

国外偏振成像军事应用的研究进展（下）

莫春和², 段锦^{1,2}, 付强¹, 丁莹¹, 祝勇³, 姜会林¹

(1. 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022; 3. 长春理工大学 计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 偏振成像探测技术作为一种新兴的光电探测技术, 在目标探测识别及处理方面相对于传统的成像有着独特的优势, 对于未来战争中应对日益复杂战场环境下目标探测与识别具有重大的意义, 而特别受到了西方军事强国的重视。对近年来西方主要军事强国的偏振成像的技术进展和主要成果从物质偏振特性、偏振传输特性、偏振探测技术、偏振信息处理等4个方面进行回顾、总结和展望。本文是论文的下半部分, 重点阐述①偏振成像探测方法, 用于探测目标, 获取偏振信息, 提高成像质量; ②偏振目标获取和处理, 用于提高探测识别概率, 降低虚警率。

关键词: 偏振成像; 偏振探测; 军事应用; 偏振信息处理

中图分类号: TN209, TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)04-0265-06

Review of Polarization Imaging Technology for International Military Application (II)

MO Chun-he², DUAN Jin^{1,2}, FU Qiang¹, DING Ying¹, ZHU Yong³, JIANG Hui-lin¹

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Polarization imaging, as a new photoelectric detection technology, has unique advantage in target detection, recognition and processing compared with traditional imaging technology. Polarization imaging has great potential and important significance in the future wars with complex battlefield environment. In this paper, the research and application of polarization imaging and detection in the military field in recent years are reviewed in four areas as material polarization characteristics, polarization transmission characteristics, polarization detection equipment, polarization information processing etc. This paper, as the second part of the thesis, focus on ①detection method for polarization imaging, being used to detect target, acquire polarization information and improve the imaging quality; ②polarization information processing, being used to improve the detection probability, reducing false alarm rate.

Key words: polarization imaging, polarization detection, military application, polarization information processing

0 引言

偏振成像因其能够获取目标辐射或反射的额外偏振多维信息^[1], 从而具有提高探测目标精度、提高目标的识别概率和穿云透雾等能力。受到了国外许多国家的重视, 特别地, 各国为了发展本国的国防军事力量, 从上世纪70年代军方就开始不遗余力地研究

了偏振成像探测技术, 希望利用偏振成像出色而独特的探测性能来为在日后可能的战场上占据有利的主导权。

目前, 对偏振成像探测技术研究的国家主要有美国、以色列、荷兰、瑞典、英国、瑞士等, 他们研究的工作重点集中于偏振成像在军事的应用方面, 为此进行了实地测量、模拟仿真等试验, 并对收集了丰富

收稿日期: 2013-08-20; 修订日期: 2014-02-19.

作者简介: 莫春和(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向偏振成像及偏振图像处理。E-mail: chunhemo@gmail.com.

导师简介: 段锦(1971-), 男, 博士、教授, 博士生导师, 主要从事光电成像、图像处理和目标识别等方面的研究。E-mail: duanjin@vip.sina.com.

的偏振数据（比如偏振图像、参数、变化曲线等），进行了归纳分析。国外对偏振成像探测具体的研究有：不同外部条件下地雷探测、军用车辆的探测、军用帐篷探测、军用防水布、榴弹炮探测、坦克的探测及仿真、飞机模型的探测、水下目标的探测、金属表面涂料的偏振特性等以及外部环境（温度、天气等）对偏振成像影响的研究等^[2-12]。随着偏振成像技术不断深入的研究，出现了多种不同类型和结构的偏振成像器件和设备，出现了各种适用于不同应用场合和条件的偏振信息处理方法。本文接下来将探讨国外在军事偏振成像探测方面的发展和取得的研究成果，将从偏振成像探测方法和偏振目标获取处理两个方面进行回顾和总结并对偏振成像进行展望。

1 偏振成像探测方法与设备

1.1 偏振成像探测应用

偏振作为光固有的重要的特性之一，偏振能够很容易的为某些昆虫（如蚂蚁，虾蛄）等动物感知，而我们人类视觉却不能够直接感知。如何有效获取偏振信息，是偏振矢量信息探测和偏振图像融合处理的首要问题。

运用偏振成像探测技术，可以有效地获取目标偏振信息，这是偏振成像相对于可见光强度成像和红外成像的独特优势：有效利用偏振矢量信息，就可以增强图像对比度，提高信噪比，从而在军事应用上可以改善目标探测成像的质量、提高探测精度，为及时发现敌方目标提高有效的手段。对遮蔽和隐藏下军事目标成像实验^[13]，如图1所示，树阴下的两辆卡车在可见光和长波红外下的成像，图(a)和图(b)中目标与背景的对比较低，没有辨别出探测目标；而图(c)的长波红外偏振成像则可以显示整体轮廓和定位目标位置。

在战场上地雷由于它的隐蔽性、伪装性、杀伤力，常常会给予军事对方造成较大的人员伤亡和军用车辆毁伤等，有效地探测识别出地雷有着巨大的价值。传统红外成像地雷探测方法，在热对比度很低或者背景杂乱下的情况下探测识别效果并不明显。多个国家都进行了地雷探测方面的研究，结果表明利用偏振成像进行地雷探测，确实能够改善探测识别效果，特别是红外偏振成像。比如瑞典国防研究局在分别在2001年和2004利用红外（短波和长波）偏振成像探测地雷^[1,14]；英国（国防科学与技术实验室）和美国政府在2007年利用长波红外和中波红外偏振成像对军事公路上的地雷开展了探测研究实验^[15]。

如图2，为2000年荷兰对沙地和森林背景下的地雷进行了偏振成像的探测实验研究^[16]。得出结论为：

1) 在沙地背景下，可见光成像效果比中波红外偏振成像效果好；2) 在森林背景下，中波红外偏振成像效果比可见光成像效果好。

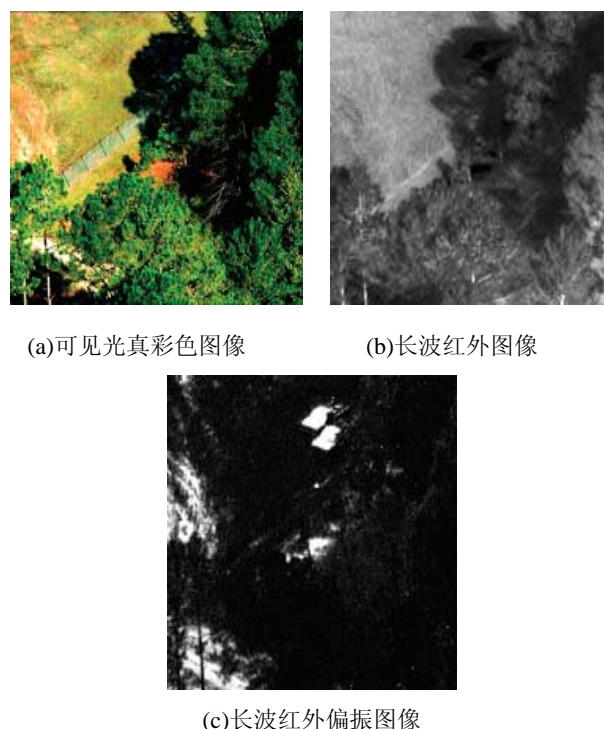


图1 树阴下的两辆皮卡车不同的成像效果图

Fig.1 Different imaging effect of two pickup trucks in the shade

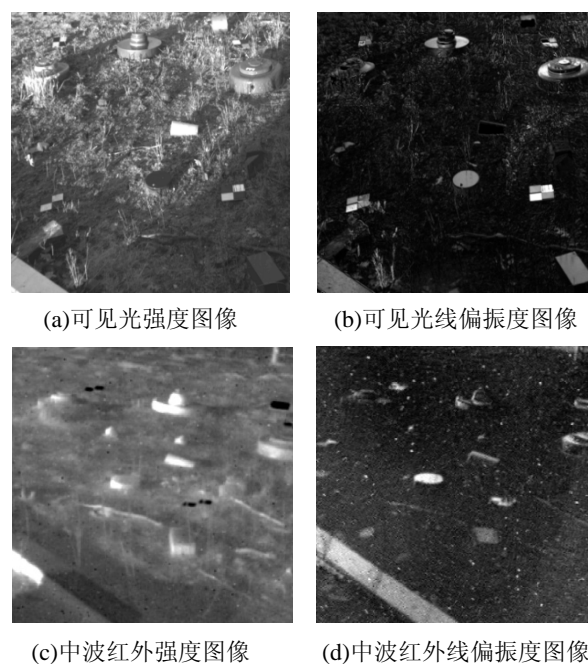


图2 森林背景下的地雷成像

Fig.2 Mines imaging of forest background

目标的偏振成像的质量不仅仅会受到目标的几何特征、表面粗糙度及材质等的影响，还会受到热光作用的影响。因为热光的辐射和反射作用将会影响到

目标的偏振态,而不同的偏振态将使我们能够从复杂的背景中辨别出感兴趣的目标。2010年美国陆军研究实验室(Army Research Laboratory)对自然背景中的军用车辆分别进行了中波红外偏振成像、长波红外偏振成像、热成像和热偏振成像的实验研究^[17],如图3所示。实验结果表明:场景中目标存在的热辐射和光学背景中存在的大量中波红外源与长波红外源是影响偏振成像质量(图像的对比度)的主要因素。传统的热成像与偏振成像相结合将会使得获取到的图像质量得到增强。



(a)实验用的军用车辆及其
所处的背景环境

(b)偏振成像效果图

图3 复杂背景下的军用车辆及其偏振成像

Fig.3 Complex background of military vehicles and their
polarization imaging

1.2 偏振成像探测设备

美国亚利桑那大学,空军研究实验室,蒙大拿州立大学(University of Arizona, the U.S. Air Force Research Laboratory, Montana State University)在2006年对被动偏振成像器在遥感应用方面进行了系统的回顾和总结^[13]。在文章中,作者主要做了4方面论述:第一,指出在过去30年中,偏振成像在多种遥远应用方面作为有力的工具,有效地提高了获取图像的可用信息。第二,将偏振成像设备的结构进行分类,并分析了各类型偏振成像设备的优势和缺点,以及适用场合。第三,对于偏振测量和偏振光学系统设计方面的影响因素都进行总结分析,对于偏振测量和偏振光学设计起到了很好的指导作用。第四,对于目前已经发现并验证的可见光(含近红外、短波红外)、中红外和远红外的偏振成像的优缺点、适用场合进行了较详细的列表分析总结。这篇文章是偏振成像的应用方面比较全面、权威的综述性论文。

偏振成像探测技术的深入研究,带动了偏振成像探测器件和设备的发展,仪器适用性越强,精度越高,那么探测效果将会更佳。从近年来各国对偏振成像技术不断深入的研究,可喜的是偏振成像发展的同时也带动了偏振成像探测器向体积小、成本低、精度高和适用范围广等方面的高速发展。从偏振探测设备类型

和结构上,可分为以下几类:

1) 分时型:由于偏振信息是分时获取的,所以只能用于静态目标探测,不符合军事应用的动态和实时需求。分时型又包括机械旋转型和电控液晶型。

机械旋转型,通过旋转偏振片,获得不同角度的偏振信息,需要运动部件进行偏振时序测量;电控液晶型,1996年美国空军科研办公室AFOSR研究证实其存在响应光谱范围窄、光透过率低、成像帧频低等无法克服的缺点,目前多在特性研究中使用。

2) 分振幅型:其结构复杂、体积大、重量重,更适合用于科学研究,不符合轻小型化的军事应用需求。

3) 分波前型,又叫分孔径型。美国在2008年在红石兵工厂、陆军研究发展工程中心(ARDEC)下属的精确武器实验室(PAL)、洛克希德·马丁公司先进技术中心等进行了武器效能测试,已具备实战能力,可能已装备陆军。

4) 分焦平面型:美军在2008年在红石兵工厂进行了红外线偏振成像实时探测试验;2010年研制出可见光线偏振相机;2012年美国空军莱特·帕特森空军基地报道了美国空军研究实验室(AFRL)正在开发基于新型圆偏振滤光镜的偏振成像技术。这种滤光片能够同时获得圆偏振和线偏振光,如图4所示。报道重点指出了此项技术的应用方向:能够增强“穿云透雾看穿战场”的能力。基于该方法的宽波段全偏振实时成像有重要的军事应用潜力,这项技术可以看作偏振探测方面的一项突破性进展。

5) 通道调制型:2008年,美国实现了单波长全偏振成像;2010/2011年研制出基于反射/透射结构的可见光全偏振成像原理样机;2011年突破了单波长全偏振成像的技术瓶颈,实现了较窄波段上的全偏振图像实时获取,存在重要的军事应用潜力。

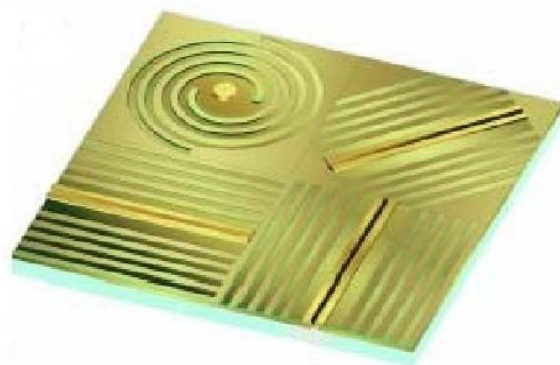


图4 基于微纳格栅结构的全偏振滤光片

Fig.4 Full polarizing filter based on Nano-gate structure

2011年,美国(University of Arizona, The

University Boulevard, The North Carolina State University) 进行了一种新型的偏振成像探测机理研究, 即基于宽带偏振光栅的白光通道型偏振成像^[18]。通道型线性成像 CLI (Channeled Linear Imaging) 使用偏振光栅 PGs (Polarization Gratings) 可以测量在室外条件下的二维空间 Stokes 参数分布, 这将有利于较好的获取有效的 Stokes 参数分布, 从而提高偏振成像目标探测的图像质量, 以及为后续的图像融合处理作准备, 如图 5 所示。



图 5 偏振成像及其图像融合

Fig.5 Polarization Imaging and Image Fusion

2 偏振信息处理

各种实验测试表明, 通常情况下, 人造目标物体相比于自然物体往往具有较高的偏振度 (DOP), 尤其反映在电介质材料上, 如塑料、玻璃和某些金属板。自然界中沥青或混凝土铺设的跑道或建筑, 比天空和大海具有更高的 DOP; 天空和大海比土壤、岩石或植被具有更高的 DOP^[19]。偏振成像探测可以获取多维偏振信息, 而通过对偏振信息的处理可以增强图像对比度 ICR (image contrast ratio), 提高目标与背景信杂比 SCR (Signal to Clutter Ratio), 提高目标探测识别概率 PD (Probability of Detection)、降低虚警率 FAR (False Alarm Rates) 等。

2005 年, 以色列进行了长波红外偏振成像以改善目标的获取实验^[19]。实验用前视红外和偏振红外成像对军用卡车和军用帐篷进行了成像比较试验, 如图 6

所示。图(a)为采用前视红外成像效果, 图(b)为采用红外偏振成像的效果。实验显示, 目标(军用卡车和军用帐篷)在复杂背景中偏振红外成像效果与前视红外成像相比较, 在对比度和信杂比 (SCR) 指标上有很大提高。

当人造目标和背景的光谱特征接近时, 光谱成像仪将很难将两者分离开来。为了克服此缺点, 就需要把偏振引入到光谱成像中来。光谱偏振成像不仅获取了目标的光谱特性而且还获取了偏振特性, 大大地增强了目标的探测识别能力。2011 年美国罗彻斯特大学就利用了光谱偏振成像仪对人造目标进行了被动偏振成像的探测研究实验^[20]。实验表明: 光谱偏振成像对异常目标(文中定义为处于自然背景环境下的人造目标)探测时, 能够获得更低的虚警率。

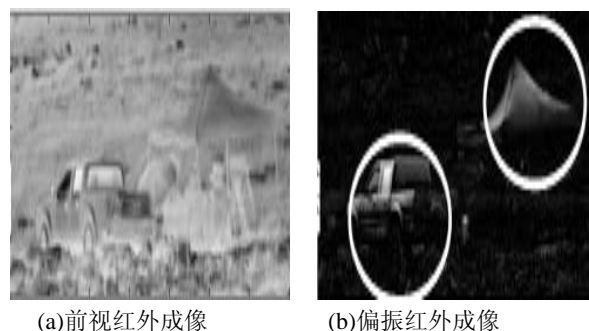


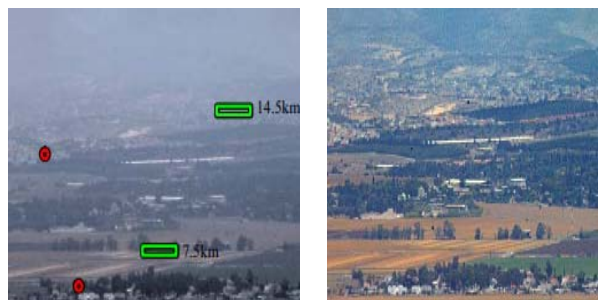
图 6 前视红外成像和红外偏振成像效果图

Fig.6 FLIR imaging and infrared polarization imaging effect diagram

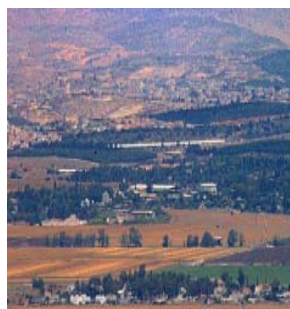
2009 年以色列在雾霾天气环境下进行了偏振成像实验^[21], 指出雾霾环境下成像的不理想主要是由于大气中烟雾颗粒散射造成的。为了减少颗粒散射对成像的影响, 提出了根据图像数据利用基于特征的和基于距离的独立分量分析 ICA (independent component analysis) 来估计偏振度 DOP (degree of polarization) 参数, 以达到偏振滤波图像。可以从图 7 看出偏振成像的对比度得到了明显的提高。

2011 年美国空军实验室 AFRL (Air Force Research Laboratory) 在 Dayton 的 Wingmasters 靶场开展对空偏振成像目标跟踪试验^[22]。实验中对两种不同材质的小型遥控模型飞机在不同背景(包括天空、树林、跑道和草地)下进行了长波红外偏振成像, 并与真彩色成像、长波红外成像作了相应对比, 如图 8 所示。实验结果表明: 在几乎所有杂乱背景的情况下, 长波红外偏振成像更加能够提高目标的探测性能的结论。在同样的目标和背景条件下, 长波红外图像虚警率 FAR 是长波红外偏振度图像的 9~52 倍, 并且长波红外偏振度图像的信杂比 SCR 是长波红外图像的 3.4253~35.6136 倍。不同目标不同背景下目标的虚警

率 FAR 与探测识别概率 PD 的关系变化曲线图,如图 9 所示。



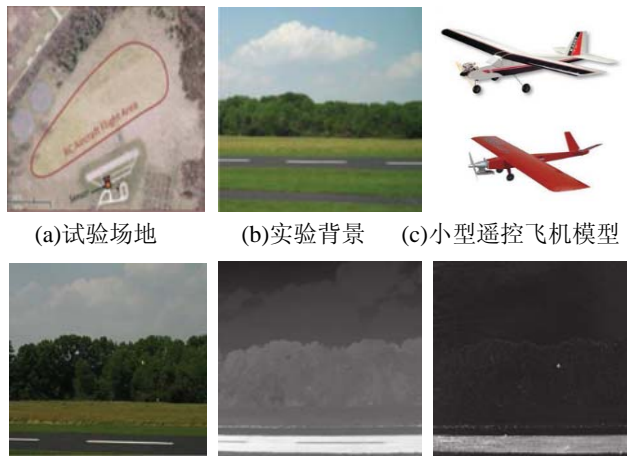
(a)雾霾天气中的强度图像 (b)基于特征的独立分量分析 (ICA) 去雾的偏振图像



(c)基于距离的独立分量分析 (ICA) 去雾的偏振图像

图 7 雾霾天气环境下的偏振成像

Fig.7 Hazy environment polarization imaging



(d)可见光真彩色图像 (e)长波红外图像 (f)长波红外偏振度图像

图 8 美国空军 2011 年低空小型无人机的偏振成像实验效果

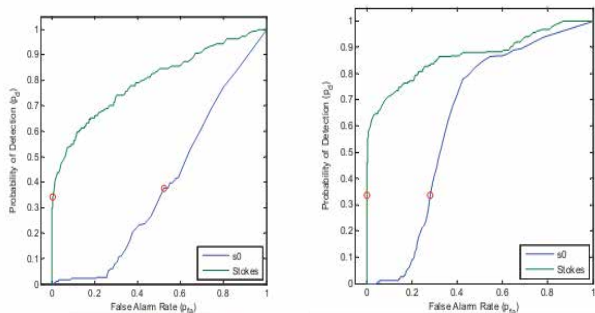
Fig.8 U.S. Air Force carried out polarization imaging experiments of low-altitude UAV in 2011

3 总结

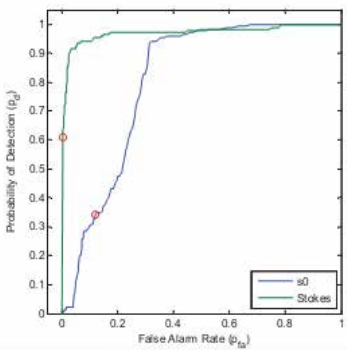
本文参考了大量相关的资料,较系统地从偏振成像探测方法、偏振信息处理两个方面大类对近年来西方主要军事强国偏振成像在军事应用上的发展现状和主要成果进行了归纳总结。

但是,偏振成像探测的局限性也是显而易见的,

比如在偏振成像过程中的光能损失问题、成像探测器响应阈值等问题等。偏振成像探测军事应用有着较严格的条件限制,比如,在晴朗的天气下,偏振成像可能不如可见光成像效果。因此,1)在偏振成像探测方面,偏振成像探测必须考虑与传统的可见光、红外探测探测技术相结合的问题。将偏振成像与强度成像和光谱成像相结合、取长补短、互相补充,可能更能突出偏振的独特性,回避局限性。2)在偏振图像信息处理方面,不能仅依靠偏振成像探测器所获取的偏振信息,进行偏振多维矢量的分离、融合与图像处理,还必须结合已经预先获知的目标和背景的偏振特性,以及考虑传输环境可能对偏振的影响,才能去伪存真,提高识别精度。3)在偏振成像探测设备方面,在实际应用中必须考虑设备的稳定性和轻小型化问题,装备环境适应性问题,以及考虑从现有装备升级改造到全新装备的过渡问题。



(a)背景为树木 (b)背景为树木和天空之间过度区域



(c)背景为天空

图 9 飞机在不同背景下 S_0 和全线性偏振 Stokers 的 ROC 曲线图

Fig.9 Receiver operating characteristics (ROC) curves from the S_0 and full linear Stokes images of aircraft in different background

参考文献:

[1] 聂劲松, 汪震. 红外偏振成像探测技术综述[J]. 红外技术, 2006, 28(2): 63-67.

- Nie Jing-song, Wang Zhen. Summarize of Infrared Polarization Imaging Detection Technology[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(2): 63-67.
- [2] Göran Forssell. Test and analysis of the detectability of personnel mines in a realistic minefield by polarization in the infrared LW region [C]//*Proceedings of SPIE*, 2004, **5415**: 187-195.
- [3] Michael G Gartley. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared[D]. New York: Wallace Memorial Library of Rochester Institute of Technology, 2007.
- [4] Kristan Gurton, Melvin Felton, Robert Mack, et al. MidIR and LWIR polarimetric sensor comparison study[C]//*Proc. Of SPIE*, 2010, **7664**, 76640L: 1-14.
- [5] Mark Woolley, Jacob Michalson, Joao Romano. Observations on the polarimetric imagery collection experiment database[C]//*Proc. of SPIE*. 2011, **8160**, 81600P: 1-16.
- [6] Roy M Matchko, Grant R Gerhart. Rapid 4-Stokes parameter determination using amotorized rotating retarder[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(9): 098002: 1-8.
- [7] Göran Forssell. Model calculations of polarization scattering from 3-dimensional objects with rough surfaces in the IR wavelength region[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **5888**: 588818: 1-9.
- [8] Bradley M Ratliff, Daniel A LeMaster, Robert T Mack, et al. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data[C]//*Proc. of SPIE*, 2011, **8160**, 816002: 1-13.
- [9] James S Taylor, P S Davis, Lawrence B Wolff. Underwater partial polarization signatures from the shallow water real-time imaging polarimeter (SHRIMP)[C]// *Proceedings of SPIE*. 2003, **5089**: 296-311.
- [10] Dennis H Goldstein. Polarimetric characterization of Federal Standard paints[C]//*Proceedings of SPIE*, 2000, **4133**: 112-123.
- [11] N J Pust, J A Shaw, A Dahlberg. Visible-NIR imaging polarimetry of painted metal surfaces viewed under a variably cloudy atmosphere [C]//*Proc. of SPIE*, 2008, **6972**, 69720G:1-9.
- [12] J Scott Tyo, Bradley M Ratliff, et al. The effects of thermal equilibrium and contrast in LWIR polarimetric images[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(23): 15161-15167.
- [13] J Scott Tyo, Dennis L Goldstein, David B Chenault, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(22): 5453-5469.
- [14] Göran Forssell. Surface landmine and trip-wire detection using calibrated polarization measurements in the LWIR and SWIR[C] //*Proceedings of SPIE*, 2001, **4491**: 41-51.
- [15] Robert M Deas, Nicola A Playle, Kathryn J Long. Trial of a Vehicle Mounted UK Electro-Optic Countermine Sensor System as Part of a UK/US Collaborative Program[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6553**, 655314: 1-8.
- [16] Wim de Jong, Frank Cremer, Klammer Schutte, et al. Usage of polarization features of landmines for improved automatic detection[C]//*Proc. SPIE*, 2000, **4038**: 1-12.
- [17] M Felton, K P Gurton, J L Pezzaniti, et al. Comparison of the Inversion Periods for Mid-wave IR (MidIR) and Long-wave IR (LWIR) Polarimetric and Conventional Thermal Imagery[R]. Aberdeen: Army Resesrch Laboratory, 2010.
- [18] Michael W Kudenov, Michael J Escuti, Eustace L Dereniak, et al. White-light channeled imaging polarimeter using broadband polarization gratings[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(15): 2283-2293.
- [19] Y Aron, Y Gronau. Polarization in the LWIR - a method to improve target acquisition[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **5783**: 653-661.
- [20] Brent D Bartlett, Ariel Schlamm. Anomaly detection of man-made objects using spectro-polarimetric imagery[C]//*Proc. of SPIE*, 2011, **8048**, 80480B:1-7.
- [21] Einav Namer, Sarit Shwartz, Yoav Y Schechner. Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(2): 472-493.
- [22] Bradley M Ratliff, Daniel A LeMaster, Robert T Mack, et al. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data[C]//*Proc. of SPIE*, 2011, **8160**, 816002: 1-13.