

## 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究

王霞<sup>1</sup>, 梁建安<sup>1</sup>, 龙华宝<sup>2</sup>, 姚锦华<sup>1</sup>, 夏润秋<sup>1</sup>, 贺思<sup>1</sup>, 金伟其<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 红外成像可以获得目标的强度信息, 偏振成像可以获得目标的偏振信息, 二者结合更有利于目标的探测识别。实验选用天空中飞机、海面上船只、草地上车辆三种典型自然背景下的典型目标作为研究对象, 并利用自行研制的四通道同时长波红外偏振成像系统实现图像采集。实验结果表明, 相对于传统的长波红外成像, 长波红外偏振成像具有以下优势: 长波红外偏振度图像在一定情况下具有更高的图像对比度, 有利于目标的探测识别; 长波红外偏振角图像可以突出目标细节, 有利于观察者对场景内容的理解; 长波红外偏振度和偏振角图像在一定情况下可以抑制杂波干扰, 有利于杂波情形下的目标成像研究。

**关键词:** 红外偏振; 目标探测; 图像对比度; 杂波干扰

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0704002

## Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives

Wang Xia<sup>1</sup>, Liang Jian'an<sup>1</sup>, Long Huabao<sup>2</sup>, Yao Jinhua<sup>1</sup>, Xia Runqiu<sup>1</sup>, He Si<sup>1</sup>, Jin Weiqi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Shanghai Aerospace Control Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The infrared imaging technology can acquire the intensity information of targets, and polarization imaging technology can acquire the polarization information of targets. Combination of the two technology is more conducive to the target detection and recognition. Experiments focused on typical targets under typical backgrounds, such as the plane in the sky, the ship on the sea, and the vehicle on the grass. In Experiments, the four-channel long wave infrared polarization imaging (LWIPI) system developed was employed to acquire images. Experimental results show that, compared with traditional long-wave infrared images, LWIPI has the following advantages: (1) the long wave infrared polarization degree image has a higher image contrast in a certain situation, which is beneficial to the target detection and recognition; (2) the long wave infrared polarization angle image can highlight target details, which is beneficial to the viewer's understanding of the content of the scene; (3) the long wave infrared polarization degree image and angle image can suppress clutter in a certain situation, which is beneficial to target imaging studies under the condition of a clutter.

**Key words:** infrared polarization; target detection; image contrast; clutter interference

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-12-19

基金项目: 武器装备预研基金(9140A01010113BQ01001)

作者简介: 王霞(1972-), 女, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电检测、光谱分析及微光与红外成像方面的研究。

Email: angelniuniu@bit.edu.cn

## 0 引言

长波红外偏振成像技术可以将红外成像技术和偏振成像技术的特点相结合,具有很大的发展潜力。典型自然背景下的典型目标成像一直是军事研究的重点,国内外研究学者做了很多实验研究。1992 年 B.Ben-Dor 等<sup>[1]</sup>对地物背景的偏振度进行了研究。1998 年 L.S.Balfour<sup>[2]</sup>等进行了海上目标红外偏振实验,表明利用海面和船只偏振度上的差异可以增加目标/背景对比度。2005 年 Y.Aron 和 Y.Gronau 等<sup>[3]</sup>对车辆及帐篷进行了野外红外偏振成像实验,表明利用红外偏振方法可以有效地抑制背景,提高目标探测率。在大多数有杂乱波干扰的情况下,红外偏振成像比普通红外成像能探测到范围更广的目标。2006 年 Tyo 等<sup>[4]</sup>利用长波红外偏振成像技术探测杂乱背景中的车辆,发现长波红外偏振信息能够很好地将车辆从背景中分离出来。2011 年陈伟力<sup>[5]</sup>等利用搭建的中波红外偏振成像系统对典型目标背景进行了室内和室外实验,并对偏振图像进行了融合处理,获得了更多的目标细节信息。2013 年田晶<sup>[6]</sup>等研究了偏振光经过尾流气泡群和静水后偏振状态产生的差异,初步区分出水体自身散射信号与尾流信号在回波信号强度上的差异。2014 年黄雁华<sup>[7]</sup>等基于多种颜色空间对伪装目标进行了偏振检测实验,得到目标与背景偏振度对比较高的最佳参考方向。

文中从军事探测所关心的典型自然背景,如天空背景、海面背景、草地背景出发,研究了军事研究所关心的典型目标(如无人机、船舶、车辆等)在这些背景下的长波红外偏振成像实验,从不同角度总结了长波红外偏振成像技术的特点及优势,提出了长波红外偏振成像技术的未来应用方向。

## 1 长波红外偏振成像技术及实验系统

### 1.1 长波红外偏振成像技术

红外偏振成像技术是通过偏振器件对背景和目标的反射和辐射进行检偏滤波,然后用红外成像器件获取场景的不同偏振角度(0°、60°、120°)的图像;再通过公式(1)计算得到表征光波偏振态的 Stokes 矢量  $\vec{S}=[I \ Q \ U \ V]^T$ ,并根据 Stokes 矢量和偏振度、

偏振角之间的关系(公式(2)、(3))获得偏振度图像和偏振角图像。利用红外偏振成像技术探测目标的过程主要包括:背景与目标辐射过程、传输过程、红外偏振成像过程以及偏振图像的处理过程。如图 1 所示。

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3} [I'(0^\circ) + I'(60^\circ) + I'(120^\circ)] \\ Q = \frac{4}{3} [I'(0^\circ) - \frac{1}{2} I'(60^\circ) - \frac{1}{2} I'(120^\circ)] \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}} [I'(60^\circ) - I'(120^\circ)] \end{cases} \quad (1)$$

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

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

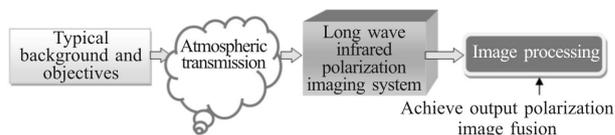


图 1 长波红外偏振光学目标探测过程图

Fig.1 Long wave infrared polarization optical target detection system diagram

### 1.2 四通道同时长波红外偏振成像实验系统

偏振成像系统有分时偏振成像系统和同时偏振成像系统两种<sup>[8]</sup>。此次实验选择可同时对目标成像的四通道同时长波红外偏振成像系统。系统采用了 FLIR TAU2-336 非制冷长波红外机芯及其原装镜头。机芯图像分辨率为 336×256,像元间距为 17 μm,镜头焦距为 25 mm, f 数为 1.1,视场为 13°×10°。偏振片采用直径为 50 mm 的红外全息线栅偏振片 KRS-5,通光孔径为 34 mm,消光比为 150:1。偏振片及成像系统实物图如图 2 所示。

系统由 4 台光轴相互平行的非制冷长波红外成像机芯及其镜头和 3 片偏振片构成。其中一台长波红外成像机芯及其镜头采集场景的长波红外强度图像,另外 3 台长波红外成像机芯的镜头前放置偏振片分别采集 0°、60°、120°的偏振角度图像。系统采用偏振片前置的结构可以减小色差。偏振片支架的通光孔视场限制在±28°之内,远大于机芯自身视场,避免对成像视场造成影响。在系统应用之前,采用黑体对探测器在常用温度区间内的响应曲线进行了标

定,校正了探测响应强度,并用实验验证了系统的同时性。



(a) 长波红外偏振成像系统所采用的偏振片 (b) 长波红外偏振成像系统实物图  
 (a) Polarizing film used in the long wave infrared polarization imaging system (b) Physical figure of long wave infrared polarization imaging system

图 2 长波红外偏振成像系统偏振片及实物图

Fig.2 Polarizing film and physical figure of long wave infrared polarization imaging system

## 2 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验

针对一些典型背景和典型目标,如天空背景下

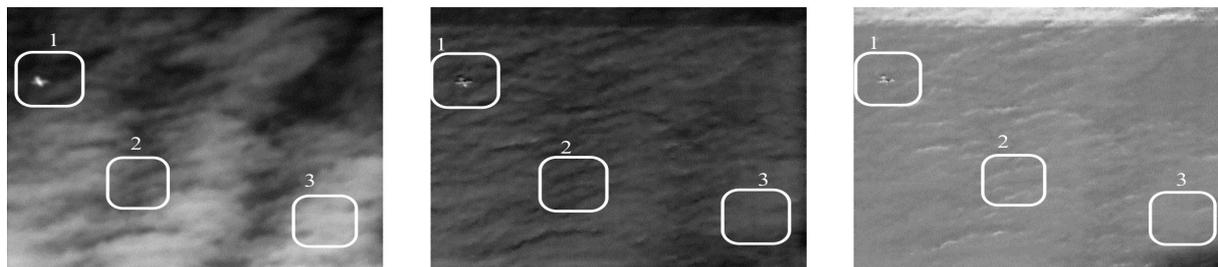
的无人机、海面背景下的船舶、草地背景下的车辆等开展了长波红外偏振成像实验,探究了长波红外偏振成像的优势及其应用趋势。

### 2.1 天空自然背景下的长波红外偏振成像实验

图 3 为 2014 年 10 月 18 日在盐城海边采集的云层背景下无人机的长波红外强度图像和长波红外偏振成像图像。天气晴,东南风 3~4 级。

图 3 是在地对空观测条件下无人机的长波红外强度与偏振图像,无人机距离云层较远,未被云层遮挡。可以看出,云层和天空背景的变化直接影响对无人机的探测。因此,采用目标/背景局部对比度(以下统称为对比度)与背景灰度标准差(以下统称为标准差)分析不同云层背景对目标探测的影响。对比度的定义为  $C = \frac{\alpha_T - \alpha_B}{\alpha_T + \alpha_B}$ , 其中,  $\alpha_T$  为目标平均灰度,  $\alpha_B$  为除去目标其他背景平均灰度,它反映了图像的质量。

标准差的定义为  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$ , 其中  $x_i$  为背景每个像素点的灰度值,  $N$  为背景像素点总数,  $\mu$  为



(a) 无偏强度图像 (b) 偏振度图像 (c) 偏振角图像  
 (a) Unbiased intensity image (b) Polarization degree image (c) Polarization angle image

图 3 典型无人机长波红外偏振成像

Fig.3 Infrared polarization imaging for typical UAV

背景的平均灰度值,它反映了背景灰度值即杂波信号的起伏。

根据云层的稀疏程度在图 3 中选取 3 种不同云层背景条件,方框 1、2、3 分别代表云层稀薄、中等和较厚背景。假设无人机分别位于上述 3 种云层背景条件,针对强度、偏振度和偏振角图像,计算这 3 种背景的标准差以及无人机目标和 3 种背景的对比度,结果如表 1 所示。计算中,背景区域按照目标等效区域直径的 3 倍选取。

由表 1 计算结果可以看出:无人机在云层稀薄背景条件下,强度图像对比度大于偏振度和偏振角图像,这与主观评价效果一致。但是在图 3(b)、(c)的偏振度和偏振角图像中,目标的轮廓更加明晰,目标边缘的清晰度有所提升,目标的形状、样貌已初步显现,可以分辨出目标为飞机,这有利于目标的识别。对于中等和较厚云层背景,从表 1 中可以发现:偏振度、偏振角图像标准差都小于强度图像,说明其背景杂乱程度都低于强度图像,偏振成像可以抑制背景

杂波的起伏,且偏振角图像抑制作用更明显。

表 1 典型无人机图像对比度与标准差

Tab.1 Typical UAV image contrast and standard deviation

Image type	Region 1		Region 2		Region 3	
	Local contrast	Standard deviation	Local contrast	Standard deviation	Local contrast	Standard deviation
Intensity image	13.5	13.4	6	29.7	1.1	9
Polarization degree image	7.1	11.8	7	9.4	4.6	7.8
Polarization angle image	2.3	9	2.1	6.6	2	6.5

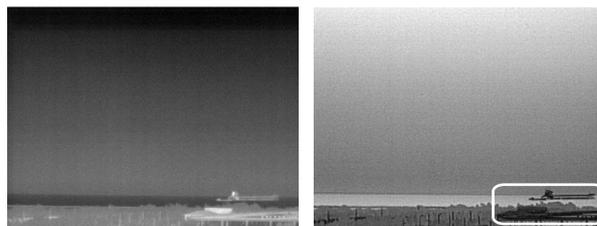
另外,对于中等云层背景,强度图像标准差是稀薄云层背景的 2.2 倍,说明变化的云层厚度增加了强度图像背景的杂乱程度。强度图像对比度下降了 1.25 倍,而偏振度、偏振角图像对比度变化不大,表明目标的偏振成像不受云层背景杂波的影响,更有利于目标的探测。

对于选取的较厚云层背景区域,云层几乎布满了整个区域,强度图像中这一区域的背景灰度值较高,对比度几乎为 1,即目标与背景的灰度值几乎相同,不利于目标的探测。而偏振度、偏振角图像对比度都是强度图像的数倍,更有利于完成目标的探测任务。

从该实验可发现:作为地对空目标探测手段,相比于红外强度探测技术,长波红外偏振成像技术更凸显目标的细节及整体轮廓,对消除背景杂波的干扰具有一定优势。另外,无人机位于天空背景连续运动过程中红外强度信号可能在强杂波处被湮没,而长波红外偏振成像技术则可能利用偏振信息更有效地完成探测任务。这一点可进行进一步的实验验证。此外,无人机被云层遮挡的情况还需另行讨论。

2.2 海面自然背景下的长波红外偏振成像实验

图 4 为 2014 年 5 月 14 日在上海海边采集的海面背景下船舶的长波红外图像和长波红外偏振度图像。天气阴,北风 3~4 级。



(a) 长波红外图像 (b) 长波红外偏振度图像  
(a) Long wave infrared image (b) Long wave infrared polarization degree image

图 4 船舶长波红外偏振成像图

Fig.4 Ship long wave infrared polarization imaging

从表 2 可以发现:偏振度图像中船舶与天空以及船舶与海面的对比度相比于强度图像都有着较大的提升,说明在这一场景中偏振信息的加入有利于目标的探测,这是由人造物和自然物的偏振度差别较大带来的。同样的,船舶轮廓、方框所示的地物背景等细节也更加清晰,也有利于目标的识别。另外,在偏振度图像中,由于天空和水面偏振度差别大,海天分界线更加明显,这也为偏振军事应用提供了一个新的思路。

表 2 船舶图像对比度

Tab.2 Ship image contrast

Image type	Contrast of ship and sky	Contrast of ship and sea surface
Intensity image	0.14	0.31
Polarization degree image	0.59	0.68

2.3 草地自然背景下的长波红外偏振成像实验

图 5 是 2014 年 10 月 11 号在盐城海边采集的挂着燃烧瓶的卡车在草地中的不同成像距离的长波红外强度图像和长波红外偏振成像图像。天气多云,东北风 3~4 级。

从图 5(a)~(d),目标的成像距离依次为 90 m、70 m、50 m、30 m。由于燃烧瓶热辐射能量很高,在强度图像中只有燃烧瓶形成一个较亮的长方块,车辆及周围草地背景都没有显现。但是随着成像距离的减小,偏振度图像和偏振角图像比强度图像的成像效果更理想。观察 4 组图中的偏振角图像,无论成像距离远近,偏振角图像都可以观察到目标的轮廓,并且随着成像距离的减小,目标的细节信息更加丰富,

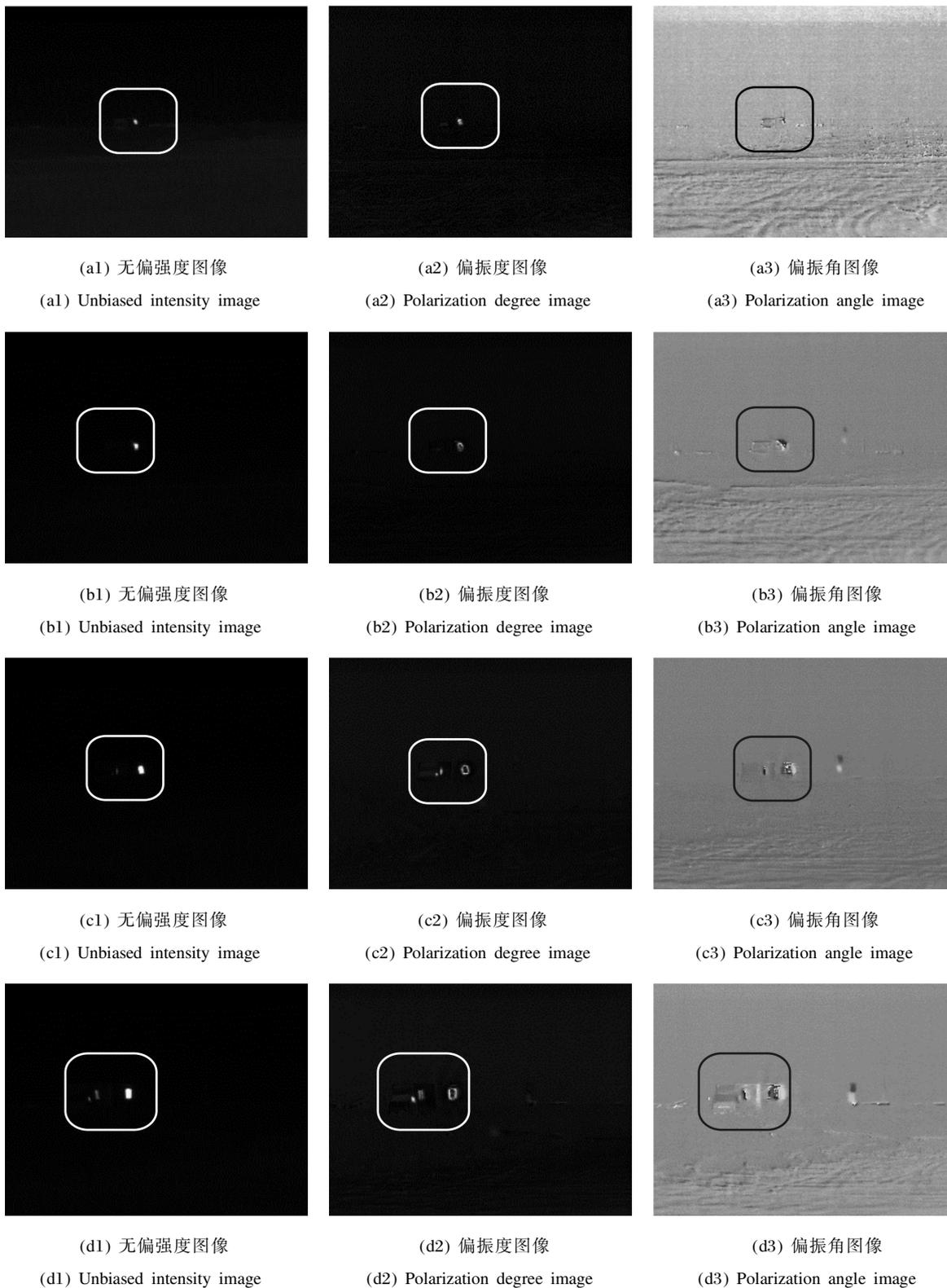


图 5 挂着燃油桶的卡车由远及近长波红外偏振成像

Fig.5 Trucks with burning bottle long wave infrared polarization image from far and near

同时草地背景的信息也大量的显现。这些细节信息有利于观察者对成像场景的理解。

该组实验说明长波红外成像技术能够进行目标的探测,但有时并不能进行目标的识别,而长波红外

偏振成像技术则可以识别。实验对高温目标的远距离成像也进行了探索,证明了偏振成像在高温目标远距离成像上较强度成像有一定的优势,其中偏振角图像优势更明显。这说明偏振信息和红外辐射信息的结合应用可以提高成像系统的作用距离,这一点可以进行进一步的理论研究及实验验证。

图 6 是图 5 中卡车上挂着的燃烧瓶的近距离长波红外强度图像和长波红外偏振成像图像。

从图 6 可以看到:作为目标的燃烧瓶热辐射能量很高,燃烧瓶与背景的对比度很高,强度图像能够完成基本的探测与识别任务。但是瓶身的热辐射接

近或超过了探测器的响应范围上限,反映在强度图上就是一片白色,灰度值接近或等于 255,整个燃烧瓶轮廓模糊,瓶身上没有任何细节显示。而从 3 个 Stokes 参量图像上看,瓶口轮廓清晰可见,且瓶身上的细节图案有所显现(方框圈出)。与 I 图像相比,Q 和 U 图像瓶身轮廓更为分明。在偏振度图像和偏振角图像中,不仅瓶身的轮廓较强度图像更加分明,而且瓶口上方由于燃烧所产生的气体图像较强度图像也更加明显,特别是在偏振角图像中,气体与背景对比度较强,气体范围也显现得更加全面。这为偏振成像的应用提供了新的思路,可以利用红外偏振成像

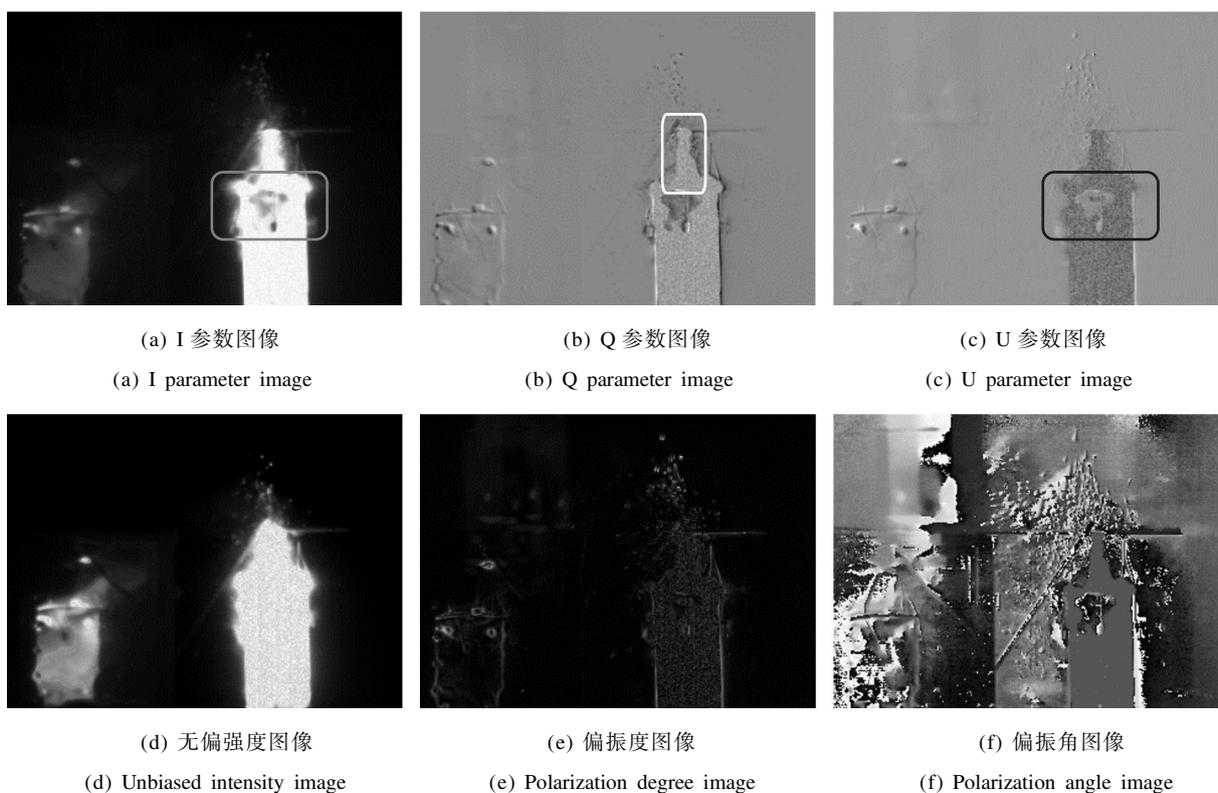


图 6 卡车上挂着的燃烧瓶的长波红外偏振成像

Fig.6 Burning bottle on the truck long wave infrared polarization image

技术对高温目标进行探测和近距离气体泄漏检测等。

### 3 结论及思考

分析此次实验可发现,在多云的天空背景下,长波红外偏振成像可以抑制杂波,突显目标轮廓;在海面背景下,长波红外偏振成像可以提高目标与背景的对比度,突显海天线;在草地背景下,长波红外偏振成像不仅能识别目标,而且可以提供更多的细节信息,提高了成像系统的作用距离。这为长波红外偏

振成像技术的应用提供了不同的方向,多个应用研究值得深入进行。

(1) 抑制杂波干扰,提高有杂波情形下的目标探测概率。2.1 节分析指出,偏振度和偏振角图像能够有效地抑制背景杂波,并且有可能提高目标的探测概率。

(2) 突显海天线,有助于涉及海天线的军事应用。2.2 节的分析表明:偏振成像所携带的偏振信息可以为海天线的探测提供新的方法。

(3) 高温目标陆地远距离探测,提高远距离高温

目标的探测、识别概率。由 2.3 节图 5 所示的实验可以看到长波红外偏振成像技术对高温目标远距离的探测有较好的效果。

(4) 细节信息丰富,可以用于气体泄漏检测。2.3 节图 6 所示的实验充分地体现了偏振角图像具有大量的细节信息这一优势。

文中在实验研究的基础上,总结了长波红外偏振成像的优势特点,提出了长波红外偏振成像的一些新的应用方向,下一步将开展具体的理论模型研究和实验验证,继续完善长波红外偏振成像技术的应用研究。

#### 参考文献:

- [1] Ben-Dor B, Balfour L S. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared [C]//SPIE, 1991, 1971: 68-77.
- [2] Balfour L S, Bushlin Y, Brandman N. Polarization signatures of man-made objects in the SW infrared spectral band[C]//Proceedings of SPIE, 1998, 3375: 49-54.
- [3] Aron Y, Gronau Y. Polarization in the LWIR—a method to improve target acquisition[C]//SPIE, 2005, 5783: 653-661.
- [4] Scott Tyo J. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [5] Chen Weili, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Experiment of target detection based on medium infrared polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 7-11. (in Chinese)  
陈伟力, 王霞, 金伟其, 等. 采用中波红外偏振成像的目标探测实验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 7-11.
- [6] Tian Jing, Chen Hang, Qi Qian. Experimental analysis of polarization effect for wake detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 34-37. (in Chinese)  
田晶, 陈航, 戚茜. 光尾流偏振探测实验分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 34-37.
- [7] Huang Yanhua, Wu Wenyan, Gong Yanchun, et al. Camouflage target detection of the best polarized reference direction based on LMS and  $\alpha\beta$  color space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 632-639. (in Chinese)  
黄雁华, 武文远, 龚艳春, 等. 基于 LMS、 $\alpha\beta$  颜色空间的最佳参考方向伪装目标偏振检测 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 632-639.
- [8] Liu Jing, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Review of imaging polarimetry based on stocks vector [J]. *Optical Technology*, 2013, 39(1): 56-62. (in Chinese)  
刘敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. 光学技术, 2013, 39(1): 56-62.