

· 光电探测 ·

## 红外偏振成像技术研究

刘重阳<sup>1</sup>, 赵万里<sup>2</sup>

(1. 海军装备部, 北京 100000; 2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘要:** 偏振成像技术是近年来国内外成像技术研究的重点, 具有重要的应用价值。概述了红外偏振成像系统原理、组成及其特点, 介绍了该技术国内外的研究概况, 重点分析了中波/长波红外偏振成像装置以及红外偏振成像技术在人工目标识别上潜在的优势。最后对红外偏振成像技术的未来发展趋势进行了展望。

**关键词:** 红外; 偏振成像; 目标探测

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-05-0031-03

## Research on Infrared Polarization Imaging Technology

LIU Chong-yang<sup>1</sup>, ZHAO Wan-li<sup>2</sup>

(1. Department of Navy Furnishment, Beijing 100000, China; 2. Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** Polarization imaging technology is an important research aspect of imaging technology in China and foreign countries, which has important application value. The principle, composition and characteristics of infrared polarization imaging system are introduced. The research status of the technology in China and foreign countries is introduced. The potential advantages on manual target identification of MIR/LIR polarization imaging devices and infrared polarization imaging technology are analyzed. Finally, the development of infrared polarization imaging technology is forecasted.

**Key words:** infrared; polarization imaging; detection

红外成像技术由于具有被动工作、目标识别能力强、全天候工作等特点, 应用广泛。目前大部分红外成像技术是通过探测目标与背景的红外辐射及反射, 实现目标的识别和探测。

红外偏振成像技术除利用目标场景的辐射及反射强度信息外, 还利用目标景物辐射及反射的偏振度信息, 提高成像系统在复杂背景下目标的探测和识别能力。通常, 人造物体具有不自然的光滑表面, 它们辐射及反射的偏振特征性能较强, 自然背景表面粗糙, 辐射及反射的偏振比较弱。红外偏振成像探测可利用人造目标与自然目标的红外辐射偏振特征的差异来提高目标识别效果。使用偏振

手段可以在复杂的辐射背景下检出有用的信号, 以成像方式显示隐藏的人造物体, 可应用于人造目标的探测识别, 具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

### 1 基本原理

红外偏振成像是在红外热成像的基础上, 利用光的偏振特性获取景物(目标与背景)红外偏振图像的。描述光波偏振态的方法有两种: 一种是琼斯矢量表示法; 另一种是斯托克斯矢量(Stokes)。前者不适用描述光的任意偏振态, 而后者可描述完全偏振光、部分偏振光和完全非偏振光, 采用斯托克

收稿日期: 2014-10-09

基金项目: 光电信息控制和安全技术重点实验室基金资助项目(9140C150206130C15068)

作者简介: 刘重阳(1970-), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事电子信息工程研究; 赵万里(1981-), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事激光与物质相互作用研究。

斯参量表示如下

$$S = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_{RCP} + I_{LCP} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中,  $s_0, s_1, s_2, s_3$  为斯托克斯矢量符号表示, 下脚标 RCP 表右旋圆偏振, LCP 表左旋圆偏振;  $s_0$  为入射总光强;  $s_1$  为水平方向的线偏振分量;  $s_2$  为  $45^\circ$  方向的线偏振分量;  $s_3$  与左右旋的圆偏振有关。由于斯托克斯参量表示法有四个独立的参量, 最少需要四个方程才能解出目标点的斯托克斯参数。但在自然界, 目标场景的圆偏振分量很小, 所以通常假定  $s_3=0$ 。因此实际测量时, 只需要测出三个不同角度的线偏振分量光强, 即可解得 Stokes 参量和偏振状态。光学元件对光偏振性的改变可用穆勒矩阵表示。理想的线偏振器的透过轴与 X 轴成  $\theta$  方位角, 出射光的斯托克斯矢量  $S'$  可由偏振器件的穆勒矩阵左乘入射光的斯托克斯矢量  $S$  得到, 即

$$S' = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

出射光强表示为

$$I_\theta = S'_0 = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta) \quad (3)$$

所以通过对目标测量三次(不同偏振角)得到三个方向(如  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$  三个偏振角)的线偏振光强度  $I_\theta$ , 即可计算得到 Stokes 的三个分量, 从而得到整个目标的偏振度和偏振角, 表征目标的特性<sup>[4-6]</sup>。

偏振度、偏振角可用 Stokes 参量表示如下

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{I} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (5)$$

对目标场景光波的偏振态分解、扫描、角度编码后, 从探测器每个像元的光强响应中, 可解算出景物光波的偏振信息, 形成 Stokes 参量图像, 即  $S_0$  图像、 $S_1$  图像、 $S_2$  图像, 进而得到描述景物偏振态的  $P$  图像和  $\theta$  图像。

## 2 红外偏振成像装置实验系统

偏振成像系统对目标探测识别研究主要集中在三个方面:(1)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;(2)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;(3)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, 目前最常用的方法是旋转偏振片型方法。

红外偏振成像系统主要由望远物镜、红外偏振片、红外滤光片、聚焦透镜、驱动电机、红外焦平面成像器件(FPA)、计算机控制与图像采集系统等构成, 如图1所示。

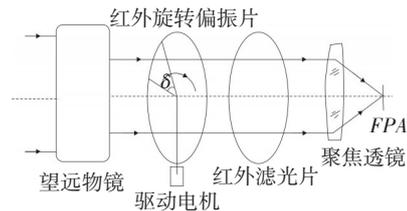


图1 红外偏振成像系统示意图

红外偏振成像系统的工作过程如下: 通过计算机发送指令给驱动电机, 由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、红外偏振片、红外滤光片、聚焦透镜聚焦到探测器上。红外偏振片需要旋转4个偏振态位置, 对4个位置分别成像, 通过数字图像处理, 解算出目标的偏振信息, 提取目标的红外辐射特性, 实现红外场景目标的偏振成像探测<sup>[7-8]</sup>。

## 3 红外偏振成像的特点

红外偏振成像与红外热成像比较, 其优势主要有:(1)偏振成像利用偏振度与偏振角进行识别, 偏振度是不同偏振态的辐射强度值之比, 无需准确的辐射量校准就可以达到相当高的精度。在传统的红外热成像中, 定标对于红外热成像的测量准确度至关重要;(2)红外偏振成像识别地物背景中的车辆目标具有明显的优势。研究表明, 自然环境中地物背景的红外偏振度非常小, 而金属材料的红外偏振度相对较大, 因此以金属为主体的车辆的偏振度和地物背景的偏振度差别较大, 这有利于提高目标与背景的对比特性;(3)通常的红外防护对于红外偏

振成像侦察失效。红外防护主要是制造复杂背景,使红外系统无法从背景中区别目标,但是这种杂乱的热源和目标的偏振特性存在差异,无法达到红外防护的目的;(4)对于辐射强度相同的目标和背景,红外成像无法区别,而红外偏振成像可以很好地区别。

尽管红外偏振成像技术有诸多优点,它也存在部分问题需要深入研究:(1)通过偏振片的目标场景红外辐射能量存在很大损失,损失的红外辐射对系统成像质量、成像灵敏度、探测距离等的影响有多大,以及如何采取措施尽量消除或减小这一影响;(2)系统加上偏振片以后,以及在偏振片同步旋转过程中,会在一定程度上影响到目标温度场的分布以及对探测器温度稳定带来一定影响,并最终影响到系统成像质量。因此,在红外偏振成像技术研究过程中,必须考虑如何解决这些问题<sup>[9]</sup>。

#### 4 红外偏振成像的国内外研究现状

国内外进行了热红外偏振成像的理论和大量的实验研究。美国BAE Systems高级技术中心对偏振成像探测技术的应用开展了许多研究工作,取得了大量试验数据。2005年美国研制了分振幅(波前)型的偏振成像仪,它是偏振探测的新技术代表;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对比试验研究。

随着红外热像仪的发展,近年来国外红外偏振成像设备都采用了面阵红外成像器件(如图2)。测量不同偏振方向红外偏振辐射的方法有两种,一种是直接旋转偏振片;另一种是偏振片固定,旋转1/4波片。

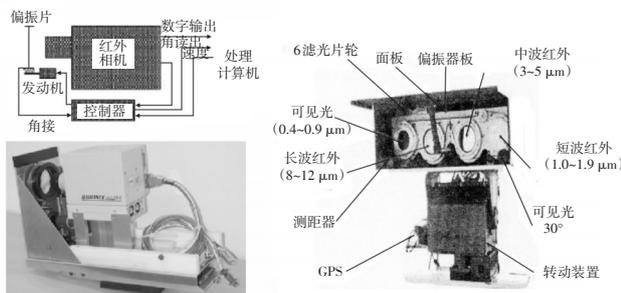


图2 两种国外红外偏振成像设备

美国的Cooper等人进行了舰船目标和海面背

景的成像试验,发现目标与背景的水平偏振度的对比,在长波红外波段远强于中红外波段。Y Aron等人将红外偏振成像应用到了红外前视仪中,提高了前视仪的信噪比。他们对车辆和帐篷进行了野外实验。图3是试验得到的红外图像与红外偏振图像,成像效果差异非常明显,在红外偏振图像中,目标的边缘和细节特征更加突出<sup>[10-11]</sup>。

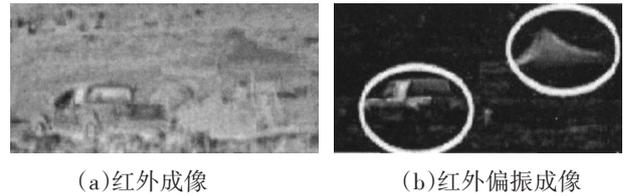


图3 红外成像与红外偏振成像效果的比较

近年来,国内一些研究机构,如中科院上海技物所、中科院安徽光机所、西安应用光学研究所等,跟踪国外偏振成像技术的发展,研制了相关产品,如偏振成像仪、三通道航空偏振成像仪等用于航空航天遥感探测。作为近十年来发展起来的一项新的成像技术,对伪装及隐身目标探测的研究刚刚起步,目前国内文献报道还较少。

#### 5 结论

红外偏振成像技术作为红外探测及红外图像处理领域中一个全新的分支,在热红外目标探测领域有着重要的应用价值。随着越来越多的科研团队的加入,将会加快红外偏振成像技术的发展,研究不同类型目标红外偏振特性,完善红外偏振探测技术和目标识别算法,对未来人造目标的探测具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] 汪震,乔延利. 热红外偏振成像技术在目标识别中的实验研究[J]. 光学技术,2007, 33(2).
- [2] 陈伟力,王霞. 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).
- [3] 陈伟力,王霞. 基于小波包变换的中波红外偏振图像融合研究[J]. 北京理工大学学报,2011,31(5).
- [4] 刘必鏊,时家明. 红外偏振探测的机理[J]. 红外与激光工程,2008,37(5).
- [5] 袁惠. 一维深亚波长光栅的耦合波分析及偏振特性的研究[J]. 中国激光,2002,29(9). (下转第51页)

cated on silicon and AlN submounts[J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52:884-888.

- [15] Chen Z Z, Liu P, Zhang G Y, et al. Junction temperature and reliability of high-power flip-chip light emitting diodes [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2007, 10:206-210.
- [16] LIN Cheng-chen, CHANG Lian-be, Jeng Ming Jer, et al.

Fabrication and thermal analysis of flip-chip light-emitting diodes with different numbers of Au stub bumps [J]. *Microelectronics Reliability*, 2010, 50(5):683-687.

- [17] 周小丽,刘木清,钱勇,等. LED光通量测试系统的研究[J].*光电子·激光*, 2008, 19(6):728-730.
- [18] Schubert E Fred. *Light-Emitting Diodes*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006:1-432.

(上接第14页)

- [6] Kwon O M, Park J H, Lee S M. Secure communication based on chaotic synchronization via interval time-varying delay feedback control[J]. *Nonlinear Dyn*, 2011, 63(1-2): 239-252.
- [7] Smaoui N, Karouma A, Zribi M. Secure communications based on the synchronization of the hyperchaotic Chen and the unified chaotic systems[J]. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul*, 2011, 16(8):3279-3293.
- [8] Luo R Z, Wang Y L, Deng S C. Combination synchronization of three classic chaotic systems using active backstepping design[J]. *An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2011, 21(4):1054-1500.
- [9] Luo R Z, Wang Y L. Active backstepping-based combination synchronization of three different chaotic systems[J]. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 2012, 4(2):142-147.
- [10] Wu Z Y, Fu X C. Combination synchronization of three different order nonlinear systems using active backstepping design[J]. *Nonlinear Dyn*, 2013, 73(3):1863-1872.
- [11] Ojo K S, Njah A N, Olusola O I, et al. Generalized reduced-order hybrid combination synchronization of three Josephson junctions via backstepping technique[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 77(3):583-595.
- [12] Sun J W, Shen Y, Zhang G D, et al. Combination combina-

tion synchronization among four identical or different chaotic systems[J]. *Nonlinear Dyn*, 2013, 73(3): 1211-1222.

- [13] Qiang C N, Ren X M, Jing N. Robust anti-synchronization of uncertain chaotic systems based on multiple-kernel least squares support vector machine modeling[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2011, 12(44):1080-1088.
- [14] Chen Y, Li M Y, Cheng Z F. Global anti-synchronization of master-slave chaotic modified Chua's circuits coupled by linear feedback control[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, 52(3-4):567-573.
- [15] Yang C C. Robust synchronization and anti-synchronization of identical  $\Phi^6$  oscillators via adaptive sliding mode control[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(3): 501-509.
- [16] Rehan M. Synchronization and anti-synchronization of chaotic oscillators under input saturation[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(10-11): 6829-6837.
- [17] Hammami S, Benrejeb M, Feki M, et al. Feedback control design for Rössler and Chen chaotic systems anti-synchronization[J]. *Physics Letters A*, 2010, 374(28): 2835-2840.
- [18] 祝金川. 相位共轭波振荡器时空混沌控制及NH<sub>3</sub>激光器复杂网络混沌同步研究[D]. 大连:辽宁师范大学, 2011.

(上接第33页)

- [6] 廖艳林. 亚波长金属/电介质双层光栅偏振片[J]. *中国科学技术大学学报*, 2005, 35(5).
- [7] 赵华君. 亚波长介质偏振分束光栅的衍射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(10).
- [8] 郭雷,李晖晖. 图像融合[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.

- [9] 阮秋琦,阮宇智. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [10] 钟庆新,夏利民. 一种基于双树复小波变换的图像融合方法[J]. *计算机工程及应用*, 2008.
- [11] 岳晋,杨汝良. 基于双密度双树复小波变换的图像融合研究[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(1).