

〈综述与评论〉

红外偏振成像探测技术及应用研究

姜会林¹, 付 强¹, 段 锦², 张立中¹, 李英超¹, 张 肃¹

(1. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

(2. 长春理工大学 电信学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 红外偏振成像探测技术针对复杂环境中识别探测目标具有明显的优势和广阔的应用前景。首先分析了研究红外偏振特性的必要性和紧迫性, 阐述了红外偏振成像具有“凸显目标、穿透烟雾、辨别真伪”的独特优势; 其次概括了国外红外偏振成像技术的研究历程和试验进展; 在此基础上, 重点研究了目标起偏、信道环境下的偏振传输、全偏振图像探测三个方面的主要科学问题, 并指出了重点研究内容和关键技术; 最后, 对红外偏振成像技术在军、民若干领域的应用前景进行了展望。

关键词: 红外偏振; 成像探测; 目标起偏; 偏振传输; 全偏振图像

中图分类号: O436.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)05-0345-05

Research On Infrared Polarization Imaging Detection Technology And Application

JIANG Hui-Lin¹, FU Qiang¹, DUAN Jin², ZHANG Li-zhong¹, LI Ying-chao¹, ZHANG Su¹

(1. Space opto-electronics institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

2. Electronical-information Engineering institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Infrared polarization imaging detection technology has obvious advantages and broad application prospects in the target detection of the complex environment. This article firstly analyzes the necessity and urgency of the infrared polarization characteristic research, summarizes the unique advantages of highlighted goal, the fog/smoke penetration and the authenticity in the infrared polarization imaging. Secondly generalized the foreign infrared polarization imaging technology progress in the research process and test; On this basis, the research is mainly focused on three aspects of the main scientific problems which are the target product, the polarization transmission in channel environment and the polarization image detecting, then pointed out the key research contents and the technologies. Finally, pointed out the infrared polarization imaging technology application prospect in the field of army and civilian.

Key words: infrared polarization, imaging detection, target polarization, polarization transmission, full polarization image

0 问题的提出

红外偏振成像是在红外成像基础上, 通过获得每一点的偏振信息而增加信息维度的一种成像技术, 不仅能获得目标二维空间的红外图像, 而且能获得图像上每一点偏振信息。利用增加的偏振维度, 可明显增强伪装、暗弱等目标与背景的差异, 提高目标探测与识别能力^[1-4]。

根据其获取的偏振信息, 红外偏振成像可分为红

外线偏振成像和红外全偏振成像。红外线偏振成像能丰富对探测对象表面粗糙度、纹理、轮廓等的认识; 圆偏振在雾霾烟尘环境中传输时, 偏振态可得到良好的保持, 使包含圆偏振信息的红外全偏振成像能够增加复杂传输条件下的探测距离, 能清晰刻画目标边缘并从复杂背景中凸显目标。

由于人造物体和自然景物在偏振度上存在差异, 偏振成像技术能够提高人们对目标的辨别能力, 具有强烈的应用需求。

收稿日期: 2014-03-18; 修订日期: 2014-05-05。

作者简介: 姜会林(1945-), 男, 博士, 博士生导师。主要从事空间激光通信、光电测试、偏振成像等方面的工作。

基金项目: 国家“973”项目。

1) 从光电装备面临难题, 看红外偏振研究的必要性

光电成像探测是实现目标态势感知的重要手段, 基于强度成像的探测设备与技术在日益复杂的烟幕、扬尘、雾霾、伪装、假目标等环境下, 目标探测、识别效果受到严重影响。红外偏振探测技术的优势正是解决上述问题的一种有效手段: 目标与背景的红外偏振特性产生机理的差异, 以及不同目标的红外偏振特性的各异性, 使得红外偏振探测技术能够有效应用于目标探测, 在低照度环境、复杂自然背景、大气强散射背景及其海面杂波干扰等条件下, 增强目标探测能力, 满足空间态势感知、伪装目标检测、海上目标监视、空中和空间目标监测等领域应用需求。

2) 从国家安全和社会需求, 看红外偏振研究的紧迫性

综合分析目前的国际局势和发展事态可知, 对于目标侦查、探测、打击的需求已经十分紧迫; 我国领海及岛屿主权受到包围式侵犯, 海面水汽雾气中和浑浊海水中的目标探测问题亟待解决; 我国幅员辽阔, 自然灾害众多, 类似汶川地震的低空对地灾情观察和报告能力有限, 对地观测能力亟待提高; 我国空间探测发展突飞猛进, 无论地基对空探测, 空间站和飞行器对地探测, 都亟需提供有效探测手段和提升探测识别能力; 我国低空开放已成为必然, 低空中的低慢小目标需要有效监控手段。红外偏振探测技术特性为改善光电装备在复杂环境条件下的伪装、隐身、虚假目标的识别性能, 增强烟雾、雾霾、扬尘等浑浊介质下的探测距离, 提供了一种可行的解决途径。

3) 从军事应用战略的角度, 看红外偏振探测的重要性

红外偏振探测技术可识别真伪、反制探测, 是强化光电对抗能力的有效手段。随着军事应用中侦察和反侦察、干扰和反干扰、隐身和反隐身、欺骗和反欺骗技术的高速发展, 偏振探测技术领域具有的独特优势, 可以在复杂环境下有效分辨、识别隐身伪装目标。偏振探测技术可有效提高光电成像装备的战场适应能力、探测识别能力、有效打击能力; 可以增强我军战场态势感知能力、光电对抗能力和装备自主创新能力, 为复杂战场环境下低可探测目标光电探测设备的能力提升与优化设计提供科学依据, 为该技术的广泛军事应用打下基础, 具有重要的军事意义。

1 红外与偏振成像技术结合的优势

红外偏振成像探测技术具有普通成像无法比拟的独特优势^[5-7]:

1) 基于人造目标与自然背景的偏振特性差异, 红外偏振成像技术在从复杂背景中凸显人造目标方面具有独特优势。

2005年, 以色列对复杂背景中车辆进行偏振红外成像, 图1中左图采用前视红外成像, 右图采用的红外偏振成像, 其中右图中信杂比可提高到近30左右, 成像质量大大提高。

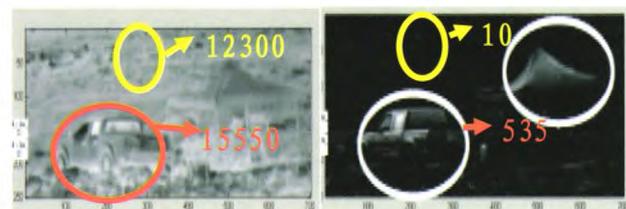


图1 成像效果对比

Fig.1 Comparison of the imaging effect

2) 基于偏振是独立于强度、光谱的光学信息维度的特性, 红外偏振成像具有在隐藏、伪装、隐身、暗弱目标发现方面的优势。

2008年, 美国对普通光照与阴影中黑色车辆两种成像结果进行对比。阴影中普通强度成像无法探测到的黑色车, 偏振成像获得清晰的效果, 如图2所示。

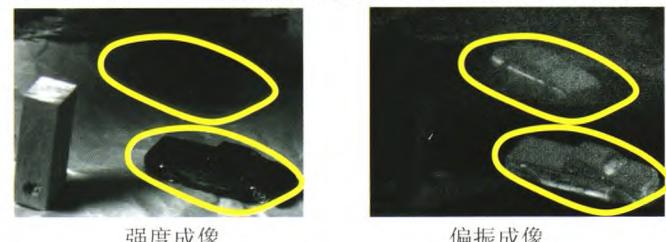
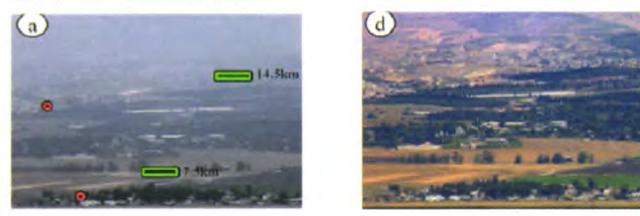


图2 成像效果对比

Fig.2 Comparison of the imaging effect

3) 基于红外偏振信息在散射介质中特性保持能力比强度散射更强的特性, 红外偏振成像具有可增加雾霾、烟尘中的作用距离的优势。

2005年, 以色列在雾霾环境下进行偏振成像试验。偏振成像可以提高图像的对比度, 从而提高作用距离, 如图3所示。



强度成像效

偏振成像

图3 雾霾环境下进行的偏振成像试验

Fig.3 Polarization imaging experiments in fog/smoke environment

综上所述, 红外偏振成像探测具有“凸显目标”、“穿透烟雾”和: 辨别真伪: 的优势, 而红外成像比

可见光成像的“穿透烟雾”能力强, 偏振红外成像比红外成像“穿透烟雾”能力更强。表1为几种探测技术的优势对比。

表1 几种探测技术的优势对比

Table 1 Advantage comparison of some detection technologies

探测技术	凸显目标	穿透烟雾	辨别真伪
可见光成像	弱	弱	弱
红外成像	较强	强	弱
雷达	弱	强	弱
光谱成像	强	弱	强
偏振成像	强	较强	强
红外偏振	强	强	强

2 国外研究进展

2.1 偏振探测装置发展历程

美国早在20世纪70年代就开始进行偏振成像探测装置的研究工作, 四十多年的发展历程如表2所示。

表2 偏振成像发展历程

Table 2 Development of polarization imaging

时间	类型	典型特征	典型应用领域
1970s	旋转偏振片型	时序式, 机械旋转	气象探测
1980s	分振幅型	多光路、多探测器, 实时成像	地物探测
1990s	液晶/声光 调制型	时序式, 电控旋转	科学实验
1990s	分波前/ 分孔径型	多光路、单探测器, 实时成像	近地空间监测
2000-	分焦平面型	单光路, 单探测器 全偏振、实时成像	军事应用
2003-	通道调制型	单光路、单探测器 全偏振、实时成像	军事应用

2.2 红外偏振试验进展

2002年英国国防科技实验室利用红外偏振成像技术进行扫雷实验研究。图4可以看出, 红外偏振成像技术在遮蔽目标检测效果方面明显优于非偏振红外成像技术。

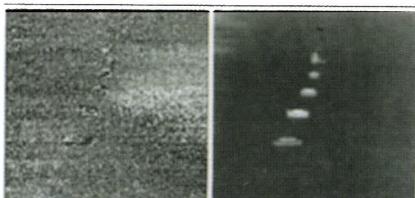


图4 红外偏振成像技术进行扫雷实验

Fig.4 Demining experiments with infrared polarization imaging technology

同年, 利用长波红外偏振成像技术探测隐藏在复杂背景丛林中车辆的实验。由图5可知, 可见光图像和非偏振红外图像受背景等因素影响较大, 但红外偏振成像技术则可较好地将目标从复杂背景中分离出来, 提高了对目标的探测能力。



图5 成像效果对比

Fig.5 Comparison of the imaging effect

2003年, 瑞典国防研究局利用红外偏振探测能在复杂背景中检出伪装目标的特点, 测量证明表面覆盖空心微珠结构的伪装物体散射光的退偏振度是入射角的函数。同年, 又利用偏振成像透视三层伪装网, 效果如图6所示。

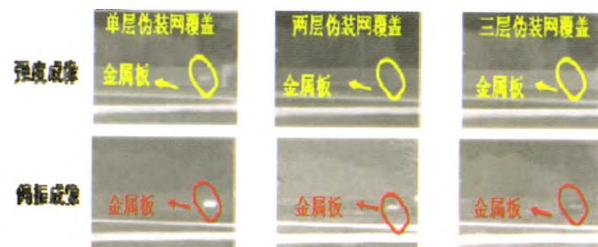


图6 利用偏振成像透视三层伪装网

Fig.6 Perspective three camouflage nets with polarization imaging

2005年瑞典国防研究局利用红外偏振成像识别营区的装甲车。成像效果对比如图7所示, 红外偏振成像比红外成像更能探测出目标。



图7 偏振成像识别营区的装甲车

Fig.7 Armored car recognition of polarization imaging in camp

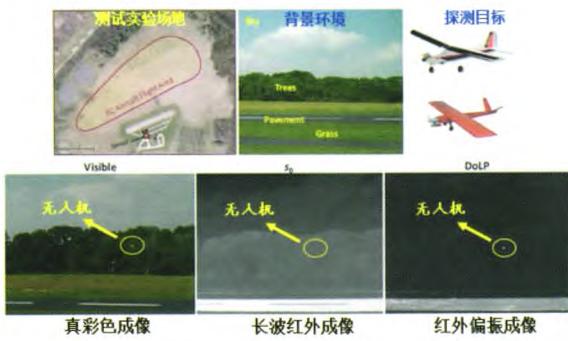
2011年美军在白沙靶场开展对空偏振成像目标跟踪试验, 图8为美国空军低空小型无人机的偏振成像实验效果, 最大虚警率由0.52降为0.01, 信杂比提高3.4倍~35.6倍^[8-11]。

3 需要突破的主要科学问题

3.1 目标起偏问题

光照射到目标/背景之后, 由于反射、散射等, 会

产生特定的偏振特性，称为物质的起偏。由菲涅尔反射定律可知当非偏振光束从光滑表面反射时会产生部分偏振光。目标特有的偏振特性来源于光照射到其表面时，反射光中电矢量垂直分量和平行分量的振幅发生变化，因此反射光不再各向同性，而成为部分偏振光或线偏振光，产生由其自身性质决定的特征偏振。根据光波偏振态的变化可以反演被探测目标的纹理结构、表面状态和材料类型等^[12]。



无人机型号	背景环境	反射率 ρ_{ref}	散射系数 S_1	散射系数 S_2	散射系数 S_3	散射系数 S_4	SCR Gain
Aircraft	Background	ρ_{ref}	S_1	S_2	S_3	S_4	
Kodet T-40	Trees	0.52	0.01	0.1344	4.7742	35.6136	
Kodet T-40	Trees/Sky	0.29	0.01	0.4097	4.5723	11.2447	
Kadet T-40	Sky	0.11	0.01	1.3494	4.6223	1.4747	
Viper 500	Trees	0.22	0.01	0.0890	0.0085	0.6787	
Viper 500	Trees/Sky	0.18	0.01	0.5801	1.3510	29.9405	
Viper 500	Sky	0.09	0.01	2.3674	13.6375	5.7605	

图8 无人机的红外偏振成像实验效果

Fig.8 Infrared polarization imaging effect of UAV

目标起偏要研究的科学问题一方面是外界因素的复杂影响，如多辐射源、大观察角、复杂背景等诸多外界因素对目标偏振特性的影响。另一方面是现有起偏模型的适用性，常用的起偏模型只适用微面元法线与材质表面法线夹角 θ 呈高斯分布 $P(\theta)$ 的粗糙表面；微面元间遮蔽因素只考虑了等高锯齿形微元的情况，对于更复杂情况，模型的适用性受到限制。

虽然新型的偏振探测技术可从偏振的维度对目标进行探测，但必需建立在对目标和背景偏振特性充分认知的基础上，对高维偏振信息进行重新组合与增强，才能充分凸显目标的特性，实现对目标的有效探测识别。因此，必须研究目标的起偏问题。

3.2 偏振传输问题

目标偏振特性在传输过程中，受到大气环境的影响，包括雾、霾、烟、尘及大气等传输介质，以及密度场、温度场等。这些影响会造成偏振成像探测器接收到的信号不能准确地表征目标和背景偏振特性。传输环境包括干洁的定常大气和烟尘雾霾等非定常大气。非定常大气存在多种类、多尺度、时-空非定常分布的特征，其大气散射、吸收特性既不同于常规单一球形各向同性散射介质，也不同于统计尺度规则上呈回转椭球形的常规散射颗粒凝团，大气气溶胶粒子特性及其谱分布的改变，使得现有的大气气溶胶瑞利散

射和Mie（米氏）散射理论很难适用复杂环境下的偏振成像探测需求。因此，必须研究大气信道下的偏振传输特性。

目前用Mie散射理论近似处理偏振传输特性。在散射过程中，散射振幅函数 $S(\theta, \phi)$ 是一个由4个分量构成的矩阵，它们都是散射角 θ 、方位角 ϕ 的函数，分别描述不同的偏振状态。

$$S(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} S_2(\theta, \phi) & S_3(\theta, \phi) \\ S_4(\theta, \phi) & S_1(\theta, \phi) \end{pmatrix} \quad (1)$$

散射光与入射光之间的振幅关系为：

$$\begin{pmatrix} E_l \\ E_r \end{pmatrix} = \frac{e^{-ikr+ikz}}{ikr} \begin{pmatrix} S_2(\theta, \phi) & S_3(\theta, \phi) \\ S_4(\theta, \phi) & S_1(\theta, \phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{l0} \\ E_{r0} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中：“ r ”和“ l ”分别表示垂直于散射面和平行于散射面的量，角码“0”表示入射光场量，没有角码“0”的为散射光场量。

由于Mie散射理论考虑的散射介质是均一、各向同性、球形的粒子， $S_3(\theta, \phi)=S_4(\theta, \phi)=0$ ， $S_1(\theta, \phi)$ 、 $S_2(\theta, \phi)$ 不为零，且与散射角有关。散射光与入射光存在如下关系：

$$\begin{pmatrix} E_l \\ E_r \end{pmatrix} = \frac{e^{-ikr+ikz}}{ikr} \begin{pmatrix} S_2(\theta, \phi) & 0 \\ 0 & S_1(\theta, \phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{l0} \\ E_{r0} \end{pmatrix} \quad (3)$$

然而在复杂的雾霾环境下，粒子通常为非球形颗粒，并且混叠不均一，同时粒子尺度和折射率变化也比较大，用目前的Mie散射理论很难解译复杂环境下的光学传输过程中散射问题。需要研究雾霾、烟尘等环境下传输的特定参数解。

3.3 红外全偏振图像获取问题

红外全偏振图像获取主要解决通道调制型、分焦平面型面临的问题。

针对通道调制型红外全偏振成像的重要基础问题，以突破波段限制为研究重点。通道调制型引入双折射晶体使入射光4个Stokes参量产生不同的位相因子，形成干涉条纹；位相因子与波长相关，复色光入射时产生干涉条纹混叠；利用衍射-干涉条纹间距随波长变化的正、逆向关系，补偿混叠，扩展波段。

针对分焦平面型红外全偏振成像图像获取，开展微纳格栅偏振选择性透过结构优化设计及工艺实现新方法研究，为分焦平面型全偏振成像探测提供新的手段。

4 重点研究内容分析

针对上节提到的“目标起偏、偏振传输、偏振图

像获取”三个科学问题，应开展相应的理论及关键技术研究。

1) 在目标起偏过程中，开展研究不同照射角下的目标偏振特性。微观方面，同一种物质由于加工工艺不同，会导致表征表面粗糙度的高斯统计函数发生变化，即同一种材质并不能用相同的高斯函数来表征粗糙度，对于阴影和遮挡函数，需要更符合实际；宏观方面，研究多层结构组合体的偏振二向反射模型，自发辐射的偏振特性，也需要进行深入探讨。

2) 在偏振传输过程中，研究大气扰动场偏振光散射特性建模方法，建立典型目标扰动湍流的光学偏振散射特性模型；对于带有动力装置的典型目标，研究发动机喷焰或尾迹中的光学偏振散射特性建模方法，建立光偏振散射特性模型。从非定常分布粒子的表征及偏振辐射传输方程入手，深入研究大气信道对偏振光传输影响的时空分布；结合偏振光在雾霾、烟尘等中的传输环境实验，解析偏振度与偏振角等主要参数经雾霾、烟尘等大气传输环境后的变化规律，探索建立适合于非定常大气环境的偏振辐射传输模型，以完善特殊大气环境下的散射理论。

3) 在红外偏振探测过程中，研究红外偏振成像探测的原理、工作过程及装置组成。包括两个方面，一个方面研究通道调制型红外全偏振探测工作波段宽度扩展问题；另一个方面研究分焦平面型红外全偏振探测的微纳线偏振结构和微纳圆偏振螺线结构的实现方法。

硬件方面开展光学系统保偏与系统偏振检测研究，依据标定结果，对CCD相机的偏振图像进行校正，达到高精度偏振测量的目的。软件方面开展偏振信息解析重构、融合、增强技术研究，根据解调出来的Stokes矢量的4个参量计算出多种参数，如偏振度DoP、线偏振度DoLP、偏振角AoP和圆偏振度DoCP等偏振特征参数。进而可以利用这些参数完成偏振信息的各种融合。

5 结束语

红外偏振成像的凸显目标、穿透烟雾、辨别真伪特性，使其具备了广阔的应用前景。应用于对海、陆、空的观测、侦查与对抗，不仅可提升设备在雾霾、烟尘等条件下的作用距离，而且能够在复杂的背景中识别目标，提高对海、陆、空观测的态势感知能力；应用于空间碎片与新型隐身材料监测，利用卫星帆板的强偏振特性，增强对在轨卫星、废弃卫星、卫星碎片

的检测与预警；结合目标起偏机理、偏振特性传输机理，可指导新型红外偏振隐身材料、烟幕材料等的开发，为红外偏振对抗提供技术手段。

本文针对目标偏振、信道环境下的偏振传输、全偏振图像获取等方面开展了讨论，指出各方面需要突破的主要科学问题和重点研究内容。面对红外偏振成像探测技术的快速发展，我国应加强红外偏振成像探测技术研究，为国防建设、国计民生及科学探索做出贡献。

参考文献:

- [1] Nicola Playle, Daniel Port, Robin Rutherford, et al. Infrared Polarisation Sensor for Forward Looking Mine Detection[C]//SPIE, 2002, 4742: 12-16.
- [2] Michael G G. Polarimetric Modeling of Remotely Sensed Scenes in the Thermal Infrared[D]. New York: Rochester Institute of Technology, 2002.
- [3] 牛继勇, 李范鸣, 马利祥. 目标红外偏振探测原理及特性分析[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 215-220.
- [4] 赵劲松. 偏振成像技术的进展[J]. 红外技术, 2013, 35(12): 743-750.
- [5] R. A. Chipman. Depolarization index and the average degree of polarization[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44: 2490-2495.
- [6] S. Schwartz, E. Namer, Y. Y. Schechner. Blind haze separation[J]. In Proc. IEEE CVPR 2, 2006: 1984-1991.
- [7] R.T.Tan, N. Pettersson, L. Petersson. Visibility enhancement for roads with foggy or hazy scenes[C]//In Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2007: 19-24.
- [8] V. Gruev, A. Ortu, N. Lazarus, et al. Fabrication of a dual-tier thin film micropolarization array[J]. *Opt. Express*, 2007, 15: 4994-5007.
- [9] D. M. Kocak, F. R. Dagleish, F. M. Caimi, et al. A focus on recent developments and trends in underwater imaging[J]. *MTS Journal*, 2008, 42: 52-67.
- [10] Duan J, Fu Q, Mo C, et al. Review of polarization imaging for international military application[C]//ISPDI 2013-Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013: 890813-890813-6.
- [11] Fu Q, Jiang H, Duan J, et al. Target detection technology based on polarization imaging in the complex environment[C]//ISPDI 2013-Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013: 89050W-89050W-9.
- [12] 李淑军, 姜会林, 付强, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术研究[J]. 中国光学, 2013(6): 803-809.