

荒漠背景下典型伪装目标的高光谱偏振特性

王小龙^{1,2}, 王峰^{1,2}, 刘晓^{1,2}, 曹宇剑¹, 俞锦涛¹

¹陆军炮兵防空兵学院, 安徽 合肥 230031;

²偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 基于偏振探测原理和反射光的偏振特性理论, 利用一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统, 并以荒漠伪装网、荒漠伪装板、坦克缩比目标和悍马车缩比目标 4 类荒漠背景下典型伪装目标为对象, 研究了不同光照强度和不同观测角度条件下目标的高光谱偏振特性, 给出了荒漠背景下伪装目标的典型探测波段区间, 为更好地实现荒漠背景下伪装目标检测提供了科学指导。

关键词 成像系统; 伪装目标; 高光谱偏振; 荒漠背景

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051101

Hyperspectral Polarization Characteristics of Typical Camouflage Target Under Desert Background

Wang Xiaolong^{1,2}, Wang Feng^{1,2}, Liu Xiao^{1,2}, Cao Yujian¹, Yu Jintao¹

¹Army Artillery and Air Defense Academy, Hefei, Anhui 230031, China;

²Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Based on the polarization detection principle and the polarization characteristics theory of reflected light, a divided aperture simultaneous type hyperspectral polarization imaging system is used to analyze hyperspectral polarization characteristics of objects under different illumination intensities and different observation angles. Taking desert camouflage net, desert camouflage board, tank shrinkage ratio target and hummer shrinkage ratio target act as the objects, which adapts to the desert background. We give a typical detection wavelength selection range of camouflage target under desert background. The analysis results provide a scientific guidance to achieve better camouflage target detection in desert background.

Key words imaging systems; camouflage target; hyperspectral polarization; desert background

OCIS codes 110.4234; 110.5405; 160.3130

1 引言

荒漠中地表水极端缺乏, 物理风化严重, 地面温差较大。按土壤组成物分类, 荒漠可分为砾漠、岩漠、泥漠和沙漠。我国是世界上受荒漠化最为严重的国家之一, 截至 2014 年, 荒漠化面积已达到 261.16 万平方千米。在我国, 荒漠主要分布在西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏和内蒙古等地区^[1]。

荒漠地区作战是一种在特殊环境下的作战样式。目前, 我军高层非常重视荒漠地区作战训练, 因

此研究荒漠地区伪装防护的目标检测技术具有重要意义。自 20 世纪 90 年代, 针对目标与背景间的光谱或偏振信息的差异, 研究人员提出了荒漠背景下伪装目标的检测技术。Eismann 等^[2-4]通过获取荒漠背景下伪装目标与背景的光谱数据, 并利用相应的数据处理方法, 实现了目标检测。Klick 等^[5]通过处理目标的中长波红外图像序列, 实现了荒漠背景下的点目标检测。基于荒漠背景下伪装目标的高光谱图像, Mayer 等^[6-7]提出了不同的目标检测算法。Ding 等^[8]提出多光谱图像融合算法来检测荒漠背

收稿日期: 2017-10-24; 收到修改稿日期: 2017-11-21

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

景下伪装目标。Egan 等^[9]通过获取荒漠型士兵军服和军车涂层的偏振及强度信息,分析了目标与背景的对比如差异性,从而实现了目标检测。薛模根等^[10-11]基于荒漠背景下的伪装目标偏振图像,提出了不同的目标检测方法。

韩兆迎等^[12-14]利用地物光谱信息的差异,判断目标的组分和真伪等信息;但当目标与背景光谱近似时,则易发生误判。目标与背景的偏振信息存在差异,则利用偏振信息反演出的地物轮廓、表面粗糙度等表面属性也存在不同,由此可以实现目标检测。但当识别人造假目标和人造真目标时,则存在不足。

高光谱偏振成像获取目标的空间、强度、光谱和偏振等多重信息,为实现目标检测提供更加丰富的信息支撑,进而提高检测的准确性^[15-17]。然而,目前尚无利用高光谱偏振成像技术实现荒漠背景下伪装目标检测方面的报道。鉴于荒漠中最常用的伪装防护手段是荒漠迷彩服、荒漠伪装网、装甲伪装涂层等,本文利用一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统,研究了不同光照强度和不同观测角度条件下,荒漠伪装网、荒漠伪装板、坦克缩比目标和悍马车缩比目标等荒漠背景下典型伪装目标的高光谱偏振特性,为更好地实现荒漠背景下伪装目标的检测提供指导。

2 基本理论

2.1 偏振探测原理

用斯托克斯参量 $[I \ Q \ U \ V]^T$ 来表示偏振光的偏振信息,其中 I 表示非偏振光强度, Q 表示 0° 与 90° 方向线偏振强度之差, U 表示 45° 与 135° 方向线偏振强度之差, V 表示圆偏振光强度。当利用探测

器获取目标 0° 、 60° 和 120° 3 个偏振方向的目标强度信息后,则有

$$\begin{cases} I_i = \frac{2}{3} [I_o(0^\circ) + I_o(60^\circ) + I_o(120^\circ)], \\ Q_i = \frac{2}{3} [2I_o(0^\circ) - I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)], \\ U_i = \frac{2}{\sqrt{3}} [I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)], \\ P = \frac{\sqrt{Q_i^2 + U_i^2}}{I_i}, \end{cases} \quad (1)$$

式中下标 i 表示入射探测器目标辐射,下标 o 表示探测器接收目标辐射, P 为目标偏振度。由此可知,获得了目标 0° 、 60° 和 120° 3 个偏振方向的辐射强度信息后,则可解析得到目标的 I 、 P 、 Q 、 U 等偏振信息。

2.2 反射光的偏振特性

图 1 所示的介质 1、2 均为透明、各向同性的均匀介质,光波由介质 1 入射到介质 2,反射光和折射光保持与入射光在同一平面内,且入射角与反射角相等。

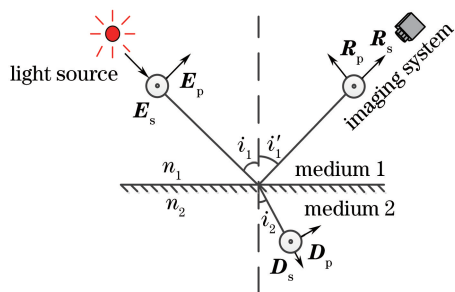


图 1 反射光的偏振特性模型

Fig. 1 Model of reflected light polarization characteristics
利用菲涅尔方程来描述入射光、反射光和折射光之间振幅、相位及偏振态之间的变换关系,则有^[18]

$$\begin{cases} \left| \begin{array}{l} \mathbf{R}_s \\ \mathbf{E}_s \end{array} \right| = \frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} = -\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)} \\ \left| \begin{array}{l} \mathbf{R}_p \\ \mathbf{E}_p \end{array} \right| = \frac{n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} \\ \left| \begin{array}{l} \mathbf{D}_s \\ \mathbf{E}_s \end{array} \right| = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} = \frac{2\cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_1 + i_2)} \\ \left| \begin{array}{l} \mathbf{D}_p \\ \mathbf{E}_p \end{array} \right| = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} = \frac{2\cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{E}_s 、 \mathbf{E}_p 分别表示入射光与入射平面垂直和平行的电矢量, \mathbf{R}_s 、 \mathbf{R}_p 分别表示反射光与入射平面垂直和平行的电矢量, \mathbf{D}_s 、 \mathbf{D}_p 分别表示折射光与入射

平面垂直和平行的电矢量, i_1 为入射角, i_2 为折射角。自然光可看作两个振幅相等、振动相互垂直、非相干的线偏振光的叠加。因此,当入射光为自然光

时,则有

$$|\mathbf{E}_s| = |\mathbf{E}_p|. \quad (3)$$

由(2)式可知,反射光的 s、p 分量仅与入射光的 s、p 分量相关。因为入射自然光的分量 \mathbf{E}_s 和 \mathbf{E}_p 的频率不一定相等,相位差不固定,所以反射光的分量 \mathbf{R}_s 和 \mathbf{R}_p 的频率也不一定相等,相位差也不固定,叠加后为部分偏振光或自然光。根据入射角的不同,分以下几种情形进行分析:1) 当 i_1 取一般值,斜入射时,由(2)、(3)式可得, $|\mathbf{R}_s| \neq |\mathbf{R}_p|$, 则表明反射光 s 分量与 p 分量的振幅不相等,叠加后为部分偏振光;2) 当 i_1 取布儒斯特角时, $i_1 + i_2 = 90^\circ$, 由(2)

式可得, $\mathbf{R}_s \neq 0$ 且 $\mathbf{R}_p = 0$, 则反射光 s 分量与 p 分量叠加后为线偏振光。

3 实验概述

3.1 分孔径同时式高光谱偏振成像系统

实验数据由一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统获取,图2为该成像系统的实物图和主视场位置图。该成像系统由三套相互独立且平行、结构设计完全相同、偏振方向分别为 0° 、 60° 和 120° 的高光谱成像系统组合而成。以任一偏振方向的高光谱成像系统为例,其设计框图如图3所示。

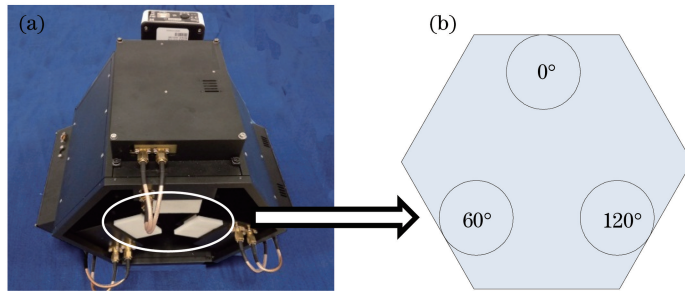


图2 分孔径同时式高光谱偏振成像系统。(a)实物图;(b)主视场位置图

Fig. 2 Imaging system of divided aperture simultaneous type hypersepectral polarization.

(a) Physical map; (b) position of main filed of view

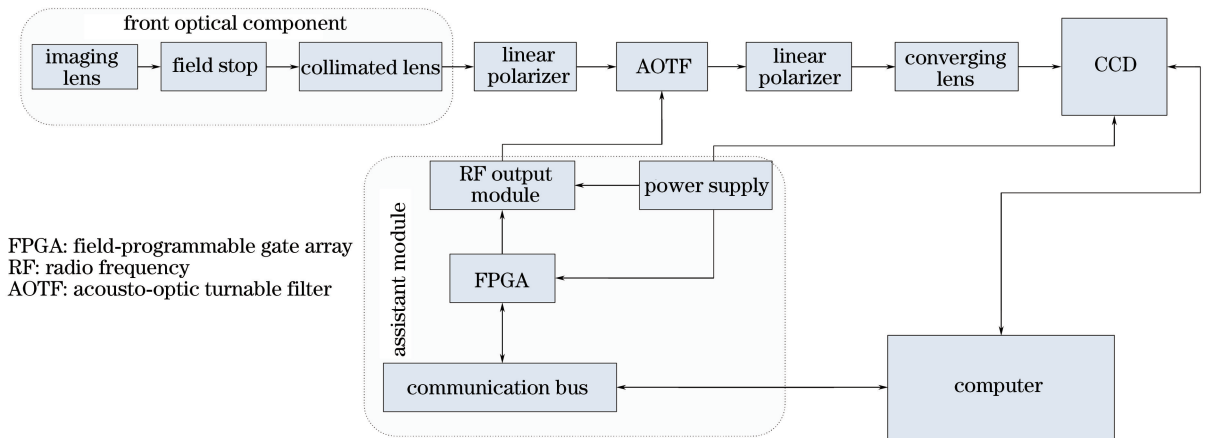


图3 分孔径同时式高光谱偏振成像系统设计框图

Fig. 3 Design diagram of divided aperture simultaneous type hyperspectral polarization imaging system

由图3可知,任一偏振方向的高光谱成像系统由前置光学组件、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。其中,前置光学组件由成像镜、视场光阑和准直镜组成,辅助模块包括射频驱动模块、电源电路模块和信号采集模块。

该系统的工作过程为:视场内的地物反射光同时入射3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

偏器透振方向与参考坐标轴水平方向的夹角分别为 0° 、 60° 、 120° ;经过起偏器后,三束入射光变成三束线偏振光。入射光经施加相同射频信号的 AOTF 分光组件后,产生与射频信号对应的波长为 λ_1 的衍射光和 0 级光,衍射光偏振态与入射线偏振光相互正交,0 级光的偏振态与入射线偏振光相同;出射的混合光经过检偏器后,0 级光被消除,只剩下波长为 λ_1 的衍射光;出射后的三束光经过会聚镜后,变成平行光束出射,同时在 CCD 相机中形成波长为 λ_1 ,偏振方

向分别为 0° 、 60° 和 120° 的图像。在成像过程中,不断选择,以获取地物高光谱偏振图像数据。分孔径同时式高光谱偏振成像系统具体性能指标如表 1 所示。

表 1 分孔径同时式高光谱偏振成像系统的主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of divided aperture simultaneous type hyperspectral polarization imaging system

Serial number	Parameter	Parameter value or property
1	Spectral range / nm	450-950
2	Spectral resolution / nm	2-8
3	Field angle / ($^\circ$)	6
4	Polarization direction / ($^\circ$)	0,60,120
5	Quantized value / bit	12
6	Frame frequency / (frame \cdot s $^{-1}$)	Maximum 20
7	Detection range / km	Superior to 1 (fine weather)
8	Process mode	Fusion process spectral and polarization
9	Imaging power / W	35.6
10	Standby power / W	6
11	Spectral switch elapsed time / ms	0.1
12	Focal length / mm	78
13	Clear aperture / mm \times mm	8 \times 8
14	Optical probe size / mm \times mm \times mm	260 \times 220 \times 240
15	Linear polarization range / nm	350-2300

3.2 典型伪装目标实验样品介绍

伪装是通过减小目标与背景之间的谱和色的差异性,以达到保护目标的目的。随着科技的不断进步,伪装目标与背景间近似同谱同色,从而增加了传

统光学探测伪装目标的难度。实验样品为荒漠伪装网、荒漠伪装板、坦克缩比目标和悍马车缩比目标,主要用于对抗荒漠背景下可见光-近红外工作波段 ($0.4\sim 1.2\ \mu\text{m}$) 进行光学侦察,如图 4 所示。

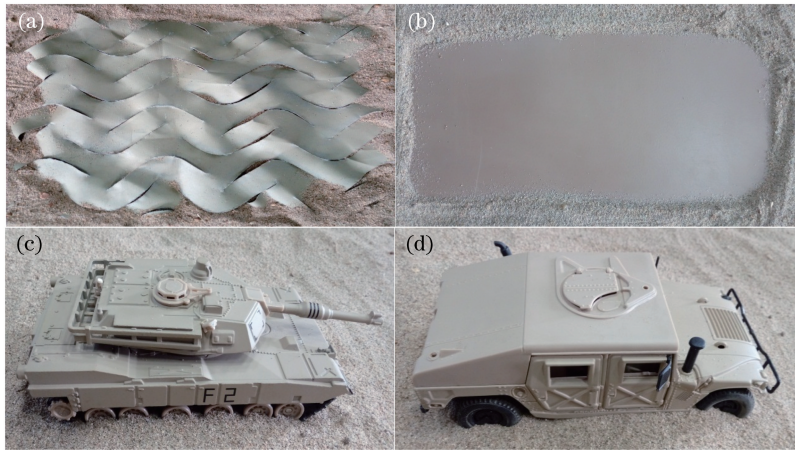


图 4 实验样品实物图。(a) 荒漠伪装网;(b) 荒漠伪装板;(c) 坦克缩比目标 (d) 悍马车缩比目标

Fig. 4 Experiment samples. (a) Desert camouflage net; (b) desert camouflage board;

(c) shrinkage ratio target of tank; (d) shrinkage ratio target of Hummer

荒漠伪装网的外形呈椭圆切花状,其表面法向取向服从随机分布,且涂有荒漠伪装涂料。荒漠伪装板、坦克缩比目标和悍马车缩比目标表面涂有沙黄色荒漠伪装涂料,是我军荒漠装甲战车军事装备的主型伪装涂料。

3.3 伪装目标高光谱偏振特性实验设计

实验在仿真大气实验室内进行,实验设计如图 5 所示,图中 θ_i 为入射角, θ_r 为观测角, φ 为方

位角。实验光源采用光谱特性近似太阳光的短弧氙灯,且位置固定。

由反射光偏振特性分析可知,当 θ 取目标布儒斯特角值,且 θ_r 与 θ_i 相等时,成像系统接收目标辐射的偏振特性最大。实验样品组分不同,其布儒斯特角也不同。因此,在无各实验样品布儒斯特角先验信息的情况下,实验中统一令 $\theta_i = 70^\circ$ 。由文献 [19] 的分析可知,在 θ_i 和 θ_r 不变的前提下, $\varphi = 180^\circ$

时,地物偏振特性最大。因此,实验过程中保持 $\varphi = 180^\circ$ 不变。

保持实验数据采集条件一致,对分孔径同时式高光谱偏振成像系统进行如下设定:选择光谱工作波段为 $450 \sim 945 \text{ nm}$,光谱分辨率为 5 nm ,设置 CCD 相机曝光时间为 50 ms ,增益为 2 dB 。

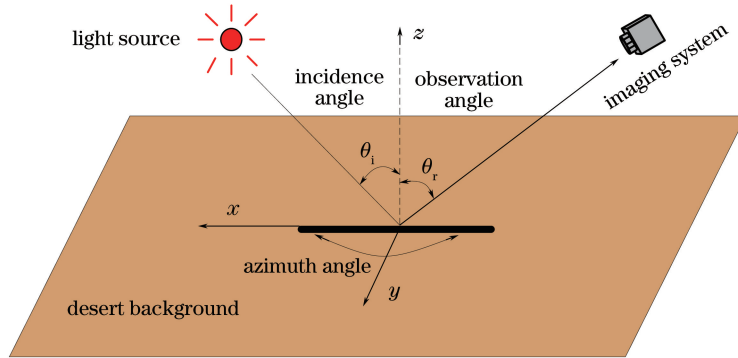


图 5 实验设计示意图

Fig. 5 Experimental design diagram

4 结果与分析

4.1 实验数据处理

光谱曲线是目标反射率随波长的变化曲线,其反映了地物的理化组分等本质信息。分孔径同时式高光谱偏振成像系统获得的是目标辐射亮度值,而非目标反射率。因此,在处理数据时,将辐射亮度值转换为反射率,描绘出地物反射光谱曲线,这个过程称为光谱反演^[20]。目前光谱反演的方法有很多,在仅有高光谱偏振图像数据、无其他先验辅助数据的情况下,常用内部平均法进行光谱反演。

内部平均法是用图像的辐射亮度值 D_λ 除以整

实验设计思路为:1) 进行不同光照强度伪装目标高光谱偏振特性实验时,令 $\theta_r = \theta_i = 70^\circ$,通过改变入射光的光照强度来获取实验数据;2) 进行不同观测角度伪装目标高光谱偏振特性实验时,令入射光的光照强度不变,通过改变观测角度来获取实验数据。

幅图像的平均辐射亮度值 M_λ ,得到地物的相对反射率 R_λ ^[21],即

$$R_\lambda = \frac{D_\lambda}{M_\lambda} \quad (4)$$

由此可知,地物相对反射率越大,目标越容易被检测到。

对获取的高光谱偏振图像数据进行处理,处理流程如图 6 所示。首先将 60° 偏振方向的高光谱图像作为基准图像、同波段 0° 和 120° 偏振方向的高光谱图像作为待配准图像,进行图像配准处理;然后计算 I 、 P 、 Q 、 U 偏振参量图像数据立方体;最后利用内部平均法获取偏振反射光谱。

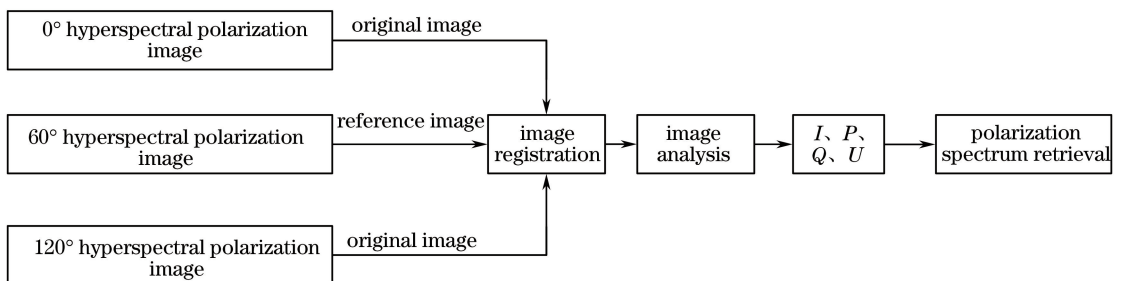


图 6 实验数据处理流程图

Fig. 6 Flow chart of experimental data processing

4.2 不同光照强度下伪装目标高光谱偏振特性分析

4.2.1 荒漠伪装网的高光谱偏振特性分析

不同光照强度下荒漠伪装网高光谱偏振特性实验结果如图 7 所示。在入射光强度分别为 24011 ,

13417 , 6405 , 2031 lx 的条件下进行实验。实验结果表明:1) 在不同光照强度下,荒漠伪装网合成强度相对反射率光谱发生变化,相同探测波段下,光照越强,合成强度相对反射率越小,偏振度相对反射率光

谱相似,但有差异;2)在不同光照强度下,荒漠伪装网合成强度相对反射率光谱变化较大,偏振度相对反射率光谱变化较小,表明荒漠伪装网偏振度图像具有一定的抗光照变化能力;3)在不同光照强度

下,探测波段在 660~810 nm、820~845 nm 区间内,荒漠伪装网合成强度相对反射率和偏振度相对反射率均较大,有利于该型荒漠伪装网检测和表面属性分析。

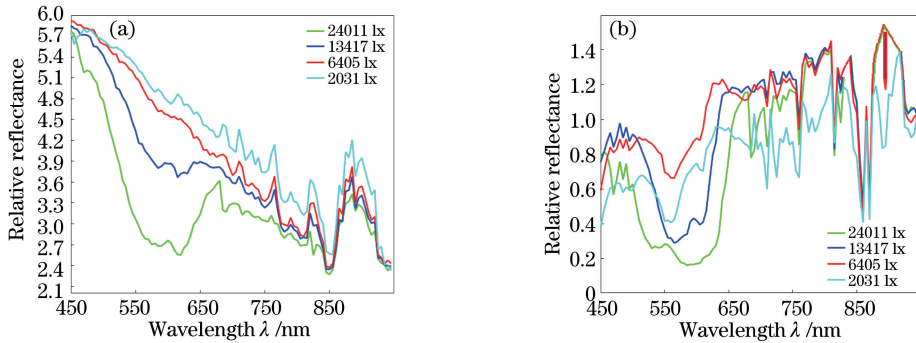


图 7 不同光照强度下荒漠伪装网的相对反射率光谱。(a)合成强度相对反射率光谱;(b)偏振度相对反射率光谱

Fig. 7 Relative reflectance spectra of desert camouflage net under different illuminations.

(a) Relative reflectance spectra of synthetic intensity; (b) relative reflectance spectra of polarization degree

4.2.2 荒漠伪装板的高光谱偏振特性分析

不同光照强度下荒漠伪装板的高光谱偏振特性实验结果如图 8 所示。在入射光强度分别为 13394, 6339, 1927 lx 条件下进行实验。实验结果表明:1)在不同光照强度下,荒漠伪装板的合成强度相对反射率光谱和偏振度相对反射率光谱发生变化,相同探测波段下,光照越强,合成强度相对反射率越小,偏振度相对反射率越大;2)在不同光

照强度下,荒漠伪装板合成强度相对反射率光谱变化较大,偏振度相对反射率光谱变化较小,表明荒漠伪装板偏振度图像具有一定抗光照变化能力;3)在不同光照强度下,探测波段在 470~510 nm、580~675 nm、765~810 nm、825~845 nm 区间内,荒漠伪装板合成强度相对反射率和偏振度相对反射率均较大,有利于该型荒漠伪装板检测和表面属性分析。

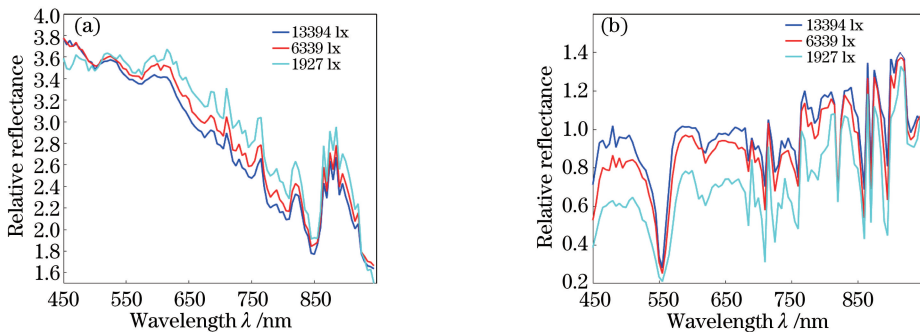


图 8 不同光照强度下荒漠伪装板的相对反射率光谱。(a)合成强度相对反射率光谱;(b)偏振度相对反射率光谱

Fig. 8 Relative reflectance spectra of desert camouflage board under different illuminations.

(a) Relative reflectance spectra of synthetic intensity; (b) relative reflectance spectra of polarization degree

4.2.3 坦克缩比目标的高光谱偏振特性分析

不同光照强度下坦克缩比目标的高光谱偏振特性实验结果如图 9 所示。在入射光强度分别为 24101, 13477, 6298, 1900 lx 条件下进行实验。实验结果表明:1)在不同光照强度下,在 450~770 nm 波段范围内,坦克缩比目标的合成强度相对反射率和偏振度相对反射率光谱发生变化,相同探测波段下,光照越强,合成强度相对反射率越大,偏振度相

对反射率也越大;2)在不同光照强度下,坦克缩比目标的合成强度相对反射率光谱变化较大,偏振度相对反射率光谱变化较小,表明坦克缩比目标偏振度图像具有一定抗光照变化能力;3)在不同光照强度下,探测波段在 480~540 nm、610~705 nm、765~810 nm、820~835 nm 区间内,坦克缩比目标的合成强度相对反射率和偏振度相对反射率均较大,有利于该型坦克缩比目标检测和表面属性分析。

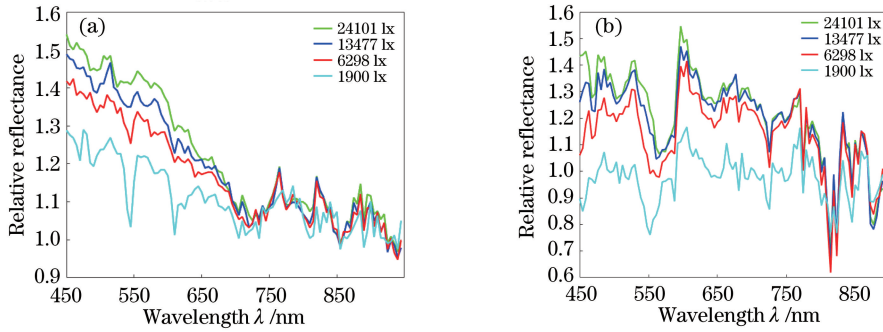


图9 不同光照强度下坦克缩比目标的相对反射率光谱。(a)合成强度相对反射率光谱;(b)偏振度相对反射率光谱

Fig. 9 Relative reflectance spectra of shrinkage ratio target of tank under different illuminations.

(a) Relative reflectance spectra of synthetic intensity; (b) relative reflectance spectra of polarization degree

4.2.4 悍马车缩比目标的高光谱偏振特性分析

不同光照强度下悍马车缩比目标的高光谱偏振特性实验结果如图10所示。在入射光强度分别为24088, 13391, 6309, 1897 lux条件下进行实验。实验结果表明: 1) 在不同光照强度下, 悍马车缩比目标的合成强度相对反射率和偏振度相对反射率光谱发生变化, 相同探测波段下, 光照越强, 合成强度相对反射率越大, 偏振度相对反射率

也越大; 2) 在不同光照强度下, 悍马车缩比目标的合成强度相对反射率光谱变化较大, 偏振度相对反射率光谱变化较小, 表明悍马车缩比目标的偏振度图像具有一定抗光照变化能力; 3) 在不同光照强度下, 探测波段在625~840 nm区间内, 悍马车缩比目标的合成强度相对反射率和偏振度相对反射率均较大, 有利于该型悍马车缩比目标检测和表面属性分析。

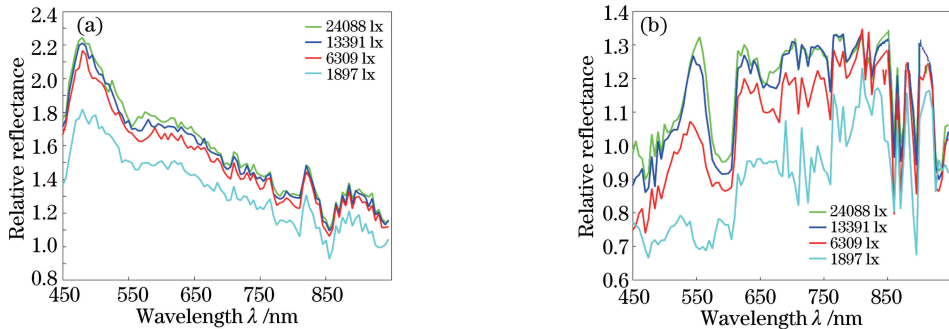


图10 不同光照条件下悍马车缩比目标的相对反射率光谱。(a)合成强度相对反射率光谱;(b)偏振度相对反射率光谱

Fig. 10 Relative reflectance spectra of shrinkage ratio target of Hummer under different illuminations.

(a) Relative reflectance spectra of synthetic intensity; (b) relative reflectance spectra of polarization degree

4.3 不同观测角度下伪装目标的高光谱偏振特性分析

4.3.1 荒漠伪装网的高光谱偏振特性分析

不同观测角度下荒漠伪装网的高光谱偏振特性实验结果如图11所示。在观测角分别为58°、64°和70°条件下进行实验。实验结果表明: 1) 在不同观测角度条件下, 荒漠伪装网的合成强度相对反射率光谱相似; 但受观测角度影响较大, 相同探测波段下, 观测角与入射角差值越小, 合成强度相对反射率越大; 偏振度相对反射率光谱相似, 但有差异; 2) 在不同观测角度条件下, 探测波段在650~800 nm区间内, 荒漠伪装网的合成强度相对反射率和偏振度相对反射率均较大, 有利于该型荒漠伪装网检测和表

面属性分析。

4.3.2 荒漠伪装板的高光谱偏振特性分析

不同观测角度下荒漠伪装板的高光谱偏振特性实验结果如图12所示。在观测角分别为58°、64°和70°条件下进行实验。实验结果表明: 1) 在不同观测角度条件下, 合成强度相对反射率光谱相似, 但受观测角度的影响较大, 相同波段下, 观测角与入射角的差值越小, 合成强度相对反射率越大, 偏振度相对反射率光谱相似, 但有差异; 2) 在不同观测角度条件下, 探测波段选择500~540 nm、580~600 nm和690~800 nm, 荒漠伪装板合成强度相对反射率和偏振度相对反射率均较大, 有利于该型荒漠伪装板检测和表面属性分析。

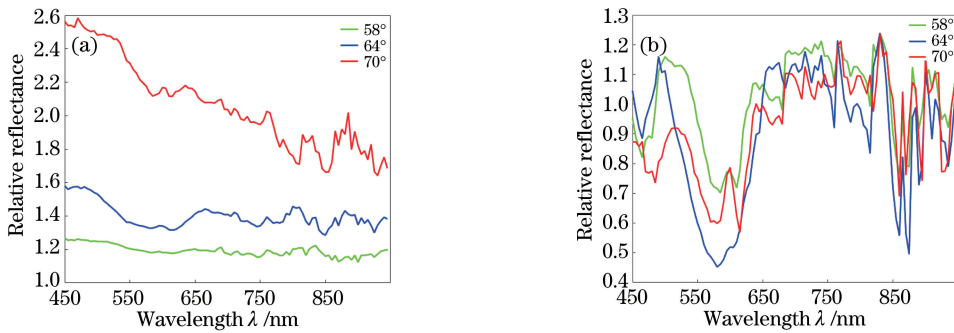


图 11 不同观测角下荒漠伪装网的相对反射率光谱。(a)合成强度相对反射率光谱;(b)偏振度相对反射率光谱

Fig. 11 Relative reflectance spectra of desert camouflage net under different observation angles.

(a) Relative reflectance spectra of synthetic intensity; (b) relative reflectance spectra of polarization degree

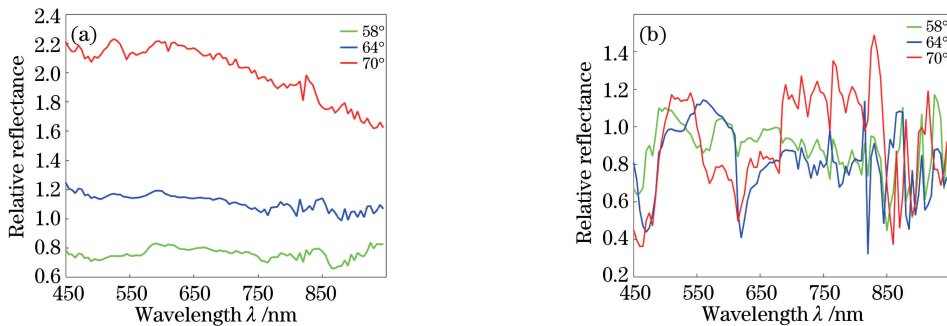


图 12 不同观测角下荒漠伪装板的相对反射率光谱。(a)合成强度相对反射率光谱;(b)偏振度相对反射率光谱

Fig. 12 Relative reflectance spectra of desert camouflage board under different observation angles.

(a) Relative reflectance spectra of synthetic intensity; (b) relative reflectance spectra of polarization degree

4.3.3 坦克缩比目标的高光谱偏振特性分析

不同观测角度下坦克缩比目标的高光谱偏振特性分析实验结果如图 13 所示。在观测角分别为 58° 、 64° 和 70° 条件下进行实验。实验结果表明:1) 在不同观测角度条件下,合成强度相对反射率光谱相似,但受观测角度影响的较大,相同探测波段下,观测角与入射角差值越小,合成强度相对反射率越大,偏振度相对反射率光谱相似,但有差异;2) 在不同观测角度条件下,探测波段选择 $480\sim 550\text{ nm}$ 、

$620\sim 650\text{ nm}$ 和 $685\sim 800\text{ nm}$ 波段,坦克缩比目标的合成强度相对反射率和偏振度相对反射率均较大,有利于该型坦克缩比目标检测和表面属性分析。

4.3.4 悍马车缩比目标的高光谱偏振特性分析

不同观测角度下悍马车缩比目标的高光谱偏振特性分析实验结果如图 14 所示。在观测角分别为 58° 、 64° 和 70° 条件下进行实验。实验结果表明:1) 在不同观测角度条件下,合成强度相对反射率光谱相似,但受观测角度影响的较大,相同探测波段下,

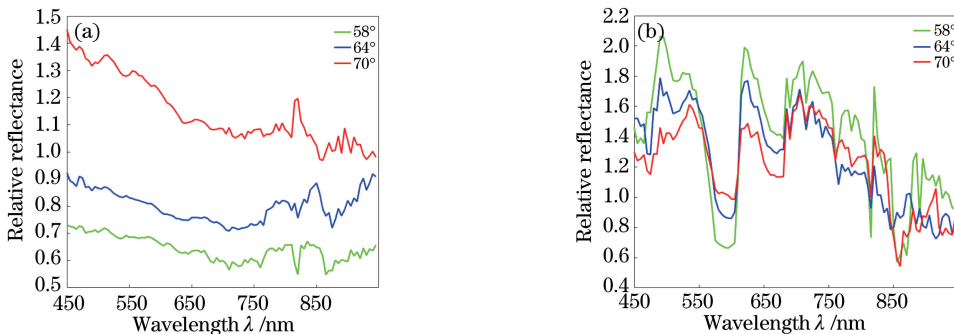
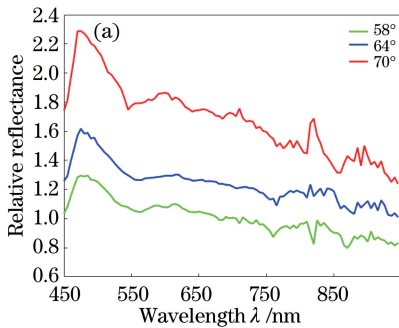


图 13 不同观测角下坦克缩比目标的相对反射率光谱。(a)合成强度相对反射率光谱;(b)偏振度相对反射率光谱

Fig. 13 Relative reflectance spectra of shrinkage ratio target of tank under different observation angles.

(a) Relative reflectance spectra of synthetic intensity; (b) relative reflectance spectra of polarization degree

观测角与入射角差值越小,合成强度相对反射率越大,偏振度相对反射率光谱相似,但有差异;2)在不同观测角度条件下,探测波段选择 545~565 nm、



630~805 nm 和 825~835 nm,悍马车缩比目标的合成强度相对反射率和偏振度相对反射率均较大,有利于该型悍马车缩比目标检测和表面属性分析。

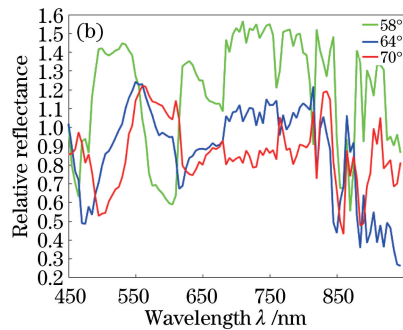


图 14 不同观测角下悍马车缩比目标的相对反射率光谱。(a)合成强度相对反射率光谱;(b)偏振度相对反射率光谱

Fig. 14 Relative reflectance spectra of shrinkage ratio target of Hummer under different observation angles.

(a) Relative reflectance spectra of synthetic intensity; (b) relative reflectance spectra of polarization degree

5 结 论

在不同光照强度和不同观测角度条件下,在荒漠背景下对荒漠伪装网、荒漠伪装板、坦克缩比目标和悍马车缩比目标的高光谱偏振特性进行研究,得到以下结论。

1) 荒漠背景下伪装目标的合成强度相对反射率和偏振度相对反射率随探测波段起伏变化,通过优化选择探测波段,有利于伪装目标的检测和表面属性分析,荒漠伪装网的探测波段宜在 660~800 nm 中选择,荒漠伪装板的探测波段宜在 500~510 nm、580~600 nm、690~800 nm 中选择,坦克缩比目标的探测波段宜在 480~540 nm、620~650 nm、765~800 nm 中选择,悍马车缩比目标的探测波段宜在 630~805 nm、825~835 nm 中选择。

2) 不同光照强度下,荒漠背景下伪装目标的合成强度相对反射率的变化幅度较大,偏振度相对反射率的变化幅度较小,表明偏振度图像具有一定的抗光照干扰能力。

3) 探测荒漠背景下的伪装目标时,成像系统观测角与入射光的入射角差值越小,合成强度的相对反射率越大,有利于实现目标检测。

参 考 文 献

[1] State Forestry Bureau. China desertification situation communique[DB/OL]. [2015-12-29]. <http://www.forestry.gov.cn>.
国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[DB/OL]. [2015-12-29]. <http://www.forestry.gov.cn>.

[2] Eismann M T, Seldin J H, Schwartz C R, *et al.* Target detection in desert backgrounds: infrared hyperspectral measurements and analysis [C]. Proceedings of SPIE, 1995, 2561: 80-97.
[3] Schwartz C R, Eismann M T, Cederquist J N, *et al.* Thermal multispectral detection of military vehicles in vegetated and desert backgrounds[C]. Proceedings of SPIE, 1996, 2742: 286-297.
[4] Collins B H, Olsen R C, Hackwell J A, *et al.* Thermal imagery spectral analysis [C]. Proceedings of SPIE, 1997, 3118: 94-105.
[5] Klick D I, Blumenau P M, Theriault J R. Detection of targets in infrared clutter [C]. Proceedings of SPIE, 2001, 4370: 120-133.
[6] Mayer R, Antoniadis J, Baumbach M, *et al.* Robustness tests for object identification algorithms in hyperspectral imagery [C]. Proceedings of SPIE, 2006, 6302: 63020Y.
[7] Wong C M, Shepanski J, Sandor-Leahy S. Parallel algorithms for fast subpixel detection in hyperspectral imagery [C]. Proceedings of SPIE, 2013, 8655: 86550O.
[8] Ding N, Gao J B, Wang J, *et al.* Study on airborne multispectral imaging fusion detection technology [C]. Proceedings of SPIE, 2014, 9298: 92980S.
[9] Egan W G. Detection of vehicles and personnel using polarization [C]. Proceedings of SPIE, 2000, 4133: 233-237.
[10] Xue M G, Liu X C, Liu X, *et al.* Research of desert infrared polarization dim and small target detection method [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 1010003.

- 薛模根, 刘晓诚, 刘晓, 等. 荒漠背景下红外偏振弱小目标检测方法研究[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1010003.
- [11] Li X M, Huang Q C. Target detection for infrared polarization image in the background of desert [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(9): 779-782.
李小明, 黄勤超. 荒漠背景下红外偏振图像目标检测方法[J]. 红外技术, 2016, 38(9): 779-782.
- [12] Han Z Y, Zhu X C, Wang L, *et al.* Hyperspectral evaluation of SPAD value of apple tree canopy based on continuum-removed method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 023001.
韩兆迎, 朱西存, 王凌, 等. 基于连续统去除法的苹果树冠 SPAD 高光谱估测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 023001.
- [13] Wei W S, Zhou Y K, Zheng X C. Rapid determination of volatile base nitrogen in pork based on optimal characteristic wavelength multispectral system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1130003.
魏文松, 周彦昆, 郑晓春. 基于优选波长的多光谱猪肉挥发性盐基氮含量快速检测[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1130003.
- [14] Jiang X Q, Ye Q, Lin Y, *et al.* Inverting study on soil water content based on harmonic analysis and hyperspectral remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1028001.
姜雪芹, 叶勤, 林怡, 等. 基于谐波分析和高光谱遥感的土壤含水量反演研究[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1028001.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Lan H J. The polarization of reflected light & refracted light [J]. *Journal of Guangxi University for Nationalities (Nature Science Edition)*, 2002, 8(3): 15-18.
蓝海江. 反射光和折射光的偏振状态[J]. 广西民族学院学报(自然科学版), 2002, 8(3): 15-18.
- [19] Ma W J. Research on multi-dimensional information extraction and object detection algorithms of polarized hyperspectral images [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
马文静. 偏振高光谱图像多维信息提取及目标检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [20] 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.
- [21] 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.