11]. 而液晶可变延迟器 (liquid crystal variable retarder, LCVR) 是一种新型的相位调制器件, 具有通光范围宽、响应快、调制电压低、相位调制精度高等优点^[12]. 2002年, 美国陆军实验室的 Neelam 等^[13]提出了一种基于一个 AOTF 和一个 LCVR 调谐的光谱偏振成像仪设计, 获得了水平和垂直两个方向上的光谱偏振图像; 2011年, 北京航空航天大学的张颖等^[14]首次将 LCVR 应用于全偏振成像, 并提出了两个 LCVR 和滤光片调谐的全偏振多谱段光谱成像系统; 2014年, Neelam^[15]再次提出了一个 AOTF 外加两个 LCVR 调谐的光谱偏振成像仪设计, 获得了 4 个 Stokes 参量的光谱全偏振图像.

为了获得光谱分辨率、空间分辨率和偏振精度都较高的 4 个 Stokes 参量的光谱全偏振图像, 考虑到 AOTF 的 ± 1 级衍射光的正交特性, 本文提出用一个 AOTF 滤光、一个 LCVR 调制和两个 CCD 分别对 ± 1 级衍射光成像的高光谱全偏振成像新方案; 分析了该方案的技术原理, 讨论了该方案的偏振成像精度, 设计搭建了原理样机系统, 并进行了外场实验. 实验结果表明, 该方案用一个 LCVR 调制, 减小了对光通量的插入损耗, 提高了偏振精度; 两个 CCD 成像, 一次调制便可获得两个偏振方向的光谱图像, 提高了光信息利用率; 基于一个 AOTF 和一个 LCVR 调谐的光谱偏振成像系统, 无运动部件, 避免了相对观测目标的运动, 工作稳定, 图像处理相对简单. 该方案可为高速率、高光谱、高空间分辨、高偏振精度和高稳定的光谱偏振探测提供新的理论和技术手段.

2 高光谱全偏振成像探测原理

2.1 AOTF 滤光原理

AOTF 是用于高光谱成像的理想滤光器件, 其工作原理如图 1 所示.

图 1 中, \mathbf{K}_{in} , \mathbf{K}_d 和 \mathbf{K}_a 分别表示入射光、衍射光和超声波的矢量; 射频驱动信号 $f(t)$ 加载到压电

换能器上激发横向超声波, 超声波通过声光相互作用晶体并使其形成运动的体光栅, 入射光经过时发生衍射. 入射光, 衍射光和超声波之间满足动量匹配关系

$$\mathbf{K}_d = \mathbf{K}_{in} \pm \mathbf{K}_a. \quad (1)$$

根据文献^[16], 衍射光满足

$$\lambda = v\Delta n(\sin^4 \theta_i + \sin^2 2\theta_i)^{1/2}/f, \quad (2)$$

其中, λ 为衍射出射光波长, v 为超声波波速, Δn 为入射光在声光相互作用晶体中的双折射率差, θ_i 为入射光与声光相互作用晶体光轴的夹角, f 为超声波频率. 显然, 射频驱动信号频率 $f(t)$ 和超声频率 f 是一一对应的, 据 (2) 式可知, 能够通过调节驱动信号的频率选择相应波长的衍射光来实现滤光. 由图 1 可知, ± 1 级衍射光是一对正交的线偏振光. 因此, 在新设计的光谱偏振成像探测系统方案中, 我们将 AOTF 的这些优势都加以利用.

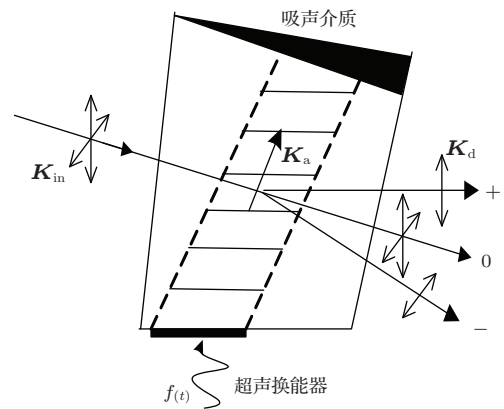


图 1 AOTF 工作原理图

Fig. 1. Working Principle of AOTF.

2.2 LCVR 相位调制原理

LCVR 通过对不同波长的入射光、不同的相位延迟施加相应调制电压来精确控制. 通常入射光通过 LCVR 时, 电致双折射产生的光程差定义为 LCVR 对入射光的延迟量 R , 且 R 和相位延迟 δ 满足

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} R. \quad (3)$$

现在常用的 LCVR 大多都是对正性向列液晶分子摩擦取向后进行封装的液晶盒. 通过驱动控制器输入调制电压, 在调制电压产生的电场作用下, 液晶盒中的液晶分子发生偏转而导致双折射来产生相位延迟. 在其通光范围内对入射光的最大

相位延迟均超过 2π , 但由于取向层对液晶分子的锚定作用, 即便施加足够大的调制电压也不能使 LCVR 的相位延迟达到零. 图 2 为 Thorlabs 公司的 LCC113-A 全波液晶延迟器对 635 nm 入射光的延迟量 R 随调制电压变化关系. 根据文献 [12], 其他波长入射光的延迟量 R 随调制电压的变化关系, 可通过 LCVR 的双折射色散定标得到.

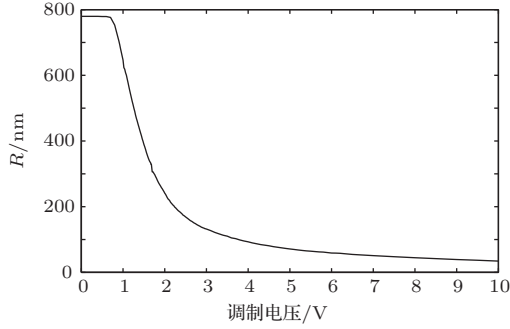


图 2 延迟量随调制电压变化关系

Fig. 2. Retardation change with modulation voltage diagram.

2.3 高光谱全偏振成像探测原理

基于 LCVR 和 AOTF 的应用优势, 我们设计用 AOTF 实现滤光、用一个 LCVR 实现调制、两个 CCD 成像的高光谱全偏振成像的探测新方案, 其光学结构如图 3 所示.

图 3 中, L_1 和 L_2 为成像镜头将目标一次成像到 AOTF, L_3 和 L_4 为传导镜头将 ± 1 级衍射光分别

二次成像到两个 CCD 各自的焦平面上, 遮挡 0 级衍射光. 依据 AOTF 工作原理可知, 成像在 CCD1 上的 $+1$ 级衍射光为偏振方向沿 y 轴的线偏振光, 成像在 CCD2 上的 -1 级衍射光为偏振方向沿 x 轴的线偏振光. 通常把探测目标反射、透射和辐射进入系统的光用 Stokes 参量表示为

$$S_{in} = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T, \quad (4)$$

S_0, S_1, S_2 和 S_3 为 Stokes 参量的 4 个分量, 依据 Stokes 参量的定义, S_0 为成像目标的总光强图像, S_1 为偏振方向沿水平和竖直两个正交方向上的光强差值, S_2 为偏振方向沿 45° 和 135° 两个正交方向上的光强差值, S_3 为右旋和左旋圆偏振光的光强差值 [13].

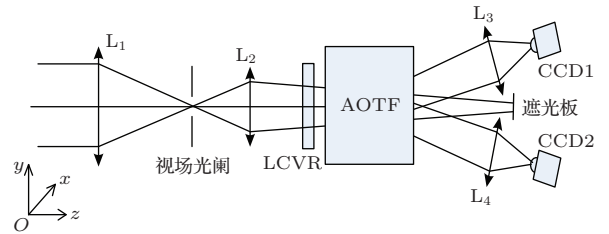


图 3 高光谱全偏振成像原理图

Fig. 3. Full polarization hyperspectral imaging schematics.

用 M_{LCVR} 表示 LCVR 的穆勒矩阵, M_P 表示检偏器的穆勒矩阵, 则

$$M_{LCVR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta_1 + \sin^2 2\theta_1 \cos \delta & \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta_1 \sin \delta \\ 0 & \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta_1 + \cos^2 2\theta_1 \cos \delta & \cos 2\theta_1 \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta_1 \sin \delta & -\cos 2\theta_1 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$M_P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 & 0 \\ \cos 2\theta_2 & \cos^2 2\theta_2 & \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 & 0 \\ \sin 2\theta_2 & \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 & \sin^2 2\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

(5) 式中, θ_1 为 LCVR 快轴与 x 轴的夹角, δ 为 LCVR 对入射光的相位延迟; (6) 式中, θ_2 为检偏器与 x 轴的夹角. 经过图 2 所示系统后, 出射光的 Stokes 参量为

$$S' = M_P \times M_{LCVR} \times S_{in}. \quad (7)$$

根据原理图 3, 我们将 LCVR 快轴与 x 轴的夹角 θ_1 设置为 22.5° ; 由前面分析可知, 经 AOTF 出射的衍射光, $+1$ 级衍射光的 θ_2 为 90° , -1 级衍射光的 θ_2 为 0 . 结合 (5) 和 (6) 式代入 (7) 式得到 $+1$ 级衍射光的 Stokes 参量 S'_+ 和 -1 级衍射光的 Stokes 参量 S'_- 分别为

$$S'_+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_0 - \frac{1}{2}(1 + \cos \delta)S_1 - \frac{1}{2}(1 - \cos \delta)S_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \delta S_3 \\ -S_0 + \frac{1}{2}(1 + \cos \delta)S_1 + \frac{1}{2}(1 - \cos \delta)S_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \delta S_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$S'_- = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_0 + \frac{1}{2}(1 + \cos \delta)S_1 + \frac{1}{2}(1 - \cos \delta)S_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \delta S_3 \\ S_0 + \frac{1}{2}(1 + \cos \delta)S_1 + \frac{1}{2}(1 - \cos \delta)S_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \delta S_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

实际上, CCD 能够直接探测到的是 Stokes 参数的第一个分量, 所以对于系统中 CCD1 成像的光强 I_1 和 CCD2 成像的光强 I_2 分别为

$$I_1 = \frac{1}{2} \left[S_0 - \frac{1}{2}(1 + \cos \delta)S_1 - \frac{1}{2}(1 - \cos \delta)S_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \delta S_3 \right], \quad (10)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \left[S_0 + \frac{1}{2}(1 + \cos \delta)S_1 + \frac{1}{2}(1 - \cos \delta)S_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \delta S_3 \right]. \quad (11)$$

为了能够求解得到每一成像光谱的全部 Stokes 参量, 对每一成像光谱通过 LCVR 施加 2π , 1.5π , π 和 0.5π 的相位延迟, 两个 CCD 对每一成像光谱共得到 8 幅图像, 如表 1 所列.

表 1 不同相位延迟时 CCD 的成像
Table 1. CCD imaging for different phase retardation.

相位延迟	2π	1.5π	π	0.5π
CCD1 成像光强	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}
CCD2 成像光强	I_{21}	I_{22}	I_{23}	I_{24}

将表 1 中的图像联立可求解得到入射光的 4 个 Stokes 参量分别为

$$\begin{cases} S_0 = I_{11} + I_{21}, \\ S_1 = I_{21} - I_{11}, \\ S_2 = I_{23} - I_{13}, \\ S_3 = \frac{\sqrt{2}}{2}(I_{14} - I_{12} + I_{22} - I_{24}). \end{cases} \quad (12)$$

3 偏振探测精度分析

按图 3 所示的原理, 我们搭建了实验系统, 系统结构框架如图 4 所示.

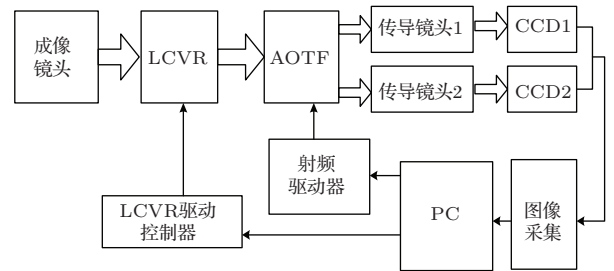


图 4 高光谱偏振成像系统示意图

Fig. 4. Diagram of the polarization hyperspectral imaging system.

LCVR 选用 Thorlabs 公司的 LCC113-A 全波液晶延迟器, 通光孔径 ϕ 为 10 mm; AOTF 为美国 Brimrose 公司生产的 VA210, 工作波长 450—900 nm, 工作频率 65—200 MHz, 光谱分辨率 2—10 nm, 通光孔径 8 mm \times 8 mm. 成像相机为大恒公司生产的工业级 CCD, 响应波长为 350—1050 nm, 752 \times 480 pixel. LCVR 驱动控制器、AOTF 射频驱动器和 CCD 图像采集及偏振图像处理均由一台计算机控制.

该系统对于偏振成像的精度主要由偏振调制器件 LCVR 决定. 由 (10), (11) 和 (12) 式可知, LCVR 快轴与 AOTF 的 -1 级衍射光的方位夹角 θ 和 LCVR 的相位延迟 δ 两个变量共同决定了 4 个 Stokes 参量的测量探测. 对于我们所使用的 LCVR 及其装配套件, 在该系统的装调中, LCVR 快轴与 AOTF 的 -1 级衍射光所成的 22.5° 夹角能最大限

度地控制在 $\pm 1^\circ$ 的偏差范围内;对于LCVR的相位延迟,调制电压的均方根值能精确到0.01 V,根据LCVR的定标结果^[12],LCVR在 2π 和 π 的相位延迟处 ± 0.01 V的调制电压所引起的相位延迟偏差约为 ± 0.049 rad;而LCVR在 $3\pi/2$ 和 $\pi/2$ 处相位延迟随调制电压的变化最快, ± 0.01 V的调制电压相位偏差约为 ± 0.074 rad,调制后的出射圆偏振光椭圆率^[17]偏差为 $\pm 7.71\%$.

考虑LCVR快轴与AOTF的1级衍射光夹角和LCVR相位延迟的偏差的影响,根据(10),(11)和(12)式可推导出这两个偏差对4个Stokes

参量构成的相对误差,如图5所示.

由图5可知,LCVR快轴与AOTF的1级衍射光夹角和LCVR相位延迟的偏差不会影响到 S_0 的探测精度, S_1 的相对误差主要受LCVR相位延迟偏差的影响,最大相对误差为0.064%,而 S_2 和 S_3 的相对误差主要受LCVR快轴方位角的偏差影响,最大相对误差分别为0.31%和3.97%.此外,对于满足光谱偏振成像系统光谱带宽的LCVR,选择调制电压精度更高和进一步提高LCVR的相位延迟定标均可提高高光谱偏振成像的偏振探测精度.

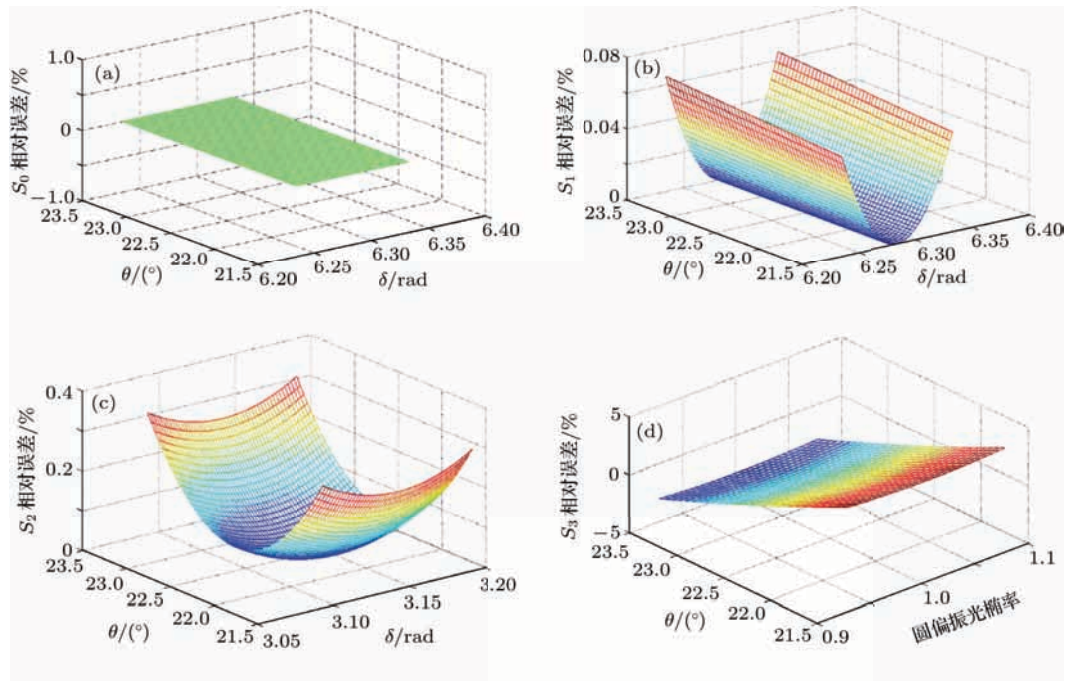


图5 (网刊彩色) Stokes各参量的相对误差 (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) S_3

Fig. 5. (color online) The relative error of each Stokes parameter: (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) S_3 .

4 实验与讨论

我们选择在夏天晴朗的上午,对该原理样机系统进行了室外实验.首先,原理样机中不装配LCVR,设置AOTF射频驱动器作波长间隔为10 nm的扫频驱动,获取了AOTF ± 1 级衍射的多个光谱通道图像数据,实验成像目标场景为图6(a).采用图像处理软件ENVI4.6,分别提取了每个光谱通道 ± 1 级光谱图像中墙体 5×5 像元的平均光强值,做归一化处理后得到墙体光谱和图6(b).

由图6(b),AOTF ± 1 级衍射光的效率是不完全相等的,偏振图像处理时必须加以考虑.

为了获取每一光谱通道的全部Stokes参量,此时,原理样机装配上LCVR,AOTF设置为单频驱动或将扫频时间设置得足够长,以获得LCVR取4个不同相位调制的8幅强度图像.我们以600 nm为例对偏振成像进行具体分析讨论.据图6(b), ± 1 级衍射光的衍射效率分别为37.3%和34.5%,结合LCVR4个不同相位调制下的8幅强度图,代入(12)式,求解得到全部Stokes参量如图7所示.

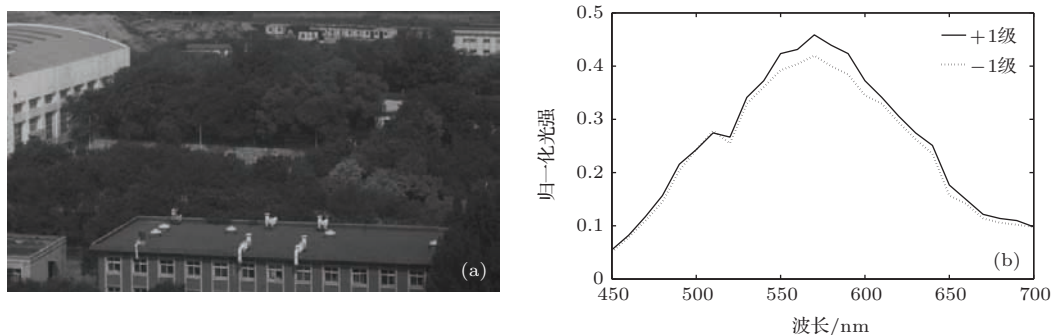


图6 (a) 目标场景; (b) 墙体光谱

Fig. 6. (a) The scene of target; (b) spectral of the wall.

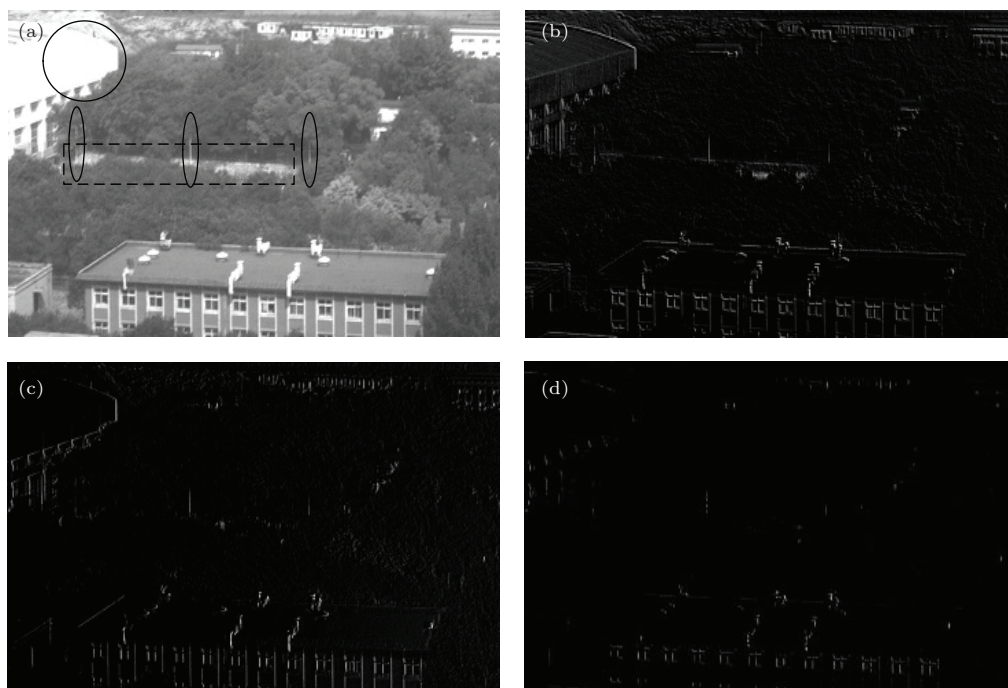


图7 600 nm的全Stokes参量图 (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) S_3

Fig. 7. Stokes parameters of 600 nm: (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) S_3 .

图7(a)中,圆框标出的房屋总强度值较大,但屋檐和窗户等空间形状弯曲程度较大的地方在后三个图像中的强度值明显大于相对平坦的屋顶的值;椭圆框标出的灯柱被树荫遮挡成像不明显,但因为灯柱表面光滑,并且材料为金属,所以在图7(b)和图7(c)的线偏振光强度图像中强度值较大,成像明显;虚线矩形框标出的石墙,在图7(b)和图7(c)中成像有差别,表明不同偏振方向上的线偏振光有差异.结合600 nm的全Stokes参量图来看,建筑等造物体反射光的线偏振特性明显优于树木等自然物体,金属人造物体对某些方向的反射光具有少量的圆偏振成分,而树木等自然物体的反射光圆偏振成分接近零.此外,通常还可以根据

Stokes参量图像得到目标的线偏振度图、偏振相角图和全偏振度图等偏振信息.

5 结论

本文阐述了基于AOTF和LCVR调谐的高光谱偏振成像新技术的工作原理,给出了该技术实现的方案,分析了该技术光谱偏振成像的偏振精度,搭建原理样机并进行了室外实验.获取了450—700 nm、光谱带宽为10 nm的26个光谱通道的图像数据,成像质量良好,并对工作波长为600 nm的全部Stokes参量图像进行了具体分析讨论.结果表明,该技术能够对光谱分辨率优于

10 nm 的每一个光谱通道提供全部 Stokes 参量图像, 可为高光谱、高空间分辨、高偏振精度和高稳定的光谱偏振探测提供新的理论和技术手段.

参考文献

- [1] Li J, Zhu J P, Qi C, Zheng C L, Gao B, Zhang Y Y, Hou X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044206 (in Chinese) [李杰, 朱京平, 齐春, 郑传林, 高博, 张云尧, 侯洵 2013 物理学报 **62** 044206]
- [2] Mu T K, Zhang C M, Li Q W, Wei Y T, Chen Q Y, Jia C L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 110704 (in Chinese) [穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 魏宇童, 陈清颖, 贾辰凌 2014 物理学报 **63** 110704]
- [3] Chen Y H, Wang Z B, Wang Z B, Zhang R, Wang Y C, Wang G J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060702 (in Chinese) [陈友华, 王召巴, 王志斌, 张瑞, 王艳超, 王冠军 2013 物理学报 **62** 060702]
- [4] Zhang C M, Ren W Y, Mu T K 2010 *Chin. Phys. B* **19** 024202
- [5] Wu J F, Zhang C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034201
- [6] Hasekamp O P, Landgraf J 2007 *Appl. Opt.* **46** 3332
- [7] Scharmer G B, Narayan G, Hillberg T 2008 *Astrophys. J.* **689** 169
- [8] Nathan J P, Andrew R D, Michael J, Joseph A 2011 *Opt. Express* **19** 18602
- [9] Zhao Y Q, Pan Q, Cheng Y M 2011 *Imaging Spectropolarimetric Remote Sensing and Application* (Beijing: National Defense Industry Press) (in Chinese) [赵永强, 潘泉, 程咏梅 2011 成像偏振光谱遥感及应用 (北京: 国防工业出版社)]
- [10] Zhang C M 2010 *Interference Imaging Spectroscopy* (Beijing: Science Press) pp17–32 (in Chinese) [张淳民 2010 干涉成像光谱技术 (北京: 科学出版社) 第17—32页]
- [11] Zhao H J, Zhou P W, Zhang Y, Cheng X, Xing H 2009 *Infrared and Laser Engineering* **38** 189 (in Chinese) [赵慧洁, 周鹏威, 张颖, 程宣, 邢辉 2009 红外与激光工程 **38** 189]
- [12] Li K W, Wang Z B, Zhang R, Yu H 2015 *Chin. J. Laser* **42** 0108001-1 (in Chinese) [李克武, 王志斌, 张瑞, 于慧 2015 中国激光 **42** 0108001-1]
- [13] Neelam G, Rachid D, Steve C 2002 *Opt. Eng.* **41** 1033
- [14] Zhang Y, Zhao H J, Cheng X, Xiong S J 2011 *Spectrosc. Spect. Anal.* **31** 1375 (in Chinese) [张颖, 赵慧洁, 程宣, 熊胜军 2011 光谱学与光谱分析 **31** 1375]
- [15] Neelam G 2014 *Proc. SPIE* **9099** 90990N-1
- [16] Yu K X, Ding X H, Pang Z G 2011 *Acousto Optic Principle and Acousto Optic Device* (Beijing: Science Press) p257 (in Chinese) [俞宽新, 丁晓红, 庞兆广 2011 声光原理与声光器件 (北京: 科学出版社) 第257页]
- [17] Liao Y B 2003 *Polarization Optics* (Beijing: Science Press) p49 (in Chinese) [廖延彪 2003 偏振光学 (北京: 科学出版社) 第49页]

A new technique of full polarization hyperspectral imaging based on acousto-optic tunable filter and liquid crystal variable retarder*

Li Ke-Wu^{1)2)3)†} Wang Zhi-Bin¹⁾³⁾ Yang Chang-Qing¹⁾ Zhang Rui¹⁾³⁾
Wang Yao-Li¹⁾³⁾ Song Yan-Peng¹⁾

1) (*Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, Taiyuan 030051, China*)

2) (*School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

3) (*Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

(Received 28 January 2015; revised manuscript received 12 February 2015)

Abstract

In order to achieve all Stokes parameters of spectral image with high spectral resolution, high spatial resolution, high polarization accuracy, high signal-to-noise ratio and good stability, taking into account the orthogonal characteristic of ± 1 order diffraction light which diffracts from a acousto-optic tunable filter (AOTF), a new technique of full polarization hyperspectral imaging is presented. It uses one AOTF to diffract the incident light, one liquid crystal variable retarder (LCVR) to modulate the light retardation, and two CCDs to image the ± 1 order diffraction light, respectively. According to the Muller matrixes of all optical elements in the system, the basic working principle of the new technique is that LCVR sequentially provides the retardation 2π , 1.5π , π and 0.5π for each spectral channel, so the CCD obtains corresponding images. After analyzing these images, the all Stokes parameters are obtained; the precision of this system for polarization imaging is determined mainly by polarization modulation device LCVR. Considering the azimuth of LCVR fast axis and retardation precision at the same time, it is unveiled that LCVR has no effect on the accuracy of the first Stokes parameter, and the relative errors of other latter 3 Stokes parameters are less than 0.064%, 0.31% and 3.97%; then, our prototype system is used to do the outdoor experiments in a summer sunny morning, images data for 26 spectral channels with spectral bandwidth of 10 nm, which are from 450 nm to 700 nm, are acquired, the imaging quality is very fine. Firstly, LCVR are not assembled in our prototype system, and AOTF works in the sweeping frequency mode. The spectrum from each CCD proves that the diffraction efficiency of AOTF ± 1 order diffraction light is not completely the same, and the difference must be considered in polarized image processing. Then another experiment is done after LCVR has been assembled. The image data of the incident light of 600 nm are taken for example to discuss its all Stokes parameters in detail. The results show that the principle of the new technique is correct and the new scheme is feasible. This study provides a new theory and implementation scheme for the polarization spectral imaging technology.

Keywords: spectrum, polarization, Stokes parameters

PACS: 07.60.Rd, 07.60.Fs, 42.25.Ja, 42.81.Gs

DOI: 10.7498/aps.64.140702

* Project supported by the International Science and Technology Cooperation Special, China (Grant No. 2013DFR1015), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61127015),

† Corresponding author. E-mail: kewuli1990@gmail.com