

文章编号: 1672-8785(2014)05-0013-06

长波红外偏振图像信息的 提取与增强

邱眺文 张 焱 李吉成 杨卫平

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 ATR 国防科技重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 基于长波红外偏振成像探测技术在目标检测识别领域的优势, 本文搭建了长波红外偏振成像探测系统, 采集了室内外典型目标的长波红外偏振图像, 提取了三类典型目标的斯托克斯矢量、偏振度、偏振角以及两个组合特征 δ 与 ρ 等图像信息, 并对其特点进行了详细分析。基于对图像偏振信息的解算, 提出了一种目标-背景对比度增强方法。实验证明该方法可行且有效。

关键词: 长波红外; 红外偏振图像; 信息提取; 对比度增强

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.05.003

Extraction and Enhancement of Information about LWIR Polarization Image

QIU Tiao-wen, ZHANG Yan, LI Ji-cheng, YANG Wei-ping

(ATR Key Laboratory under College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: On the basis of advantages of Long Wave Infrared (LWIR) polarization imaging in the field of target detection and recognition, a LWIR polarization imaging detection system is built. The LWIR polarization images of some typical indoor and outdoor objects are collected by the system. The image information of three kinds of targets, such as Stokes vectors (I, Q, U), degree of linear polarization, angle of polarization and two combined features δ and ρ , is extracted. Their characteristics are analyzed in detail. A new method for enhancing target-background contrast based on the infrared polarization information obtained is proposed. The experimental result shows that the method is feasible and effective.

Key words: LWIR; infrared polarization image; information extraction; contrast

0 引言

偏振成像探测技术是近十余年来迅速发展起来的新型光电成像探测技术。利用该技术不仅能获取目标景物的光强信息, 还可获取目标景物的偏振信息, 在目标探测识别领域具有很

大的应用潜力。8~14 μm 的长波红外辐射主要来源于物体自身的辐射。长波红外偏振在目标探测识别领域具有其自身的优势。首先, 物体的长波红外辐射比较稳定, 这是因为在环境温度条件下, 任何物体本身就是一个持续不断发射的长波红外辐射源, 而不必反射或散射太阳光; 其

收稿日期: 2013-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61302145、61101185)

作者简介: 邱眺文 (1990-), 男, 湖南平江人, 硕士研究生, 主要从事红外偏振成像自动目标识别方面的研究。

E-mail: qiutiaowen@126.com

次,与中波红外辐射相比,物体的长波红外辐射受周围环境的影响比较小,这是因为太阳和大气会使周围环境的中波辐射强于长波辐射,周围环境辐射被目标表面反射后会与目标自身辐射相叠加发生消偏振,从而使中波红外的偏振性小于长波红外,而且昼夜变化显著;最后,物体的长波红外偏振性相对更明显,这是因为典型目标表面的粗糙度比长波波长小,这些表面在长波波段显得更光滑,更容易保持线偏振状态^[1]。基于以上原因,长波红外偏振成像在目标探测识别应用方面,特别是自然杂波背景下的人工目标探测识别方面具有明显的优势和广阔的应用前景。

基于长波红外偏振成像探测的特点和优势,国外学者进行了大量的实验与理论研究。Cooper 等在对舰船目标和海面背景进行红外偏振成像实验后得出了这样的结论:舰船目标的偏振度不明显,海面主要表现出垂直偏振度;目标与背景的水平偏振度的对比度在长波红外波段远强于中波红外波段^[2]。Goran Forssell 等在野外环境下进行了伪装遮障的长波红外偏振成像探测实验,并取得了明显的探测效果^[3]。Jacob L. Michalson 等研究了气象条件对长波红外偏振成像的影响,针对自然背景中的人工目标探测,测试了不同天气状况对斯托克斯参量及偏振度性能的影响^[4]。Sagiv Lior 等提出了利用长波红外高光谱图像探测和辨别烟囱排放气体的方法^[5]。与国外取得的研究成果相比,我国在该技术方面的研究和应用还很欠缺。

红外偏振成像能够获取目标景物的丰富信息。然而,如何提取和挖掘有用的信息,分析和理解这些信息以及如何正确有效应用这些信息,都是需要我们考虑的问题。本文利用搭建的长波红外偏振成像设备,对室内外典型目标进行了多个偏振方向的偏振图像采集,对获取的图像的偏振信息进行了处理与分析,其中包括斯托克斯参量、偏振度、偏振角以及两个组合特征 δ 和 ρ ,提出了利用偏振信息增强目标-背景对比度的有效方法。

1 红外偏振成像的基本原理

红外偏振成像需要利用红外偏振成像探测系统。文献 [6] 给出了多种成像技术方案,总的来说,红外偏振成像可以分为时序探测和同步探测两种模式。时序探测模式通过电机驱动步进或连续旋转光学元件(偏振片、波片)每一时刻获取单个偏振方向图像。这种模式的光学系统较简单,由于获取的不同偏振方向的图像具有时差,因此仅适用于静止或慢速运动目标。同步探测模式能够同时获取多个通道的偏振图像,如光分束的多探测器方案以及偏振片与焦平面集成方案。这种模式能够实时获取目标的偏振信息,适用于运动目标的偏振成像,缺点是系统复杂,技术难度大。

本文针对实验室应用环境,采用时序探测方案搭建了长波红外偏振成像探测系统。系统由长波热像仪、长波红外检偏器和图像采集与处理软件模块组成。长波热像仪由 FLIR 公司生产,工作波段范围为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$,探测器焦平面的像素为 636×500 ,视场角为 $6.6^\circ\times 5.5^\circ$,像元尺寸为 $40\ \mu\text{m}$,A/D 量化精度为 14 bit。选用英国 SPECAC 公司生产的 CCaF_2 金属线栅偏振片为长波红外检偏器,其偏振度可达 99.4%,有效光学口径为 50 mm,栅间间距为 $0.25\ \mu\text{m}$,消光比为 320:1,透过率为 90%。

光的偏振态可用斯托克斯矢量^[7]表示。四维的斯托克斯矢量为 $S = [I\ Q\ U\ V]^T$,其中, I 表示总的光强; Q 表示水平线偏振分量与垂直线偏振分量之差; U 表示 45° 线偏振分量与 135° 线偏振分量之差; V 表示右旋偏振分量与左旋偏振分量之差。在偏振成像探测中,圆偏振分量 V 在仪器可以检测的范围内很小,可以近似认为 $V=0$ 。偏振元器件等光学介质对入射光的作用可用 Mueller 矩阵表示^[7]。利用线偏振片的 Mueller 矩阵得到任意偏振方向 θ 下的出射辐射光强与入射光斯托克斯矢量之间的关系:

$$I^\theta = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta) \quad (1)$$

根据式 (1),在不少于三个偏振方向(本文采用 0° 、 60° 、 120°)获取出射辐射光强后,就能够

解算出入射光的斯托克斯矢量偏振态, 得到前三个斯托克斯参量 (I 、 Q 、 U), 获得偏振度 P 与偏振角 A 等参数:

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

$$A = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (3)$$

偏振态的各斯托克斯参量有如下关系:
 $I^2 \geq Q^2 + U^2$, 式中等号对应于完全偏振光。利用斯托克斯矢量可把部分偏振光分解为完全偏振成分与自然光成分两部分:

$$I = I_N + I_P \quad (4)$$

式中, 完全偏振成分的光强为 $I_P = \sqrt{Q^2 + U^2}$, 自然光成分的光强为 $I_N = I - \sqrt{Q^2 + U^2}$ 。

在偏振信息解算与分析之前, 必须先对采集的偏振图像进行图像校正、滤波、配准和裁剪等预处理, 以消除探测器及光学元器件带来的杂波噪声影响, 并对不同偏振的图像之间的微位移偏差进行配准。

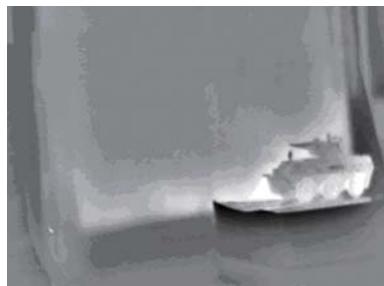
2 偏振信息解算与分析

2.1 斯托克斯参量、偏振度与偏振角图像与分析

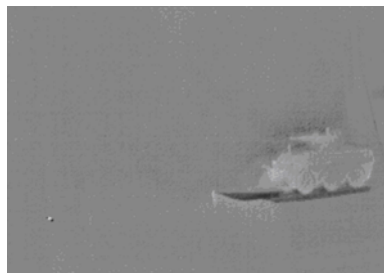
对室内的装甲车模型、室外水泥地面背景下的运输车以及天空云背景下的铁塔进行了长波红外偏振成像探测, 利用三个偏振方向的偏振图像解算出各斯托克斯参量、偏振度 P 和偏振角 A , 结果如图 1 所示。



(a) 起偏角为 0° 的偏振强度图像



(b) 斯托克斯参量 I 成像图像



(c) 斯托克斯参量 Q 成像图像

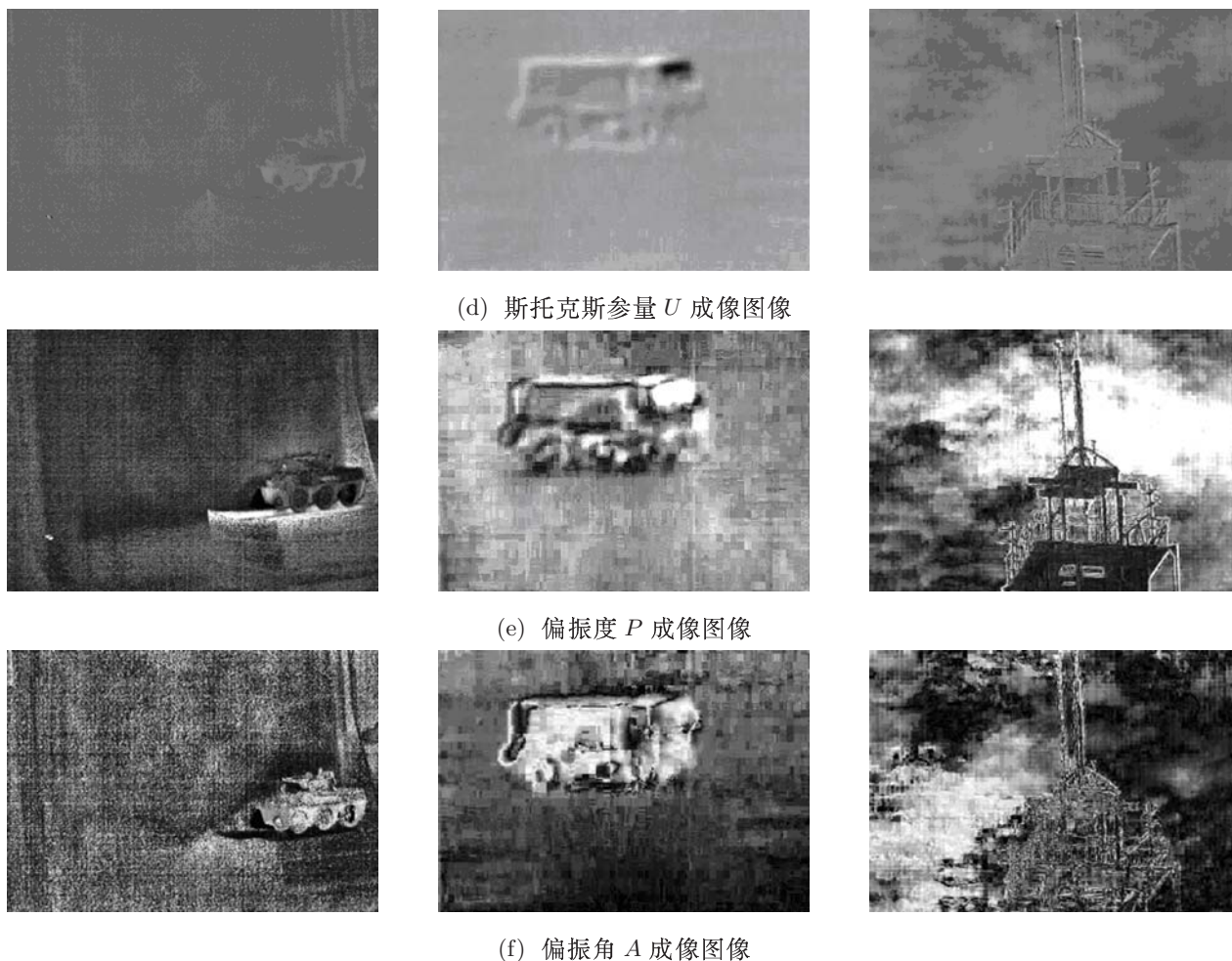


图 1 室内外典型目标的斯托克斯参量、偏振度及偏振角成像图像

I 表示目标景物总的光强信息。图 1(b) 中, 目标 1(装甲车模型) 的结构清晰, 背景光强信息较强; 目标 2(运输车辆) 中除前挡风玻璃外, 运输车及地面背景的光强都较大, 目标与背景不易区分; 目标 3(铁塔) 的结构清晰, 细节丰富, 目标与天空背景的光强差异较大。综上可知, 由于光强 I 成像图像综合了三个不同偏振角度的图像信息, 总体而言清晰, 可视性好, 但背景杂散光干扰强烈, 目标和背景的对比较低, 不利于直接应用于伪装或隐蔽目标的探测识别^[8]。

Q 和 U 由两个相互正交的偏振分量之差得到, 蕴含了目标景物的偏振信息。由图 1(c) 和 (d) 可知, Q 和 U 图像与 I 图像相比虽然丢失了部分目标细节信息, 但是背景光强得到明显抑制, 图像灰度分布更为均匀, 便于目标的检测与

分割, 已有的研究也证明直接应用 Q 图或者 U 图检测目标是可行的^[4]。

偏振度 P 表示物体表面辐射偏振性的大小, 是偏振成像探测的一个本质特征, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。Kristan P G 等多种热辐射表面的红外偏振度进行了测量, 得到偏振度随表面粗糙度、波长和入射角等因素变化的关系^[9]。从图 1(e) 中可知, 目标 1 的模型支撑面具有较大的偏振度, 表明相对于探测方向倾斜角度越大的物体表面偏振度越大; 目标 2 的前挡风玻璃具有较大的偏振度, 表明同一材料表面的偏振性分布较一致; 目标 3 的边缘偏振度比较大, 物体轮廓被突显出来, 天空中起伏的云背景表现出了较强的偏振性。综上所述, 偏振度反映了物体结构、轮廓、材料和粗糙度等性质, 能为目标的探

测识别提供有效依据。不同性质的物体如人工目标与自然景物、金属与绝缘体都可以借助偏振度得到辨别。

偏振角 A 表示光波偏振方向与参考方向的夹角, 与物体表观及固有特性直接相关, 是偏振成像探测的一个重要信息。Miranda A M 等通过对汽车等目标与自然背景的偏振特性的研究, 指出了汽车等目标与自然背景偏振角参数的差异^[10]。孙晓兵等的研究表明偏振角参数能够较好地描述物体不同的表面取向, 并能较好地与自然背景中凸现人工目标特征, 从而提高目标与背景的对比度^[11]。从图 1(f) 可知, 目标 1 与背景的偏振角在平均灰度和局部灰度杂乱度两方面的分布有明显差别, 体现为偏振角图像的纹理差异。基于这种差异可将目标区域分割出来。目标 2 的偏振角明显大于图中的地面背景, 通过偏振角的大小可有效分割目标; 目标 3 的偏振角相对较大, 尤其是边缘部分, 天空云背景的偏振角分布比较杂乱。综上可知, 平整目标表面的偏振角分布往往比较一致, 而背景的偏振角离散性比较大, 偏振角对物体表面性质的变化很敏感, 不同目标或目标与背景表面状态的差

别会使偏振角参数产生较大差异。偏振角图像能够体现不同表面取向及粗糙度等细节特征。偏振角参数改善了目标与背景的对比度, 能从杂乱的背景中突显人工目标, 能用于弱信号目标或隐藏目标的探测识别。但偏振角图像对噪声敏感, 容易受到噪声污染。

2.2 偏振态 δ 和 ρ 成像及分析

文献 [12] 中提出了两个组合特征, 即 δ 和 ρ , 其表达式为

$$\delta = \cos^{-1}\left(\frac{U}{\sqrt{I+Q}\sqrt{I-Q}}\right) \quad (5)$$

$$\rho = \frac{U}{I \sin(A)} \quad (6)$$

δ 是所观测电磁波的正交投影的相位差, 由三个斯托克斯参量计算得到。 ρ 是偏振度的扩展量, 包含比偏振度更多的信息, 尤其是保留了符号, 由斯托克斯参量和偏振角计算得到。 δ 和 ρ 成像图像分别如图 2(a) 和 (b) 所示。 δ 图像背景均匀, 杂波噪声少, 目标突出, 易于对目标进行检测或分割; ρ 图像背景同样得到了抑制, 目标结构与轮廓突显, 缺点是放大了原始偏振图像的噪声。

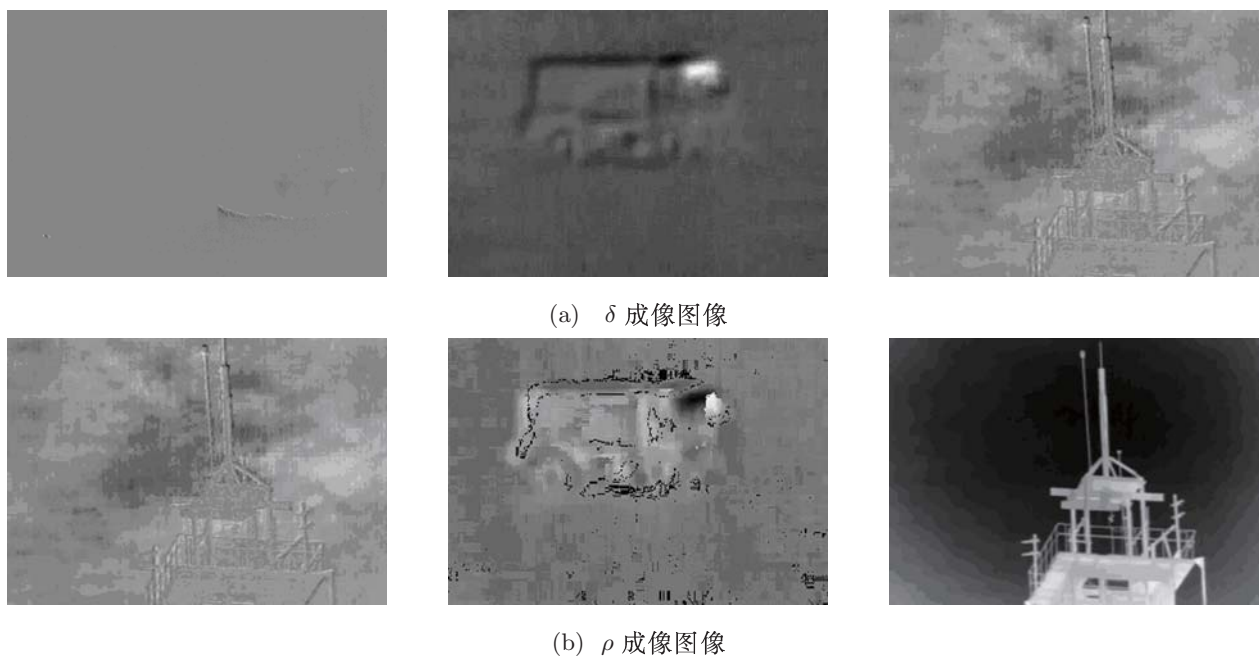


图 2 目标的 δ 和 ρ 的成像图像

2.3 目标-背景对比度增强

目标景物的偏振态往往是部分偏振。部分偏振光辐射 I 可视为由自然光成分 I_N 与完全偏振成分 I_P 两部分叠加而成^[7]。根据马吕斯定律, 偏振方向 θ 下的偏振分量可记为 $I^\theta = I_N^\theta + I_P^\theta = \frac{1}{2}I_N + I_P \cos^2(\theta - A)$, 其中自然光成分记为 $I_N^\theta = \frac{1}{2}I_N$, 线偏振成分记为 $I_P^\theta = I_P \cos^2(\theta - A)$ 。在某一个偏振方向 θ 下提取线偏振成分 I_P^θ 使背景信息减至最弱和使目标信息增至最强, 能够增强目标背景对比度, 特别是在伪装、隐身等目标背景对比度很小的情况下, 图像绝大部分的灰度信息无法用于辨识目标。通过合理提取图像信息可增强目标背景的对比度。

线偏振成分 I_P^θ 图像的目标背景对比度 C_P^θ 的计算式为

$$C_P^\theta = \frac{I_{TP}^\theta - I_{BP}^\theta}{I_{TP}^\theta + I_{BP}^\theta} = \frac{I_{TP} \cos^2(\theta - A_T) - I_{BP} \cos^2(\theta - A_B)}{I_{TP} \cos^2(\theta - A_T) + I_{BP} \cos^2(\theta - A_B)} \quad (7)$$

式中, C_P^θ 可取到最大值 1。

红外强度图像 I 的目标背景对比度 C 计算式为

$$C = \frac{I_T - I_B}{I_T + I_B} = \frac{(I_{TN} + I_{TP}) - (I_{BN} + I_{BP})}{(I_{TN} + I_{TP}) + (I_{BN} + I_{BP})} \quad (8)$$

式中, 在目标与背景强度差异较小时, C 值很小。因此, 不难得到 $\max_{\theta} C_P^\theta > C$, 选择合适的 θ 值就能提高目标背景的对比度 C_P^θ 。式 (7) 和 (8) 中下标 T 表示目标, B 表示背景, N 表示自然光成分, P 表示完全偏振成分。

目标背景对比度增强实验的结果如图 3 所示。不难发现, 在偏振方向为偏振角的目标区域求均值 ($\theta = \overline{A_T}$) 时提取的线偏振成分 $I_{TP}^{\overline{A_T}}$ 显著地抑制了背景。由表 1 各参数图的目标背景对比度的计算结果可知, $I_{TP}^{\overline{A_T}}$ 图的对比度远大于其它几种参数, 表明提取的偏振成分 $I_{TP}^{\overline{A_T}}$ 在改善目标背景对比度方面是有效的。



图 3 目标背景对比度增强图

表 1 各参量图的目标背景对比度比较

对比度	0° 偏振图	I 图	P 图	A 图	$I_{TP}^{\overline{A_T}}$ 图
装甲车模型	0.1795	0.1710	0.0909	0.1777	0.6076
运输车	0.0589	0.0706	0.0511	0.1778	0.5956
铁塔	0.3397	0.4526	0.2690	0.0871	0.5545

3 结论

利用搭建的长波红外偏振成像探测系统对室内外典型目标场景进行了偏振图像采集, 并对其斯托克斯参量 (I 、 Q 、 U)、偏振度、偏振

角以及 δ 和 ρ 等图像信息进行了提取与分析。结果表明, 红外偏振信息在目标探测识别应用领域中具有明显优势。基于对图像偏振信息的解算,

(下转第 23 页)