文章编号　1674-2915(2013)06-0803-07

偏振成像探测技术发展现状及关键技术

李淑军[1],姜会林[1],朱京平[2],段　锦[1],付　强[1*],付跃刚[1],董科研[1]
(1. 长春理工大学 空间光电技术研究所,吉林 长春 130022;
2. 西安交通大学 电子与信息工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:考虑偏振成像探测技术在目标探测中具有独特优势,本文介绍了偏振成像探测技术的概念,概括了国外偏振成像探测技术的研究历程和发展现状。基于上述描述,针对偏振成像探测的关键技术进行了深入的讨论,包括目标偏振特性、信道环境下的偏振传输特性和偏振成像目标全偏振图像的获取等。最后总结了该研究领域存在的主要问题,归纳了偏振成像探测技术的发展趋势。

关　键　词:偏振成像;目标探测;通道调制成像;分焦平面成像
中图分类号:O436.3; TP391　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20130606.0803

Development status and key technologies of polarization imaging detection

LI Shu-jun[1], JIANG Hui-lin[1], ZHU Jing-ping[2], DUAN Jin[1], FU Qiang[1*], FU Yue-gang[1], DONG Ke-yan[1]
(1. *Institute of Space Photoelectric Technology*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*;
2. *School of Electronic and Information Engineering*, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an* 710049, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *cust_fuqiang*@126.*com*

Abstract: As polarization imaging detection can offer its unique advantage in the target detection, this paper discusses its technological development. Firstly, the concept of polarization imaging detection technology is introduced, and the research process of polarization imaging detection technology in abroad is summarized. On this basis, the key technologies of polarization detection, including the polarization properties of target, the polarization transmission in channel environments and polarization imaging acquisition technology, are discussed. Finally, this paper summarizes several problems to be solved and suggests the future developing direction of the polarization imaging detection.

Key words: polarization imaging; target detection; channel modulation imaging; separated focal plane imaging

收稿日期:2013-09-13;**修订日期**:2013-11-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60677009)

1 引 言

偏振成像是在实时获取目标偏振信息的基础上利用所得到的信息进行目标重构增强的过程,它能够提供更多维度的目标信息,是一项具有巨大应用价值的前沿技术,特别适合于隐身、伪装、虚假目标的探测识别,在雾霾、烟尘等恶劣环境下能提高光电探测装备的目标探测识别能力[1-3]。

目标的偏振特性决定了偏振成像探测具有强度成像无法比拟的独特优势:(1)基于人造目标与自然背景偏振特性差异明显的特性,偏振成像在从复杂背景中凸显人造目标方面有独特优势;(2)基于偏振独立于强度和光谱的光学信息维度的特性,偏振成像具有在隐藏、伪装、隐身、暗弱目标发现方面的优势;(3)基于偏振信息具有在散射介质中特性保持能力比强度散射更强的特点,偏振成像具有可增加雾霾、烟尘中的作用距离的优势。

本文针对偏振成像探测技术,研究了国外偏振成像探测技术发展历程,并对关键技术进行了深入的讨论。

2 偏振成像概述及发展历程

2.1 偏振成像探测技术概述

人们通过相机来探测光的强度,实现形影成像;通过光谱仪来探测光波电场的波长,进行物体材质分析;通过多普勒测速仪来探测光的位相,实现速度探测;而偏振信息的探测需要采用偏振仪。近年来,获取强度与光谱的成像光谱技术也已取得了良好的应用。虽然光的偏振现象早在1669年就被发现了,但其在成像探测方面的应用起步较晚,是一项新兴的前沿技术[4]。

偏振成像是一种获取目标二维空间光强分布以及偏振特性分布的新型光电成像技术。电视摄像、红外热像等传统光电成像是通过探测反射、辐射光强的二维空间分布来获得图像的,其实质是二维空间强度成像;偏振成像在传统强度成像基础上增加了偏振信息维度,不仅能获取二维空间光强分布,还能获得图像上每一点的偏振信息。

如果仅获取目标的强度和线偏振信息(S_0,S_1,S_2),则称为线偏振成像;如果在获取线偏振信息的同时还获取圆偏振信息(S_3),则称为全偏振成像。自然目标的圆偏振很弱,因而在非人造目标探测中一般仅采用线偏振探测,也就是说用前3个Stokes分量表述;而人造目标的圆偏振特性较强,与地物目标差异明显,因而包含线偏振与圆偏振信息的全偏振探测更加适合于从背景中凸显目标,同时,包含圆偏振的全偏振信息在雾霾、烟尘等传输环境下作用距离更远,因而更适用于特殊环境下的应用。

2.2 偏振成像探测技术的发展现状

早在20世纪70年代,美国就开始进行偏振成像技术的研究工作,经过40年的发展,目前已发展了多种偏振成像探测技术,它们可根据实现年代、技术方案、核心器件等不同分为5类[5-13]:

(1)机械旋转偏振光学元件

20世纪70年代出现了机械旋转偏振光学元件型(如图1),它通过旋转偏振片和波片来工作,为时序型工作方式。早期用照相胶片记录图像,曾装载在U-2高空侦察机上对苏联导弹发射进行侦察。20世纪80年代随着电视摄像管和CCD芯片技术的发展,其探测能力得到了较大提高。但采用运动部件,使其体积、重量、抗振能力、环境适应能力难以满足应用要求,同时时序型的工作方式使其适合于静对静观测,因而对运动目标的观测或在运动载体上对目标观测都很难实现。

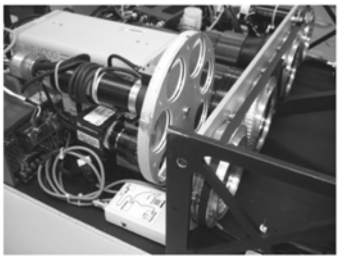


图1 旋转偏振片

Fig. 1 Rotating polarizer

(2)分振幅型偏振成像装置

20世纪80年代出现了分振幅型偏振成像装置(如图2)。它采用分束器将入射光分为3~4路,后接相应个数的探测器,各个探测器前加不同

偏振片,实现偏振信息的同时探测,再利用计算机解算。系统采用多光路多探测器方式工作,体积庞大、结构复杂,且受原理限制,适用于对单色光进行探测,后续解调算法也非常复杂。

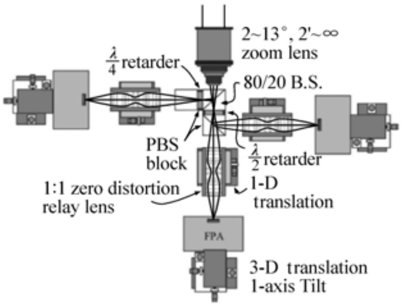


图 2　分振幅型偏振成像装置

Fig. 2　Separation amplitude polarization imaging device

(3)液晶可调滤光片型偏振成像装置

20 世纪 90 年代初随着液晶技术的成熟,人们以电压控制液晶分子偏转取代机械旋转来实现偏振图像探测,研制出液晶型偏振成像装置(如图 3),其体积重量大大缩小。但液晶对光的强衰减导致探测距离极其有限,同时电控不可避免的电噪声、发热等问题对探测精度影响严重,加之时序型工作方式导致其无法进行实时探测。

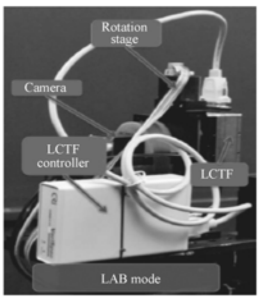


图 3　液晶可调滤光片型偏振成像装置

Fig. 3　Liquid crystal tunable filter polarization imaging device

(4)分孔径型偏振成像装置

20 世纪 90 年代后期出现了分孔径型偏振成像装置(如图 4),它利用微透镜阵列将入射光分为 4 个部分,通过将一个探测器分为 4 个区域来实现同一探测器接收,通过简单计算实现偏振成像。美国 Arizona 大学、偏振传感器公司在此方面的研究处于领先地位,得到了美国国家宇航局(NASA)喷气推进实验室(JPL)、空军实验室、空军科研办公室、陆军实验室等部门的支持,已研制出原理样机。NASA 将其搭载在 C-130 飞机、航天飞机上对地表和海洋热源偏振目标进行探测,以提高天基红外导弹预警卫星的识别精度,降低虚警率。但分孔径型设备尚不具备圆偏振探测能力。

图 4　分波前型线偏振成像装置

Fig. 4　Separated wavefront line polarization imaging device

(5)分焦平面型和通道调制型偏振成像装置

2000 年以后,出现了分焦平面型和通道调制型偏振成像装置。

分焦平面型(如图 5)出现于 2000 年,它直接在探测器探测面阵前每个像元前加入微型偏振片,4 个为一组,实现偏振探测,系统微型化的特点明显。2012 年之前,人们探索实现了线偏振成

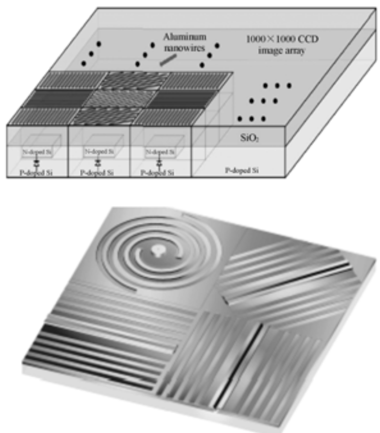


图 5　分焦平面型偏振成像装置及其核心组元

Fig. 5　Separated focal plane polarization imaging device and core elements

像。2012年2月,美国报道了圆偏振滤光片的研究成果,有望将来实现全偏振成像。开展该研究的机构主要有美国NASA JPL,Moxtek公司,Arizona大学、科罗拉多矿业大学、华盛顿大学圣路易斯分校等,其技术难点主要是微型线/圆偏振片阵列的工作机理、优化设计及其与CCD相机像元的精确配准等,大多处于探索阶段,性能指标离实用还有一定距离。

通道调制型偏振成像装置(如图6)的雏形出现于2003年,它利用位相延迟器将不同位相因子分别同时调制到各线/圆偏振分量上,通过成像透镜傅里叶变换在探测器面阵上分开,再通过计算机解调实现全偏振成像探测。2003年日本北海道大学实现了目标单色光实时探测,2008年实现了单色偏振成像,2011年美国Arizona大学将其工作波段扩展到50 nm,提升了光通量和探测距离,但受器件结构限制,成像质量尚待提高。

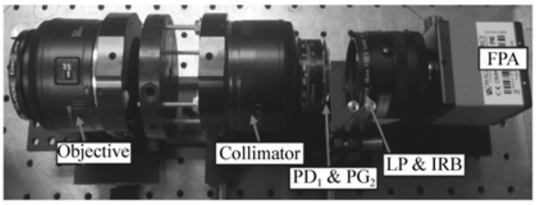


图6 通道调制型偏振成像装置

Fig. 6 Channel modulated polarization imaging device

表1 偏振成像发展历程

Tab. 1 Development history of polarization imaging

年代	类型	典型特征	典型应用领域
1970	旋转偏振片型	时序式,机械旋转体积中等,(准)静态成像	气象探测等
1980	分振幅型	多光路、多探测器体积庞大,可实时成像	地物探测等
1990	液晶调制型	时序式,电控旋转体小但光通量低,(准)静态成像	科学实验等
1990	后期分孔径型	多光路、单探测器体积小,实时线偏振成像	近地空间监测等
2000 -	分焦平面型	单光路单探测器全偏振、实时成像、小型集成化	着重面向应用
2003 -	通道调制型	单光路、单探测器全偏振、实时成像、轻小模块化	着重面向应用

3 关键技术

3.1 目标偏振特性

光照射到目标/背景之后,由于反射、散射等因素,会产生特定的偏振特性,称为物质的起偏。起偏主要基于菲涅尔方程。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上时,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,因而研究目标偏振特性必须研究起偏[14-16]。

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,才能提升信息处理的实时性,凸显目标特性,实现对目标的有效探测识别。目标偏振特性研究方面的关键技术问题包括:目标/背景偏振谱特性数据库构建与实现技术、目标起偏高精度建模技术。

3.2 信道环境下的偏振传输

目标偏振特性在传输过程中,受到大气传输环境的影响,包括雾、霾、烟、尘及大气等传输介质,以及密度场、温度场等[17-18]。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米氏散射理论很难适用复杂环境下的偏振成像探测需求。

基于上述问题，有必要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，还应该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。偏振光在复杂信道环境下的传输特性研究的关键技术问题主要有复杂信道（烟尘、雾霾）表征技术、复杂信道下的偏振辐射传输模型构建技术等。

3.3　目标全偏振图像获取

（1）地基空间态势感知偏振成像探测技术

在这方面的研究中，主要研究白天强背景下空间目标偏振成像技术，如利用地基大口径望远镜，获取空间目标和导弹尾焰的高分辨率成像信息与偏振信息。关键技术包括：用于在轨卫星、废弃卫星、卫星碎片编目的高分辨率偏振成像技术，临近空间低慢小/高速运动目标偏振特性及实时偏振成像探测识别技术。

（2）对地遥感全偏振成像探测技术

这方面的关键技术主要包括：1）轻小型化的偏振探测方法研究。航天、航空对地遥感要求载荷的体积与重量要足够小，因而需要探索从原理上可以实现小型化、结构简洁的偏振成像探测技术。2）由于人造目标具有相对于自然目标强的圆偏振特性，因而包含圆偏振信息的全偏振成像探测方式成为目标偏振成像探测的首选。3）针对相对运动地目标探测，还要实现对目标的准高分辨率成像。

（3）用于隐身伪装目标探测技术

地面目标常常是隐身涂层覆盖、伪装网遮蔽、假目标混淆下的目标。偏振作为独立于强度与光谱的又一物理量，在隐身伪装目标探测与识别方面具有明显优势。为此，需要开展隐身涂层偏振特性研究、伪装网偏振特性研究、空中隐身伪装目标（如无人机、战机、侦察机等）的偏振特性研究、地面隐身伪装目标（如自行武器等）偏振特性研究、隐身目标与背景的偏振特性差异研究、真假目标偏振特性差异研究、隐身伪装目标偏振二向反射模型（pBRDF）建模技术研究。该方面的关键技术包括：目标/背景偏振特性数据库技术、目标偏振二向反射模型建模技术等[19-20]。

4　发展趋势

综上所述，本文在系统、全面、深入分析偏振成像探测技术的基础上，总结了该研究领域中的主要问题及未来研究方向，并归纳出偏振成像探测技术呈现出以下发展趋势：（1）动态目标偏振探测方面，从“时序型”向“空间型”发展；（2）偏振遥感遥测方面，从“体积大、结构复杂”向“轻小型、集成化、模块化”发展；（3）暗弱目标偏振成像方面，从“窄波段”向“宽波段、全波段”发展；（4）目标特性研究方面，从“偏振成像”、“光谱成像”向“高光谱全偏振成像”发展。

5　结束语

本文介绍了偏振成像探测技术的概念，根据探测技术的特点，高度概括了国外偏振成像探测技术的研究历程。针对目标偏振特性、信道环境下的偏振传输、偏振成像目标全偏振图像获取等方面开展了讨论，指出各方面的关键技术，对其中全偏振图像获取涉及的关键技术从地基空间态势感知、对地遥感、用于隐身伪装目标探测与识别等方面开展了讨论。最后指出，面对偏振成像探测技术的快速发展，我国应抓住机遇，加强偏振成像探测技术研究，突破起偏机理、传输机理、探测机理等重大基础问题。

参考文献：

[1]　DUGGIN M J, LOE R S. Calibration and exploitation of a narrow-band imaging polarimeter[J]. *Optical Eng.*, 2002, 41(5): 1039-1047.

[2] DE M A,KIM Y K,GARCIA-CAUREL E,*et al*.. Optimized Mueller polarimeter with liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 2003,28 (8):616-618.

[3] GENDRE L,FOULONNEAU A,BIGUE L. Full Stokes polarimetric imaging using a single ferroelectric liquid crystal device[J]. *Optical Eng*. ,2011,50(8):081209.

[4] CHUNMIN Z,BAOCHANG Z,BIN X. Wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer[J]. *Appl. Optics*,2004,43(33):6090-6094.

[5] JOHNSON L F. Infrared Polarization Signature Feasibility Tests[R]. U. S. Army Mobility Equipment Research and Development Center,1974.

[6] CHIN-BING S A. Infrared Polarization Signature Analysis[R]. Defense Technical Information Center,1976.

[7] TYO J S,GOLDSTEIN D L,CHENAULT D B,*et al*.. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl. Optics*,2006,45(22):5453-5469.

[8] GIUDICOTTI L,BROMBIN M. Data analysis for a rotating quarter-wave, far-infrared Stokes polarimeter[J]. *Appl. Opt.* , 2007,46(14):2638-2648.

[9] MATCHKO R M,GERHART G R. High-speed imaging chopper polarimetry[J]. *Optical Eng*. ,2008,47(1):016001.

[10] SELLAR R G,BOREMAN G D. Limiting aspect ratios of Sagnac interferometers[J]. *Opt. Eng*. ,2003,42(11):3320-3325.

[11] SMITH W H,HAMMER P D. Digital array scanned interferometer: Sensors and results[J]. *Appl. Optics*,1996,35 (16):2902-2909.

[12] HAMMER P D,JOHNSON L F,STRAWA A W,*et al*.. Surface reflectance mapping using interferometric spectral imagery from a remotely piloted aircraft[J]. *IEEE*,2001,39(11):2499-2506.

[13] LUCEY P G,HORTON K A,WILLIAMS T J,*et al*.. SMIFTS: a cryogenically cooled, spatially modulated imaging infrared interferometer spectrometer[J]. *SPIE*,1993,1937:130-141.

[14] CHUN C S L,SADJADI F A. Target recognition study using polarimetric laser radar[J]. *SPIE*,5426:274-284.

[15] JIHAD Z,PIERRE G,YOSHI T. Using polarimetric imaging for material classification[C]// International Conference on Image Proceeding. Barcelona,Spain:IEEE,2003,3:11-827-830.

[16] TAN S X,NARAYANAN R M. Design and performance of a multiwavelength airborne polarimetric lidar for vegetation remote sensing[J]. *Appl. Opties*,2004,43:2675-2677.

[17] LE H L,HARTEMANN P,DOLFI D. A phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging[J]. *SPIE*,2001,4370:94-105.

[18] MEHDI A,FRANCOIS G,PHILIPPE R. Multispectral polarimetric imaging with coherent illumination towards higher image contrast[J]. *SPIE*,2004,5432:133-144.

[19] BREUGNOT S,CLEMENCEAU P. Modeling and performances of a polarization active imager at λ = 806 nm[J]. *Opt. Eng*. ,2000,39(10):2681-2688.

[20] AZZAM R M A. Mueller-matrix ellipsometry:a review[J]. *SPIE*,1997,3121:400-409.

作者简介:

李淑军(1976—),男,吉林梅河口人,博士后,1999年于北京航空航天大学获得硕士学位,2004年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,主要从事偏振成像探测方面的研究。E-mail:Lishujun@cust. edu. cn

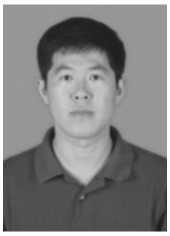
付 强(1984—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2010年、2012年于长春理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事大气激光传输、偏振成像探测方面的研究。E-mail:cust_fuqiang@126. com

姜会林（1945—），男，辽宁辽中人，教授，博士生导师，1981 年、1987 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位，主要从事激光通信、靶场测试、偏振测试等方面的研究。E-mail：HLJiang@ cust. edu. cn

朱京平（1967—），女，陕西西安人，教授，博士生导师，1989 年、1991 年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位，2000 年于西安交通大学获得博士学位，主要从事光通信与光传感、光电集成、光电子技术及其在生物医学中的应用、通信用光电集成器件与系统方面的研究。Email：jpzhu@ mail. xjtu. edu. cn

段　锦（1971—），男，吉林长春人，博士，教授，博士生导师，1993 年于北京理工大学获得学士学位，1998 年于沈阳工学院获得硕士学位，2004 年于吉林大学获得博士学位，主要从事机器视觉、环境仿真、光电检测等方面的研究。E-mail：duanjin@ vip. sina. com

付跃刚（1972—），男，吉林长春人，教授，博士生导师，2001 年于长春光学精密机械学院获得硕士学位，2005 年于长春理工大学获得博士学位，主要从事激光通信、光学设计等方面的研究。E-mail：fuyuegang@ cust. edu. cn



董科研（1980—），男，吉林梅河口人，博士，助理研究员，2006 年、2009 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位，主要从事偏振成像探测方面的研究。E-mail：Dongkeyan@ cust. edu. cn