

文章编号:1001-9014(2009)02-0137-04

偏振遥感识别低反射率伪装网研究

张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 郑文伟

(国防科技大学 航天与材料工程学院国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:偏振遥感是一种新型的侦察手段,具有传统遥感所不具备的优点,是研究大气与地面目标的重要方法.为了研究伪装目标的偏振散射特征,在光学与红外波段测量了三色迷彩伪装网的偏振参数.研究发现,在探测条件一定的情况下,伪装网散射光的偏振度受入射角度和表面反射率的影响较大.入射角增大,伪装网散射光的偏振度也随之增大;表面反射提高,其散射光的偏振度降低.偏振度成像可以增强低反射区域的亮度和对比度,而偏振角成像对伪装网的外形特征非常敏感,偏振遥感对复杂背景中的低反射率伪装目标识别具有独特优势,对军事伪装目标的生存构成了严重威胁.

关键词:偏振遥感;伪装网;偏振度;偏振角;反射率
中图分类号:0436.3 **文献标识码:**A

DETECTING LOW REFLECTIVITY CAMOUFLAGE NET BY USING POLARIZATION REMOTE SENSING

ZHANG Chao-Yang, CHENG Hai-Feng, CHEN Zhao-Hui, ZHENG Wen-Wei

(Key Lab of Advanced Ceramic Fibers and Composites, School of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Polarization remote sensing is a new method with several advantages in detection. It is very important to study atmosphere and targets on the ground. To investigate the polarimetric scattering characteristics of camouflage targets, polarimetric parameters of three color pattern camouflage net were measured in visible and infrared waveband. By the analysis of data, it was found that polarimetric scattering characteristics of camouflage net were mainly influenced by incidence angle and reflectance of surface under a definite detecting condition. The polarization degree of scattering light goes up with the increase of incidence angle and falls when the reflectance of surface rises. The imaging of polarization degree can enhance the brightness and contrast of low reflectivity pattern, and the imaging of polarization angle is very sensitive to the outline of camouflage net. Polarization remote sensing is very useful to the detection of low reflectivity targets in complex backgrounds and threatens the existence of camouflaged military targets badly.

Key words: polarization remote sensing; camouflage net; polarization degree; polarization angle; reflectivity

引言

偏振遥感融合了光强度侦察和偏振侦察的优点,在军事上有着重要的应用价值.国内外许多科研机构开展了偏振遥感仪器和目标偏振特征的研究. Vanderbilt 等研究了树叶的偏振反射特征^[1],指出偏振反射数据包含了树叶表面和内部的结构信息. Ben-Dor^[2]在热红外波段对不同目标进行了偏振测试,指出可以用偏振图像来分辨人工目标和自然背景.美国空军研究室的 Goldstein^[3]对涂覆了军用油漆的铝板作了偏振检测. Forssell^[4]等人和 Aron 等

人^[5]分别对车辆和帐篷进行了野外偏振成像实验.研究表明利用偏振成像可以有效消除背景噪声,提高图像对比度.

伪装网是最常用的隐真伪装器材,具有功能全、效费比高和通用性好等特点,被誉为伪装效果最佳的隐身伪装器材,应用非常广泛.美军在伊拉克战争中大量使用荒漠型伪装网,用于坦克、装甲车、火炮等战斗装备的伪装,减少了战场上的损失.伪装网具有与背景相一致的光谱反射特征和热红外辐射特征,利用常规的光学成像与红外成像很难发现.

本文通过对三色迷彩伪装网和草地背景环境的

偏振特征测试,研究了伪装网在光散射过程中的偏振状态,分析了不同因素对散射光偏振度的影响规律.利用偏振度和偏振角信息成像分析了伪装网的偏振成像特征,讨论了偏振遥感在识别伪装方面的优势.

1 测量仪器与方法

偏振遥感中常用 Stokes 矢量法表示光的偏振状态,Stokes 矢量由 4 个参数组成,每个参数都可用不同方向光强度表示,能够直接测量,定义如下

$$S = \begin{pmatrix} I = \langle E_x^2(t) \rangle + \langle E_y^2(t) \rangle \\ Q = \langle E_x^2(t) \rangle - \langle E_y^2(t) \rangle \\ U = 2\langle E_x(t) \rangle \langle E_y(t) \rangle \cos[\delta_y(t) - \delta_x(t)] \\ V = 2\langle E_x(t) \rangle \langle E_y(t) \rangle \sin[\delta_y(t) - \delta_x(t)] \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中, $E_x(t)$ 、 $E_y(t)$ 、 $\delta_x(t)$ 、 $\delta_y(t)$ 分别表示在 x 、 y 方向上电场的振幅和相位, $\langle E \rangle$ 的含义是求 E 时间平均值.通过 Stokes 矢量可以定义偏振度 P 和偏振角 θ

$$P = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}}{I}, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right),$$

实验采用中科院安徽光机所研制的多波段偏振 CCD 相机,该相机的工作波段为 443 ~ 865 nm.在平面直角坐标系内,光强度与 Stokes 参数的关系可以表示为

$$I(\alpha) = 1/2(I + Q\cos 2\alpha + U\sin 2\alpha), \quad (3)$$

式中, α 是入射光的偏振方向与 X 轴的夹角.以往的关于材料表面偏振散射研究^[6-9]中发现,绝大部分地物的圆偏振分量(V)非常微弱,因此在实验中被忽略.根据式(3)测试 0° 、 60° 、 120° 三个偏振方向的光强度,计算 Stokes 矢量中的 I 、 Q 、 U 三个参数,进而求出偏振度 P 和偏振角 θ .

散射光的偏振特征在整个半球空间内的分布非常复杂,受方位角(a)的影响很大.在镜面反射方向时,偏振反射特征差异显著且具有代表性;随着方位角的偏转,偏振反射差异逐渐减小^[10-12],因此本文主要研究镜面反射方向的偏振散射特征.

2 测试结果及分析

伪装网装饰布采用 U 型切花,切花尺寸 41mm,沿着切花方向拉伸 1.2 倍,缝制在底网上得到树叶状三色迷彩伪装网(中绿色、土黄色、褐色).将三色迷彩伪装网平铺在草地上,根据上图所示架设测试仪器,测试的水平距离为 20m.测试过程中,保持相

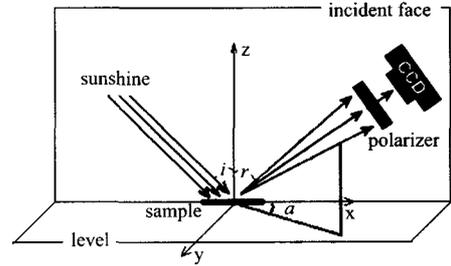


图 1 偏振散射测量示意图

Fig. 1 The sketch map of polarimetric scattering measurement

机的观测角度(r)与入射角度(i)相同(图 1).通过调节偏振片和滤波片,测试不同条件下样品的偏振散射特征.

图 2 是偏振度测试结果.可以看出,在入射角较小时,伪装网的三种颜色斑块与草地背景的偏振度都很低.随着入射角的增加,伪装网的偏振度逐渐增大,而草地背景的偏振度一直很低.在相同的光照条件下,颜色较深的褐色斑块具有较大的偏振度,而浅色斑块的偏振度相对较低.伪装网表面散射光的偏振度还随着探测波段而变化,在可见光波段,散射光的偏振度较大,而随着探测波段延伸到近红外波段,偏振度明显变小.伪装网的表面涂覆有伪装涂层,阳光照射到涂层表面时,一部分光在空气与树脂界面发生反射作用,可称为一次散射光;另一部分光入射到涂层内部,在内部经过各种散射体的散射作用后再从表面出射到空气中,可称为二次散射光.一次散射光满足 Fresnel 定律

$$R_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_d}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_d},$$

$$R_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_d}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_d}, \quad (4)$$

$$T_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_d},$$

$$T_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_d},$$

式中, n_1 、 n_2 为空气与树脂的折射率; θ_i 、 θ_d 为入射角和折射角;光在涂层表面发生反射和折射时,其电场矢量可以分解为两个正交分量,平行于(垂直于)入射面的分量称为 P 光(S 光), R_p 、 T_p 、(R_s 、 T_s) 分别代表 P 光(S 光)的反射振幅比和透射振幅比.依据 Fresnel 定律可知, S 光的相位在反射过程中发生反向,其反射光强度随着入射角增大而单调上升,而 P 光的反射强度随着入射角增大首先单调下降,在入射角等于 Brewster 角时降为零并发生相位反向,此时一

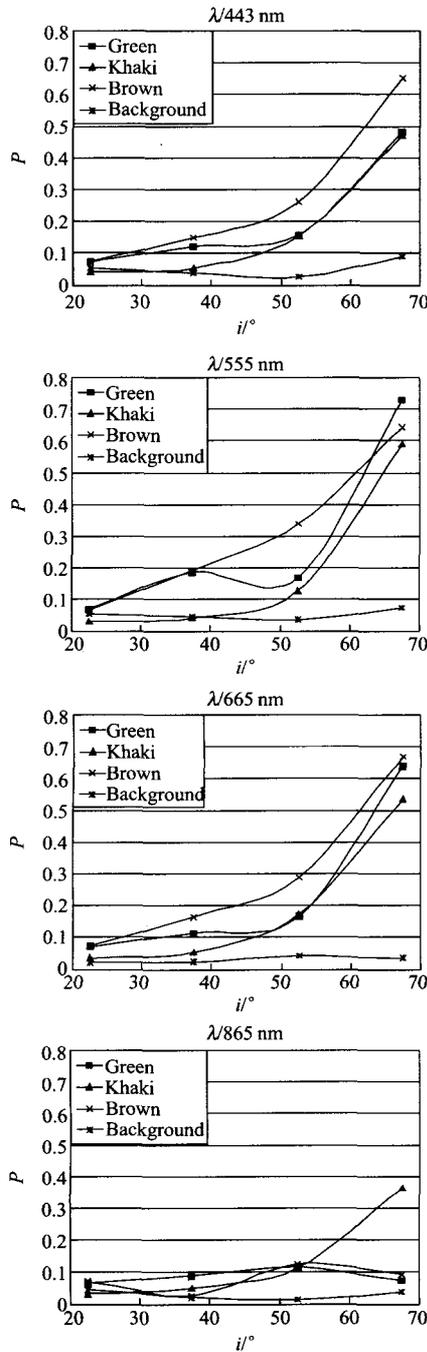


图2 镜面反射方向伪装网的偏振光谱
 Fig. 2 The polarization spectrum of camouflage net in the direction of specular reflection

次散射光的偏振度达到最大值, 利用 Fresnel 定律和公式 5 即可计算一次散射光的偏振度(P_r)。二次散射光在涂层内部受到颜料、填料、气孔等散射体的散射作用, 部分被吸收, 部分被反射, 由于涂层内部散射体分布的随机性, 使得散射后光的偏振角在各个方向趋于平均分布, 则二次散射光的偏振度较小。

$$P_r = (|R_s|^2 - |R_p|^2) / (|R_s|^2 + |R_p|^2) \quad (5)$$

总体来说, 一次散射具有较强的起偏振作用而二次散射具有消偏振作用。散射光的偏振度是一次散射光与二次散射光共同作用的结果。采用 ASD FieldSpec® HandHeld 型光谱仪测量迷彩涂层的光谱反射率(图 3)。对比其偏振光谱可知, 褐色涂层的反射率较低, 吸收率较大, 二次散射光在总体散射光中所占的比例很小, 则散射光的偏振度主要受一次散射的影响, 其偏振度值比较高。随着涂层反射率的逐渐增大, 二次散射光所占的比例逐渐上升, 使得总体散射光的偏振度呈下降趋势。在近红外波段, 绿色涂层的反射率较高, 其散射光的偏振度很低。

草地背景可以看作是一个表面非常粗糙的散射体, 其散射面可以分为大量的微面元, 由于这些微面元的倾角和尺寸杂乱无章, 不存在方向性取向特征, 因此其散射光的偏振方向趋于平均分布, 使得草地背景的散射光表现出比较小的偏振度和随机分布的偏振角。

3 偏振遥感成像分析

伪装网可以在可见光和近红外波段模拟植被、土壤等背景的反射光谱, 以对抗传统的强度遥感侦察。传统多光谱遥感等方法难以识别经过伪装的军事目标, 特别是低反射率目标, 在图像上呈暗色调, 给目标的识别带来很大困难。但在偏振遥感中, 反射率较低的褐色斑块具有较大的偏振度, 在偏振度图像上呈亮色调, 很容易与背景区分开; 而反射率较高的土黄色斑块由于偏振度较小而呈暗色调(图 4), 这与强度图像完全不同。同时, 相对于草地背景, 伪装网表面比较光滑, 在偏振散射过程中容易产生一致的偏振角, 使其轮廓与形状特征非常明显, 失去了原有的伪装效果。草地背景的偏振状态受其叶子的表面形态和分布的影响, 一般来说, 自然植被的叶子反射方向随机分布, 使其散射光有着较低的偏振度

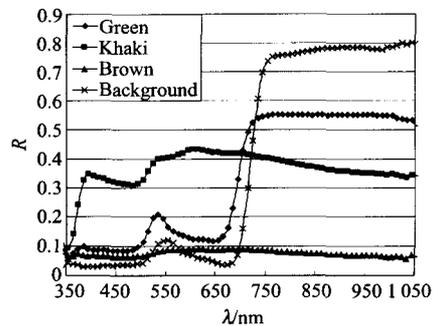


图3 伪装网三色彩色的反射光谱
 Fig. 3 The reflectance spectrum of coatings

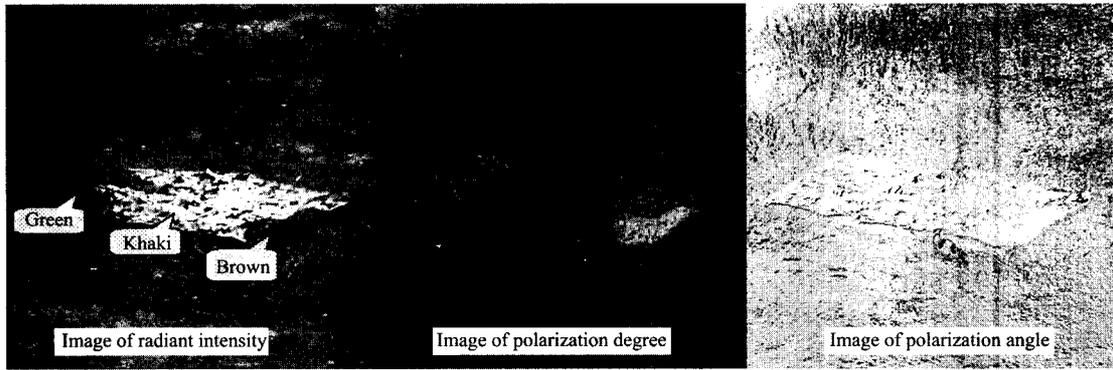


图4 伪装网不同识别信息的成像图

Fig. 4 Image of different detective information of camouflage net

和随机分布的偏振角,这与伪装网表面存在很大的偏振度和比较一致的偏振角有明显的区别.在偏振图像处理过程中很容易消除背景的杂乱信号,分辨出有用的信息.

4 结语

低反射率伪装目标的识别是多光谱遥感面临的难题,本文测试了三色迷彩伪装网的散射偏振度,并利用偏振度和偏振角成像对伪装网进行了识别,取得了较好的效果.

1. 伪装网的偏振特征主要受到光照条件和自身性质的影响,其散射偏振度随着入射角的增加而逐渐增大;相同的光照条件下,低反射率斑块的偏振度较大且随着反射率的增大而减小.

2. 伪装涂层对入射光的作用可以分为一次散射和二次散射,一次散射具有较强的起偏振作用而二次散射具有消偏振作用.散射光的偏振度是一次散射光与二次散射光共同作用的结果.

3. 草地背景的散射光有着较低的偏振度和随机分布的偏振角,与伪装网的偏振散射特征差别很大.偏振度图像有利于低反射率目标的识别,而偏振角图像对目标的形状特征非常敏感,利用这两种成像信息,能够较好地解决军事伪装目标的识别问题.

REFERENCES

- [1] Vanderbilt V C, Grant L. Polarization of light scattered by vegetation [C]. *Proc. IEEE*, 1985, **73**: 1012—1024.
- [2] Ben-Dor B. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared [C]. *Proc. SPIE*, 1992, **1971**: 68—76.
- [3] Goldstein D H. Polarimetric characterization of federal standard paints [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4133**: 112—123.
- [4] Forssell G, Karlsson E H. Measurements of polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with cenospheres [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5075**: 246—258.
- [5] Aron Y, Gronau Y. Polarization in the LWIR [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5783**: 653—661.
- [6] SUN Xiao-Bing, QIAO Yan-Li, HONG Jin, et al. Experimental Study on polarization characteristic of man-made object [J]. *High Technology Letters* (孙晓兵, 乔延利, 洪津, 等. 人工目标偏振特性实验研究. *高技术通讯*), 2003, **8**: 23—27.
- [7] ZHAO Yun-Sheng, HUANG Fang, JIN Lun, et al. Study on polarizing reflectance characteristics of plant simple leaf [J]. *Journal of Remote Sensing* (赵云升, 黄方, 金伦, 等. 植物单叶偏振反射特征研究. *遥感学报*), 2000, **4** (2): 131—135.
- [8] JIN Lun, ZHANG Hong-Bo, ZHAO Yun-Sheng. Data capture of surface object polarization reflection and establishing of polarization databases system [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)* (金伦, 张洪波, 赵云升. 地物偏振反射数据的获取与数据库的建立. *东北师大学报自然科学版*), 2000, **32** (4): 98—102.
- [9] SONG Kai-Shan, ZHANG Bai, ZHAO Yun-Sheng. Study on polarized characteristics of deciduous tree leaves in Northeast of China [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)* (宋开山, 张柏, 赵云升. 东北主要高大落叶乔木单叶的偏振特性研究. *东北师大学报自然科学版*), 2004, **36** (1): 88—94.
- [10] ZHAO Yun-Sheng, WU Tai-Xia, HU Xin-Li, et al. Study on quantitative relation between multi-angle polarized reflectance and bidirectional reflectance [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵云升, 吴太夏, 胡新礼, 等. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探. *红外与毫米波学报*), 2005, **24** (6): 442—445.
- [11] SHAO Wei-Dong, WANG Pei-Gang, ZHENG Qin-Bo, et al. Polarimetric calibration airborne remote sensing polarimeters [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵卫东, 王培纲, 郑亲波, 等. 机载偏振遥感仪的偏振定标. *红外与毫米波学报*), 2003, **22** (2): 137—140.
- [12] ZHANG Tian-Hao, LI Kun, SHAO Wei-Wei, et al. TE and TM mode photorefractive surface waves [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天浩, 李坤, 邵伟伟, 等. TE 和 TM 模式光折变表面波. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (1): 60—64.