

文章编号: 1672-8785(2009)11-0021-05

伪装材料的偏振散射光谱研究

张朝阳 陈朝辉 程海峰 郑文伟 曹 义

(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: 采用多波段偏振 CCD 相机在光学与红外波段测试了镜面反射方向伪装材料的偏振特征。研究了不同入射条件下具有粗糙表面的伪装材料的偏振散射过程, 得到了材料的偏振散射光谱。在镜面反射方向, 伪装材料表面具有高的线偏振度, 而草地背景的线偏振度很低。利用 Kirchhoff 近似理论分析了粗糙表面的偏振散射过程, 分析结果与实验测试的偏振光谱相一致。由于伪装材料与背景的偏振散射光谱不同, 因此利用偏振信息成像能够识别复杂背景中的伪装目标。偏振遥感在伪装目标识别方面具有重要的军事应用价值。

关键词: 伪装材料; 偏振遥感; 偏振光谱; 入射角

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

Study of Polarization Spectrum of Camouflage Materials

ZHANG Chao-yang, CHEN Zhao-hui, CHENG Hai-feng, ZHENG Wen-wei, CAO Yi

(School of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense
Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The polarization characteristics of a camouflage material in the direction of specular reflection are tested by using a multispectral polarization CCD camera in visible and infrared wavebands. The polarization characteristics of a camouflage material with rough surfaces are studied under different incident conditions and the polarization spectrum of the material is obtained. In the direction of specular reflection, high linear polarization is exhibited at the surfaces of the camouflage material and very low linear polarization is exhibited against the meadow background. The polarimetric scattering at the rough surfaces are analyzed by using Kirchhoff's scattering theory. The analysis result is in agreement with the measured polarization spectrum. Since the polarization scattering spectrum of the camouflage material is different from that of the background, the use of polarization information in imaging is very helpful to the identification of targets against complex background. Polarization remote sensing is of important value to the detection of camouflaged military targets.

Key words: camouflage materials; polarization remote sensing; polarization spectrum; incidence angle

1 引言

目前的遥感探测手段以目标的辐射或反射电磁波强度作为识别信息, 依靠光谱的差异来

识别背景中的目标。这种方法在识别杂乱背景中的伪装目标时遇到了困难, 而偏振遥感融合了强度侦察和偏振侦察的优点, 在伪装目标识

收稿日期: 2009-04-26

基金项目: 国防科技大学科研计划项目 (JC07-01-03)

作者简介: 张朝阳 (1980-), 男, 吉林榆树人, 在读博士生, 主要从事偏振遥感和伪装隐身技术的研究。E-mail: zh
angcy_nudt@163.com

别方面有着潜在的应用价值。国内外许多科研机构开展了偏振成像仪器和目标偏振特征的研究。V. C. Vanderbilt 等人研究了树叶的偏振反射特征^[1], 指出树叶的偏振反射数据包含了树叶表面和内部的结构信息。B. 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 D. H. Goldstein^[3] 对涂覆了军用油漆的铝板作了偏振检测。G. Forsell 等人^[4] 和 Y. Aron、Y. Gronau^[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地消除背景噪声, 提高图像的对比度。

伪装材料可以通过模拟背景环境的光谱反射特征对军事目标进行有效伪装和遮蔽, 利用常规的遥感手段很难进行识别。伪装材料的偏振信息不同于光谱反射信息, 会受多种因素的影响。利用偏振遥感识别伪装目标是目前国内研究的热点。

2 偏振遥感的侦察原理与仪器

偏振遥感中常用斯托克斯参数法表示光的偏振状态。在直角坐标系中, 电磁波可以分为平行于入射面和垂直于入射面的两个分量, 两个分量之间的相位角 δ 决定了电磁波的偏振状态, 定义如下:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = I \begin{pmatrix} 1 \\ P_L \cos 2\varphi \\ P_L \sin 2\varphi \\ P_C \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, I 为电磁波强度, P_L 为线偏振度, P_C 为圆偏振度, φ 为线偏振角度。通过斯托克斯矢量可以定义偏振度 P :

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

实验采用多波段偏振 CCD 相机, 相机的工作波段为 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。测试三个偏振方向的光强度, 计算斯托克斯矢量中的 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) 因非常微弱而被忽略^[6]。实验中, 将三种绿色伪装材料平铺在草地背景中, 在不同的阳光入射角下测试材料与背景的偏振散射特征。

目标二向散射分布受表面形态和几何形状的影响很大。一般来说, 散射光强度主要分布在以镜面反射方向为轴的椭圆形区域内, 与散射强度分布类似。以往的关于目标表面偏振散射的研究^[7-9] 发现, 偏振特征受测试方位角的影响很大, 在方位角接近镜面反射方向时, 偏振散射特征差异显著; 当方位角逐渐偏离时, 偏振散射特征差异逐渐减小^[10]。因此本实验主要研究镜面反射方向伪装遮障的偏振散射与成像特征 (见图 1)。

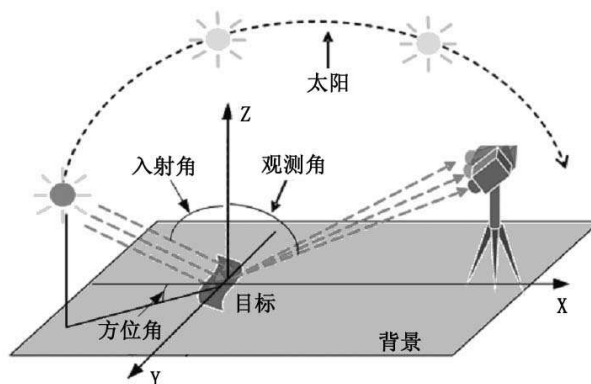


图 1 偏振散射测量示意图

3 实验研究

图 2 是偏振度测试结果。可以看出, 偏振度的不同除了与粗糙度相关外, 还受到表面折射率和光线入射角的影响。垂直入射时, 入射光的偏振状态与自然光大致相同, 其偏振度很低; 当入射角增大时, 偏振度也随之增大, 在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 之间达到最大值。在不同的探测波段, 材料表面散射光的偏振度相差较大。在 665nm ~ 750nm 波段和全波段, 偏振度较大。在其它波段, 偏振度较小。这是因为在不同的探测波段, 伪装材料的表面折射率差别较大, 导致其对入射光的偏振散射效果不同。

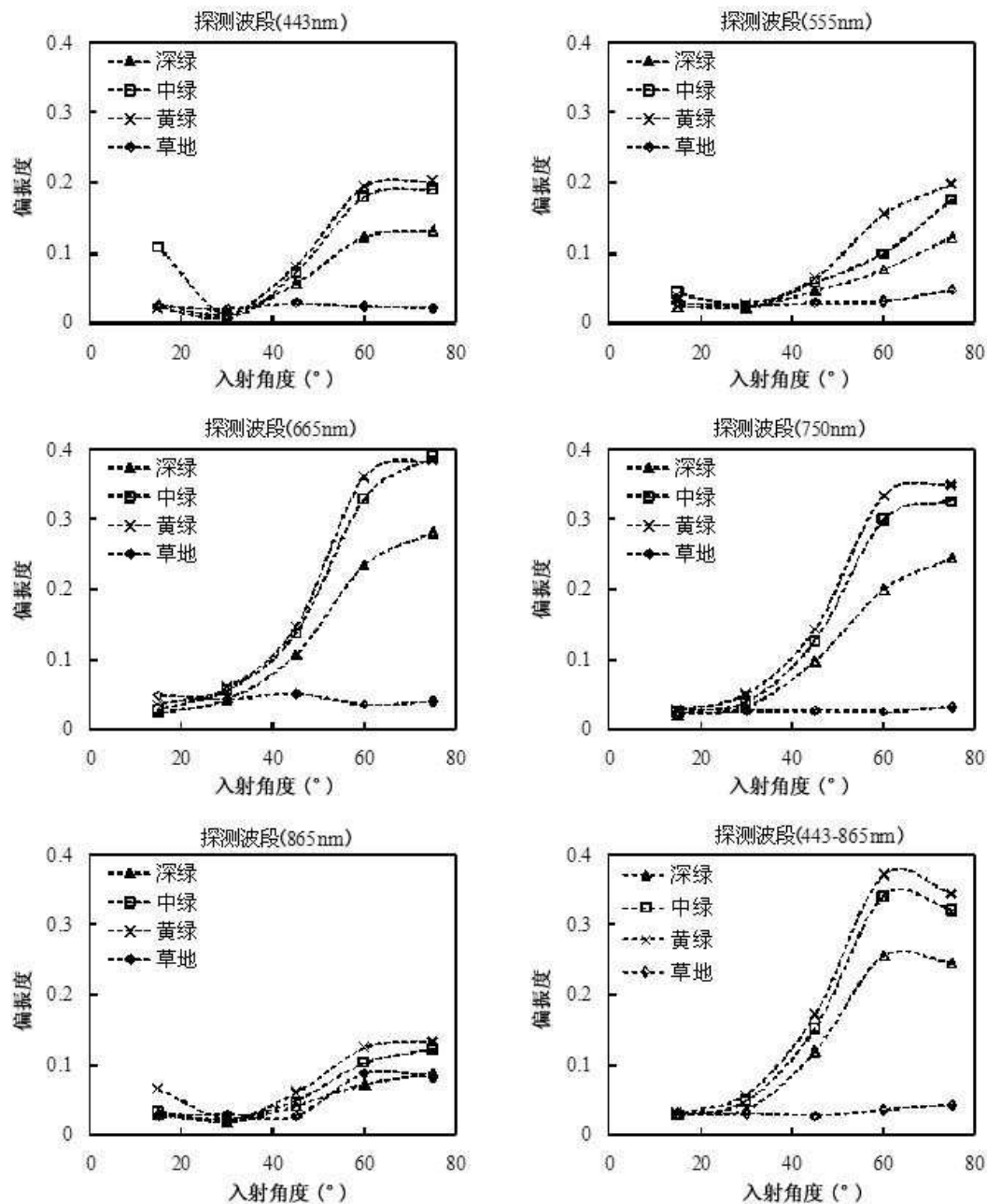


图 2 伪装材料的偏振散射光谱

在整个探测波段和不同的入射角度条件下,草地背景的偏振度保持在 0.1 以下。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。在某些探测波段,伪装材料的高偏振度与草地背景的低偏振度形成

鲜明对比,可以作为偏振遥感的探测信息进行目标识别。

4 结果分析

相对于入射光的波长,伪装材料表面可以看作是一个随机粗糙表面。对于一束照射到伪装材料表面的平面波(见图 3),入射光的电场为

$$E_i = \vec{e}_i E_0 e^{ik_i r} \quad (3)$$

式中, k_i 为入射波矢量, $\vec{e}_i$ 为电场矢量的偏振方向。粗糙表面用随机高度分布 $z = f(r_\perp)$ 来表示。其中 $\langle f(r_\perp) \rangle = 0$ 是具有 0 均值的高斯随机变量。

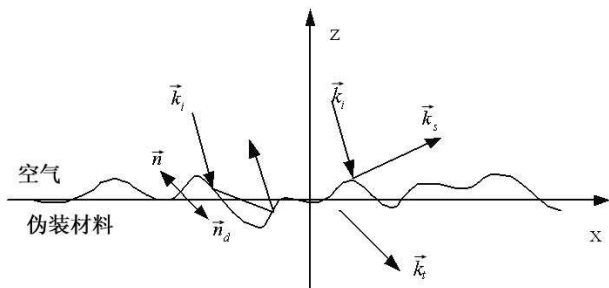


图 3 伪装材料表面的偏振散射

根据惠更斯原理, 观察点的电场由边界面的电场表示, 因此得到空气中的散射场和伪装材料内部的透射场为

$$E_s(r) = \iint_{s'} ds' \left\{ \begin{aligned} & i\omega\mu_0 GG(r, r') [\vec{n}H(r')] + \\ & \nabla GG(r, r') [\vec{n}E(r')] \end{aligned} \right\}$$

$$E_t(r) = \iint_{s'} ds' \left\{ \begin{aligned} & i\omega\mu_0 GG_1(r, r') [\vec{n}_d H(r')] + \\ & \nabla GG_1(r, r') [\vec{n}_d E(r')] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, s' 为进行表面积分的粗糙表面, $\vec{n}$ 和 $\vec{n}_d$ 为垂直于粗糙表面的单位矢量, 分别指向反射和透射区域 (见图 4)。空气和伪装材料区域内的并矢格林函数 $GG(r, r')$ 和 $GG_1(r, r')$ 分别为

$$GG(r, r') = \left(\mathbf{I} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right) \frac{e^{ik|r-r'|}}{4\pi|r-r'|}$$

$$GG_1(r, r') = \left(\mathbf{I} + \frac{1}{k_1^2} \nabla \nabla \right) \frac{e^{ik_1|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \quad (5)$$

式中, $k = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$, $k_1 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_1}$ 。如果观察点在远区, 则并矢格林函数可以简化为

$$GG(r, r') \cong \left(\mathbf{I} + \vec{k}_s \vec{k}_s \right) \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \exp(-ik_s r')$$

$$GG_1(r, r') \cong \left(\mathbf{I} + \vec{k}_t \vec{k}_t \right) \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \exp(-ik_t r') \quad (6)$$

式中, $\vec{k}_s$ 和 $\vec{k}_t$ 分别表示空气中和伪装材料中的散射和透射方向。将式 (6) 代入式 (4), 则可以得到反射方向 $\vec{k}_s$ 和透射方向 $\vec{k}_t$ 的场为

$$E_s(r) = \frac{ik e^{ikr}}{4\pi r} \left(\mathbf{I} - \vec{k}_s \vec{k}_s \right)$$

$$\times \iint_{s'} ds' \left\{ \vec{k}_s [\vec{n}E(r')] + \eta [\vec{n}H(r')] \right\} e^{-ik_s r'}$$

$$E_t(r) = \frac{ik_1 e^{ik_1 r}}{4\pi r} \left(\mathbf{I} - \vec{k}_t \vec{k}_t \right)$$

$$\times \iint_{s'} ds' \left\{ \vec{k}_t [\vec{n}_d E(r')] + \eta_1 [\vec{n}_d H(r')] \right\} e^{-ik_t r'} \quad (7)$$

式中, η 和 η_1 分别为空气中和伪装材料中的波阻抗。利用 Kirchhoff 近似理论, 伪装材料表面任意一点的场由该点的切面场来近似, 最终得到反射光的二向偏振散射系数为

$$r(\vec{k}_s, \vec{k}_i) = \frac{4\pi r^2 (S_r)_v}{A_0 \cos \theta_i (S_0)_h} \quad (8)$$

式中, 下标 v 代表入射波的偏振, 下标 h 代表散射波的偏振, S_0 为入射波的 Poynting 功率密度, S_r 为散射波的功率密度, A_0 是投影到 $x-y$ 粗糙表面的面积, 与随机高度分布相关, θ_i 为入射角。利用式 (8) 结合菲涅耳反射定律可以分析光在伪装材料散射过程中的偏振状态变化。

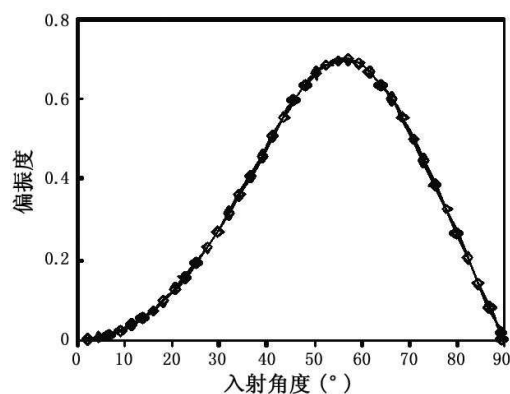


图 4 入射角度与偏振度的关系

光束入射到伪装材料表面时, 其散射光在垂直于入射面的分量和平行于入射面的分量的强度会随着入射角的变化而变化。随着入射角的增大, 平行于入射面的强度逐渐减小并在 60° 附近发生相位偏转, 而垂直于入射面的强度随着入射角的增大而持续增大, 此时偏振度最大; 达到最大值时的入射角与材料的表面折射率有关, 折射率越大, 偏振度达到最大值时需要的入射角就越大。

5 结论

伪装目标的识别是遥感探测中面临的难题, 本文利用多波段偏振相机研究了伪装材料的偏振散射特征与入射角的关系, 并利用 Kirchhoff 近似理论和菲涅耳反射定律对伪装材料表面的偏振散射过程进行了模拟, 取得了较好的效果。

1. 伪装材料的散射光偏振度受探测波段和入射角的影响较大。在入射角小于 60° 时, 散射光的偏振度与入射角成正比。伪装材料在光学和红外波段具有较大的偏振度, 而草地背景的偏振度比较小, 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。

2. 利用 Kirchhoff 近似理论和菲涅耳反射定律解释了伪装材料粗糙表面的偏振散射过程, 对粗糙面的偏振度信息进行了近似计算, 计算结果与测试结果比较吻合。

3. 在某些探测波段和探测角度下, 伪装材料和草地背景的偏振信息差异明显, 具有明显的暴露特征。偏振遥感可以增强目标与背景之间的对比度, 对于伪装目标的探测具有重要意义。

参考文献

- ~~~~~
- (上接第 6 页)
- [7] 赵海涛, 裴彦军, 郭海雷, 等. 傅里叶变换成像光谱技术在化学战剂遥测中的应用 [J]. **舰船科学技术**, 2006, **28**(2): 80-82.
 - [8] Uzun, I.S.; Bouridane, A.A.A. FPGA implementations of fast Fourier transforms for real-time signal and image processing, Field-Programmable Technology (FPT), 2003. Proceedings.2003 IEEE International Conference on Volume, Issue, 15-17 Dec. 2003 Page(s): 102-109.
 - [9] Lo Sing Cheng, Miri A, Tet Hin Yeap. Efficient FPGA Implementation OF FFT Based Multipliers, Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conference on Volume, Issue, 1-4 May 2005 Page(s): 1300-1303.
 - [10] K Scott Hemmert, Keith D Underwood. An Analysis of the Double-Precision Floating-Point FFT on FPGAs, Field-Programmable Custom Computing Machines, 2005.FCCM 2005.13th Annual IEEE Symposium on Volume, Issue, 18-20 April 2005 Page(s): 171-180.
 - [11] 钱文明, 刘新宁, 张艳丽. 基于 Cyclone 系列 FPGA 的 1024 点 FFT 算法的实现 [J]. **电子工程师**, 2007, **33**(2): 12-14.
 - [12] 邓学禹. 基于 FPGA 的 1024 点流水线工作方式的 FFT 实现 [F]. 电子科技大学学位论文.
 - [13] Mahdavi, N.; Teymourzadeh, R.; Bin Othman, M.VLSI Implementation of High Speed and High Resolution FFT Algorithm Based on Radix 2 for DSP Application. Research and Development, 2007.SCORed 2007.5th Student Conference on Volume, Issue, 12-11 Dec 2007 Page(s): 1-4.
 - [14] 鲍庆龙, 刘平. 基于 FPGA 的高速 FFT 算法实现 [J]. **微处理机**, 2007, **4**(2): 16-19.