

复杂地物背景下的车辆目标激光主动偏振成像研究

徐飞飞¹ 曾朝阳² 陈杭¹

¹装备学院研究生管理大队, 北京 101416

²装备学院光电装备系, 北京 101416

摘要 为了提高反坦克导弹在复杂背景下的目标识别能力,可利用目标和背景的偏振特性差异实现目标探测和识别。采用激光主动偏振成像方法获取车辆目标在无背景、草地背景、混凝土背景和沙土背景4种典型背景下的强度图像和偏振图像,比较分析两类图像的边缘强度、清晰度和空间频率,结果表明,偏振图像的边缘和细节特征比强度图像更好,有利于在复杂背景中识别车辆目标。激光主动偏振成像方法对提高反坦克导弹在复杂地物背景下的目标识别能力有重要意义。

关键词 成像系统; 偏振成像; 目标识别; 斯托克斯矢量; 车辆目标; 目标探测; 复杂背景

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.051103

Research on Active Laser Polarization Imaging of Vehicle Targets Under Complicated Background

Xu Feifei¹ Zeng Chaoyang² Chen Hang¹

¹ Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment, Beijing 101416, China

² Department of Optical and Electronic Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China

Abstract In order to improve the target identification capability of the anti-tank missiles, the difference in polarization properties of the target and the background can be utilized to realize target detection and recognition. The intensity images and polarization images of the armored vehicles in four different environment backgrounds, such as no background, grass background, concrete background, and sandy background, are obtained by using the active laser polarization imaging technology. All these acquired intensity and polarization images are compared and analyzed in terms of edge intensity, image definition and spatial frequency, respectively. The results show that the polarization images have better edge and detail characteristics than the intensity images, which is conducive to the vehicle target recognition under complex background. The active laser polarization imaging technology will play an important role in promoting the target recognition capability of anti-tank missiles.

Key words imaging systems; polarization imaging; target recognition; Stockes vectors; vehicle targets; target detection; complex background

OCIS codes 110.5405; 110.2960; 110.2970; 100.3008

1 引言

现代战争中,反坦克导弹因其较高的打击精度与目标识别准确度,已成为一种主要的反装甲武器。其制导方式有毫米波雷达、被动红外、激光制导等。随着作战环境的日趋复杂,为加强装甲车辆防护,世界各国在研究新型装甲的同时各自研制了主动防御系统,如俄罗斯的“窗帘-1”光电干扰式主动防御系统、以色列的“战利品”主动防护系统以及美国的陆军综合主动防护系统(IAAPS)等^[1]。反坦克导弹需要在沙土、草地、植被和混凝土等复杂地物背景环境下工作,应对烟幕遮蔽、电磁干扰、假目标和伪装隐身等对抗措施的干扰,

收稿日期: 2015-11-26; 收到修改稿日期: 2015-12-27; 网络出版日期: 2016-03-29

作者简介: 徐飞飞(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光偏振成像探测方面的研究。E-mail: zyxufei@126.com

导师简介: 曾朝阳(1971—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光电信号处理方面的研究。E-mail: zcyang@126.com

因此其目标探测精度和识别准确度均会有所降低。

偏振探测作为一种新的目标探测方法在军事领域备受关注,与传统探测手段相比,激光主动偏振探测可以获得除光强信息之外的偏振信息,具有穿透烟雾和识别目标细节的能力,世界各军事强国在偏振遥感和激光主动偏振成像方面均进行了研究。美国罗彻斯特大学开发的 DIRSIG 建模软件可进行目标的偏振特性仿真^[2];亚利桑那大学 Gurton 等^[3]研究了防水布、不同金属和电介质板的红外偏振特性,发现军事上常用的人造目标与自然背景偏振特性差异明显;de Jong 等^[4]利用偏振技术探测识别杂草中的反步兵地雷,发现在草地背景中利用偏振成像可以提高地雷的识别准度和精度;Forssell^[5]利用红外偏振成像识别装甲车,通过红外偏振成功地从树木背景中识别出装甲车辆。在激光主动偏振成像研究方面,王霞等^[6]研究了主动偏振成像的原理和系统结构;胡放荣等^[7]研究了线偏振激光主动成像,识别不同金属材料;张雪冰等^[8]对旋转波片法成像斯托克斯偏振仪进行误差标定和补偿。激光具有高亮度、良好的单色性等特点,与被动偏振成像相比,激光偏振成像具有成像分辨率高、距离探测较远、能够同时获取目标距离方位信息等优势。

本文简要介绍了激光主动偏振成像的探测原理^[9],并搭建实验平台,获得了无背景、草地背景、混凝土背景和沙土背景 4 种情况下的目标强度图像和偏振图像。通过 Matlab 平台计算获得目标的偏振度图像和偏振角图像,比较偏振图像和强度图像的边缘强度、清晰度和空间频率等评价指标,分析不同地物背景下车辆目标的可识别能力。在不同的地物背景下,利用激光偏振成像方法识别车辆目标能力有所差异,对比相同条件下的目标强度图像,本文方法获得的偏振图像更有利于目标的探测与识别。

2 激光主动偏振成像探测原理

2.1 偏振态的斯托克斯表示

偏振是电磁波除了波长、相位、振幅以外的又一重要属性。不同物质具有不同的偏振特性,目标偏振特性与目标材料、表面粗糙度、外形等因素有关。偏振常用琼斯矩阵法、邦加球表示法、斯托克斯参量法^[10]等表示。采用斯托克斯参量法时,目标偏振态 \mathbf{S} 可表示为

$$\mathbf{S} = [I \ Q \ U \ V]^T, \quad (1)$$

式中 I 为光强分量, Q 和 U 分别为线偏振分量, V 为圆偏振分量。

自然条件下, V 值较小,与实验过程中的误差相比可忽略不计,因此 V 取为零。

通过某光学元件后,偏振态的变化可用穆勒(Mueller)矩阵 \mathbf{M} 表示为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{S} 为出射偏振态, \mathbf{S}_0 为入射偏振态。经过 4 次测量,即可得到输入的斯托克斯参量。

对理想的线偏振器,透过轴与 OX 轴成 θ 方位角。 \mathbf{S} 可由偏振器件的 \mathbf{M} 矩阵左乘 \mathbf{S}_0 得到,即

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

圆偏振分量 V 设为 0,得到光强

$$I = \frac{1}{2} (I_0 + Q_0 \cos 2\theta + U_0 \sin 2\theta). \quad (4)$$

只需要测量 3 个不同角度下的光强值,就可计算出其斯托克斯参量,通过实验分别获取 0° 、 60° 、 120° , 3 个偏振方向的图像。

由斯托克斯参量可以计算线偏振度 P 和偏振角 α ^[11]:

$$\begin{cases} P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ \alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 激光主动偏振成像实验系统

在实际军事应用中,目标可能处于多种复杂的地物背景下,选取无背景、草地背景、沙土背景和混凝土背景 4 种典型地物背景条件,其中无背景条件用黑色纸板模拟。分别获取 4 种背景下的偏振图像和强度图像。根据偏振双向反射分布函数(BRDF)仿真分析可知,该车辆目标在波长为 630 nm 时,偏振能量最大。因此实验采用 632 nm 激光器,系统如图 1 所示,目标选取某装甲车模型,背景板分别粘贴杂草、沙土、混凝土块,实验在暗室条件下进行。

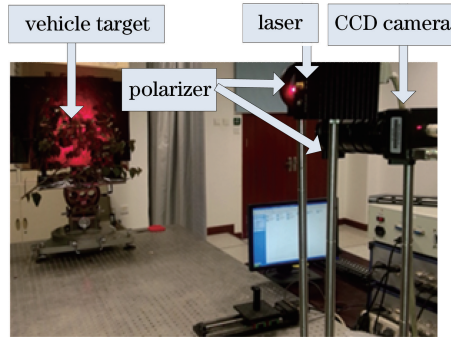


图 1 激光偏振主动成像实验系统

Fig. 1 Experimental setup of active laser polarization imaging system

通过以下步骤获得 4 种典型地物背景下的目标图像:

- 1) 不加偏振片,获得 632 nm 激光下的目标强度图像;
- 2) 加偏振片,激光器发射的光通过偏振片变成线偏振光,通过旋转偏振片分别获得 0° 、 60° 、 120° , 3 个偏振方向的目标偏振图像;
- 3) 更换地物背景,重复步骤 1)、2)。

3 实验结果与图像分析

3.1 实验结果

利用(5)式,通过 Matlab 软件平台仿真目标的偏振度图像和偏振角图像,如图 2~5 所示。通过对比图 2~5 的偏振度图像、偏振角图像和强度图像,可以发现车辆目标的偏振度高于背景区域,因为车辆属人工目标,表面较为光滑,与自然背景相比,产生的反射以镜面反射为主,地物背景表面较粗糙,产生较强的漫反射;在目标部件的边沿处,偏振度和偏振角变化明显,更好地凸显目标的轮廓特征。

3.2 图像分析与讨论

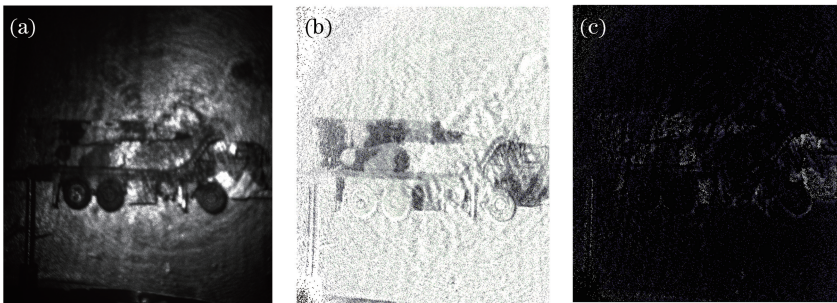


图 2 无地物背景下的目标图像。(a) 强度图像; (b) 偏振度图像; (c) 偏振角图像

Fig. 2 Target images without background. (a) Intensity image; (b) polarization degree image; (c) polarization angle image

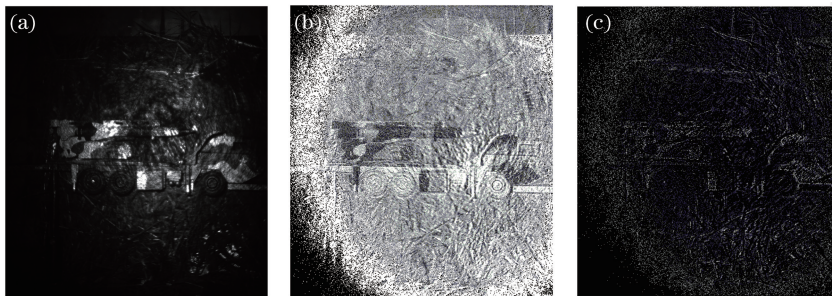


图 3 草地背景下的目标图像。(a)强度图像；(b)偏振度图像；(c)偏振角图像

Fig. 3 Target images under grass background. (a) Intensity image; (b) polarization degree image; (c) polarization angle image

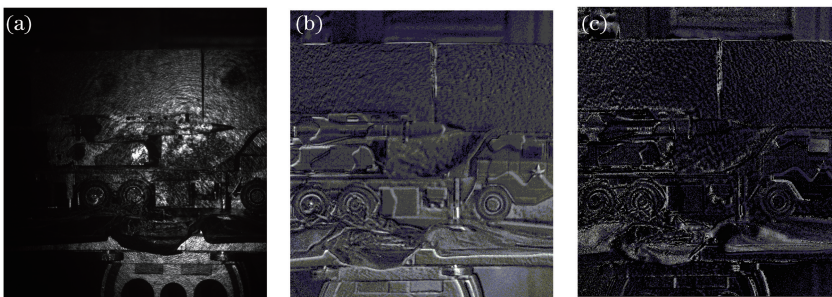


图 4 混凝土背景下的目标图像。(a)强度图像；(b)偏振度图像；(c)偏振角图像

Fig. 4 Target images under concrete background. (a) Intensity image; (b) polarization degree image; (c) polarization angle image



图 5 沙土背景下的目标图像。(a)强度图像；(b)偏振度图像；(c)偏振角图像

Fig. 5 Target images under sandy background. (a) Intensity image; (b) polarization degree image; (c) polarization angle image

计算不同地物背景下获取的偏振图像和强度图像的图像边缘强度、图像清晰度和空间频率,并对偏振图像和强度图像进行定量比较分析。

利用 Sobel 算子对图像进行边缘检测,对检测出的边缘图像求和得到图像总边缘强度,以 L 表示。 L 值越大表示图像的边缘信息越丰富,具体结果如表 1 所示。

表 1 不同背景下的图像边缘强度

Table 1 Edge intensity of images under different backgrounds

	No background	Grass	Concrete	Sandy
Intensity image	39.5708	20.5177	43.7740	48.0674
Polarization degree image	129.2665	262.3865	281.9829	219.5314
Polarization angle image	53.2839	120.4370	164.3757	155.9482

从表 1 可以看到,在无背景和其他地物背景下,偏振度图像和偏振角图像的边缘强度远大于强度图像,

具有更好的边缘特性;3种地物背景下偏振图像相对于强度图像的边缘强度增加量比无背景下更大,因为实验选用黑色纸板作为无背景条件,其表面比地物背景光滑,与目标的偏振特性差异较小;混凝土背景下,偏振图像边缘强度增加最明显。

对一幅 $M \times N$ 大小的图像,清晰度函数可表示为

$$G = \frac{1}{M \times N} \sum \sqrt{\frac{\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2}{2}}, \quad (6)$$

式中 ΔI_x^2 和 ΔI_y^2 分别为水平和垂直方向上图像灰度值的差分, G 为图像清晰度,表示影像上各细部影纹及其清晰程度, G 越大,图像清晰度越高。具体结果如表 2 所示。

表 2 不同背景下的图像清晰度

Table 2 Target image definition under different backgrounds

	No background	Grass	Concrete	Sandy
Intensity image	9.5417	2.8912	7.1590	7.7151
Polarization degree image	31.1966	60.0189	65.7299	49.0986
Polarization angle image	12.4589	25.6738	35.5378	32.9270

从表 2 可以看到,无论有无地物背景,偏振图像的清晰度均高于强度图像;有地物背景存在时,强度图像的清晰度比无背景时低,但偏振图像的清晰度比无背景时高,说明在复杂地物背景下,偏振图像具有更好的清晰度;沙土背景下偏振图像清晰度相对低于其他地物背景下的图像。

空间频率 F 定义为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_d^2}, \quad (7)$$

式中 F_x 为水平方向频率, F_y 为垂直方向频率, F_d 为对焦方向频率^[12]。空间频率 F 反映图像的总体活跃程度, F 越大,目标的细节越清晰。具体结果如表 3 所示。

表 3 不同背景下的图像空间频率

Table 3 Spatial frequency of images under different backgrounds

	No background	Grass	Concrete	Sandy
Intensity image	22.7454	9.7738	20.1304	19.7038
Polarization degree image	61.2516	127.7049	129.9207	92.5797
Polarization angle image	32.5865	64.5611	82.1477	77.0453

从表 3 可以看到,无论有无地物背景,偏振图像空间频率均高于强度图像;有地物背景存在时,强度图像的空间频率比无背景时低,但偏振图像的空间频率比无背景时高,说明在复杂地物背景下,偏振图像能更好地反映目标细节。

通过比较以上 3 个图像质量评价参数可以发现,无背景(黑色纸板)下时目标强度图像的清晰度和细节特征均好于 3 种地物背景。但在地物背景下偏振图像的边缘强度、清晰度和空间分辨率远大于无地无背景的情况,这是因为物体的退偏振能力与其材质、表面粗糙度等因素有关,表面光滑的金属、纸板等人工目标表面较为光滑,对入射线偏振光以镜面散射为主,退偏振能力较差,而草地、混凝土、沙土等背景表面不够光滑、排列不规则,对入射线偏振光以漫散射为主,退偏振能力较强^[13]。因此,在地物背景下目标与背景的偏振对比度更大,与基于光强度成像相比,激光偏振成像更容易识别目标。

4 结 论

通过激光主动偏振成像对无背景和草地、混凝土、沙土背景下的车辆目标成像,分析其偏振度和偏振角图像,得出以下结论:与基于目标光强信息的目标探测效果相比,在不同的地物背景下,激光主动偏振成像所获得的偏振图像具有更好的边缘和细节特征,更容易识别目标;在草地背景下利用激光偏振进行目标探测和识别的效果最好,混凝土背景次之,沙土背景下相对较差。

作为复杂战场环境下探测车辆目标的一种有效手段,激光偏振成像在几种典型地物背景下能够显著提高目标识别能力。激光偏振成像探测还有克服暗夜条件、不受电磁干扰、穿透烟雾和识别伪装目标等优势,在未来复杂战场环境下的目标识别中将发挥重要作用。

参考文献

- 1 Cao Hequan, Zhang Guangming, Sun Sujie, *et al.*. Status and development of protection technology of armored vehicles [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(12): 1549-1554.
曹贺全, 张广明, 孙素杰, 等. 装甲车辆防护技术研究现状与发展[J]. *兵工学报*, 2012, 33(12): 1549-1554.
- 2 Meyers J P. Modeling polarimetric imaging using DIRSIG[D]. New York: Rochester Institute of Technology, 2002.
- 3 Gurton K, Felton M, Mack R, *et al.*. MidIR and LWIR polarimetric sensor comparison study[C]. SPIE, 2010, 7664: 76640L.
- 4 de Jong W, Cremer F, Schutte K, *et al.*. Usage of polarization features of landmines for improved automatic detection [C]. SPIE, 2000, 4038: 241-252.
- 5 Forssell G. Model calculations of polarization scattering from 3-dimensional objects with rough surfaces in the IR wavelength region[C]. SPIE, 2005, 5888: 588818.
- 6 Wang Xia, Zhang Mingyang, Chen Zhenyue, *et al.*. Overview on system structure of active polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2244-2251.
王霞, 张明阳, 陈振跃, 等. 主动偏振成像的系统结构概述[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2244-2251.
- 7 Hu Fangrong, Xiong Xianming, Dong Tingjin. Target detection and identification based on linear polarization laser active imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(2): 108-110.
胡放荣, 熊显名, 董挺进. 基于线偏振激光主动成像的目标探测与识别[J]. *激光与红外*, 2007, 37(2): 108-110.
- 8 Zhang Xuebing, Li Yanqiu, Zheng Meng, *et al.*. Calibration and error compensation of an imaging Stokes polarimeter based on rotating quarter-wave plate method [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0708007.
张雪冰, 李艳秋, 郑猛, 等. 旋转波片法成像斯托克斯偏振仪误差标定和补偿[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0708007.
- 9 Woolley M, Michalson J, Romano J. Observations on the polarimetric imagery collection experiment database [C]. SPIE, 2011, 8160: 81600P.
- 10 Hu Qiaoyun, Yang Weifeng, Hu Yadong, *et al.*. Principle and simulation of a spatially modulated full Stokes parameters polarization imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211004.
胡巧云, 杨伟锋, 胡亚东, 等. 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理及仿真 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211004.
- 11 Luo Yingda, Chen Zhe. Measurement principle and experimental design of polarized light's Stokes parameters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(6): 54-58.
罗英达, 陈哲. 偏振光斯托克斯参量测量原理与测量方法设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(6): 54-58.
- 12 Ma Heng, Jia Chuanying, Liu Shuang. Image fusion based on spatial frequency [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 41(31): 215-218.
马恒, 贾传荧, 刘爽. 基于空间频率的图像融合方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2006, 41(31): 215-218.
- 13 Zhan Juntong, Fu Qiang, Zhang Su, *et al.*. Research on the effects of forward scattering angle to polarization imaging contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711007.
战俊彤, 付强, 张肃, 等. 前向散射角度对偏振成像对比度影响的研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711007.