

国外偏振成像军事应用的研究进展（上）

段 锦^{1,2}, 付 强¹, 莫春和², 祝 勇³, 丁 莹¹, 杨 帆², 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: 偏振是电磁波的重要特征, 偏振是光除了波长、振幅、相位以外的又一重要属性。物质偏振属性能够为目标探测和识别提供更多维度的信息。因而, 偏振探测技术成为近年来备受关注的一种新型的目标探测方法。从偏振成像在军事上的研究和应用出发, 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、偏振信息处理等四个方面进行回顾和总结。本文是论文上半部分, 重点阐述: 1) 目标偏振特性及仿真, 用于区分不同目标及背景; 2) 偏振传输特性, 用于穿透烟雾观察战场、增加作用距离。

关键词: 偏振成像; 偏振探测; 军事应用; 偏振特性; 传输特性

中图分类号: TN209, TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)03-0190-06

Review of Polarization Imaging Technology for International Military Application I

DUAN Jin^{1,2}, FU Qiang¹, MO Chun-he², ZHU Yong³, DING Ying¹, YANG Fan², 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 is one of the primary characteristics of electromagnetic wave and has been another light domain except the wavelength, intensity and phase. Polarization has become a new technology field for target detection and recognition in recent years, because polarization properties of material can provide more dimension information. The polarization imaging technology development and main achievement of the major west military powers in recent years are reviewed in four areas as material polarization characteristics, polarization transmission characteristics, polarization detection equipment, polarization information processing etc. This paper is the first part of the thesis, focusing on (1) the target polarization characteristics and simulation, being used to distinguish different objectives and backgrounds; (2) polarization transmission characteristics, being used to observe target through smoke and fog of battlefield.

Key words: polarization imaging, polarization detection, military application, polarization characteristics, transmission characteristic

0 引言

偏振是电磁波的重要特征, 偏振是光除了波长、振幅、相位以外的又一重要属性。物质因其自身属性不同会具有不同的偏振特性(会产生其自身性质决定的特征偏振), 也就是说物质因其自身属性不同会具有不同的偏振特性, 如表面特性、粗糙度、阴影和外形等等。

偏振成像探测技术与强度成像、光谱成像、红外辐射成像等技术相比, 具有独特的优势: 除了获取传统成像信息外, 还能够额外获取偏振多维信息^[1]。因此对于偏振成像探测技术, 国内外在不同领域、不同方向、不同层次都开展了相对广泛的研究, 涵盖了光学遥感和地球物理^[2]、大气及云层探测^[3-4]、水下探测^[5]、军事目标探测^[6]等方面。

随着偏振探测技术的日臻成熟, 西方军事强国已

收稿日期: 2013-08-20; 修改日期: 2014-02-19.

作者简介: 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。

经把研究的重点转移到军事和安全领域。并把提高对军事目标的探测识别能力作为偏振成像探测技术的研究重点。国外研究的国家主要有美国、以色列、荷兰、瑞典、英国、瑞士等。特别是美国经过了40余年的研究，做了大量的技术储备，取得了可观的技术成果，从数量、广度、深度上来看，偏振成像技术都处于世界较领先的地位。

本文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。本文是论文的上篇，重点从目标特性及仿真和偏振传输特性两个方面进行回顾和总结；关于目标偏振成像探测技术和偏振信息处理两个方面将在后续的文章中（下篇）进行阐述。

1 目标偏振特性及仿真

1.1 偏振测试与特性分析

偏振成像探测技术不仅可以获取传统成像目标的光强等信息还可以获取偏振多维信息。当我们对目标进行偏振成像时，人造目标具有区别于自然背景的偏振属性。利用这种特征，我们能够很好地对处于复杂自然背景中的人造目标进行探测识别。比如在2002年，荷兰用偏振成像技术探测播撒雷^[7]，如图1所示。有反射性的地雷目标与有漫散射性背景相比，有着比较强的辐射偏振特征。利用红外强度成像仅识别3个地雷，而利用红外偏振成像可全部识别5个地雷；偏振成像大大地提高了区分目标与背景的识别能力。

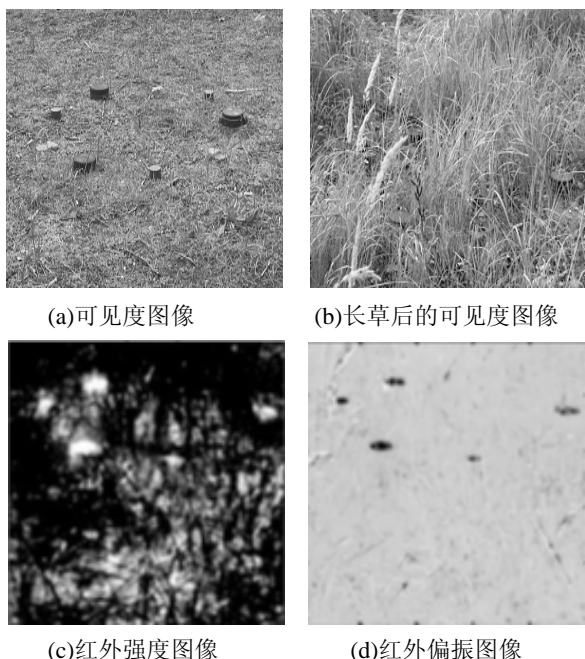


图1 杂草中地雷的红外强度成像以及红外偏振成像

Fig.1 The infrared intensity and polarization imaging of the mines in weeds

偏振成像能够探测目标这是不争的事实，但是这里存在一个不容忽视的问题，即还应该考虑到相似的人造目标特质属性对偏振成像的影响。换句话说就是当在军事战场上存在伪造目标的情况下如何提高目标识别概率，这就需要分析人造目标的类别（固体/液体/气体）、材质、大小、温度、表面粗糙度、颜色、反射率等属性。

2000年，美国空军实验室 AFRL（Air Force Research Laboratory）对美国联邦标准涂料（NO.595B 编码版本：表面光洁度、颜色、反射率）的偏振特性进行了实验研究^[8]。首先通过使用分光偏振反射计检测来获取铝基底上12个拥有不同表面光洁度、颜色、反射率的样品的偏振特性，然后对在0.9~1.0 μm 波长区域的数据进行了详细地分析。最后绘制出了相应条件下的偏振特性系数曲线并分析。实验表明：随着光束入射角的增大，样品的偏振特性系数总体呈现增加趋势，在入射角为85°左右时有所下降；随着样品的反射率减小，样品的偏振特性系数反而呈现增加趋势。偏振特性系数在文中利用米勒（Mueller）矩阵系数求取。我们可以从图2和图3看到这些变化趋势。故涂料的不同将会对目标的偏振特性产生不同程度的影响。

长波红外偏振成像依赖被探测物的热辐射，而并不依赖额外的环境条件成像（如光照的强度、天气状况等），因而具有全天候的目标探测识别能力。但是热辐射对长波红外偏振成像的影响程度如何却不甚了解。2007年美国亚利桑那大学和美国空军研究实验室对目标（灰色球体）和光学背景（球体所处的室内环境）的长波红外偏振成像中热平衡与反差效应进行了研究实验^[9]。实验结果表明：当光学背景的温度远远小于目标的温度时，长波红外偏振成像对热辐射目标具有更强的偏振特性；当目标与光学背景处在热平衡状态时，目标将可以完全失去偏振特性。如图4热球体实验图像所示。

美国陆军研究实验室、空军研究实验室和亚利桑那大学在2008年共同合作对不同材质目标进行了红外偏振成像实验的研究^[10]，验证不同目标材质会对偏振成像效果产生的影响。实验将不同材料的防水布、不同的金属和电介质板块作为目标，草地作为背景的偏振成像，用于研究目标进行偏振测试和特性分析。实验成果表明：军事上常用的人造目标与自然背景偏振特性存在着明显的差异，因此可以区分不同目标及背景，如图5所示。

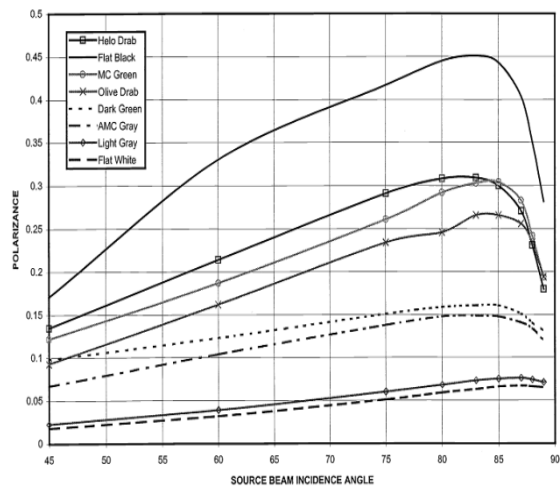


图2 偏振特性系数与光束入射角的关系图

Fig.2 Averaged polarizance vs. source beam incidence angle for eight flat paint

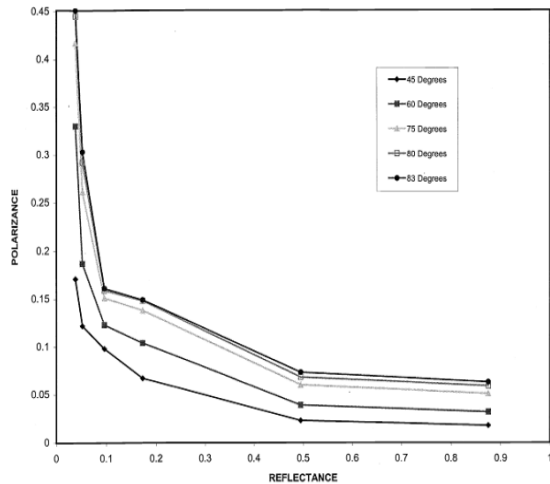


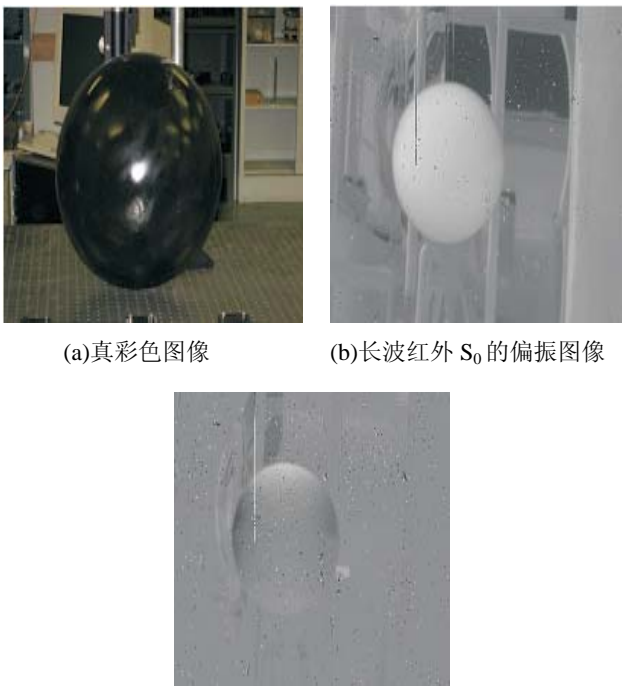
图3 偏振特性系数与样品反射率的关系图

Fig.3 Veraged polarizance vs. reflectance for six paint samples and five incidence angles

2010年2月，美国武器研究发展与工程中心（ARDEC）进行了长波红外偏振图像采集的实验^[11]。他们利用偏振探测器对俄制2S3型自行榴弹炮开展长达7个月的不间断偏振特性测量，收集到了81936幅可用的长波红外偏振图像。实验试验场景如图6所示。这些图像数据包括，不同季节、不同时段、不同天气条件下的目标/背景偏振特性曲线。

1.2 目标偏振特性仿真

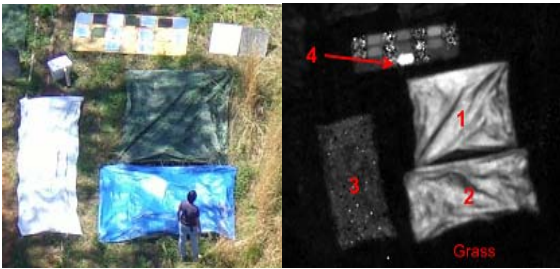
在对目标偏振特性进行了大量测试和特性分析的基础上，对偏振的建模和仿真也进行了深入研究。目前，目标偏振特性模型通常可分为：经验模型^[12]、半经验模型^[13]。



(c)长波红外 S₁ 的偏振图像

图4 热球体实验图像

Fig.4 Thermal sphere experimental images



(a)真彩色目标图像 (b)红外偏振的线偏振度（DOLP）图像

图5 不同材质目标的红外偏振成像

Fig.5 Infrared polarization imaging of different goals materials

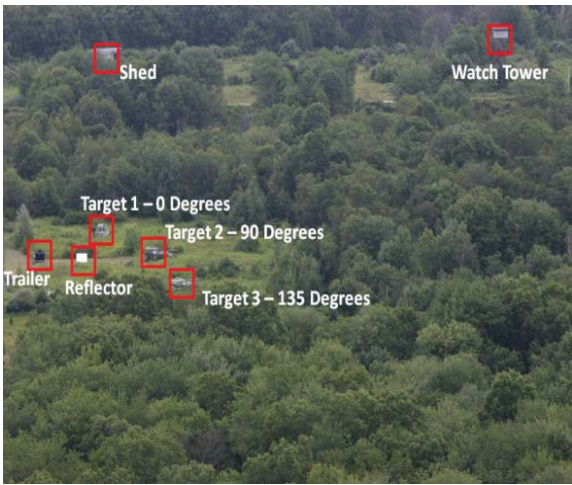
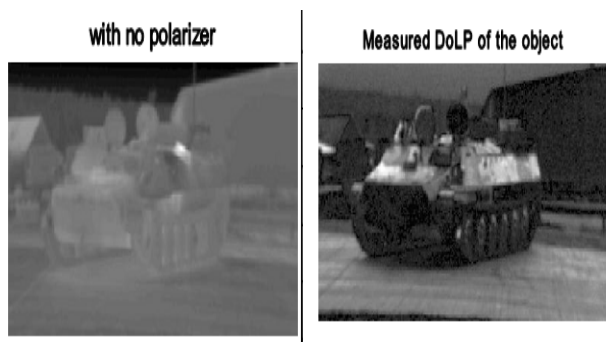


图6 俄制2S3自行榴弹炮测试试验场景

Fig.6 Russian 2S3 Howitzers test scene

目前，典型的经验模型的主要有：Robertson-Sandford 模型，Beard-Maxwell 模型，Basis Function Decomposition 模型。半经验模型典型的有：Torrance-Sparrow 模型、Priest-Germer 模型。纯物模型还并不成熟，而没有得到学术界的认可。1967 年的 Torrance-Sparrow 模型假定粗糙表面由无数个镜面组成，镜面的尺度远远大于波长，因此可以采用菲涅尔公式对其进行统计学分析；1973 年的 Beard-Maxwell 模型是 Torrance-Sparrow 的改进，使用更多的远程探测得到的自然材质和人造材质的测试数据，但没有充分的利用材质的数据；2000 年的 Priest-Germer 模型仍然是 Torrance-Sparrow 模型的改进。

2005 年瑞典国防研究局进行了识别军营中装甲车的偏振成像实验，如图 7 所示，完成了对三维目标模型计算仿真^[14]。对于不同的偏振状态，利用二向反射分布函数（BRDF）来描述在确定目标表面的反射率。通过蒙特卡罗计算，目标所有侧表面的散射率被合并到一个整体，形成总的目标反射率。总的反射率在整个散射半球能得到不同的偏振态和不同角度的反射率。



(a) 装甲车无偏的 α 热视图像 (b) 装甲车的偏振度图像

图 7 装甲车的热视图像及偏振图像

Fig.7 Agema Thermovision image and polarization image

由美国数字成像与遥感实验室（Digital Imaging and Remote Sensing Laboratory）开发的 DIRSIG 建模软件是目前最接近于实用化的目标偏振特性软件。DIRSIG 是一个工程和科学领域的复杂建模工具集，用于可见光和红外波段的目标环境建模和场景生成^[12]。DIRSIG 中包含了最具可用性的偏振模块，而 Torrance-Sparrow 模型是 DIRSIG 中偏振模型的核心。

2002 年罗切斯特大学就利用 DIRSIG 软件进行了偏振特性的建模仿真研究^[12]。指出目前 DIRSIG 软件可提供较为完备的太阳辐射、天空背景辐射、月球辐射、地面辐射偏振等数据模型，但在卫星飞行器、传输与散射和起偏与消偏、目标与背景偏振特性方面的模型，仍然不完善，在云层偏振特性的建模方面，基

本处于空白的状态，如图 8 所示。

2007 年，罗切斯特大学报道了利用 DIRSIG 软件进行了偏振特性的建模仿真研究^[13]，偏振特性的建模仿真效果如图 9 所示。图 9 中从上到下分别是基于 DIRSIG 软件的 S_0 、 S_1 、 S_2 的偏振建模仿真的效果图与测量图的比较。可以看出基于 DIRSIG 软件的 S_0 、 S_1 、 S_2 的偏振建模仿真的效果比较好，整体轮廓比较清晰、边缘特征得到了加强。

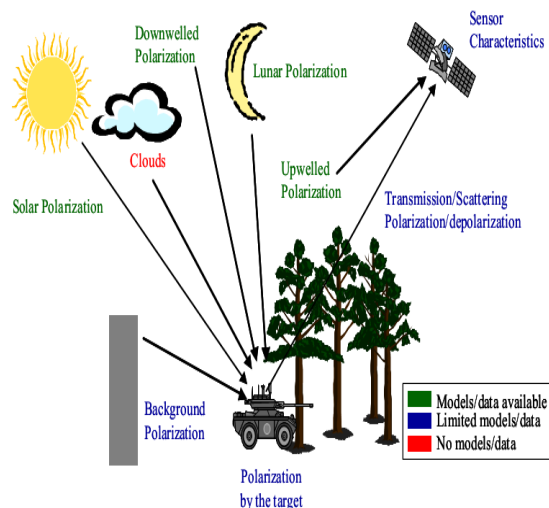


图 8 成像变化中的偏振源

Fig.8 Sources of polarization in the imaging change

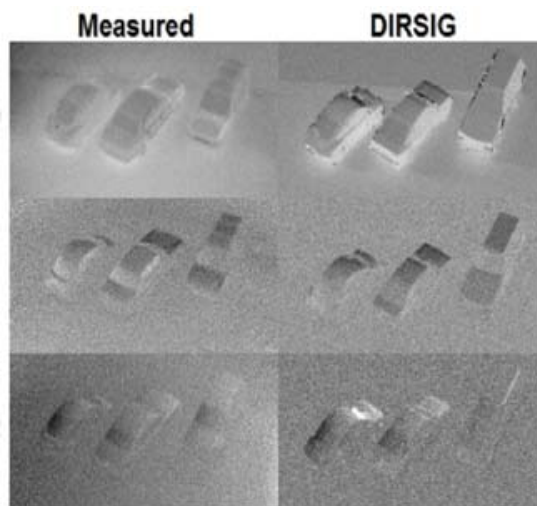


图 9 DIRSIG 软件的偏振特性的建模效果

Fig.9 Comparison of DIRSIG and measured thermal IR images of three automobiles on asphalt

2 偏振传输特性

偏振光在大气、水下等空间传输时将会受到传输介质的类型、浓度大小、粒径大小、散射系数、吸收系数和反射系数等不同程度的影响而改变，导致目标对偏振光的散射，吸收和反射受到影响，最终造成了

偏振成像的探测效果的优劣。瑞利散射理论，验证了自然光在传播过程中受空气分子等的散射作用。散射作用会改变光自身的偏振特性，形成拥有不同偏振态的偏振光。1994 年，James 首次提出光束在自由空间传输过程中，偏振度值会发生改变，而偏振度值的改变则会影响偏振成像的探测。

2000 年美国进行了散射介质中可见光偏振成像的实验^[15]。实验在几种类型的散射介质(牛奶和烟雾)中进行偏振成像。实验表明偏振成像能够提高散射介质中图像的对比度，特别是对全斯托克斯(Stokes)偏振图像进行某些处理后效果更佳，如图 10 所示。利用偏振成像技术可以增强在浑浊介质中(烟、雾、霾、尘、水体等)的目标图像质量。

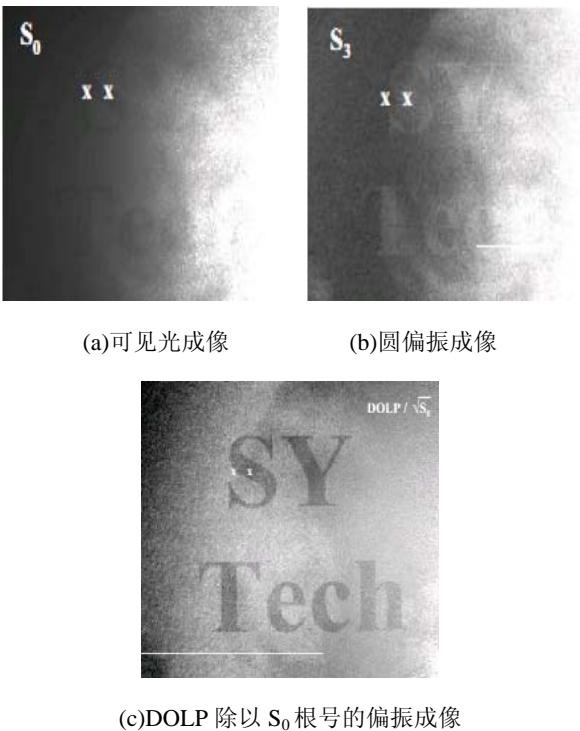


图 10 散射介质烟雾中可见光的偏振成像

Fig.10 Measurement results of imaging through smoke at visible wavelengths

2003 年美国海军水面作战中心利用浅水实时偏振成像仪对水下的部分偏振特性进行了实验研究^[16]。研究表明照射到水下的自然光同样是部分线偏振光，因此可以利用这些部分线偏振光进行水下偏振成像，从而得到包含各方向的偏振图像和偏振度图像。从图 11 可以看出偏振成像能够探测出目标(地雷)，而常规的成像完全探测不出目标。故利用传输到浅水中的部分线偏振光，可以很好的对目标进行探测识别。这将给潜水员或水下无人探测装置在浅水域提供更多的信息来探测、归类和识别目标物和障碍物。

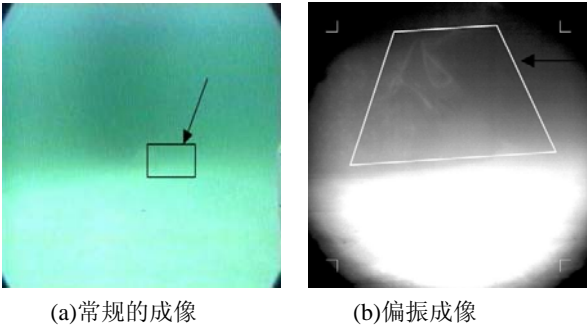


图 11 水下目标的成像

Fig.11 Image of Truncated Cone Target

2006 年，美国密苏里大学哥伦比亚分校(University of Missouri-Columbia)深入研究了在可见光波段(波长 633 nm)条件下，浑浊介质的光学特性对目标偏振成像(包括线偏振成像和圆偏振成像)的影响^[17]。其中实验研究介质的光学特性包括散射系数、吸收系数和反射系数；目标的类别为具有散射、吸收和反射特性的目标。浑浊介质的光学特性以及目标的类别(散射、吸收和反射)都会对偏振成像效果的改善有着不同程度的作用。作者特别地指出了浑浊介质中偏振成像的几个有效的应用：依据目标的偏振态不同，可以辨别出目标的类型；如果目标类型已知，那么依据不同偏振分量之间的相关图像的清晰度可以揭示出背景的某些光学特性。

2009 年，以色列在雾霾天气环境下进行了偏振成像实验^[18]，指出雾霾环境下大气中存在大量的散射介质，比如烟雾颗粒等。这些散射介质将会对光的传输及传统的光成像造成相当程度的影响，导致成像效果的对比度低、清晰度不高和成像的作用距离短。但是偏振成像能够消减或过滤这些散射介质的作用，从而改善了成像效果及提高了成像的作用距离。大气中拥有散射作用的传输介质对偏振成像影响的示意图如图 12 所示。

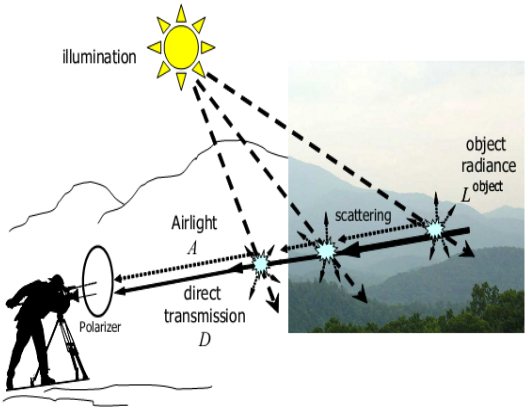


图 12 大气中拥有散射作用的传输介质对偏振成像影响
Fig.12 Scattering of the atmosphere effect on polarization imaging

目前,大气信道传输的仿真计算软件主要有美国的 IRMA,法国的 6S,以及美国的 MODTRAN 等,它们在建模方法、适用波段上各有差别。但是只有大气辐射传输建模工具 MODTRAN 包含有在可见光和红外波段的偏振仿真计算模块 MODTRAN-P。DIRSIG 也是用 MODTRAN-P 来计算偏振的大气传输特性的。

3 总结

本文对近年来国外偏振成像探测技术的军事应用进行分类阐述其实验研究成果,详细回顾其在军事应用的发展历程而希望能对本研究领域人员提供一个有价值的参考。本文主要从目标的偏振特性及仿真、偏振传输特性两方面进行了详细地阐述。

总结起来,我们有以下认识:第一,偏振成像相比于传统成像确实能够改善成像的质量,但是不同类型的目标偏振属性将会影响到我们最终能够直接探测成像效果的优劣。目标和背景偏振特性的差异研究,将有助于在复杂背景下对目标的探测和识别。第二,当光在不同介质中传输时会受到介质的光学特性的影响,导致目标偏振特性在传输过程中发生不同程度的改变。偏振传输规律和机理的研究,有助于我们从更深层次解决探测作用距离的问题。第三,目标偏振特性的建模仿真是可行的,也是理论研究所必需。目标的起偏机理的研究,将有助于偏振模型的科学合理的物理解释。

参考文献:

- [1] Li Hai-lan, Wang Xia, et al. The development and analysis of target detection research based on polarization imaging technology[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(5): 695-700. (in Chinese)
李海兰, 王霞, 等. 基于偏振成像技术的目标探测研究进展及分析[J]. *光学技术*, 2009, **35**(5): 695-700.
- [2] Sun Xiao-bing, Qiao Yan-li, et al. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(3): 175-189. (in Chinese)
孙晓兵, 乔延利, 等. 可见和红外偏振遥感技术研究进展及相关应用综述[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, **5**(3): 175-189.
- [3] Zhao Ji-zhi, Jiang Yue-song, et al. Polarized laser backscattering of atmospheric clouds distribution [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(5): 1037-1043. (in Chinese)
赵继芝, 江月松, 等. 大气云层分布的偏振激光后向散射研究[J]. *应用光学*, 2011, **32**(5): 1037-1043.
- [4] Zou Xiao-feng, Wang Xia, et al. Atmospheric effects on infrared polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2): 304-308. (in Chinese)
邹晓凤, 王霞, 等. 大气对红外偏振成像系统的影响[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(2): 304-308.
- [5] Jin Weiqi, Wang Xia, Cao Feng-mei, et al. Review of Underwater Opto-electrical Imaging Technology and Equipment (II)[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(3): 125-132. (in Chinese)
金伟其, 王霞, 曹峰梅, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(下)[J]. *红外技术*, 2011, **33**(3): 125-132.
- [6] Chen Yi-wang, Zeng Qin-yin, Pan Yu-xin, et al. A new method of military false target identification[J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, **19**(16): 89-92. (in Chinese)
陈亦望, 曾钦银, 潘育新, 等. 一种军事假目标识别的新方法[J]. *电子设计工程*, 2011, **19**(16): 89-92.
- [7] F. Cremer, W. de Jong, K. Schutte. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines[J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2002, **41**(5): 1021-1032.
- [8] Dennis H. Goldstein. Polarimetric characterization of Federal Standard paints[C]//*Proceedings of SPIE*, 2000: 112-123.
- [9] 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.
- [10] Kristan Gurton, Melvin Felton, Robert Mack, et al. MidIR and LWIR polarimetric sensor comparison study[C]//*Proc. Of SPIE*, 2010, **7664**: 76640L: 1-14.
- [11] Mark Woolley, Jacob Michalson, Joao Romano. Observations on the polarimetric imagery collection experiment database[C]//*Proc. of SPIE*. 2011, **8160**(81600P): 1-16.
- [12] Jason P. Meyers. Modeling Polarimetric Imaging using DIRSIG[D]. New York : Wallace Memorial Library of Rochester Institute of Technology, 2002.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] David B. Chenault, J. Larry Pezzaniti. Polarization Imaging Through Scattering Media [C]//*In Proc. SPIE*, 2000, **4133**(2000): 124-133.
- [16] J. S. Taylor, et al. Underwater Partial Polarization Signatures from the Shallow Water Real-time Imaging Polarimeter (SHRIMP)[C]//*Proceedings of SPIE*. 2003, **5089**(2003): 296-311.
- [17] Ralph E. Nothdurft, Gang Yao, Effects of turbid media optical properties on object visibility in subsurface polarization imaging[J]. *APPLIED OPTICS*, 2006, **45**(22): 5532-5541.
- [18] Einav Namer, Sarit Shwartz, Yoav Y. Schechner. Sky less polarimetric calibration and visibility enhancement[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(2): 472-493.