

基于 AOTF 的高光谱偏振成像系统设计与实验

汪家春¹, 赵大鹏¹, 杜香华², 王启超¹, 林志丹¹, 程立¹, 李志刚¹

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

2. 中央军委装备发展部军事代表局驻北京地区第二军事代表室, 北京 100191)

摘要: 为获得目标和场景的偏振信息, 基于线偏振片和声光可调滤波器(AOTF)设计了一套高光谱偏振成像系统。文中从 AOTF 的工作原理出发分析其偏振等效关系, 随后给出了探测系统的具体结构, 并对其光学系统的各元件进行了合理的参数配置。最后, 利用设计的成像系统对林地背景中的涂覆三种不同颜色涂层的铝板进行了高光谱偏振成像实验, 获得了场景的高光谱信息和偏振信息, 并通过数据处理得到涂层与背景之间的强度对比和偏振对比特性。结果表明: 涂层与自然背景的偏振特性存在一定程度的差异, 对于不同自然背景中的目标, 通过选择与背景特性差异较大的若干波长或波段, 利用合适的探测方式进行探测, 有利于实现快速准确的目标识别。

关键词: 声光可调滤波器(AOTF); 高光谱; 偏振; 系统设计

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0138002

Design and experiment of hyper-spectral polarization imaging system based on AOTF

Wang Jiachun¹, Zhao Dapeng¹, Du Xianghua², Wang Qichao¹, Lin Zhidan¹, Cheng Li¹, Li Zhigang¹

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;

2. The Second Military Representation Office in Beijing Area of Military Representation Bureau of Equipment Development Department, CMC, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to acquire the polarization characteristics of targets and backgrounds, a hyper-spectral polarization imaging system based on a non-collinear, acousto-optic tunable filter (AOTF) and a linear polarizer was designed in this paper. The paper began with an analysis of the equivalent relationship of the AOTF to describe the principle of polarization detection of this system. Appropriate parameters of hardware components were assigned reasonably later. Then, the hyper-spectral polarization experiment about the aluminium plate, which was coated with light green, dark green and khaki pigments, within meadow was conducted by using the imaging system proposed above. Moreover, the hyper-spectral intensity and polarization contrast characteristics of the target and natural background in the scene were deduced by processing the experiment data. The results indicate that the polarization characteristics of pigments are different from that of natural background. The detection means can be chosen reasonably to

收稿日期: 2016-05-05; 修订日期: 2016-06-10

基金项目: 国家 863 计划(2014AA0791)

作者简介: 汪家春(1974-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事目标探测和系统设计方面的研究。Email: w_jiachun@163.com

realize the effective and quick detection and recognition for targets under the mixed background at those wavelengths or wavebands with obvious polarization contrast characteristics.

Key words: acousto-optic tunable filter(AOTF); hyper-spectral; polarization; system design

0 引言

物体的表面特性作为其本身的一种重要属性,与物体相互作用后的电磁波(反射或散射)往往无形中携带着物体的表面特性所决定的偏振信息,而这种通过获取偏振信息(反射或散射光波的偏振态)进行物体成像探测的技术称为偏振成像技术^[1-2]。目前,偏振成像技术已在伪造识别^[3],农业调查^[4],海洋观测^[5]以及目标探测^[6]等领域得到了应用。在目标探测方面,与传统的强度成像技术相比较,偏振成像技术作为一种新型探测技术手段,能够获得目标与背景更加丰富的信息量,有效抑制背景杂乱噪声对目标识别的干扰,增强图像对比度,提高探测距离,可进一步提高目标探测与识别的准确度。

偏振成像技术所具备的显著优势使得其备受世界各国研究人员的关注,作为该项技术的设备基础,偏振成像系统也得到了快速发展,同时也取得了诸多研究成果^[7-10],实现了在可见光、近红外以及中远红外波段的光谱偏振成像探测。随着材料科技的日新月异和光学器件加工制造技术的日益成熟,偏振调制器件和分光器件已由传统的偏振片、棱镜、光栅等转变为具有更高光谱分辨率、小型化、集成化和智能化的新型器件。声光可调滤波器(Acousto-optic Tunable Filter, AOTF)作为一种全固态的新型滤波及偏振调制器件,能够实现快速的电控调谐,无机械移动部件,且结构小巧紧凑,已被应用于光谱偏振成像系统的研制过程中^[11-13]。

目前,利用 AOTF 和液晶相位可变延迟器(Liquid-Crystal Variable Retardation, LCVR)实现高光谱偏振探测已有相关报道,但采用一块 LCVR 的分时型偏振探测系统无法获得场景的偏振信息,而采用两块 LCVR 虽可实现场景的全偏振信息获取,但带来的通光量的减小将提高对后续 CCD 相机性能的要求^[13]。为此,文中在分析 AOTF 等效关系的基础

上,基于线偏振片和 AOTF 设计了一套高光谱偏振成像系统,该系统能够实现 550~1 000 nm 波段范围内场景的高光谱偏振成像探测。同时,该系统具有两种工作模式,分别为高光谱探测和高光谱偏振探测,可依据需要进行选择。随后,分析了该系统的偏振探测原理。此外,利用该系统对放置于林地背景中的浅绿色、深绿色和土黄色涂层进行了高光谱偏振探测,获得了三种涂层和典型背景(绿草、枯草和沙土)的高光谱特性、偏振特性以及涂层与背景的高光谱对比特性。

1 高光谱偏振成像系统设计

1.1 AOTF 的原理及其等效关系

AOTF 是由较低声光衰减的光学材料制成的新型电调谐光谱带通滤波器,其具有良好的光学性能以及较高的声光品质因数^[14]。其结构示意图如图 1 所示。

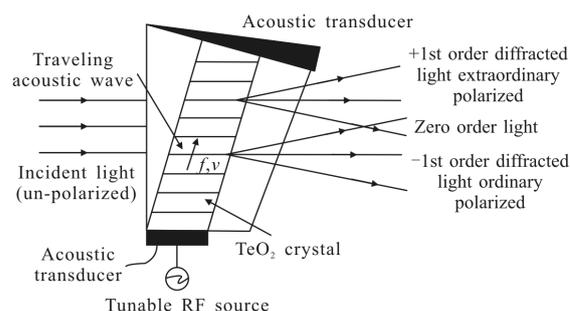


图 1 AOTF 结构示意图

Fig.1 Principle diagram of AOTF

AOTF 是根据声光衍射原理制成的分光器件,可调射频源产生的射频信号转换为超声波振动并穿过晶体内部,超声波使晶格产生了空间周期性的振动,其作用与一维衍射光栅等效。当输入一定频率的射频信号使得布喇格衍射条件得到满足时,入射到该光栅上的白光或宽波段光束将发生布喇格衍射,

将会有两束衍射光同时出现(+1 级衍射光束和-1 级衍射光束),并分别位于零级光束的两侧。零级光束与入射光束的方向相同,而±1 级衍射光束将发生一定角度的偏折,且两束衍射光均为波长为 λ 的单色线偏振光且两者的偏振态相互正交,由此可从入射白光或宽波段光束中选择出波长为 λ 的单色线偏振光。衍射光束的波长 λ 与射频信号的频率 f 存在如下——对应的关系,因此只需通过调节驱动射频信号的频率 f ,即可连续、快速地改变衍射光束的波长 λ ,实现光谱滤波。

通过 AOTF 的原理可知,AOTF 对入射光束偏振态的这种变换作用可以将其等价为一个偏振片和一个主轴和透光方向夹角为 $\pi/4$ 的 1/2 波晶片的叠加^[15]。因此,根据 Mueller 矩阵理论可以得到 AOTF 的等效 Mueller 矩阵为:

$$M_{AOTF}=M_{\text{half-wave plate}} \cdot M_{\text{polarizer},\gamma} \quad (1)$$

式中: $M_{\text{half-wave plate}}$ 和 $M_{\text{polarizer},\gamma}$ 分别为 1/2 波晶片和线偏振片的 Mueller 矩阵。已知透光方向与 X 轴(参考方向)夹角为 γ 的偏振片的 Mueller 矩阵可表示为:

$$M_{\text{polarizer},\gamma}=\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & c_2 & s_2 & 0 \\ c_2 & c_2^2 & c_2s_2 & 0 \\ s_2 & c_2s_2 & s_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1/2 波晶片的 Mueller 矩阵可表示为^[15]:

$$M_{\text{half-wave plate}}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_4 & s_4 & 0 \\ 0 & s_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $c_2=\cos(2\gamma)$; $s_2=\sin(2\gamma)$; $c_4=\cos(4\gamma)$; $s_4=\sin(4\gamma)$ 。

因此,AOTF 的等效 Mueller 矩阵为:

$$M_{AOTF}=\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & c_2 & s_2 & 0 \\ A & C & E & 0 \\ B & D & F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $A=c_2c_4+s_2s_4$; $B=c_2s_4-s_2c_4$; $C=(c_2c_4+s_2s_4)c_2$;

$D=(c_2s_4-s_2c_4)c_2$; $E=(c_2c_4+s_2s_4)s_2$; $F=(c_2s_4-s_2c_4)s_2$

1.2 系统结构

系统由外围硬件部分和系统处理软件两部分组成。系统的结构示意图和实物图分别如图 2 和图 3 所示。

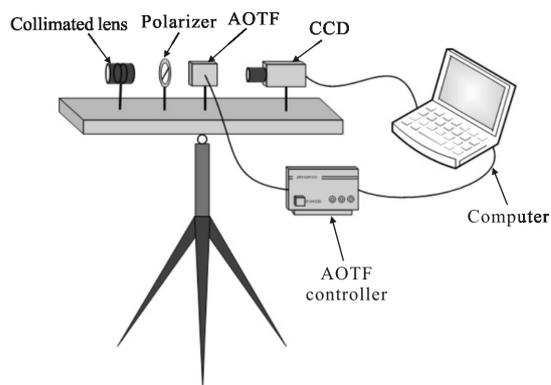


图 2 系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the system

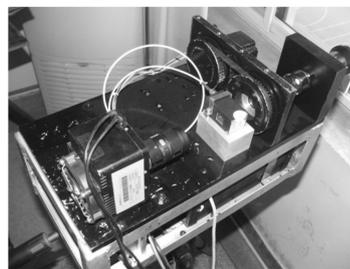


图 3 系统硬件实物图

Fig.3 Photos of the hardware module

系统的外围硬件部分由前端准直光学系统、偏振片及其旋转装置、AOTF、后端成像光学系统、CCD 相机及偏振片旋转控制器和 AOTF 的电调控制器组成。其中,前端准直光学系统用于准直物方入射的光线,以保证入射光束以很小的发散角进入偏振片和 AOTF,从而保证 AOTF 器件的正常工作。系统采用变焦镜头(焦距变化范围:5~100 mm,视场角:45°~2.9°)和定焦镜头(焦距:75 mm,视场角:8.5°)对接组合的方式进行入射光束的准直,实现准直系统出射光束的发散角达到 5°;偏振片的作用是调制入射光束的偏振态,配合 AOTF 可以检测出入射光束的偏振态。系统选用的偏振片为美国 Meadowlark Optics 公司生产的型号为 UPM-100-VIS 的超高消光比可见光/近红外偏振片,其工作波段为 550~1500 nm,消光比为 10 000 000:1;系统选用的 AOTF 是由较低声光衰减的 TeO₂ 晶体材料制成的,其波长调谐时间通常只有几十微秒,因此,AOTF 能够在极短的时间内调谐到所需要的波长,实现快速、连续、随机地波长选择,从而提高系统检测速度。其工作波段为 550~1 000 nm,通光孔径为 10 mm×10 mm,光谱分辨

率为:2.9 nm(@543 nm),9 nm(@792 nm);后端的成像光学系统将 AOTF 衍射出来的光线成像于 CCD 相机的焦平面上,从而探测出物方的景物信息。CCD 相机为 140 万像素黑白二级半导体制冷高灵敏度近红外相机,工作波段为 400~1000 nm,G 灵敏度为 1.3×10^3 mV。偏振片旋转控制器和 AOTF 的电调控制器分别用来控制偏振片的起偏方向和 AOTF 的调谐波长,这两者结合在一起即可实现对目标在特定波长处偏振态的测量。

系统的软件部分主要由控制指令产生模块和信息处理模块组成。主要用于产生各类控制指令以及对硬件部分获得图像的处理,进而获得场景的高光谱偏振信息和偏振融合等信息。

2 系统偏振探测原理

由上文分析的 AOTF 的等价关系可知,1/2 波晶片的主轴和其透光方向夹角为 $\pi/4$,其作用仅仅是将通过波晶片的线偏振光的振动方向转动 90° 。如果只探测 AOTF 出射的某一路衍射光束(+1 级或-1 级衍射光束)时,AOTF 即可等效为一个线偏振片。因此,对系统偏振探测原理进行分析时,可将 AOTF 视为偏振片来处理。

文中的系统设计方案可等效为双偏振片探测系统。固定 AOTF 的位置不动(水平方向或者竖直方向),即这个“偏振片”的透光轴方向固定不动,在其前方增加一个可旋转的偏振片实现双偏振片的探测结构。图 4 为基于 AOTF 和偏振片的偏振探测系统结构示意图。

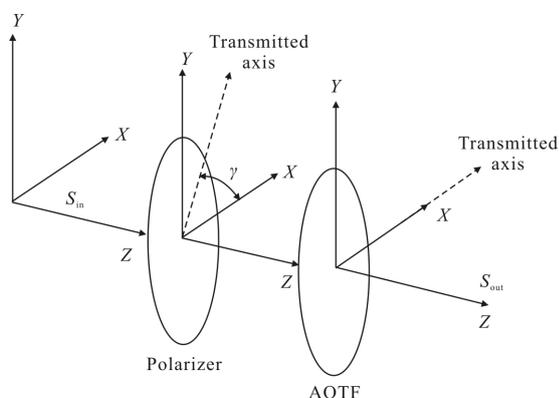


图 4 基于 AOTF 和线偏振片的偏振探测系统结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the system based on AOTF and linear polarizer

假定 CCD 相机探测 AOTF 出射光束中的+1 级衍射光,此时其透光轴方向为水平方向(X 轴方向),即夹角为 0。则由公式(4)可得 AOTF 的 Mueller 矩阵为:

$$M_{\text{AOTF}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

计算过程中忽略各成像镜头对整个系统 Mueller 矩阵的影响,由公式(2)和(5)可得 CCD 相机获得的强度图像为:

$$I' = \frac{1}{4} [(1 + \cos(2\gamma))I + (\cos(2\gamma) + \cos^2(2\gamma))Q + (\sin(2\gamma) + \cos(2\gamma)\sin(2\gamma))U] \quad (6)$$

可以看出,通过旋转偏振片(即改变夹角 γ 值)的方法可获得线性方程组,求解得到入射光束的 Stokes 参量,进而获得偏振度 P 和偏振角 θ :

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (7)$$

3 涂层与背景的高光谱偏振成像实验

高光谱偏振成像实验的原理如图 5 所示,图中入射光为太阳光或大气对其散射光,入射光与 Z 轴(竖直方向)的夹角为 i ,定义其为入射角;入射光经目标反射或者散射后被成像系统所接收,散射光与 Z 轴的夹角为 r ,定义其为探测角;成像系统所在平面与入射平面的夹角为 α ,定义其为方位角。整个成像系统固定于三脚架上可水平、俯仰调节的平台上,通过平台的调节可获得不同探测条件下的强度图像。

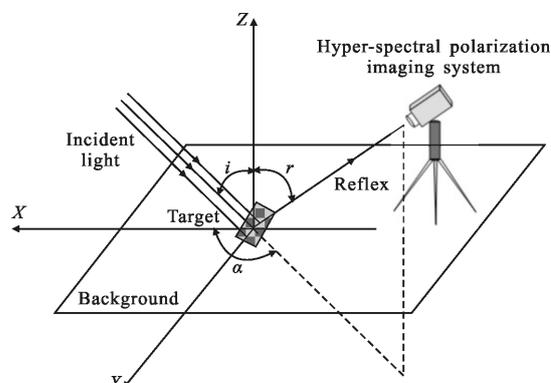


图 5 实验原理图

Fig.5 Schematic of the experiment

文中以涂覆有三色涂层(浅绿色、深绿色和土黄色)的铝板为研究目标,将其置于杂乱草地背景中,背景中包含绿草、枯草(呈土黄色)以及沙土(雨水冲刷、聚集所致)等多种典型自然地物。天气为阴天(实验选择在阴天的气象条件下进行,因为没有特定方向的光线入射,因此可忽略光线入射角对测量结果的影响)。

首先利用光纤光谱仪测试得到浅绿色涂层在 400~1 000 nm 波段范围内的反射光谱,如图 6 所示。对比叶绿素的可见光和近红外反射率光谱曲线^[16],可以看出,实验选用的浅绿色涂层的光谱与标准叶绿素的光谱非常接近。

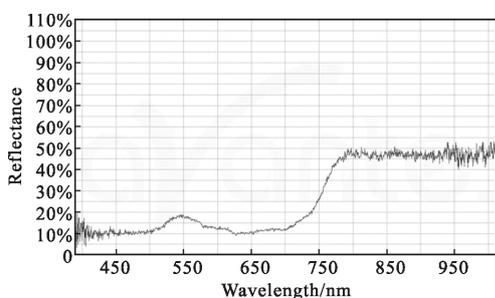


图 6 浅绿色涂层的反射光谱曲线

Fig.6 Reflectance spectrum of light green coating

成像系统位于某六层建筑顶部,调节其探测角为 60°,方位角为 180°。整个数据采集过程中,为降低噪声对探测结果的影响,将 CCD 相机的曝光时间固定为 200 ms,感光度(增益)固定为 ISO100。考虑到 CCD 相机对各个波长的响应度以及 AOTF 的衍射效率,实验在 580~840 nm 波段范围内对林地背景中的目标板进行高光谱偏振探测,光谱分辨率为 10 nm。通过对实验获得图像的处理,分别获得了涂层与背景的高光谱强度信息与偏振度信息。

图 7 给出了在 630、670 和 700 nm 波长处的强度图像和偏振图像,图(a)、(b)、(c)分别为强度图像、偏振度图像和偏振角图像:1 为绿草,2 为枯草,3 为沙土,4 为浅绿色涂层,5 为深绿色涂层,6 为土黄色涂层。可以看出,强度图像中铝板几乎“隐身”于草地背景中,其与背景之间的对比度较小,且边缘轮廓信息弱,难以识别和辨认;对于偏振度和偏振角图像,草地背景的干扰受到一定程度的抑制,铝板较为清晰地浮现在杂乱的草地背景中,尤其是偏振度图像,铝

板表面三种涂层的涂覆纹理也较为明显,而在偏振角图像中,铝板的轮廓清晰,具有较好的识别效果。

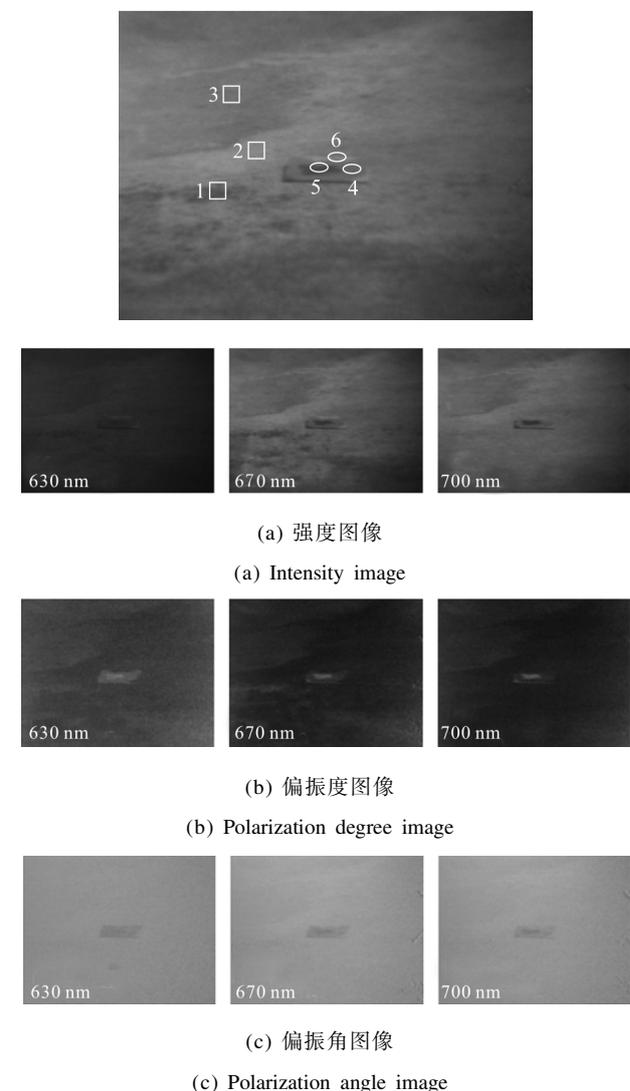


图 7 不同波长处的强度图像与偏振图像

Fig.7 Intensity images and polarization images at different wavelengths

目标与背景某一特征的差异通常使用对比度这一重要指标进行衡量。强度对比度 C_I 和偏振对比度 C_P 分别定义为:

$$C_I = \frac{|I_{\text{target}} - I_{\text{background}}|}{I_{\text{target}} + I_{\text{background}}} \quad (8)$$

$$C_P = \frac{|P_{\text{target}} - P_{\text{background}}|}{P_{\text{target}} + P_{\text{background}}} \quad (9)$$

式中: I_{target} 、 $I_{\text{background}}$ 、 P_{target} 和 $P_{\text{background}}$ 分别为目标和背景的强度和偏振度。

文中以浅绿色涂层为例,在实验获得的高光谱强度图像和偏振度图像中选择一定尺寸的浅绿色涂

层和背景区域,取该区域内强度和偏振度的平均值作为该涂层或背景 的强度值和偏振度值,利用公式(8)~(9),获得了浅绿色涂层与不同背景之间的强度对比度和偏振对比度,如图 8~10 所示。图 8 为该涂层与绿草之间的两种对比度曲线。由图可知,在 580~640 nm,偏振对比度约为强度对比度的 2~5 倍,在 760 nm 处以及 800 nm 附近,偏振对比度约为强度对比度的 2~3 倍;但在 740 nm 波长处,强度对比度大于偏振对比度。

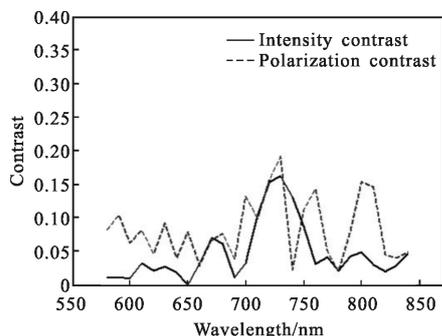


图 8 浅绿色涂层与绿草的对比度曲线

Fig.8 Contrasts of light green coating and grass

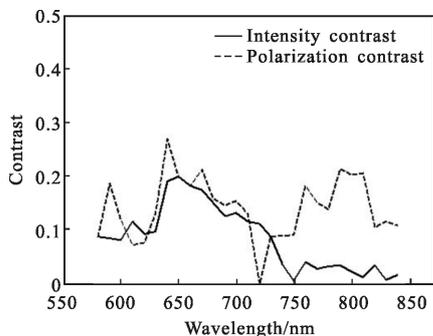


图 9 浅绿色涂层与枯草的对比度曲线

Fig.9 Contrasts of light green coating and withered grass

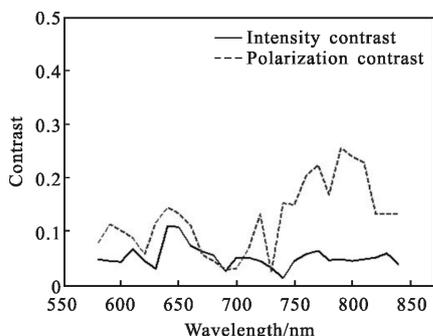


图 10 浅绿色涂层与沙土的对比度曲线

Fig.10 Contrasts of light green coating and soil

图 9 和图 10 分别为该涂层与枯草和沙土的对比度曲线。在图 9 中,仅在 620 nm 和 730 nm 波长处,强度对比度大于偏振对比度,在近红外波段,偏振对比度远大于强度对比度。结果表明,在近红外波段,利用偏振探测方式能够实现对枯草背景中的浅绿色涂层的有效探测。而在图 10 中,在 670~710 nm 波段范围内,偏振对比度和强度对比度相差较小,但在其余探测波段内,偏振探测的效果都优于高光谱强度探测,尤其在近红外波段体现的更为明显。

通过以上对浅绿色涂层与不同地物背景之间的强度和偏振对比特性分析,对于部分波长处的强度对比度或偏振对比度过小(接近于 0)的情况,在后续探测波长的优选过程中将予以剔除。对于不同背景下的不同目标的探测,优选对比特性差异较大的波长或波段,选择合适的探测方式,可提高目标识别的准确率。

4 结 论

文中对设计的高光谱偏振成像系统进行了详细论述,并基于此成像系统对三种不同颜色的涂层和三种典型自然地物的偏振特性以及目标与背景的强度和偏振对比特性进行了分析讨论,获得如下结论:

(1) 文中从分析 AOTF 的等效关系出发,基于 AOTF 和线偏振片设计了一套高光谱偏振成像系统,该系统具有高光谱成像与光谱偏振成像两种探测模式,当固定线偏振片的起偏方向时,系统即为高光谱成像探测模式,可根据实际需要进行选择。

(2) 涂层与自然背景的偏振特性存在一定程度的差异,其与不同背景之间的强度和偏振对比特性不尽相同。对于不同自然背景中的目标,通过选择与背景特性差异较大的波长或波段,利用合适的探测方式,有利于实现准确的目标探测。

参 考 文 献:

[1] Wang Feng, Yin Chengliang, Wang Yong. Research of polarization imaging detection method for water surface target in foggy weather[C]//SPIE, 2013, 8907: 89074C.
 [2] Duan Jin, Fu Qiang, Mo Chunhe, et al. Review of polarization imaging for international military application [C]//SPIE, 2013, 8908: 890813.
 [3] Dubois J, Wolff J, Warrack J, et al. NIR chemical imaging

- for counterfeit pharmaceutical products analysis [J]. *Spectroscopy*, 2007, 22: 36–40.
- [4] Inoue Y, Penuelas J. An AOTF-based hyperspectral imaging system for field use in ecophysiological and agricultural applications [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22: 3883–3886.
- [5] Perchiadhi A V. Spectral imaging AOTF spectrometer for world ocean observation[C]//SPIE, 2013, 8888: 88880P.
- [6] Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. Polarimetric imaging of camouflage screen in visible and infrared wave band [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 425–426. (in Chinese)
张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 伪装遮障的光学与红外偏振成像[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 425–426.
- [7] Yang Zhiwen. Measurement and achievement of polarimetric spectrum [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2003, 20(8): 815–820. (in Chinese)
杨之文. 偏振光谱的测量及研究进展 [J]. 光谱实验室, 2003, 20(8): 815–820.
- [8] Wang Xia, Zhang Mingyang, Chen Zhenyue, et al. Overview on system structure of active polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2244–2246. (in Chinese)
王霞, 张明阳, 陈振跃, 等. 主动偏振成像的系统结构概述 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2244–2246.
- [9] Kwang Jo Lee, In-Kag Hwang, Hyun Chul Park, et al. Polarization-Independent all-fiber acousto-optic tunable filter using torsional acoustic wave [J]. *Photonics Technology Letters*(S1041–1135), 2010, 22(8): 523–525.
- [10] Li Jie, Zhu Jingping, Qi Chun, et al. Large aperture static hyperspectral imaging full polarimetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 575–577. (in Chinese)
李杰, 朱京平, 齐春, 等. 大孔径静态超光谱全偏振成像技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 575–577.
- [11] Jiang Qinghui, Qiu Yuehong, Wen Yan, et al. Design of data acquisition system for AOTF polarization spectral imaging instrument [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 219–221. (in Chinese)
姜庆辉, 邱跃洪, 文延, 等. 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): 219–221.
- [12] Gupta N. Acousto-optic tunable filter based spectropolarimetric imagers[C]//SPIE, 2008, 6972: 69720C.
- [13] 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): 66–71. (in Chinese)
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): 66–71.
- [14] Goutzoulis A, Pape D. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices [M]. New York: Marcel Dekker, 1994.
- [15] Fang Guofang. Research on the characteristic matrix and sidelobe of acousto-optical tunable filter[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
范国芳. 声光可调谐滤波器特性矩阵与旁瓣抑制的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [16] He Zijian, Shi Jiaming, Wang Jiachun, et al. Recognition of camouflaged target by hyperspectral imaging system based on acousto-optic tunable filter [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44 (7): 797–798. (in Chinese)
何梓健, 时家明, 汪家春, 等. AOTF 高光谱探测系统对伪装目标的识别研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 797–798.