

文章编号: 1001- 2486(2008) 05- 0034- 04

自然背景中伪装网的散射偏振度与成像研究*

张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 郑文伟, 曹 义
(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 偏振遥感以目标散射光或辐射光的偏振特性作为识别信息, 具有常规强度遥感所不具备的优点。为了研究伪装网的偏振伪装效果, 在不同条件下对伪装网的散射偏振度和成像特征进行了测试。结果表明, 伪装网的表面偏振散射特征受光照条件、探测条件和材料本身特性的影响, 其散射光的偏振度与入射角度成正比, 与表面反射率成反比。相对于草地背景, 伪装网的偏振度较大, 可以在偏振度图像中被清晰地识别出来, 能够有效对抗多光谱遥感等传统侦察手段的伪装网在偏振遥感侦察下失去了伪装效果。偏振遥感对伪装技术提出了新的挑战。

关键词: 偏振度; 散射; 偏振遥感; 伪装网

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

A Study of Polarization Degree and Imaging of Camouflage Net in Natural Background

ZHANG Chao-yang, CHENG Hai-feng, CHEN Zhao-hui, ZHENG Wen-wei, Cao Yi
(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Polarimetric characteristic of scattering light was used in the polarization remote sensing to identify targets. It is a new method of detection with several advantages compared with traditional radiant intensity remote sensing. To study the effect of polarization stealth, polarimetric characteristics of camouflage net and images of polarization degree were measured under different conditions. The results indicate that polarimetric characteristics of camouflage net were influenced by several factors, such as conditions of illumination, detection and characteristics of materials. The variation of polarization degree was represented as reverse ratio to the reflectance of surface and direct ratio to the incidence angle. Compared with that of meadow, the polarization degree of camouflage net was much higher and could be identified clearly. Camouflage net meeting the request of multi-spectral remote sensing has little effect when it comes to polarization remote sensing. Thus, polarization remote sensing brings new challenges to camouflage technique.

Key words: polarization degree; scattering; polarization remote sensing; camouflage net

目标散射光的偏振特征受多种因素的影响, 相同辐射强度的物体可能有不同的偏振状态。利用偏振遥感可以降低杂乱背景的影响, 在复杂的辐射环境中检测出有用的信息^[1]。偏振遥感在大气研究、地球资源调查、水体遥感和军事侦察等许多领域得到了广泛应用^[2-5]。

偏振遥感可以识别常规遥感手段难以探测的目标。国外的一些科研机构研究了车辆、飞机和伪装帐篷等军用目标的偏振散射特性, 并对目标做了野外成像实验^[6-10]。研究表明在不同波段利用偏振信息可以有效提高图像对比度和目标识别准确率。国内对偏振遥感的研究正处于起步阶段, 本文通过对国内外林地型绿色伪装网的偏振参数测试和偏振成像实验, 研究了伪装目标在自然背景中的偏振散射特征, 分析了不同的因素对目标偏振散射的影响。结果表明传统的伪装材料在自然背景中具有较大的偏振度, 利用偏振遥感可以清晰地识别出来。

1 偏振遥感侦察原理

在偏振遥感中常用 Stokes 矢量法表示光的偏振状态, Stokes 矢量包含 4 个参数(I, Q, U, V), 代表不

* 收稿日期: 2008- 05- 13

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 张朝阳(1980—), 男, 博士生。

同状态的偏振光,定义如下:

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

$E_x(t)$ 、 $E_y(t)$ 、 $\delta_x(t)$ 、 $\delta_y(t)$ 分别表示相互垂直方向上电场的振幅和相位, $\langle E^2(t) \rangle$ 的含义是求电场强度的时间平均值。实验采用多波段偏振 CCD 相机, 工作波段为 443nm~865nm, 光谱带宽为 30nm~50nm。样品表面的散射光通过一个棱镜分成三部分, 经过偏振片之后被 CCD 接收。相机通过旋转波片的方式控制探测波段, 通过线偏振片来调节入射光的偏振状态。在笛卡尔坐标系内, 偏振方向与 XOZ 平面的夹角为 α 的光强度可以表示为

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

将三个偏振片的偏振方向置于 0° 、 60° 、 120° , 测试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 。绝大部分地物的圆偏振分量 (V) 非常微弱而被忽略^[6]。

$$P = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}}{I} \quad (3)$$

2 测量仪器与方法

以往研究的结果表明^[11-13], 材料在整个半球空间内的偏振散射非常复杂。入射角 (i) 一定, 观测角 (r) 接近于镜面反射方向时 (图 1), 散射光的偏振度最大且与背景差异明显; 而观测角和方位角 (α) 偏离镜面反射方向时, 其偏振散射特征逐渐减小。因此, 实验中主要研究镜面反射方向上的偏振散射特征。

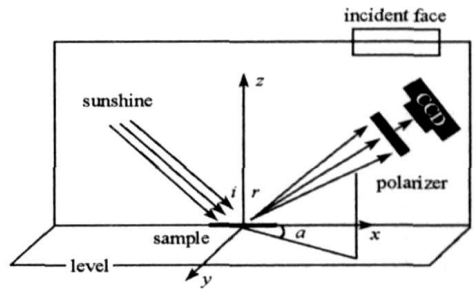


图 1 偏振测量示意图

Fig. 1 The sketch map of polarimetric measurement

3 测量结果分析

迷彩伪装网是现代战争中应用最广泛的伪装器材, 能够对多种侦察手段。在迷彩伪装技术中, 对绿色植被的模拟是决定伪装效果的关键技术之一。这是因为绿色植被的散射特征与普通绿色油漆或染料不同, 具有其独特的识别特征。文中选择瑞典巴拉居达伪装网 (R) 和国内某型伪装网 (C) 进行实验, 研究深绿色和浅绿色斑块的偏振散射特征。室内测试时用人工光源模拟太阳光照条件, 保持入射角和观测角相等, 在入射平面内测试其偏振度; 野外测试时将伪装网平铺在草地背景中, 从 20m 远 15m 高的楼上观察其成像特征。通过偏振片和滤光片来控制入射光的偏振方向和探测波段。偏振度测试结果如图 2 所示。

从图中可以看出, 入射角对伪装网的偏振散射特征影响很大。一般来说, 散射光的偏振度在垂直入射时最小, 随入射角的增大而增大, 当入射角等于 Brewster 角时, 偏振度随入射角的变化趋势发生转向。Brewster 角是材料表面反射过程中, 平行于入射面的光线 (E_p^r) 强度为零的角度, 此时偏振度最大。这是因为垂直入射时, 表面反射光的强度很小, 折射光强度较大, 折射光在伪装材料内部发生随机散射作用后从表面出射, 使其散射光的偏振度很小。随着入射角增大, 折射光的强度逐渐减小, 偏振度也随之上升。在不同的探测波段中, 偏振度值差别较大。在同种入射条件下, 伪装网的偏振度与其表面反射率密切相关, 反射率较低时, 样品的偏振度较大; 反射率较高时, 偏振度较小。表现在伪装网上深绿色斑块的偏振度普遍大于浅绿色斑块的偏振度。绿色伪装网在 400nm~600nm 波段反射率很低, 使得在这个波段的偏振度较大; 而在近红外波段, 绿色伪装网的光谱反射率迅速增大, 使得其表面散射光的偏振度有所降低。

瑞典伪装网是染料型伪装网, 国内伪装网是涂料型伪装网, 分别通过织物的染色和表面涂层来实现其模拟自然植被光谱反射特征的功能。入射光与伪装网表面作用, 产生不同的偏振状态。涂料型伪装

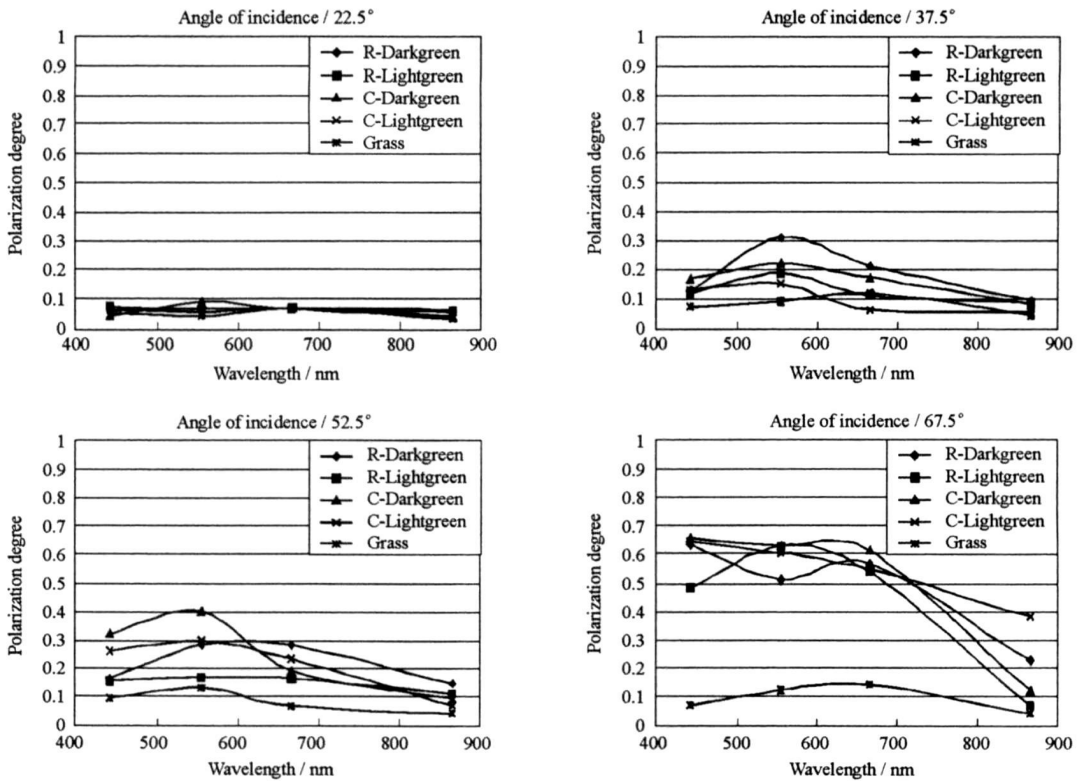


图2 入射光平面内伪装网的偏振光谱

Fig. 2 The polarization spectrum of camouflage net in the plane of incidence

网的表面相对光滑,容易产生方向性偏振散射,使其平均偏振度较大。而染料型伪装网表面粗糙,可以消除散射光的方向性偏振散射,使其具有较小的偏振度。当表面粗糙度一定时,其散射光的偏振状态与伪装网的表面折射率、反射率等有关,偏振散射过程满足 Fresnel 定律:

$$\begin{cases} E_S^{(r)} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_d)}{\sin(\theta_i + \theta_d)} E_S^{(i)} \\ E_S^{(t)} = \frac{2\sin\theta_d \cos\theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_d)} E_S^{(i)} \\ E_P^{(r)} = \frac{2\sin\theta_d \cos\theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_d) \cos(\theta_i - \theta_d)} E_P^{(i)} \\ E_P^{(t)} = -\frac{\tan(\theta_i - \theta_d)}{\tan(\theta_i + \theta_d)} E_P^{(i)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ_i (θ_d) 为入射角(折射角); $E^{(r)}$ 、 $E^{(t)}$ 和 $E^{(i)}$ 分别是反射光、透射光和入射光的电场振幅,下标 $P(S)$ 代表平行于(垂直于)入射面的分量。根据 Fresnel 定律可以得出,随着表面折射率、反射率的增大,伪装网散射光的偏振度逐渐降低;伪装网的表面粗糙度对其偏振散射特征影响很大,随着表面粗糙度的增大,散射光的偏振角在各个方向趋于平均分布,在镜面反射方向的强度逐渐减弱,偏振度也逐渐减小。在偏离镜面反射方向上,散射光的强度随着粗糙度的增加逐渐增大,但是其偏振度保持在较低值。与自然背景相比,伪装网散射光的偏振度较大,在偏振度图像中失去了原有的伪装效果(图3)。

偏振散射特征受观测条件和测试波段的影响很大,因此在偏振遥感中要得到较高的信噪比,就必须根据目标和背景特征选择合适的探测角度和波段^[14]。多光谱侦察难以发现光谱反射特性和自然背景相似的伪装网,但是利用偏振遥感可以有效识别。由于目标所处的自然背景(如泥土、植被)的辐射或反射光的偏振度比较小,通常在 0.1 以下,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。自然背景非常低的偏振度源于其散射的方向的无序性,散射光的强度在各个方向趋于平均分布,所以自然背景的偏振度较低,具有很强的消偏振功能。图3是伪装网的强度图像和偏振度图像,

偏振度图像是将目标散射光的偏振度信息转化为相应的灰度信息进行成像,图中偏振度越大,则在图像中的亮度越高。从图3中可以看出偏振图像相对于强度图像在识别伪装目标中的优势。在偏振度图像中,由于伪装网的偏振度较高,在图像中与偏振度很低的草地背景对比非常明显。尤其是未经过切花的伪装网底网,其偏振度值非常高,是很明显的暴露特征。

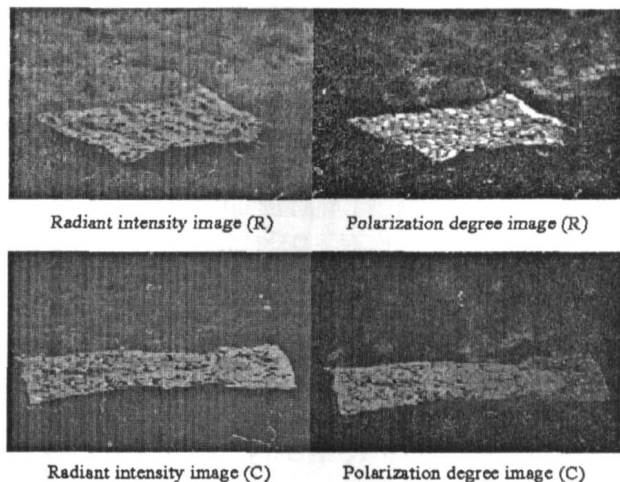


图3 伪装网的不同特征信息成像图

Fig. 3 Images of different information of camouflage net

4 结论

偏振遥感能利用目标散射光偏振信息进行测量及成像,比常规辐射强度遥感有更高的准确度。本文在不同测试条件下对染料型和涂料型伪装网做了偏振度测量和成像实验。研究发现伪装网的散射偏振度受多种因素的影响,其偏振散射过程满足 Fresnel 定律。随着入射角的增大,偏振度逐渐增大;伪装网表面低反射率迷彩斑块的偏振度较大,所以偏振遥感可以有效识别目标上的低反射率区域;随着表面粗糙度的增加,偏振度逐渐减小。自然背景的偏振度非常小,和伪装网较大的偏振度形成鲜明对比,在偏振度图像中可以清楚地识别。偏振遥感对于抑制背景影响,提高遥感图像对比度和识别伪装目标具有重大意义。

参考文献:

- [1] Cremer F, Jong W D, Schutter K. Infrared Polarization Measurements of Surface and Buried Anti-personnel Landmines [C]//Proc. SPIE- 4394, 2001, 164- 175.
- [2] 孙晓兵, 乔延利, 等. 人工目标偏振特性实验研究[J]. 高技术通讯, 2003, 8: 23- 27.
- [3] Devaux C, Vermeulen A, Deuze J L, et al. Retrieval of Aerosol Single-scattering Albedo from Ground-based Measurements: Application to Observational Data[J]. Geophys. Res. 1998, 103: 8753- 8761.
- [4] Vermeulen A, Devaux C, Herman M. Retrieval of the Scattering and Microphysical Properties of Aerosols from Ground-based Optical Measurements Including Polarization. I. Method [J]. Applied Optics, 2000, 33: 6207- 6220.
- [5] Weidmann A, Fournier G R, Forand L, et al. In Harbor Underwater Threat Detection/identification Using Active Imaging. Photonics for Port and Harbor Security [C]//Proc. SPIE- 5780, 2005, 59- 70.
- [6] Goldstein D H. Polarimetric Characterization of Federal Standard Paints [C]//Proc. SPIE- 4133, 2000, 112- 123.
- [7] Forsell G, Karlsson E H. Measurements of Polarization Properties of Camouflaged Objects and of the Denial of Surfaces Covered with Cenospheres [C]//SPIE- 5075. 2003, 246- 258.
- [8] Aron Y, Gronau Y. Polarization in the LWIR [C]//Proc. SPIE- 5783. 2005, 653- 661.
- [9] Egan W G, Duggin M J. Optical Enhancement of Aircraft Detection Using Polarization [C]//Proc. SPIE- 4133, 2000, 172- 178.
- [10] Egan W G, Duggin M J. Synthesis of Optical Polarization Signatures of Military Aircraft [C]//Proc. SPIE- 4481, 2002, 188- 194.
- [11] 赵云升, 黄方, 金伦, 等. 植物单叶偏振反射特征研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 131- 135.
- [12] 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[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2000, 32(4): 98- 102.
- [13] 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[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2004, 36(1): 88- 94.
- [14] 范伟, 王毅, 饶瑞中. 根据大气辐射特征进行目标探测的波段选择[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 177- 182.