

红外偏振成像探测技术进展

王霞,夏润秋,金伟其,刘敬,梁建安

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室,北京 100081)

摘要: 不同物体不同状态存在明显的红外偏振差异,可以构成目标探测信息。简述了利用红外偏振成像技术进行目标探测的物理本质,重点阐述了偏振双向反射分布函数原理,列举了红外偏振成像探测模型,介绍了红外偏振成像技术的应用优势,归纳总结了偏振成像系统结构分类及其特点,叙述了红外偏振成像技术在目标探测与识别领域的进展,详细叙述了红外偏振成像技术的理论、实验基础研究和在目标探测中的应用。最后,总结分析了中/长波红外偏振成像技术特点,并对发展国内红外偏振成像技术提出了建议。

关键词: 红外偏振成像; 目标探测; 偏振双向反射分布函数; 偏振特性

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3175-08

Technology progress of infrared polarization imaging detection

Wang Xia, Xia Runqiu, Jin Weiqi, Liu Jing, Liang Jian'an

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Obvious differences of infrared polarization information exist in different objects and different states of the same object. These differences can constitute the target detection information. The physical innate characteristic of target detection based on infrared polarization imaging technology was briefly introduced. The principle of the polarized bidirectional reflectance distribution function was mainly elaborated. The infrared polarization imaging detection models were cited. Application advantages of infrared polarization imaging technology were outlined. The structure classification and the characteristic of the infrared polarization imaging system were concisely summarized. Progress in target detection and recognition field of infrared polarization imaging technology was described. The imaging theory, the basic research experiments and the applications in target detection of the infrared polarization imaging technology were described in details. In the end, the advantages of infrared polarization imaging were pointed out, and some advices to the development of the field in our country were put forward.

Key words: infrared polarization imaging; target detection; PBRDF; polarization characteristic

收稿日期:2014-02-05; 修订日期:2014-03-03

基金项目:武器装备预研基金(9140A01010113BQ01001);国家自然科学基金(61231014)

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

随着红外技术和信号处理技术的发展,红外焦平面探测器的分辨力和灵敏度不断提高,在军事和民用领域的应用日趋广泛,但往往由于地物、植被和伪装等背景也具有与目标相当的辐射强度和辐射纹理,因此,如何从复杂的背景辐射中更有效地探测和识别红外目标一直是国内外迫切需要解决的问题。

实验表明:由于物体反射和电磁辐射的过程中都会产生由其自身性质所决定的偏振特性,不同物体或同一物体的不同状态(如粗糙度、含水量、材料理化特征等)在热红外波段往往具有不同的偏振状态;自然物和人造物之间存在明显的红外偏振特性差异,这些不同和差异可构成目标探测的新信息。因此,红外偏振成像技术逐步成为近年来国内外研究的热点,并在复杂背景下的目标探测中展现出广泛的应用前景。国外从 20 世纪 60 年代开始,从理论和目标特性实验、系统构成、应用三方面对红外热偏振成像技术进行了研究。

1 红外偏振成像理论与实验基础

目前,基于红外热偏振成像的目标探测方法普遍采用获取不同偏振方向的光强图像,从中解算出景物光波的斯托克司矢量和偏振度、偏振角等参数,且被动红外成像系统探测到的目标红外热偏振信息与物体表面粗糙度、折射率、反射和自身辐射的空间分布、观测方位、传输介质、波长等多种因素相关,因此,对红外偏振产生的机理以及物体的偏振特性的再现还需要作更深入的理论分析和更细致的实验分析,而这方面的工作对红外偏振探测的实际应用具有重要的理论指导意义。

1.1 红外偏振双向反射分布函数

国外对于红外偏振成像技术的理论研究主要针对偏振双向分布反射函数 (Polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function, PBRDF) 模型而展开的。大多数物体对入射辐射的反射是既有镜面反射又有漫反射成分的混合反射,双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 表示不同入射角条件下物体表面在任意观测角的反

射特性,能够全面反映各种因素对反射辐射的影响。国内外对 BRDF 模型的研究已形成了很多工程统计模型。1999 年 Hess 和 Priest^[1]指出尚无可以精确表征目标偏振反射和辐射信息的 BRDF 模型,建议需要迫切开展这方面的工作。Priest^[2]分别在 2000 年和 Germer、2002 年和 Meier 提出了基于微面元的 PBRDF 模型一般表达式,并针对低反射率样品和高反射率样品进行了实验对比研究。2002 年 Conant 和 Iannarilli^[3]提出了偏振 Sandford-Robertson BRDF 模型,该模型认为体散射成分是完全解偏的。同年, Fetrow^[4]等人提出了带有偏振分量的 Torrance-Sparrow BRDF 模型。2007 年 Gartley^[5]将 PBRDF 模型成功用于热红外偏振场景仿真,图 1 中左侧为测量结果,右侧为仿真结果。

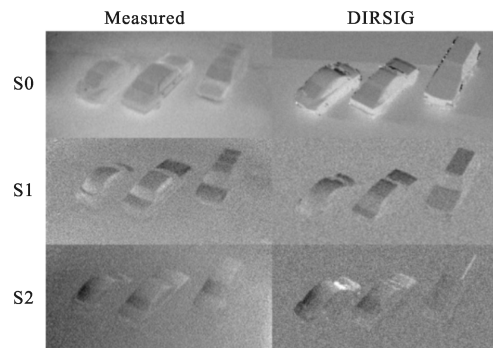


图 1 汽车的长波红外热偏振图像测量与仿真对比
Fig.1 Long wave infrared thermal polarization image measurement and simulation comparison of a car

2011 年,北京理工大学王霞等人^[6]在现有偏振双向反射分布函数模型(PBRDF)的基础上,提出了广义的红外 PBRDF 模型,并基于该模型推导了发射率模型和红外热偏振成像辐射控制方程。对目标表面的反射偏振特性进行了模拟仿真,结果与已经发表的实测数据^[7]较为一致,证明了模型的正确性。图 2 所示为绿漆和黑漆表面偏振度仿真计算与实测曲线。可以看出,仅由 PBRDF 的镜面反射计算的偏振度值与实际测量值有一定的差异,这是因为实际材料表面不可能达到理想光滑的状态。由于粗糙表面漫反射的影响,虽认为漫反射不具有偏振特性,但其对反射辐射总量有贡献,在一定程度上降低了反射辐射偏振度。广义模型计算的结果,与文献中实测曲线有较好的一致性。

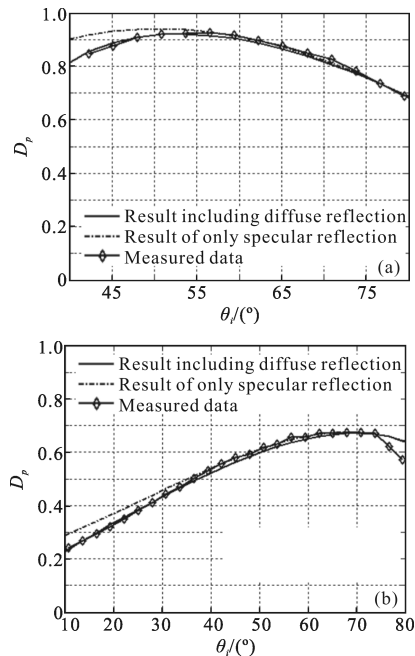


图 2 绿漆表面及黑漆表面 DoP 随 θ_i 变化曲线

Fig.2 DoP changing with θ_i curve of green paint surface and black paint surface

1.2 材料的红外偏振特性

在材料的红外偏振特性实验研究方面^[8],1990年, Timothy J. Rogne 等对美国陆军提供的 17 种卡车油漆样品进行了长波红外偏振度研究,发现不同油漆在同样的表面光滑度、温度及观察角度下偏振度有差异。

1992 年, B. Ben-Dor 等对地物背景的偏振度进行了研究。观测条件: $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 探测器观测角 70° , 得出植物背景(草, 树等)偏振度小于 0.5%; 岩石、沙石、裸土等背景偏振度介于 0.5%~1.5%; 水面, 水泥路面, 房顶等背景偏振度大于 1.5%。

1998 年, Lawrence B. Wolff 在实验室中对金属和塑料的红外偏振特性、表面光滑的铝板和玻璃上观测角度与偏振度的关系等进行了研究。

2002 年, Stephanie 等人研究表明, 红外偏振对于增强材料的探测具有优势, 观测条件: $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 探测器观测角 80° , 观测设备是热像仪加旋转金属线栅偏振片。

2005 年, Gurtan 和 Dahmani 搭建了一个偏振 FTIR 光谱仪, 可以实现 $4.5\sim 13\ \mu\text{m}$ 的红外偏振光谱测量, 并对硼硅酸盐玻璃的复折射率进行了测量, 开展了表面粗糙度和涂料对硼硅酸盐玻璃的偏振度的影响。

1.3 红外偏振成像探测模型

由于偏振探测系统的多样性, 其性能评价目前

尚未出现统一标准。在设计系统中, 设计者考虑的主要为偏振探测系统对不同入射角度偏振光的响应能力。1999 年, Edson Guimaraes^[9]结合最小可分辨温差 (MRTD) 与约翰逊准则建立了一个利用的红外偏振成像技术的探测系统的最大探测与识别距离, 其计算结果表明利用该技术的最大探测识别距离可以提高 20% 左右。Spyridon Lagaras^[10]建立了类似的红外偏振滤波的最大探测与识别距离模型, 其结果同样表明利用偏振滤波可以获得更高的表征温差, 可以提高最大探测与识别距离。

2000 年, Mehmet Yildirim^[11]利用红外偏振场景仿真获取包含有待观察目标的红外图像, 并利用计算所得的表征温差 (ATD) 结合最小可分辨温差 (MRTD) 计算了利用垂直方向偏振片滤波的第二代红外热成像探测系统相对于普通系统的最大的探测、识别及认清距离。

2002 年, Mark Pesses^[12]等人计算了地表大气对与红外偏振辐射传输的影响, 并给出了详细的数学计算方法。

2012 年, 北京理工大学的王霞等人^[13-14]理论研究了大气对红外偏振成像系统的影响, 并基于蒙特卡洛方法对短波、中波和长波红外偏振特性随距离的传输进行仿真分析, 仿真结果表明: 在短波红外波段, 目标、背景的自发辐射及大气程辐射所占比例较小, 自然照明条件下, 如果目标和背景的反射率差别较大, 强度探测性能整体优于偏振度探测; 在中波红外波段, 目标的自发辐射和大气程辐射均不能忽略, 同时受入射辐射的影响较大, 因此在中波红外波段目标和背景的强度对比度和偏振度对比度较为复杂, 如果目标的偏振特性明显, 偏振度探测性能优于强度探测; 长波红外波段探测器接收的辐射中目标自发辐射和大气的程辐射亮度所占的比例较大, 当目标和背景辐射偏振特性差异较大时, 偏振探测较强度探测具有更加稳定和优越的性能。考虑大气散射对红外偏振传输影响的仿真表明: 偏振角信息在背向散射和透射方向均有较大的波动, 没有明显的规律性, 相对于偏振角信息, 偏振度信息具有更好的规律性, $0\sim 1.5\ \text{km}$ 是偏振入射的优势范围; 当偏振度的大小衰减到与非偏光入射所引起的偏振度大小相当时, 主动偏振成像便失去了优势; 长波段光波透射光束的偏振特性保持较好, 在成像距离上更有优势。

通过红外偏振成像技术的实验及理论验证,不难得出结论:通过目标的红外偏振特性可以辨别材料,且由于红外偏振成像图像可以突显目标的轮廓、有效抑制背景噪声等特点,故红外偏振成像可以提高目标与背景的对比度,提高成像系统的目标探测率。

2 红外偏振成像系统构成

由于当前红外焦平面探测器的工艺已比较成熟,当前主流的被动偏振成像系统中基本采用的都

是焦平面探测器,红外偏振成像设备的分类方法通常有 3 种^[15]:

(1) 按时间特性可分为:实时型、非实时型。

(2) 按成像特性可分为:波前分割型、调制(时间、空间、波长等)型。

(3) 按结构特性可分为:时间分割型、振幅分割型、孔径分割型、焦平面分割型、多光轴型、复合型。其中,按结构特性分类方法,几种偏振成像系统结构比较列于表 1。

表 1 偏振成像设备分类及其特点

Tab.1 Classification and characteristics of polarization imaging equipment

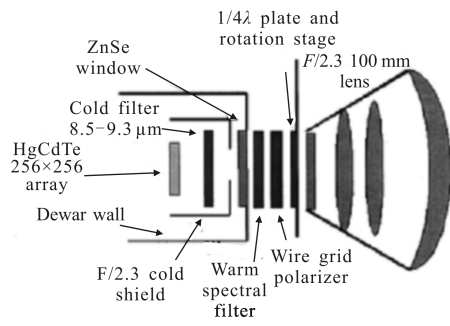
Structure type	Design feature	Processing and cost	Debugging and calibration
Time-sharing type	Good robustness Small structure Does not apply to rapid dynamic scene	Easy to implement The cost is low	The influence of scenario and platform movement can be reduced by algorithm
Amplitude-sharing type	Can real-time acquisition Large structure Can obtain the non-linear polarization image	Need a stable and easy adjustment of mechanical structure The cost is high Large volume	Need to registration of multiple detectors Registration misalignment can be reduced by adjusting the mechanical structure
Focal plane-sharing type	Real-time acquisition Small volume Loss of spatial resolution	Processing technology is difficulties The cost is high	View can't registration, only the difference is used to calculate for Stocks parameter values
Aperture-sharing type	Real-time acquisition Small volume Loss of spatial resolution Can obtain the non-linear polarization image	The optical system processing is complex The cost is high	Registration error is fixed, can be reduced through image processing methods
Many optical axis type	Real-time acquisition Large volume	Easy to implement The cost is high	Registration misalignment can be reduced by adjusting the mechanical structure
Compound type	The polarization imaging at the same time Suitable for dynamic scenes High resolution Small volume weight	To guarantee the stability of machine The cost is high	Need image registration; Through calibration deviation fixed in the position of the image

时间分割型偏振成像系统通常采用旋转偏振片或者 1/4 波片的方法获得离散时间点下不同偏振方向辐射的图像,其典型结构如图 3(a)所示。这种结构的优点就是设计简单,体积小,装调便利,获得图像不需要进行精确的配准就可以用于计算。但其也存在一个明显的缺点:无法获得相同时刻的偏振图像,不利于对动目标的探测。

振幅分割型偏振成像系统利用偏振分光片(PBS)和波片将入射辐射分解成 4 路不通偏振方向的辐射并在不同的焦平面上成像,其典型结构如图 3(b)

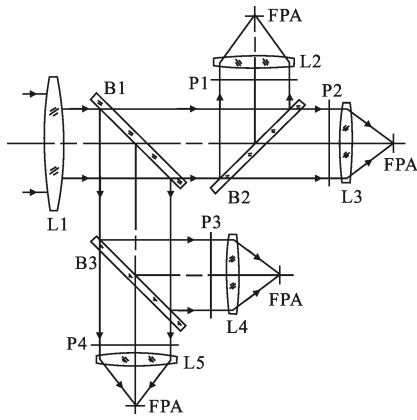
所示。这种成像模式的结构复杂,对配准的要求较高,体积大,且由于其使用了较多数量的探测器和光学器件因此制造成本也较高,且能量损失较大。

焦平面分割型偏振成像系统利用先进的工艺直接将微光学偏振元件与焦平面探测器相结合(如图 3(c)所示),该设计很大程度上减小了对前端光学系统设计的要求。但是该方法对红外器件的加工工艺要求较高,成本高,探测器的均匀性校正也比较困难;另外,由于 4 个不同偏振方向的像元实际所对应的不是同一位置,因此也存在观测误差。



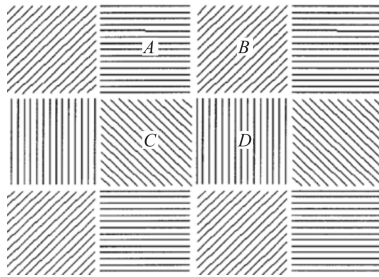
(a) 分时型

(a) Time-sharing type



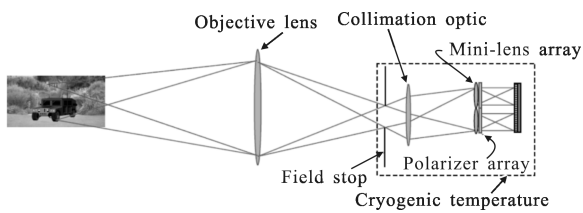
(b) 分振幅型

(b) Amplitude-sharing type



(c) 分焦平面型

(c) Focal plane-sharing type



(d) 分孔径型

(d) Aperture-sharing type

图 3 偏振成像系统结构

Fig.3 Structure of polarization imaging system

孔径分割型偏振成像设备通常由一次成像光学

系统、平行光学系统、二次成像光学系统及单个探测器构成(见图 3(d))。该类型的偏振成像设备也可以实现实时的偏振信息获取,且只需单个探测器,但是由于光学系统复杂,其能量衰减可能更大。

多光轴型偏振成像设备通常有多个光轴平行的但可分别对一定角度成像的偏振成像仪构成。该类结构的偏振成像设备结构简单,可实时获取 Stocks 参量,但需要多套设备,对较近位置的重合视场可能较小,适合用于对较远目标的偏振信息获取。

复合型偏振成像设备是将振幅分割和孔径分割相结合的一种同时偏振成像系统。目标辐射首先通过望远系统达到振幅分割的目的,再通过调制、棱镜分光进行孔径分割。这种系统体积小,质量轻,能量利用率高,但需要进行图像配准,成本较高。

3 红外偏振成像目标探测识别技术进展

通过对红外偏振成像技术进行基础理论及初步实验研究,人们对于红外偏振成像技术及目标的红外偏振特性有了比较深入的了解,由此人们更多的将探测研究应用到实际的目标探测中,其中最为突出的应用就是空间目标探测、地雷探测、海上搜救及对于伪装目标的探测^[16]。

3.1 红外偏振成像目标探测应用

3.1.1 空间物体的长波红外偏振成像

2002 年 Mark Pesses 和 Tan 在长波红外波段对空间物体进行偏振模拟研究,初步分析显示,对于空间物体识别,偏振信号要比目前的高光谱信号有用。另外,再入飞行器和热气球诱饵的偏振建立仿真结果表明实际的再入飞行器的偏振度值是涂有铝的热气球诱饵的 2~4 倍(见图 4)。

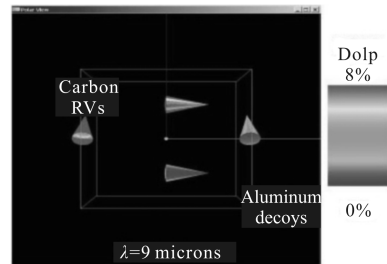
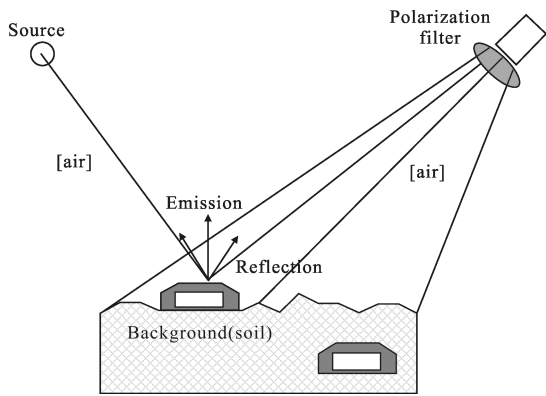


图 4 两个镀炭再入飞行器(RVs)和两个镀铝的气球诱饵的 DOLP 值对照

Fig.4 DOLP value contrast of two plating carbon reentry vehicle (RVs) and two aluminium coated balloon decoy

3.1.2 地雷探测

英国国防科技实验室 (The UK Defence Science and Technology Laboratory)2002 年利用红外偏振成像进行了一系列扫雷实验研究。从图 5 可以看出:红外偏振成像在对地雷的探测上明显优于非偏振红外成像的效果。同年,荷兰代尔夫特理工大学的 Frank Cremer 报道了类似的中波红外偏振测量地表地雷的探测结果。



(a) 红外偏振成像探测示意图

(a) Schemes of infrared polarization imaging detection

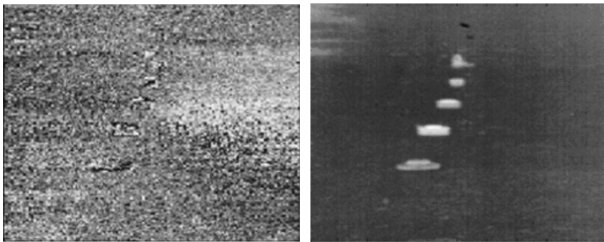


(b) 扫雷车

(c) 偏振红外成像器

(b) Minesweeping car

(c) Polarized infrared imager



(d) 非偏振红外图像

(e) 根据斯托斯矢量重建的偏振红外图像

(d) Non polarized infrared image

(e) Reconstruction polarized infrared image according to Stokes vector

图 5 红外偏振成像在扫雷中的应用研究

Fig.5 Application in mine clearance of infrared polarization imaging

瑞典国防研究机构的 GöranForssell 从 2001~2005 年也对地雷及拉发线的探测进行了深入研究,GöranForssell 研究团队搭建了中(3~5 μm)、长(8~12 μm)波红外偏振探测系统,实验结果表明:与无偏振器件的辐射探测比较,红外偏振探测系统有效的探测到所设置的地雷,提升了系统的目标探测能力。

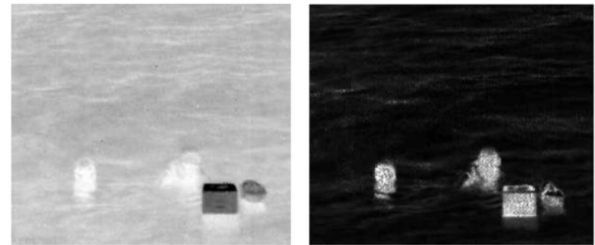
3.1.3 海面目标探测

1994~2004 年美国海军研究生院加州蒙特利分校(Naval Postgraduate School Monterey,California)进行了一系列利用红外偏振成像对海面的舰船进行探测的研究。

2001 年,荷兰代尔夫特理工大学的 Frank Cremer 将其搭建的红外偏振成像系统用于海面小目标的探测应用中。

美国蒙大纳州立大学的 Joseph A.Shaw 从 1999~2007 年对红外偏振成像在海平面探测方面进行了理论研究。Joseph A.Shaw 通过分析海水表面的辐射发射特性研究了海水粗糙度对海平面偏振度的影响,并提供了 3~15 μm 波段内水面的偏振发射率数据库表,对于笔者研究海水表面的偏振特性有着非常重要的意义。

2006 年,美国 Polarissensor 公司开展了红外偏振成像在海上搜救中的应用实验,如图 6 所示。由图中

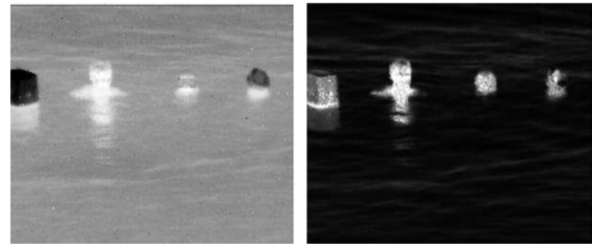


(a) 白天红外非偏振成像

(b) 白天偏振成像

(a) Unpolarized daytime infrared imaging

(b) Polarized daytime infrared imaging



(c) 晚上红外非偏振成像

(d) 晚上偏振成像

(c) Unpolarized night infrared imaging

(d) Polarized night infrared imaging

图 6 红外偏振成像在海上目标探测中的应用

Fig.6 Application in sea targets of infrared polarization imaging

可以看出:不管是在白天还是晚上,通过红外偏振成像时,人、物体和海水的对比十分强烈,而在非偏振红外成像下没有明显差异,这种目标和背景的差异非常有利于在海上目标探测。

3.1.4 地面目标探测

2005年,Y.Aron和Y.Gronau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、降低了误报率,他们对车辆及帐篷进行了野外成像实验。

2006年,美国亚利桑那大学的Tyo联合美国空军实验室等多家单位研究了利用长波被动红外偏振成像技术探测杂乱背景中的车辆,图7显示了在多光谱可见光图像和非偏振长波红外图像中,车辆被淹没在丛林边缘的阴影中,但是长波红外偏振信息能够很好地将车辆从背景中分离出来,显著地增强了系统的探测能力。

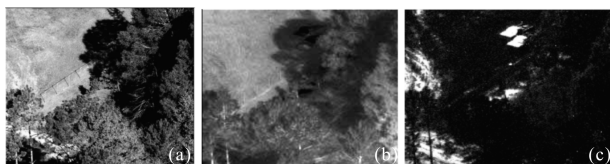


图 7 不同成像条件下丛林中车辆的图像

Fig.7 Different imaging in jungle of vehicle image

除此之外,在美国空军实验室(Air Force Research Laboratory)的支持下,洛克希勒马丁公司(Lockheed Martin)和物理创新公司(Physics Innovations Inc.)进行了利用红外偏振成像设备对小目标进行探测的研究。

3.1.5 隐身探测

美国一些科研机构正在研究针对红外偏振成像的隐身技术,例如将物体的表面处理为类球面,以减少其偏振效应。2003年GöranForssell和EvaHedborg-Karlsson对伪装遮障进行了野外实验,取得了明显的探测效果。

3.2 中、长波红外偏振探测与识别技术特点

由于近红外与短波红外场景的偏振特性与可见光比较接近,所以文中主要讨论 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\mu\text{m}$ 波段的中波及长波偏振成像的技术特点。

在自然环境中,中波与长波探测器接受的主要是目标场景的自发辐射以及来自部分阳光辐射的反射。由于阳光辐射中中波辐射的成分较少,长波偏振热成像主要体现的是场景的自发辐射的偏振特性;

而中波红外成像在有阳光照射时,其成像效果受到场景自身辐射与阳光辐射的偏振特性的共同影响,在某些场景中反射辐射的偏振特性甚至会覆盖自发辐射的偏振特性,如水面、较光滑的金属表面等等。

地物场景中,自然物体的红外偏振度一般小于1.5%,而人造物体如路面、车辆等的红外辐射则呈现出较强的偏振特性;水面场景中,水体的红外辐射呈现出较强的偏振特性,相关研究表明利用红外偏振成像,可以将船只与海面的信号对比度提高10%~20%,天空与海面的对比度提高15%左右。

4 结 论

国内对红外偏振成像技术的发展还处于起步阶段,研究成果基本表现为实验验证,在热偏振成像理论、关键技术和应用系统等方面尚未进行深入的研究,在偏振成像处理方面大多停留在对偏振图像简单的几何运算,尚未实现偏振信息的有效再现和利用。目前国内已有的相关研究尚存在许多需要更深入研究和改善之处:

(1) 在红外偏振成像理论和系统概念方面,国外已在系统理论和实验验证的基础上建立了目标红外偏振特性、大气传输特性、成像探测系统模型,并开发了仿真软件,相关理论和技术尚对我国封锁。国内对目标红外偏振信息的研究分析主要表现为实验研究,结论均为对偏振现象的简单验证,迫切需要对红外偏振成像的理论及影响偏振信息的因素进行深入分析,开展红外偏振成像系统探测性能理论及其验证技术的研究,建立典型红外偏振成像系统优化设计平台,从而为基于偏振探测技术的新型光电探测系统的发展提供理论基础。

(2) 在红外偏振成像探测技术方面,由于器件加工能力的限制,国内目前尚不能实现探测器像元层面的偏振器件制作加工能力,直接限制了偏振探测技术的应用。

(3) 在红外偏振成像探测应用方面,国外在空间目标探测、地面目标探测、海面目标探测、伪装目标等方面开展了较深入的偏振探测应用研究,而我国尚缺乏系统的应用研究。

(4) 在红外偏振信息处理方面,基于红外偏振成像技术的目标探测研究是一个较新的研究方向,将偏振技术与现在常用的其他图像探测技术相结合,

把偏振技术作为一种图像预处理方法,可以消除杂散光的影响,便于图像的后期处理。另外,利用可视化偏振进行图像增强从而提高对目标的感知和理解能力也是一个很好的发展方向,它可以让人更加直观的“看到”人眼无法直接感知的偏振信息,拓展人眼的观察范围。在这一方面,北京理工大学王霞^[17-19]等人已经开展了一些研究工作,提出了基于小波包变换法的红外偏振图像灰度级融合方法,对辐射强度图像及偏振信息图像进行有效融合,有利于场景感知和目标识别;开展了基于 HSI 颜色空间和小波变换的多光谱图像和偏振图像融合实验研究,提出了基于人眼视觉系统的假彩色融合图像质量的评价方法。红外偏振信息的处理是红外偏振成像技术的延伸,同样需要更加深入的理论研究和更加广泛的实际应用。国内在这一方面的研究较少,还不能达到较高的偏振信息处理水平。

参考文献:

- [1] Hess M, Prest R. Comparison of polarization bidirectional reflectance distribution function (BRDF) models [J]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1999, 4: 95-102.
- [2] Richard G Priest, Thomas A Germer. Polarimetric BRDF in the microfacet model: Theory and measurements [C]//Military Sensing Symposia Specialty Groupon Passive Sensors, 2000, 1: 169-181.
- [3] Conant J A, Iannarilli J F J. Development of a combined bidirectional reflectance and directional emittance model for polarization modeling [C]//SPIE, 2002, 4481: 206-215.
- [4] Fetrow M P, Wellems D, Sposato S H, et al. Results of a new polarization simulation [C]//SPIE, 2002, 4481: 149-162.
- [5] Gartley M G, Brown S D, Goodenough A A, et al. Polarimetric scene modeling in the thermal infrared [C]//SPIE, 2007, 6682: 66820C.
- [6] Wang Xia, Zou Xiaofeng, Jin Weiqi. Study of polarization properties of radiation reflected by roughness object [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2011, 32(11): 1327-1331. (in Chinese)
- [7] Vimal Thilak, David G V, Charles D C. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7531.
- [8] Nie Jingsong, Wang Zhen. Summarize of infrared polarization imaging detection technology [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(2): 63-67. (in Chinese)
- [9] Guimaraes E F. Investigation of minimum resolvable temperature difference formulation for polarized thermal imaging range prediction [R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1999.
- [10] Lagaras S E. Modeled detection and recognition range for a polarization filtered FLIR sensor [R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1999.
- [11] Yildirim M. Modeling second generation FLIR sensor detection recognition and identification range with polarization filtering [R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2000.
- [12] Pesses M, Israel S, Meyer R, et al. On the transport of polarized infrared signals through the terrestrial atmosphere [R]. Arlington: Science Applications INC, 2002.
- [13] Zhou Xiaofeng, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Atmospheric effects on infrared polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 304-308. (in Chinese)
- [14] Chen Zhenyue, Wang Xia. Study of atmospheric effects on infrared polarization imaging system based on polarized monte carlo method [C]//Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2012.
- [15] 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)
- [16] Tang Kun, Zou Jiwei, Jiang Tao, et al. IR polarization properties of a target and its background. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 611-614. (in Chinese)
- [17] Chen Weili, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Approach to fusing MWIR polarization image based on wavelet packet transform [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(5): 578-610. (in Chinese)
- [18] Chen Zhenyue, Wang Xia, Zou Xiaofeng. Polarimetric and multi-spectral image fusion based on HIS color system and wavelet transform [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2010, 39: 43-47. (in Chinese)
- [19] Chen Zhenyue, Wang Xia, Zou Xiaofeng, et al. A novel quality evaluation method for false color fused image based on human visual system [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2012, 41(4): 451-455. (in Chinese)