文章编号:1002-2082(2012)03-0441-05

红外偏振成像对伪装目标的探测识别研究

王 军,丁 娜,李建军,李俊娜,武 军,吴江辉,高 飞,
高 蒙,孙科峰,高教波

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘 要:针对目前普通光电成像系统对伪装目标的探测和识别概率较低的状况,提出伪装目标的探测识别新技术研究。介绍了红外偏振成像系统的原理、组成和特点,研制的中波/长波红外偏振成像装置,其波段范围为 3 μm ~5 μm 和 8 μm~12 μm,线偏振度 95%,消光比大于 100∶1,给出了试验分析数据和偏振融合效果图。研究表明,采用红外偏振成像技术可以有效地实现对地面伪装目标的探测和识别。研究结果还可以扩展到对人工假目标、空中隐身目标等的探测和识别。

关键词:红外偏振成像;斯托克斯参量;偏振融合图像;伪装目标;探测和识别

中图分类号:TN65; TP751 **文献标志码**:A **doi**:10.5768/JAO201233.0301001

Infrared polarization imaging: detection and recognition of camouflage target

WANG Jun, DING Na, LI Jian-jun, LI Jun-na, WU Jun, WU Jiang-hui, GAO Fei, GAO Meng, SUN Ke-feng, GAO Jiao-bo

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Due to the lower detection and recognition probability of camouflage target by current opto-electrical imaging systems, it is important to develop a new technology to detect and recognize the camouflage target. This paper introduces an infrared polarization imaging system, describes the principle, constitute and characteristics of the system. The waveband range of the developed infrared polarization imaging system is 3 μm ~5 μm/8 μm ~12 μm, the degree of linear polarization is 95%, and the extinction ratio is above 100∶1. The results of analysis data and polarization fusion image are given. These results indicate that the infrared polarization imaging system can effectively realize the detection and recognition of camouflage target. The results can also be extended into the detection and reorganization of artificial false objects and aerial stealth targets.

Key words: infrared polarization imaging; Stokes parameter; fused polarization image; camouflage target; detection and recognition

引言

目标反射、辐射的偏振态变化与其表面状态和固有属性密切相关,不同类型的目标具有不同的偏振特性。一般自然环境中地物背景的偏振度较低,而人工目标的偏振度较高,如植物的偏振度一般小于 0.5%,岩石、沙石、裸土等的偏振度介于 0.5%~1.5%之间,而水面、水泥路面、屋顶等的偏振度一般大于 1.5%(尤其水面的偏振

收稿日期:2011-11-14; **修回日期**:2012-03-02

作者简介:王军(1968-),男,江苏沛县人,研究员,主要从事军用目标光学特性、光谱成像及仿真评估技术研究工作。
E-mail:xa205wangjun@163.com

度达到了 8%～10%),某些非金属材料和部分金属材料表面的偏振度达到了 2%以上(有的甚至达 10%以上)。虽然水面、水泥路面等的偏振度较大,但是其与以金属材料(包括具有表面涂层的金属物体)为主体的军用目标(如导弹、飞机、坦克装甲车辆等)的偏振状态一般是不同的。通过获得目标不同偏振状态的特性,可对具有线偏振、椭圆偏振及部分偏振特性的军用目标进行探测与识别[1-3]。20 世纪 90 年代,偏振成像探测技术的军事应用研究引起了人们的重视。随着红外偏振器件性能的提高,如偏振度和消光比的提高以及新型红外偏振探测系统的研制成功,红外偏振成像技术在军事上的应用越来越深入。

1　国内外情况

近年来,发达国家在偏振成像探测技术研究方面开展了大量的理论与试验研究,取得了很大的进展。美国军方和 BAE SYSTEMS 高级技术中心对偏振成像探测技术在军事上的应用开展了大量研究工作,取得了大量试验数据[4]。图 1 为普通成像(左)和红外偏振成像(右)对草丛中地雷探测的试验效果对比图。

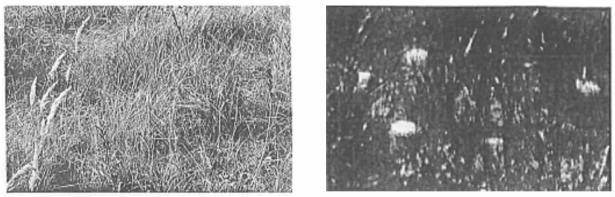


图 1　红外偏振成像技术识别草丛中的地雷

Fig. 1　Using infrared polarization imaging technology to recognize the landmine in grass

英国 Thales 光学有限公司开展了红外偏振成像探测研究,利用长波偏振热成像仪与普通热成像仪进行了比对试验研究。图 2 为被沙土掩埋的 3 种金属材料物体的强度图和偏振图,采用偏振融合算法可以得到偏振融合图[5]。

随着偏振成像技术在军用目标探测识别应用研究方面的深入,美军 2005 年研制了分振幅(波前)型的偏振成像仪,它是军用领域偏振探测的新技术代表;近年来,美国又研制了焦平面红外偏振传感器,它是在凝视焦平面的每一个像素上制作微型偏振器,垂直、水平、45°和 135°线偏振各占1/4 像素,可通过斯托克斯方程得到偏振融合图像[6],提高了偏振成像系统的探测灵敏度,目前正在向大面阵方向发展。

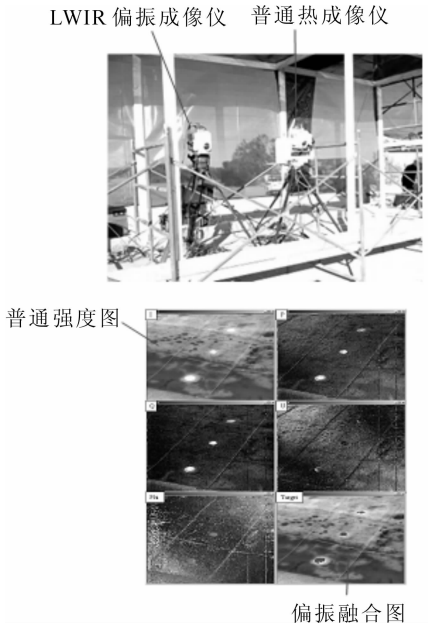


图 2　LWIR 偏振成像与普通热成像试验效果比较

Fig. 2　Experiment effect comparison between LWIR polarization image and common IR imaging

近年来,国内一些研究机构跟踪国外偏振成像技术的发展,研制了相关产品。如西安应用光学研究所开展了红外偏振探测技术研究,研制了中/长波红外偏振成像系统样机;中科院所属单位研制的偏振成像仪用于遥感探测中:2002 年,上海技物所研制的六通道偏振成像探测器(卷云计,SZ-3)随神州三号飞船发射升空;2001 年,安徽光机所研制的三通道航空偏振成像仪由三台 CCD 相机组合,探测波段在可见光、近红外波段,每个通道各自选择波片,探测 3 个 Stokes 矢量,体积较大,有运动部件。

2　系统组成与工作原理

2.1　原理介绍

光波的振动是有极性的。一般的自然光在各个方向振动是均匀分布的,是非偏振光,如果光波在同一方向上振动,就称为完全偏振光或线偏振光。光滑的非金属表面在一定角度下(称为布儒斯特角)反射形成的光是线偏振光,偏离了这个角度,就会有部分非偏振光混杂在偏振光里,称为部分偏振光,如果偏离的角度较大,就会

成为非偏振光;对于金属材料表面,反射光相对于入射光而言,2 个垂直的偏振分量 s 波和 p 波都发生了位相跃变,一般情况下,s 波和 p 波的位相跃变是不同的,因此,若入射光为线偏振光,则反射光一般将变为椭圆偏振光[7];对于散射光而言,同样存在散射光偏振,但当湿度增大或电导率较高时,材料表面散射时还将产生圆偏振分量。进一步研究表明,物体的热辐射偏振特性与表面类型(例如材料表面是各向同性或是各向异性)及粗糙度等有关,对于各向同性的表面来说随着表面粗糙度的增加热辐射偏振减小,这是由线性偏振分量随机产生的结果,对于各向异性的表面来说随着表面粗糙度的增加热辐射偏振是增加的[8]。

斯托克斯矢量利用 4 个斯托克斯参量来描述光波的偏振态和强度,它们均是光强的时间平均值,具有强度的量纲,可以直接被探测器探测。光波的 4 个 Stokes 参量为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 + I_3 \\ I_1 - I_3 \\ I_2 - I_4 \\ I_1 + I_3 - 2I_2 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:I_1,I_2,I_3 和 I_4 分别代表偏振方向为 0°,45°,90°和 135°的光强度;I 代表光的总强度;Q 代表水平偏振和垂直偏振间的强度差;U 代表偏振方向在 45°和 135°之间的强度差;V 代表光的左旋和右旋圆偏振分量的强度差。

在实际偏振探测中往往不用相位延迟器,只靠旋转线偏振片即可得到所求 Stokes 参量。因此,偏振光的偏振度 P 和偏振角 φ 可以简化为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \tag{2}$$

$$\varphi = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \tag{3}$$

偏振度 P 和偏振角 φ 的图像都是重要的偏振信息源。测量并分析它们的图像特征可以得到重要特性数据[9-10]。同时,还可以将 P、φ、I、Q、U 等图像进行组合、融合及伪彩色增强,以便进一步提高目标探测识别概率。

2.2　系统组成与工作过程

偏振成像系统对目标探测识别研究主要集中在 3 个方面:a) 采用偏振片或其他方法对目标偏振态进行分解、扫描、角度编码;b) 从探测器的光强响应中解算出目标的偏振信息,将偏振信息可视化;c) 偏振图像(融合)处理,提取目标特征。

偏振探测方法有多种,目前较常用的主要有:旋转偏振片型、分振幅(波前)型、液晶调制型等。分振幅(波前)型光路调节困难,偏振微透镜阵列制作难度高;液晶调制型对光的损耗大(尤其对红外),电调制噪声大。因此,对于目标偏振探测技术研究,目前我们采用旋转偏振片型方法,研制了中波/长波红外偏振成像系统样机,主要技术指标:波段范围 3 μm～5 μm 和 8 μm～12 μm;线偏振度 95%;消光比大于 100∶1;视场角 11°和 8°;帧频 25 Hz。

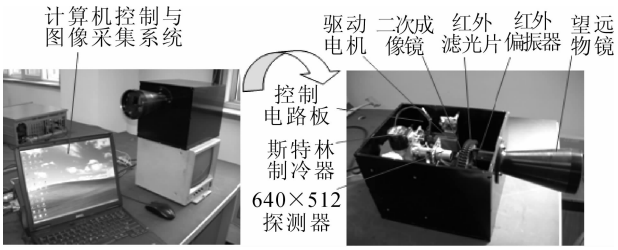


图 3　红外偏振成像系统样机

Fig. 3　Medium wave infrared polarization imaging system prototype

红外偏振成像系统(图 3)主要由望远物镜、红外偏振器、红外滤光片、二次成像镜、驱动电机、控制电路板、640×512 像元探测器(斯特林制冷器)、计算机控制与图像采集系统等构成。

工作过程:首先,启动系统,系统自检和非均匀性校自动完成;之后,根据试验需要,由计算机发出控制指令给驱动电机,驱动电机带动红外偏振器和红外滤光片旋转到指定位置,目标图像经过望远物镜、红外偏振器、红外滤光片、二次成像镜聚焦到探测器上,这里,红外偏振器需要旋转 4 个偏振态位置,4 次成像。

3　试验结果

3.1　试验条件

2010 年 11 月,试验条件多云,环境温度 10℃～13℃,相对湿度 40%～50%,能见度 5 km。目标为伪装车辆和坦克,测试距离 500 m,测试设备采用中波/长波红外偏振成像装置和普通(传统)热像仪。

3.2　试验数据处理方法

采集并分析得到的图像数据,对偏振图像进

行斯托克斯计算与图像融合处理,给出传统热成像图、偏振度 P 图、偏振角 φ 图、伪彩色增强图以及分析评价表。

1) 偏振图像处理

采用斯托克斯参量法对所采集的不同角度的偏振图进行计算,根据公式(1)、(2)、(3),得到斯托克斯参量相对应的总强度 I 图、偏振分量 Q 图、偏振分量 U 图、偏振度 P 图、偏振角 φ 图。

2) 偏振分量图的伪彩色融合处理

将偏振分量图进行 RGB 伪彩色融合,根据目标/背景光学特性参数,分别选择 3 幅不同特征的偏振分量灰度图作为 RGB 图的 3 个不同成分,组合计算生成所选 3 幅灰度图的伪彩色融合图,图 4 给出伪彩色融合算法框图。

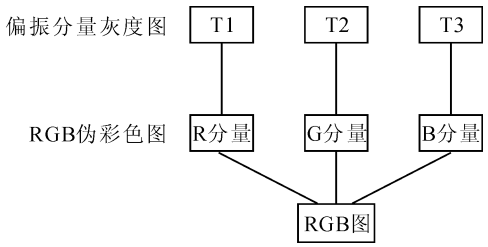


图 4　伪彩色融合算法框图

Fig. 4　Schematic of pseudo color fusion algorithm

图像灰度平均梯度值是分别将图像长度和宽度方向上的相邻像素灰度值取差后求平方和再求均方根值,它能较好地反映图像的纹理变化特征,其值越大表示图像质量越好。

如果 ΔG_x^2 和 ΔG_y^2 表示图像在 x,y 方向的梯度,图像的灰度平均梯度可以表示为

$$GMG = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{x=1}^{m-1} \sum_{y=1}^{n-1} \sqrt{\frac{(\Delta_x G^2(x,y) + \Delta_y G^2(x,y))^2}{2}} \tag{4}$$

目标与背景对比度:

$$C = \left| \frac{D_T - D_B}{D_T + D_B} \right| \tag{5}$$

式中 D_T 和 D_B 分别表示目标和背景的平均灰度值。

3.3　试验结果

1) 试验 1:中波红外偏振特性试验

采用传统中波热像仪和中波红外偏振成像系统进行对比试验,目标为伪装车辆,图 5 为测试数据和偏振度 P 图以及偏振融合增强图。

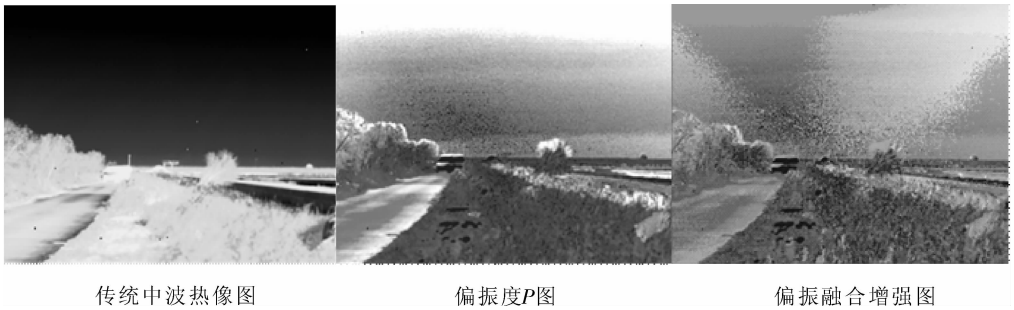


图 5　传统中波热成像和偏振成像效果比较图

Fig. 5　Comparison between traditional medium wave image and polarization image

试验所采集的伪装车辆/地面背景的原始强度图像和经过解算的偏振度 P 图的灰度平均梯度值和对比度值,如表 1 所示。

表 1　伪装车辆/地面背景原始强度图像和偏振度 P 图评价表(中波)

Table 1　Evaluation about original intensity image and polarization image of camouflage vehicle/background

项目	灰度平均梯度	对比度
原始强度图	3.5	0.040 5
偏振度 P 图	12.3	0.075 0
偏振融合增强图	27.7	0.454 7

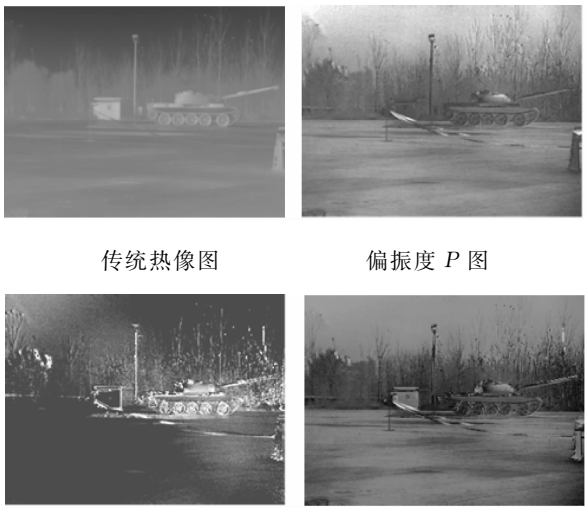
从图像和数据结果可以看出,在测试条件(如环境条件、测试方位和距离等)和参数设置(如增益、积分时间等)相同的情况下,中波红外偏振成像系统的图像效果(偏振度 P 图和偏振融合增强图)优于传统中波热像仪。

2) 试验 2:长波红外偏振特性试验

采用传统长波热像仪和长波红外偏振成像装置进行对比试验,目标为 59 式坦克,图 6 为测试数据和成像效果比较图。

试验所采集的坦克/地面背景的原始强度图像和经过解算的偏振度 P 图、偏振角 φ 图的灰度

平均梯度值和对比度值,如表 2 所示。



传统热像图　　偏振度 P 图

偏振角 φ 图　　偏振融合增强图

图 6　传统长波热成像和偏振成像效果比较图

Fig. 6　Comparison between tradition long wave thermal image and polarization image

表 2　坦克/地面背景原始强度图像和偏振度 P 图和偏振角 φ 图评价表

Table 2　Evaluation about original intensity image and polarization image of tank/background

项目	灰度平均梯度	对比度
原始强度图	1.7	0.032 1
偏振度 P 图	2.9	0.052 2
偏振角 φ 图	9.7	0.156 7
偏振融合增强图	11.6	0.129

从测试数据分析结果可以看出,在测试条件(如环境条件,测试方位和距离等)和参数设置(如增益、积分时间等)相同的情况下,长波红外偏振成像装置的图像质量相对传统长波热像仪而言有所提高。

4　结论

研制了红外偏振成像系统样机,采集了野外目标与背景图像,通过旋转红外偏振器形成 0°、45°、90°、135°4 个方向的偏振图,对其进行计算与图像融合处理,得到偏振度 P 图和偏振角 φ 图以及偏振融合图像。与传统热成像仪进行了比对:在红外探测器灵敏度足够高的情况下,利用红外偏振成像技术得到的目标偏振图像效果优于传统热成像仪直接探测得到的热图像,验证了红外偏振成像技术对伪装目标探测识别的优越性。

参考文献:

[1] CONNOR B , CARRIE I. Recent trials results of a LWIR polarimeter[J]. SPIE, 2009, 7298:7290A-1-72980A-12.

[2] JORDAN D ,INNES G,HAYTER D. Polarimetric imaging[J]. Journal of Defence Science, 2005, 10 (3): 166-172.

[3] EGAN W G,Enhancement of optical detectability with polarization[J]. SPIE,1999,3699:38-48.

[4] DUGGIN M J,EGAN W G, GREGORY J. Measurements of polarization of targets of differing albedo and shadow depth[J]. SPIE, 1999, 3699:27-37.

[5] DUGGIN M J. Imaging polarimetry in scene element discrimination[J]. SPIE, 1999,3754:108-117.

[6] HUBBARD W,BISHOP G,GOWENA T , et al. Multispectral-polarimetric sensing for detection of difficult targets[J]. SPIE,2008,7113:71130L-1-71130L-7.

[7] 王军,高教波,胡煜,等.基于 CVF 的红外偏振超光谱成像技术研究[J]. 应用光学, 2007,28 (专刊): 164-169.
WANG Jun,GAO Jiao-bo,Hu Yu ,et al. Research of infrared polarization hyperspectral imaging technology based on CVF[J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(sup.):164-169.(in Chinese with an English abstract)

[8] EL-SABA A,BEZUAYEHU T. Higher probability of detection of subsurface land mines with a single sensor using multiple polarized and unpolarized image fusion[J]. SPIE,2008,6972,69720U.

[9] ERBACH P S, PEZZANITI J L,CHENAULT D B, et al. Design and performance of polarized IR scene generator[J]. SPIE,2008,6972:69720Z-1-69720Z-11.

[10] ESTRERA J P. Digital image fusion system:color imaging and low light targets[J]. SPIE,2009,7298: 72981C-1-72981C-14.