

# 基于正交双偏振的分孔径同时式高光谱偏振成像系统设计

王小龙<sup>1</sup>, 王峰<sup>1</sup>, 徐睿<sup>2</sup>, 刘晓<sup>1</sup>, 袁宏武<sup>1</sup>

<sup>1</sup>陆军炮兵防空兵学院偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

**摘要** 为了同时获取目标光谱和偏振信息, 基于正交双偏振法和声光可调谐滤光器, 设计了一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统。从高光谱偏振成像原理出发, 介绍了成像系统的结构设计、光学设计和机械设计, 利用穆勒矩阵理论对系统成像过程进行了分析。利用所设计的成像系统对三种伪装网和灌木丛进行检测分类实验。实验结果表明, 伪装网与灌木丛的高光谱偏振特性存在较大差异, 将光谱信息和偏振信息结合起来有利于提高检测能力和分类准确性; 分孔径同时式高光谱偏振成像系统是一种有效、紧凑且可实时探测的高光谱偏振成像系统。

**关键词** 成像系统; 高光谱偏振成像; 声光可调谐滤光器; 正交双偏振法; 分孔径同时式

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031104

## Design of Hyperspectral Polarization Imaging System with Multiple Simultaneous Apertures Based on Orthogonal Dual-Polarization

Wang Xiaolong<sup>1</sup>, Wang Feng<sup>1</sup>, Xu Rui<sup>2</sup>, Liu Xiao<sup>1</sup>, Yuan Hongwu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology in Anhui Province, Army Artillery and Air Defense Forces College, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

**Abstract** In order to obtain the target spectrum and polarization information at the same time, we design a hyperspectral polarization imaging system with multiple simultaneous apertures based on the orthogonal dual-polarization method and acousto-optic tunable filter. Based on the principle of hyperspectral polarization imaging, we introduce the structure design, optical design, and mechanical design of the imaging system and analyze the system imaging process using the Mueller matrix theory. We use the imaging system to distinguish three kinds of camouflage nets from bushes. The experimental results show that the hyperspectral polarization properties of camouflage nets and bushes are quite different. We can improve the detection ability and classification accuracy by combining the spectral information and dual-polarization information. The hyperspectral polarization imaging system with multiple simultaneous apertures is an effective, compact, and real-time hyperspectral polarization imaging system.

**Key words** imaging system; hyperspectral polarization imaging; acousto-optic tunable filter; orthogonal polarization method; multiple simultaneous apertures

**OCIS codes** 110.1220; 110.2970; 110.5405; 110.7410

## 1 引言

利用高光谱成像技术可同时获取目标的空间、

光谱和强度信息。高光谱图像中的每个像素点都对应一条反映目标组分物质固有性质的地物光谱曲线, 为检测和区分地物提供了依据。目前该技术已

收稿日期: 2017-07-31; 收到修改稿日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(41406109)、安徽省自然科学基金(1708085QD90)

作者简介: 王小龙(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事高光谱偏振成像探测技术方面的研究。

E-mail: wxlaiwoqin@163.com

导师简介: 王峰(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事新型光电成像探测技术方面的研究。E-mail: wfissky7202@sina.com

经应用在公共安全、目标检测与分类、矿物检测、光学伪装效果评价等方面<sup>[1-4]</sup>。

利用偏振成像技术可同时获取目标的空间、强度和偏振信息。偏振特征是由目标自身决定的重要属性,利用偏振信息能够反演出目标的轮廓和表面粗糙度等细节信息,也能提高在雾霾、烟尘中目标的探测距离。目前,该技术在伪装目标检测、气溶胶粒子特性研究和偏振光学去雾等方面得到了应用<sup>[5-8]</sup>。

高光谱偏振成像探测技术结合了高光谱成像探测技术和偏振成像探测技术的优势,利用该技术可同时获取目标的空间、强度、光谱和偏振信息等多重信息,为复杂背景下实现目标的更精细化探测识别提供了支撑。目前,高光谱偏振成像技术已经在环境检测和军事伪装目标识别等方面得到了应用<sup>[9-11]</sup>,越来越受到国内外科研机构的重视。

1992年,美国国家航空航天局基于声光可调谐滤光器(AOTF)和CCD相机研制了光谱偏振成像仪,并进行了天文观测<sup>[12]</sup>。2002年,美国陆军研究实验室基于AOTF和液晶可变延迟器(LCVR)研制了光谱波段为 $0.4\sim 11.5\ \mu\text{m}$ 、小型可遥控的光谱偏振成像仪<sup>[13]</sup>。1996年,法国国家空间研究中心为了探测云和大气气溶胶状况,研制了地球反射光谱的偏振和方向测量器(POLDER),POLDER3已于2004年被发射进入太空,目前正在进行第3阶段的研究<sup>[14]</sup>。日本国家航空实验室一直致力于研制基于液晶调谐滤光器(LCTF)的光谱偏振成像仪,1999年,该实验室研制出可见光波段的光谱偏振成像仪,并于2003年实现了覆盖近红外的的工作波段<sup>[15]</sup>。

国内针对光谱偏振成像系统的研究起步较晚,与国外星载光谱偏振成像系统相比,国内研究成果多为小型人工手动操作成像系统。

2003年,中国科学院安徽光学精密机械研究所通过机械切换偏振方向和滤光片研制出了少数波段可调的偏振CCD相机<sup>[16]</sup>。2008年,西北工业大学利用LCTF和CCD构建了 $400\sim 700\ \text{nm}$ 波段的光谱偏振成像仪,其利用了LCTF本身是线偏振器的特性,通过机械旋转LCTF切换偏振方向<sup>[17]</sup>。西安交通大学进行了偏振干涉成像光谱仪方面的仿真,但未实现系统工程化<sup>[18]</sup>。2011年,北京航空航天大学研制出了基于LCVR调谐的全偏振多谱段成像系统,通过机械切换滤光片仅获得6个波段<sup>[19]</sup>。2015年,北京空间机电研究所搭建了静态调制的光谱偏振成像系统实验装置,将系统放置在匀速转台以模拟推扫成像;但是该装置的成像效率低,而且基

于多块延迟器和偏振器的设计方案大大减小了通光量<sup>[20]</sup>。2016年,中北大学研制出了基于双AOTF的新型成像光谱偏振探测系统,该系统利用分束镜将入射光等分成两份,两光束分别通过两个AOTF后,各获取一对 $\pm 1$ 级衍射光,从而可一次性获取成像光谱偏振信息,但分束镜分光的设计造成光路中通光量减半,导致系统对入射光强和CCD性能的要求较高<sup>[21]</sup>。2017年,南京理工大学搭建了基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像实验装置,该成像装置采用Sagnac干涉仪,通过限制光通量来获取较高的空间分辨率,但该装置在推扫成像过程中要求空间不能发生变化<sup>[22]</sup>。脉冲功率激光技术国家重点实验室研制了基于AOTF的高光谱偏振成像系统,该系统采用机械切换偏振片方向,对机械系统稳定性的要求较高<sup>[23]</sup>。

鉴于上述成像系统只能获取静态目标的光谱偏振信息、或存在影响系统稳定性的机械活动部件、或波段数量少等现状,本课题组吸取了AOTF光谱分辨率高、波段调谐快、无运动部件等优点<sup>[24]</sup>,基于正交双偏振AOTF分光组件设计了一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统。该系统覆盖了 $450\sim 950\ \text{nm}$ 波段,光谱分辨率高,可在 $2\sim 8\ \text{nm}$ 波段内选择成像;正交双偏振片的设计方案可有效消除视场内外的杂散光并提高成像信噪比,可实现 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $120^\circ$ 三个偏振方向同时成像,并且可同时获取动、静态目标光谱和偏振信息,实时性好。利用该系统对三种不同类型伪装网和灌木丛进行了高光谱偏振成像探测实验。在晴天、多云和阴天条件下,获取4种地物的光谱偏振信息,通过光谱反演获得地物相对反射率光谱,并计算出不同地物偏振反射率光谱曲线间的相关系数,以量化地物间的相似度。实验结果表明:将高光谱信息与偏振信息结合起来检测目标与背景的差异,有利于提高系统的目标检测能力和分类准确性。

## 2 高光谱偏振成像理论

### 2.1 高光谱成像原理

高光谱成像方式包括空间成像和光谱成像两种方式。

空间成像方式是从高光谱图像空间角度描述高光谱成像方式,主要分为摆扫型、推扫型、光谱扫描型和光谱-空间交叉扫描型4种<sup>[25]</sup>。摆扫型成像光谱仪是在被旋转电机驱动旋转过程中,通过扫描镜完成对地面分辨单元左右平行扫描成像,借助飞行

平台沿着与扫描方向垂直的方向不断向前运动,从而实现空间维成像。推扫型成像光谱仪是利用飞行平台上的面阵探测器,垂直于飞行运动方向向下,对地面分辨单元扫描成像,实现空间维成像。光谱扫描型成像光谱仪可分时获得各光谱波段图像,该成像过程主要采用干涉型光谱成像技术或可调谐滤光成像技术。光谱-空间交叉扫描型成像光谱仪主要基于滤光片转轮或渐变滤光片,成像效率不高。

光谱成像方式是从高光谱图像光谱角度描述高光谱成像方式,按原理可分为棱镜光栅色散型、干涉型、滤光片型、计算机层析型、二元光学元件型和三维成像型光谱成像技术<sup>[26]</sup>。虽然光谱成像方式的原理各不相同,但其功能都是将复色光分成单色光,实现单色光成像。通常将连续光谱成像的光谱分辨率达到波长 1/10 的光谱成像称为多光谱成像,达到波长 1/100 的光谱成像称为高光谱成像,达到波长 1/1000 的光谱成像称为超光谱成像。

## 2.2 偏振成像探测原理

斯托克斯矢量法是一种描述偏振光信息的方法,该方法利用 4 个不同偏振方向光强的时间平均值 $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 来描述光波的偏振态。为得到光强相对值,常将斯托克斯矢量做归一化处理<sup>[27]</sup>。例如,归一化后自然光的斯托克斯矢量为 $[1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ,水平线偏振光的斯托克斯矢量为 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ ,垂直线偏振光的斯托克斯矢量为 $[1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$ 。

为了方便研究自然条件下的目标偏振特性,通常将 $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 改写成 $[I \ Q \ U \ V]^T$ ,其中  $I$  表示非偏振光强度, $Q$  和  $U$  分别表示两个方向上的线偏振光强度, $V$  表示圆偏振光强度。用  $\alpha$  表示偏振器透过轴相对于参考坐标轴水平方向( $x$  轴)的夹角,则有

$$I_o(\alpha) = \frac{1}{2} [I + Q \cos(2\alpha) + U \sin(2\alpha)], \quad (1)$$

式中  $I_o(\alpha)$  为地物反射光透过偏振器后强度。偏振

度  $P$  和偏振角  $\theta$  可分别表示为

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I, \quad (2)$$

$$\theta = \arctan(U/Q) / 2. \quad (3)$$

当获取  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$  对应的目标强度信息时,则有

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3} [I_o(0^\circ) + I_o(60^\circ) + I_o(120^\circ)] \\ Q = \frac{2}{3} [2I_o(0^\circ) - I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)] \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}} [I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)] \end{cases} \quad (4)$$

由此可获得目标的  $I$ 、 $P$ 、 $Q$ 、 $U$  和  $\theta$  等偏振信息。

高光谱偏振成像的原理是建立在高光谱成像原理和偏振成像探测原理基础上的。高光谱偏振成像系统的设计思路:利用光学偏振器件将入射成像光谱仪的自然光变换为线偏振光,从而使获取的高光谱图像数据含有偏振信息。当改变偏振器件的偏振方向时,高光谱图像数据的偏振方向也将随之改变。通过解析不同偏振方向的高光谱图像,便可获取目标的光谱和偏振信息。

## 3 高光谱偏振成像系统设计

### 3.1 总体设计

#### 3.1.1 功能组成

图 1 为分孔径同时式高光谱偏振成像系统实物图和室外实验图。图 2(a) 为成像系统主视场位置图,由图 2(a) 可知,该系统由  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$  三个偏振方向的高光谱成像系统组成,分别位于六边形外框架相间隔的底板中间。为保证成像的同时性,三个偏振方向的高光谱成像系统相互独立、平行且结构设计相同。高光谱成像结构框图如图 2(b) 所示,成像系统主要由前置光学组件、起偏器、AOTF 分光组件、检偏器、会聚镜、CCD 相机、辅助模块和主机等组成。



图 1 分孔径同时式高光谱偏振成像系统的(a)实物图和(b)室外实验图

Fig. 1 (a) Physical map and (b) outdoor experiment map of hyperspectral polarization imaging system with multiple simultaneous apertures

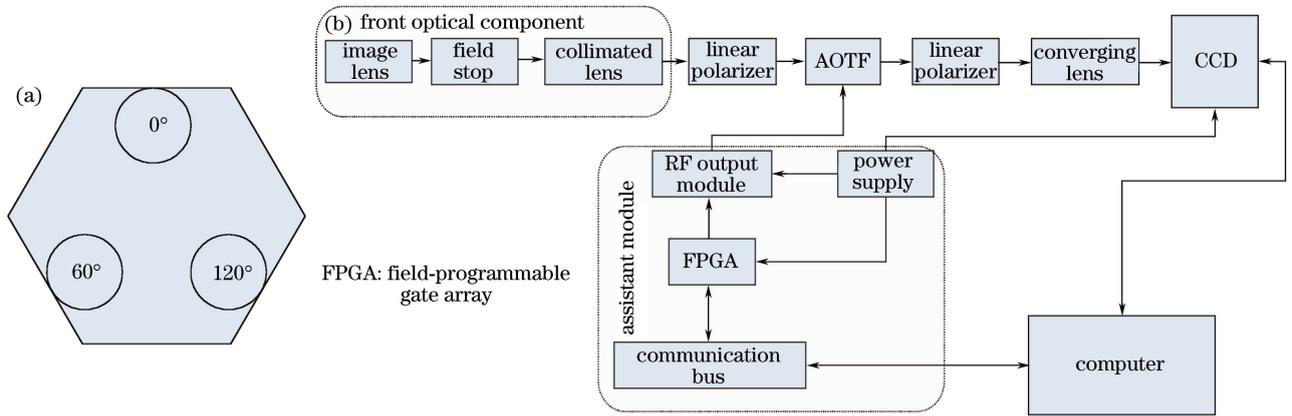


图 2 分孔径同时式高光谱偏振成像系统的(a)主视场位置和(b)设计方案框图

Fig. 2 (a) Main field location and (b) design scheme block diagram of hyperspectral polarization imaging system with multiple simultaneous apertures

### 3.1.2 设计指标

成像系统的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 成像系统的主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of imaging system

Item	Main parameter and property
Spectral range /nm	450-950
Spectral resolution /nm	2-8
Field angle /( $^{\circ}$ )	6
Polarization direction	$0^{\circ}$ , $60^{\circ}$ and $120^{\circ}$
Quantized value /bit	12
Frame frequency / ( $\text{frame}\cdot\text{s}^{-1}$ )	maximum 20
Detection range /km	superior to 1 (fine weather)
Imaging power /W	35.6
Standby power /W	6
Spectral switch elapsed time /ms	0.1
Focal length /mm	78
Clear aperture /mm $\times$ mm	$8\times 8$
Optical probe size / mm $\times$ mm $\times$ mm	$260\times 220\times 240$
Linear polarization range /nm	350-2300

### 3.1.3 工作过程

三个偏振方向的高光谱成像系统的结构相同,成像探测原理也相同,同时对同一地物进行探测,便可获得地物成像光谱偏振信息,图 3 为成像系统工作过程框图。

由图 3 可知,视场内地物反射光同时入射至三个不同偏振方向的高光谱成像系统,通过前置光学组件后,入射光束均匀准直进入起偏器。起偏器透振方向相对于参考坐标轴水平方向的夹角分别为  $0^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$  和  $120^{\circ}$ 。经过起偏器后,三束入射自然光变成三束线偏振光,入射光经过被施加相同射频信号的 AOTF 分光组件后,产生与射频信号相对应的波长为  $\lambda_i$  的衍射光和 0 级光。0 级光与入射线偏振光的偏振态相同,其他衍射光的偏振态与入射线偏振光相互正交。出射的混合光进入检偏器后,0 级光被消除,只剩下波长为  $\lambda_i$  的衍射光。出射后,衍射光经过会聚镜后以平行光束出射,在 CCD 相机中形成波长为  $\lambda_i$ 、偏振方向分别为  $0^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$  和  $120^{\circ}$  的图像。在整个工作过程中,不断改变施加在 AOTF 上的射频信号,便可实现波长的不断选择。最终,成像系统可同时获得整个 AOTF 工作波段内同一地物成像光谱的偏振信息。

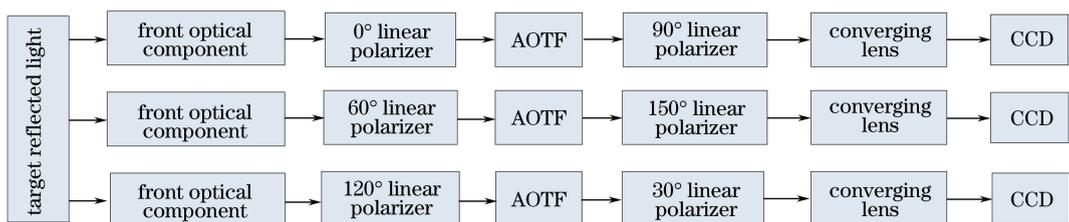


图 3 成像系统工作过程框图

Fig. 3 Workflow diagram of imaging system

### 3.2 光学设计

#### 3.2.1 光学系统组成

分孔径同时式高光谱偏振成像系统三个偏振方向的光学系统设计相同,以任一偏振方向为例说明其光学设计即可。如图 4 所示,为了提高成像系统的光学

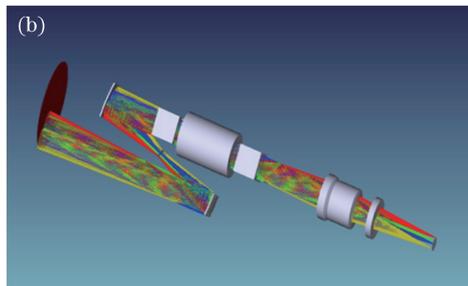
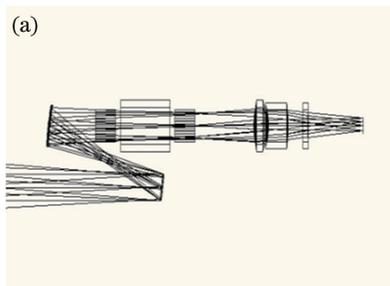


图 4 光学系统光路。(a)简易平面设计图;(b)立体设计图

Fig. 4 Light paths of optical system. (a) Simple plane design drawing; (b) three-dimensional design drawing

#### 3.2.2 AOTF 分光原理

AOTF 是一种根据声光作用原理制成的窄带可调谐滤光器。AOTF 的结构示意图如图 5(a)所示。当一束复色光通过一个高频振动光学晶体时,在射频驱动信号作用下,超声换能器激发出超声波。超声波的通过使得光学晶体形成运动的体光栅,促使波长为  $\lambda_i$  的单色光在晶体内部产生  $\pm 1$  级衍射光。 $\pm 1$  级衍射光的传播方向相对于原光线传播方向发生偏折,分别位于原方向两侧,而未发生衍射的复色光(0 级衍射光)沿原方向直接透射出晶体,由此便实现了分光<sup>[28]</sup>。当晶体振动频率改变时,衍射光波长也随之改变。由文献[24]可知,衍射光满足

$$\lambda_i = v_a \Delta n [\sin^2(2\theta_i) + \sin^4\theta_i]^{1/2} / f_a, \quad (5)$$

式中  $\lambda_i$  为衍射光波长,  $v_a$  为超声波波速,  $\theta_i$  为入射

效率,使得结构更紧凑,光学设计采用透反式。光学系统由成像镜、准直镜、起偏器、AOTF、检偏器和会聚镜组成,其中准直镜至会聚镜部分光路固定,成像镜可根据视场变换焦距。特别地,系统中成像镜后有共轭视场光阑,AOTF 则同时起到了共轭孔径光阑的作用。

光束与光学弹性晶体光轴的夹角,  $f_a$  为超声波驱动频率,  $\Delta n$  为入射复色光与衍射光的折射率差值<sup>[28]</sup>。由(5)式可知,AOTF 驱动频率与衍射波长是一一对应的,当超声波驱动频率改变时,衍射光波长也随之改变。

为了减小器件的体积,将两个换能器加工在一个晶体上。通过仿真软件优化,确定 AOTF 的超声波离轴角为  $9.6^\circ$ ,入射角为  $22.6^\circ$ 。系统中 3 个 AOTF 各有一个驱动器,每个驱动器独立驱动。当驱动器进行波段扫描时,各自通过集成开关组件选通高低工作频段,以此完成了  $450 \sim 950 \text{ nm}$  的扫描,其驱动频率为  $60 \sim 190 \text{ MHz}$ ,光谱分段点为  $0.6328 \mu\text{m}$ ,频率分段点为  $113 \text{ MHz}$ 。系统中 AOTF 实物如图 5(b)所示,其主要性能指标如表 2 所示。

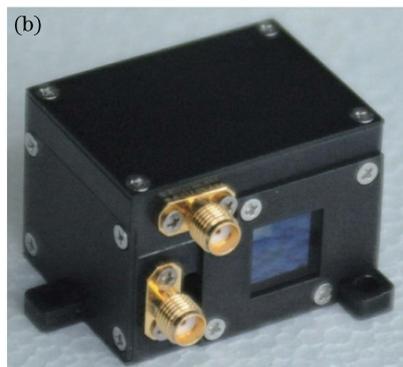
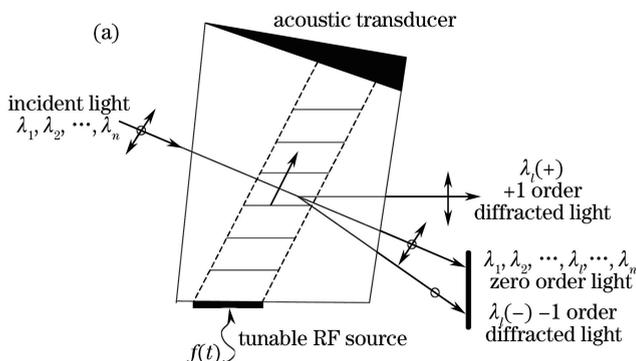


图 5 (a) AOTF 结构示意图;(b) AOTF 实物图

Fig. 5 (a) Structural diagram of AOTF; (b) physical map of AOTF

表 2 AOTF 的主要性能指标

Table 2 Main performance indexes of AOTF

Item	Main parameter and property
Acousto-optic material	TeO <sub>2</sub> crystal
Spectral range /nm	450-950
Spectral resolution /nm	2-8
Aperture angle / (°)	>3.0
Separation angle / (°)	>5.6
Clear aperture /mm	8×8
Diffraction efficiency	>40%
Drifting / (°)	0.006
Driving power /W	<2.0

### 3.2.3 系统光学特性矩阵分析

复色光经过 AOTF 分光组件之后, ±1 级衍射光因发生偏折而与 0 级光发生分离。但实际上, 一方面偏折分离角较小, 另一方面衍射光与 0 级光同时存在, 很难将衍射光与 0 级光完全分离, 利用分离角特性接收衍射光的成像系统的信噪比较低。正交双偏振法是在 AOTF 两侧设计一对相互正交的线偏振片, 通过偏振片来消除 0 级光的方法。由文献[29]可知, 正交双偏振法可有效消除 0 级光的影响, 提高光谱分辨率和成像信噪比。为此, 该系统采用了正交双偏振法。

借助穆勒矩阵理论来描述成像系统中光束偏振

态, 以任一偏振方向高光谱成像系统为示例, 则正交双偏振法 AOTF 分光系统的变换矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{p2} \cdot \mathbf{M}_{\text{AOTF}} \cdot \mathbf{M}_{p1}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{M}_{\text{AOTF}}$  表示 AOTF 的穆勒矩阵,  $\mathbf{M}_{p1}$  和  $\mathbf{M}_{p2}$  分别表示起偏器和检偏器的穆勒矩阵。入射 AOTF 光束偏振态发生的变换, 等效于光束先后入射一个线偏振片和一个快轴与其透光轴方向成  $\pi/4$  夹角的  $1/2$  波片<sup>[29]</sup>。假设 AOTF 的衍射效率为  $\eta$ , 则有

$$\mathbf{M}_{\text{AOTF}} = \eta \mathbf{M}_{1/2} \cdot \mathbf{M}_p + (1 - \eta) \mathbf{M}_p, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{M}_p$  表示 AOTF 等效线偏振片的穆勒矩阵,  $\mathbf{M}_{1/2}$  表示 AOTF 等效  $1/2$  波片的穆勒矩阵。假设  $\varphi$  为透振方向相对选定坐标轴  $x$  轴的夹角, 则线偏振片的穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_p =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) & 0 \\ \cos(2\varphi) & \cos^2(2\varphi) & \sin(2\varphi)\cos(2\varphi) & 0 \\ \sin(2\varphi) & \cos(2\varphi)\sin(2\varphi) & \sin^2(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

$1/2$  波片的穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_{1/2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(4\varphi) & -\sin(4\varphi) & 0 \\ 0 & -\sin(4\varphi) & \cos(4\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

光学特性矩阵  $\mathbf{M}_{\text{AOTF}}$  为

$$\mathbf{M}_{\text{AOTF}} = \eta \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(4\varphi) & -\sin(4\varphi) & 0 \\ 0 & -\sin(4\varphi) & \cos(4\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) & 0 \\ \cos(2\varphi) & \cos^2(2\varphi) & \sin(2\varphi)\cos(2\varphi) & 0 \\ \sin(2\varphi) & \cos(2\varphi)\sin(2\varphi) & \sin^2(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + (1 - \eta) \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) & 0 \\ \cos(2\varphi) & \cos^2(2\varphi) & \sin(2\varphi)\cos(2\varphi) & 0 \\ \sin(2\varphi) & \cos(2\varphi)\sin(2\varphi) & \sin^2(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中  $\varphi$  取决于入射光束振动方向与  $x$  轴的夹角, 当  $\varphi = 0^\circ$ , 即入射光束为水平线偏振光时, 有

$$\mathbf{M}_{\text{AOTF}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 2\eta \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 2(1 - \eta) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

当  $\varphi = 90^\circ$ , 即入射光束为垂直线偏振光时, 有

$$\mathbf{M}_{\text{AOTF}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 2\eta \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 2(1 - \eta) \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由(11)、(12)式可知, 不论入射光束是水平线偏振光还是垂直线偏振光, 出射 0 级光保持偏振方向不变, 出射衍射光与入射光束相互正交。

假设起偏器透振方向与  $x$  轴的夹角为  $0^\circ$ , 检偏器透振方向与  $x$  轴的夹角为  $90^\circ$ , 则入射的自然光通过起偏器后变成水平线偏振光, 水平线偏振光经过 AOTF 分光系统后, 产生波长为  $\lambda_l$  的衍射光和 0 级光。衍射光为垂直线偏振光, 0 级光为水平线偏振光, 衍射光和 0 级光再同时通过检偏器后, 0 级光被完全消除, 出射光束只有波长为  $\lambda_l$  的单色衍射光。因此, 正交双偏振 AOTF 分光系统可有效消除 0 级光, 同时完整保留单波段衍射光。

### 3.2.4 光学设计结果

分孔径同时式高光谱偏振成像系统采用 INFINITY 公司的 CCD 相机, 其与光学设计相关的参数为: 扫描波段范围为  $450 \sim 950$  nm, 分辨率为  $1616 \text{ pixel} \times 1216 \text{ pixel}$ , CCD 尺寸为  $1/1.8''$ , 输出格式为 Raw。

分孔径同时式高光谱偏振成像系统中成像镜的透过率为 0.98, 准直镜的透过率为 0.98, 起偏器和检偏器的透过率为 0.99, 会聚镜的透过率为 0.884736, AOTF 的最低衍射效率为 0.4。当 AOTF 衍射效率最小时, 计算得到的光学透过率为 0.1666, 即高光谱

偏振成像系统三个偏振方向的最小透过率均为 0.1666。CCD 单色模式量子效率如图 6(a) 所示, 由图可知该成像系统在近红外波段附近的量子效率较低。在近红外波段, AOTF 自身的分辨率下降, 带宽变大, 对量子信号数量有一定的提高作用, 可防止出现近红外成像信噪比过低的情况。

当探测器单元尺寸  $\delta = 7.4 \mu\text{m}$  时, 光学调制传递函数(MTF)的最大空间频率  $f_{\text{FN}}$  (即 Nyquist 采样频率) 为  $66 \text{ lp/mm}$ 。不含 AOTF 时, 不同焦距和视场对应的系统 MTF 值如图 6(b) 所示 (图中 TS 表示实验设置值, DEG 表示度), 可知在  $450 \sim 950$  nm 光谱范围内, 光谱仪光学系统的空间维在 Nyquist 频率处的 MTF 最低不小于 0.3。增加 AOTF 分光组件后, 对应的系统 MTF 值会下降, 最低不小于 0.2。一般地, 如果对成像质量的要求不高, MTF 值大于 0.2 便可满足 AOTF 的使用需求, 不会因受 AOTF 空间分辨率的限制而出现成像模糊的现象。

在完成光学设计和装配后, 还需要在实验室对成像系统开展光谱定标、辐射定标和偏振定标等工作, 以确保获得准确的高光谱偏振图像数据。

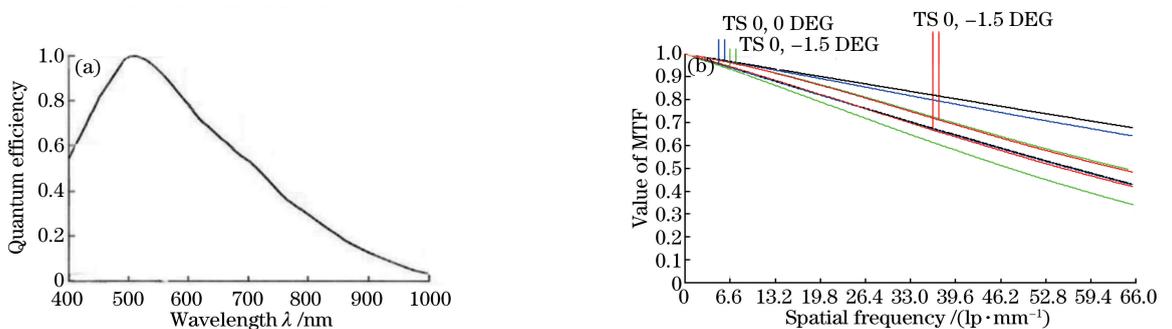


图 6 光学设计结果。(a) CCD 量子效率;(b) 光学 MTF

Fig. 6 Optical design results. (a) CCD quantum efficiency; (b) optical MTF

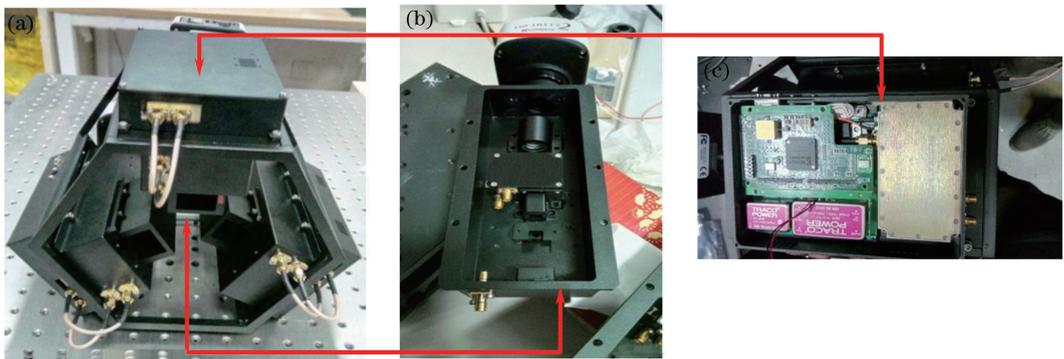


图 7 分孔径同时式高光谱偏振成像系统机械设计。(a) 整体构型图;(b) 光学腔体与 CCD 相机;(c) 电子学控制盒

Fig. 7 Mechanical design of hyperspectral polarization imaging system with multiple simultaneous apertures.

(a) Overall configuration diagram; (b) optical cavity and CCD camera; (c) electronics control box

### 3.3 机械设计

从机械设计角度看,成像系统由电子学控制盒、光学腔体和 CCD 相机三部分组成,其整体构型如图 7(a)所示。图 7(b)所示为光学腔体与 CCD 相机,两者通过紧固环连接在一起,通过更换成像镜,可实现不同焦距和成像视场的变换。图 7(c)所示为电子学控制盒,为可拆卸模块,可进行分体式安装,电子学控制盒中包含电源模块、主控与射频驱动模块、射频功放,通过两个 SMA(Sub-Miniature-A)端口与光学腔体连接,一对 DB-9 接口分别为供电与 RS-422 通信端口、相机同步端口。

### 3.4 电子学设计和软件设计

根据成像系统的设计要求,电子学设计主要实现以下功能:1) 实现指令执行、数据打包与发送功能;2) 实现二次电源的转换,为成像系统的各个模块供电;3) 对 AOTF 光学晶体进行功率驱动;4) 驱动 CCD 探测

器,获取相应的成像光谱偏振图像信息并处理信息。

软件设计主要包括上位机软件和下位机软件设计。上位机软件是利用奇趣科技开发的 Qt 软件编译完成,用户通过界面应用程序可实现对 AOTF 和 CCD 的驱动控制。下位机软件是利用 Verilog 硬件语言编写,实现解释执行上位机指令、采集探测器温度及功放状态、采集数据、AOTF 驱动配置、上位机和下位机间的通信等。

## 4 高光谱偏振成像实验

### 4.1 实验过程及数据处理

伪装网是军事上常用的防护器材,是一种通过减小目标和环境差异来提高军事目标安全性的有效手段。伪装网的伪装效果取决于是否容易被误判为与背景是同类地物。实验对象选用的伪装网样品如图 8 所示。



图 8 实验用 3 种伪装网样品。(a)伪装网 1;(b)伪装网 2;(c)伪装网 3

Fig. 8 Three kinds of camouflage net samples used in experiment. (a) Camouflage net 1; (b) camouflage net 2; (c) camouflage net 3

利用分孔径同时式高光谱偏振成像系统对同一环境背景中的三种伪装网进行成像探测,系统固定在水平俯仰可以调节的三角架上,架设于某楼 4 楼飘窗上方,距离目标中心约 60 m。将图 8 所示的伪装网设置在同一常青灌木丛中,分别在晴天、多云、阴天条件下进行实验,选择光谱工作波段为 450~945 nm,光谱分辨率为 5 nm,CCD 相机曝光时间为 50 ms,增益为 2 dB。成像设计图如图 9 所示,调节观测角  $r=60^\circ$ ,方位角  $\varphi=180^\circ$ 。根据实验对象和实验设计,并从人眼视觉效果判断,可得伪装网 1 比伪装网 2、3 融入灌木丛背景的效果要差。

为便于分析实验结果,对获取的高光谱偏振图像数据进行处理,处理流程图如图 10 所示。首先,统一以  $60^\circ$  偏振方向的高光谱图像为基准图像,并以同波段  $0^\circ$  和  $120^\circ$  偏振方向的高光谱图像为待配准图像,逐个波段进行配准处理。利用(2)~(4)式求解各波段各偏振参量图像。

图 11 所示为获取的 2017-09-07 14:02 晴天条

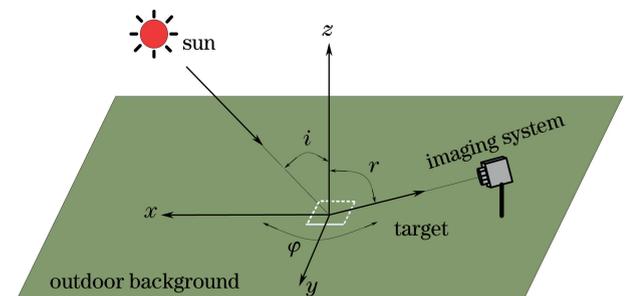


图 9 实验设计图

Fig. 9 Diagram of experimental design

件下的实验图像。图 11(a)为手机近距离拍摄的彩色强度图像,由图可知伪装网 3 融入背景较好,易被误判为背景。图 11(b)~(d)分别为经 550, 640, 800 nm 波段分孔径同时式高光谱偏振成像系统采集处理后的合成强度图像。由文献[30]可知,在可见光-近红外波段内,标准叶绿素反射率光谱曲线在 550 nm 波段处是波峰,在 640 nm 波段处是波谷,在 780~1000 nm 波段范围内的反射率保持在

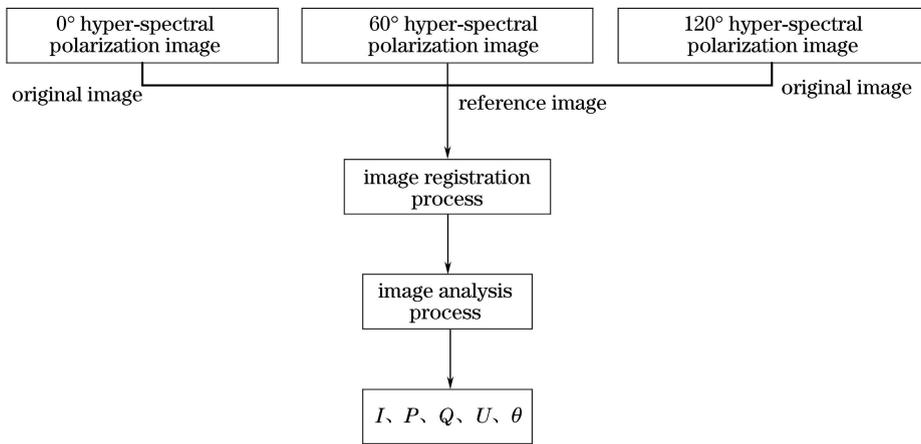


图 10 高光谱偏振图像数据处理流程图

Fig. 10 Flow chart of hyperspectral polarization image data processing

较高的水平,解释了图 11(c)自然背景较暗而图 11(d)自然背景较亮的现象。由图 11(d)可知,伪装网 1,2,3 融入背景的效果都较差。图 11(e)~(g)分别为三个波段处对应的偏振度图像。相对于人造目标,自然背景的表面较粗糙,散射较强,偏振度较低,偏振特性表现得较弱<sup>[31]</sup>。从偏振度图像可以看出,自然背景与伪装网 3 的偏振度较低,表明两者的表面较为粗糙,散射较强。

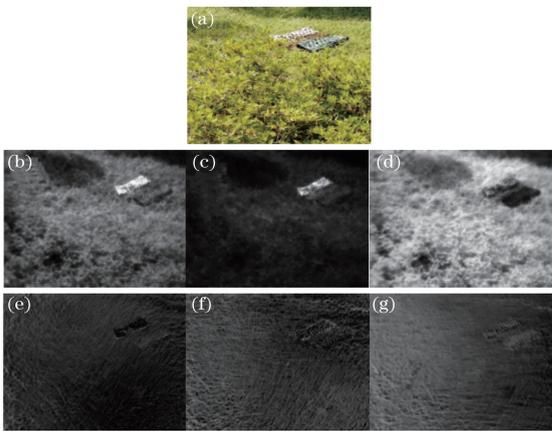


图 11 自然成像与高光谱偏振成像的图像对比。

(a) 自然成像图像;(b) 550 nm,(c) 640 nm 和 (d) 800 nm 波段强度图;(e) 550 nm,(f) 640 nm 和 (g) 800 nm 波段偏振度图

Fig. 11 Comparison of images of natural imaging and hyperspectral polarization imaging. (a) Image of natural imaging; intensity images at (b) 550 nm, (c) 640 nm and (d) 800 nm; polarization images at (e) 550 nm, (f) 640 nm and (g) 800 nm

#### 4.2 实验结果与分析

地物的反射率随波长变化的曲线称为反射光谱,其反映了地物的本质信息。成像系统获得的偏

振参量辐射亮度值是成像系统接收太阳辐射与大气、地物之间复杂作用的结果<sup>[26]</sup>。为了得到地物反射光谱,通常将辐射亮度值转换为反射率,这一过程称为光谱反演。光谱反演的方法较多,内部平均法是其中较为经典的一种方法,该方法仅根据图像数据本身进行光谱反演,没有利用其他先验辅助数据。

内部平均法是用图像数值(DN)除以整幅图像的平均值,得到地物的相对反射率  $R_\lambda$ <sup>[32]</sup>,其表达式为

$$R_\lambda = F_{DN,\lambda} / M_\lambda, \quad (13)$$

式中  $F_{DN,\lambda}$  表示辐射亮度值,  $M_\lambda$  表示图像平均辐射亮度值。随机选取 4 种地物矩形小区域进行偏振参量计算,利用内部平均法计算不同地物的合成强度和偏振度反射率的光谱曲线,对 2017-09-07 14:02 晴天条件下采集的数据进行处理,结果如图 12 所示。

由图 12 不难发现:1) 同类地物的偏振反射率随着波长的变化而变化;2) 利用单个波段、单个偏振参量对地物分类时,容易将伪装网与灌木丛错分为同类地物。3) 由图 12(a)可知,伪装网 1 的光谱曲线整体走势与灌木丛的相比,相似度较小,印证了伪装网 1 融入背景效果差的判断。4) 由图 12(b)可知,4 类地物偏振度反射率光谱曲线纵横交错,从整条曲线走势上看,不同地物间的差异较大,相似度较小。

为了描述地物间偏振参量反射率光谱曲线的走势相似度大小,通过计算曲线之间的相关系数来定量分析,其计算表达式为

$$\text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X)\text{var}(Y)}}, \quad (14)$$

式中  $\text{cov}(X, Y)$  表示  $X$  与  $Y$  的协方差,  $\text{var}(X)$  为  $X$  的方差,  $\text{var}(Y)$  为  $Y$  的方差。为了使表格简明化,用 A1 表示伪装网 1 与灌木丛, A2 表示伪装网 2 与

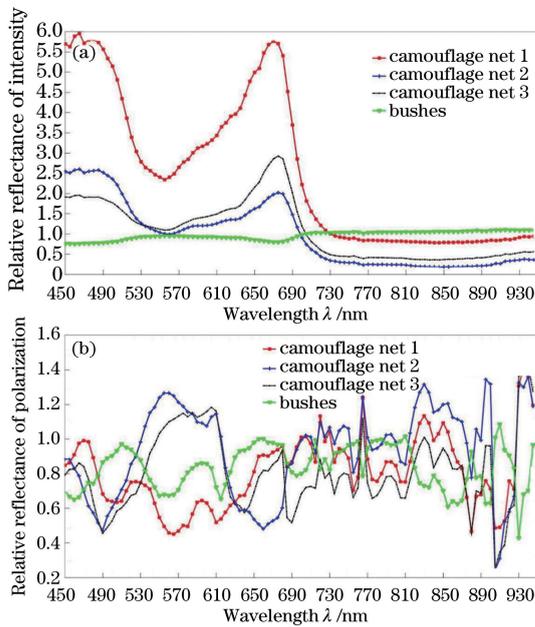


图 12 不同地物相对反射率曲线。(a)强度相对反射率随波长变化;(b)偏振度相对反射率随波长变化

Fig. 12 Relative reflectance curves of different surface objects. (a) Variation in relative reflectance of intensity with wavelength; (b) variation in relative reflectance of polarization with wavelength

灌木丛, A3 表示伪装网 3 与灌木丛, B1 表示强度相对反射率, B2 表示偏振度相对反射率, 对图 12 所示

表 4 不同天气条件下的实验结果

Table 4 Experimental results under different weather conditions

Time	Weather	Item	A1	A2	A3
2017-09-07 15:02	Sunny	B1	-0.9776	-0.9573	-0.9403
	Sunny	B2	-0.2609	-0.3195	-0.1736
2017-09-07 16:01	Sunny	B1	-0.8880	-0.8395	-0.7954
	Sunny	B2	-0.2594	-0.1068	-0.0951
2017-09-07 17:01	Sunny	B1	-0.8682	-0.3515	-0.2819
	Sunny	B2	-0.1782	-0.0324	-0.0976
2017-09-05 14:05	Cloudy	B1	-0.8726	-0.1826	0.1031
	Cloudy	B2	-0.1058	-0.0872	-0.1211
2017-09-01 14:00	Overcast	B1	-0.7848	-0.1259	0.1632
	Overcast	B2	-0.0325	-0.0146	-0.0982

表 4 给出了晴天条件下不同时间段的测量结果, 由表 3 和表 4 中数据可知: 1) 三种伪装网与灌木丛的组分、表面粗糙度不同, 不属于同类地物; 2) 在晴天条件下, 受太阳光照强度、入射角度等的影响, 地物偏振特性会有所变化, 致使高光谱偏振图像有所变化, 但仍可实现对三种伪装网与灌木丛的准确分类; 3) 在多云或阴天条件下, 将偏振信息和光谱信息结合起来也能进行准确地分类。

的光谱曲线相关系数的计算结果如表 3 所示。

表 3 不同地物偏振参量反射光谱的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of reflectance spectra of polarization parameters among different surface objects

Parameter	Condition		
	A1	A2	A3
B1	-0.9883	-0.9043	-0.8774
B2	-0.2859	-0.6094	-0.2676

探测器在同一时刻、同一视角获取同一环境场景中同类地物的成像光谱偏振信息, 解析得到的偏振参量曲线相似度很高。如果两地物偏振参量曲线间的正相关系数较大, 则表明两地物属于同类的可能性较大; 如果相关系数较小, 则两地物属于同类的可能性较小; 如果相关系数为负值, 则可判断两地物不属于同类地物。表 4 数据表明: 1) 从强度相对反射率分析, 伪装网 1~3 与灌木丛呈负相关, 它们不属于同类; 2) 从偏振度相对反射率分析, 伪装网 1~3 与灌木丛也呈负相关, 可以判断伪装网与灌木丛不属于同类地物。

为了验证结果的准确性, 在晴天、阴天和多云等不同天气条件下, 利用分孔径同时式高光谱偏振成像系统, 在同一视角、同一场景中对 3 种伪装网和灌木丛进行地物分类实验, 利用同样的数据处理方法得到的结果如表 4 所示。

## 5 结 论

论述分孔径同时式高光谱偏振成像系统设计, 并利用该成像系统对三种伪装网和灌木丛进行了成像实验, 得出如下结论:

1) 将光谱信息和偏振信息结合起来对目标进行检测分类, 可有效避免单一信息带来的误判, 提高系统的目标检测能力和分类准确性。

2) 基于正交双偏振 AOTF 分光设计的分孔径同

时式高光谱偏振成像系统,可实现多路同时成像并同时获取静态和动态目标的光谱信息和偏振信息。

### 参 考 文 献

- [1] Schau H C, Jennette B D. Hyperspectral requirements for detection of trace explosives agents[C]. SPIE, 2006, 6233: 62331Y.
- [2] Fu L T, Deng H, Liu C H. Novel fast real-time target detection and classification algorithms for hyperspectral imagery[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0230002.  
付立婷, 邓河, 刘春红. 新型高光谱图像快速实时目标检测与分类方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0230002.
- [3] Hou Y N. Research on mineral spectral feature blind extraction and target detection in hyper-spectral image[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.  
侯亚妮. 高光谱矿物波谱特征盲取及目标检测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [4] Guo T, Hua W S, Liu X, *et al.* Comprehensive evaluation of optical camouflage effect based on hyperspectra[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101002.  
郭彤, 华文深, 刘恂, 等. 一种基于高光谱的光学伪装效果综合评价方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101002.
- [5] Liu X, Xue M G, Wang F, *et al.* Algorithm for camouflage target detection based on polarization imaging in woodland background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2291-2294.  
刘晓, 薛模根, 王峰, 等. 林地背景下伪装目标偏振成像检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2291-2294.
- [6] Sun X M, Wang H H, Shen J, *et al.* Study on polarized light scattering by aerosol over ocean[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 040101.  
孙贤明, 王海华, 申晋, 等. 海洋背景下气溶胶的偏振光散射特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 040101.
- [7] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization [C]// *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001: 7176882.
- [8] Liang J, Ju H J, Zhang W F, *et al.* Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0400001.
- 梁健, 巨海娟, 张文飞, 等. 偏振光学成像去雾技术综述[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0400001.
- [9] Pan B L, Wang X H, Zhu J, *et al.* Polarized hyperspectral inversion model of Chlorophyll II in the lake water[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(6): 1665-1669.  
潘邦龙, 王先华, 朱进, 等. 湖泊水体叶绿素偏振高光谱反演模型研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(6): 1665-1669.
- [10] Ye S, Deng D F, Sun X B, *et al.* Experimental study on soil moisture remote sensing based on polarization spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1434-1439.  
叶松, 邓东锋, 孙晓兵, 等. 偏振光谱的土壤湿度遥感方法实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5): 1434-1439.
- [11] Yu X, Yang Y, Jiang X, *et al.* Recognition of camouflage targets by polarization spectral imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(4): 537-541.  
于洵, 杨焯, 姜旭, 等. 基于偏振光谱成像的目标识别方法研究[J]. *应用光学*, 2016, 37(4): 537-541.
- [12] Glenar D A, Hillman J J, Saif B N, *et al.* POLARIS-II: An acousto-optic imaging spectropolarimeter for ground-based astronomy [C]. *Polarization and Remote Sensing*. International Society for Optics and Photonics, 1992, 1747: 92-102.
- [13] Duggin M J, Loe R S. Algorithms for target discrimination and contrast enhancement using narrowband polarimetric image data [C]. *Polarization Analysis and Measurement IV*. International Society for Optics and Photonics, 2002, 4481: 247-257.
- [14] Chen H B, Fan X H, Han Z G. A review on remote sensing from POLDER multispectral multidirectional and polarized measurements [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 21(2): 83-92.  
陈洪滨, 范学花, 韩志刚. POLDER 多角度、多通道偏振探测器对地遥感观测进展[J]. *遥感技术与应用*, 2006, 21(2): 83-92.
- [15] Homma K, Shingu H, Yamamoto H, *et al.* Application of an imaging spectropolarimeter to agro-environmental sciences [C]. SPIE, 2004, 5234: 639-647.
- [16] Sun X B, Hong J, Qiao Y L. The study of method for feature extraction based on angle of polarization parameter image [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(2): 256-260.  
孙晓兵, 洪津, 乔延利. 一种基于偏振角参数图像的特征提取方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20

- (2): 256-260.
- [17] Zhao Y Q, Gong P, Pan Q. Object detection by spectropolarimetric imagery fusion [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 3337-3345.
- [18] Mu T K, Zhang C M, Li Q W, *et al.* The polarization-difference interference imaging spectrometer-II. optical design and analysis [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11): 110705.  
穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 等. 差分偏振干涉成像光谱仪 II. 光学设计与分析 [J]. 物理学报, 2014, 63(11): 110705.
- [19] Zhang Y, Zhao H J, Cheng X, *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, 赵慧杰, 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.
- [20] Zhao H B, Li H, Lin X L, *et al.* Research on spectral polarization imaging system based on static modulation [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(4): 1129-1133.  
赵海博, 李欢, 林栩凌, 等. 静态调制的光谱偏振成像系统 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 1129-1133.
- [21] Zhang R, Chen Y H, Li S W, *et al.* The research of spectral polarization imaging detection system based dual-AOTFs [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1549-1553.  
张瑞, 陈友华, 李世伟, 等. 基于双 AOTF 的新型成像光谱偏振探测系统 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1549-1553.
- [22] Bai C X, Li J X, Zhou J Q, *et al.* Interferometric hyperspectral polarization imaging method based on micro-polarization array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0138003.  
柏财勋, 李建欣, 周建强, 等. 基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像方法 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0138003.
- [23] Wang J C, Zhao D P, Du X H, *et al.* Design and experiment of hyper-spectral polarization imaging system based on AOTF [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0138002.  
汪家春, 赵大鹏, 杜香华, 等. 基于 AOTF 的高光谱偏振成像系统设计 with 实验 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0138002.
- [24] Zhao H J, Zhou P W, Zhang Y, *et al.* Acousto-optic tunable filter based spectral imaging technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 189-193.  
赵慧杰, 周鹏威, 张颖, 等. 声光可调谐滤波器的成像光谱技术 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 189-193.
- [25] Gross H N, Schott J R. Application of spectral mixture analysis and image fusion techniques for image sharpening [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 63(2): 85-94.
- [26] Tong Q X, Zhang B, Zheng L F. Hyperspectral remote sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 51-59.  
童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 51-59.
- [27] Liao Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 51-57.  
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 51-57.
- [28] Li K W, Wang Z B, Yang C Q, *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, 杨常青, 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.
- [29] Fan G F. Research on the characteristic matrix and sidelobe of acousto-optical tunable filter [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.  
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.
- [30] He Z J, Shi J M, Wang J C, *et al.* Recognition of camouflaged target by hyperspectral imaging system based on acousto-optic tunable filter [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(7): 796-800.  
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): 796-800.
- [31] Zhao R, Gu G H, Yang W. Visible light image enhancement based on polarization imaging [J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 227-231.  
赵蓉, 顾国华, 杨蔚. 基于偏振成像的可见光图像增强 [J]. 激光技术, 2016, 40(2): 227-231.
- [32] Zhao Y Q, Pan Q, Cheng Y M. Imaging spectropolarimetric remote sensing and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 84-85.  
赵永强, 潘泉, 程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 84-85.