

偏振成像技术的研究进展及应用

周强国^{1,2}, 黄志明¹, 周 炜¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 偏振成像技术的优势是把信息量从3个自由度, 即光强、光谱和空间, 扩充到7个自由度, 包括光强、光谱、空间、偏振度、偏振方位角、偏振椭率和旋转方向, 这种观测信息量的丰富有利于提高对研究目标探测的精确度。本文首先介绍在近几年内偏振成像技术在国内外的研究进展, 其次介绍偏振技术在军事及民用领域的典型应用, 最后对我国在偏振成像技术方面存在的问题给出合理的建议。

关键词: 偏振特性; 目标探测; 偏振态; 目标识别

中图分类号: TP274.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)09-0817-12

Research Progress and Application of Polarization Imaging Technology

ZHOU Qiangguo^{1,2}, HUANG Zhiming¹, ZHOU Wei¹

(1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The advantage of polarization imaging technology is that it expands the amount of information from three degrees of freedom, namely light intensity, spectrum, and space, to seven degrees of freedom, including light intensity, spectrum, space, degree of polarization, polarization azimuth, polarization ellipticity, and direction of rotation. This richness of observational information is conducive to improving the accuracy of research target detection. This article first introduces the research progress of polarization imaging technology at home and abroad in recent decades, then introduces the typical applications of polarization technology in military and civilian fields, and finally provides reasonable suggestions on the problems of polarization imaging technology in our country.

Key words: polarization characteristics, target detection, polarization, target recognition

0 引言

偏振成像技术能够获取目标物的空间信息、光谱信息以及各个谱段的偏振信息。偏振成像技术将目标物的空间、光谱和偏振信息进行融合, 不仅可以提高获取目标物的信息量, 而且能够增强对目标物的探测和识别能力。随着偏振成像技术在农业、环境、医学、工程、大气、天文等领域的应用范围日益扩大, 在未来必然表现出广阔的应用前景。偏振成像技术相比传统的探测技术对目标物体进行探测与识别时, 在以下几个方面通常会体现出无法比拟的优势: 一是当目标物使用伪装涂料、伪装网等技术进行伪装时, 偏振成

像技术可以突破传统探测器的局限性, 更容易发现目标^[1]; 二是当目标物辐射较弱, 背景辐射较强时, 传统探测器从背景中清楚分辨目标物的特征就变得困难了, 使用偏振成像技术, 更容易凸显目标; 三是在大气环境下, 偏振成像技术可以增加在烟、雾条件下的探测距离, 偏振信息比强度散射信息具有更好的保持性。

实验表明: 不同的物体或者同一物体的不同部分由于粗糙程度、材料性质、外表形状和观测角度的不同, 会产生不同的偏振特性。偏振探测技术的优点在于对目标物的探测不受目标物表面温度的影响, 只与目标物自身的性质有关, 如粗糙程度和外表形状等,

收稿日期: 2021-02-07; 修订日期: 2021-04-07.

作者简介: 周强国 (1995-), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事红外成像及太赫兹探测技术研究。E-mail: qgzhouhq@163.com.

通信作者: 黄志明 (1971-), 男, 湖南岳阳人, 研究员, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 主要从事红外与太赫兹相关领域研究。

E-mail: zmhuang@mail.sitp.ac.cn.

基金项目: 国家自然科学基金委员会杰出青年基金 (61625505)。

所以偏振探测技术能够有效避免背景杂波的影响,让目标物在背景中凸显出来,有利于对目标的检测与识别,在复杂环境下检测出有效的信号。

本文首先介绍偏振成像技术在近几十年的发展历程,再介绍偏振成像技术在军事及民用领域的典型应用,最后指出国内在偏振成像技术领域存在的问题以及给出合理的建议。

1 偏振成像技术的研究进展

对于偏振成像技术,涉及此领域较早的国家有美国、英国、以色列和日本等,特别是美国在偏振成像技术领域取得了很大的进步,在全球处于领先地位。其工作重点集中于偏振探测理论和技术应用方面,为此进行了大量测量、测试、模拟仿真等,获得了丰富的偏振数据(如偏振图像、性能参数、表格曲线等),并对数据进行了分析和归纳^[2]。本节主要在以下3个方面对偏振成像技术的发展历程进行全面系统地介绍:一是在偏振成像系统的研究方面;二是在偏振成像仪器的研究方面;三是在对目标物的观测偏振信息的研究方面。

1.1 偏振成像系统的研究

对偏振成像系统的研究有助于偏振成像光谱仪在光谱段范围、光谱分辨率以及精确度上的不断改进与提高。目前偏振成像光谱系统主要有两种:一是液晶可调谐(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF)成像光谱系统和非共线声光可调谐(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)成像光谱系统^[3]。随着光谱成像技术的发展,AOTF成像光谱系统逐渐成为国内外研究的重点。AOTF成像光谱系统可以获得更多的目标信息,它具有结构简单、分辨率高、光谱范围宽等优点。通过AOTF方式获取的数据不仅包含了目标的光谱信息和空间信息,而且包含目标的偏振信息,增强了获取目标物的信息量^[4-5],图1为AOTF偏振光谱成像系统的设计原理,图2为基于AOTF的偏振成像光谱系统。

1999年,日本国家航空航天实验室(National Aerospace Laboratory of Japan, NAL)研制了偏振光谱成像系统,该系统将电调滤光片与电机旋转相结合,获得了可见光波段的光谱图像,之后将波段扩展到了近红外波段^[3]。同年,李力等人^[6]研究了分振幅光度式偏振测量系统,并对该系统进行了定标和性能校正。2002年,美国陆军研究实验室(U. S. Army Research Laboratory, ARL)设计的偏振光谱成像系统主要由AOTF和液晶相位可变延迟器(Liquid crystal variable retarder, LCVR)组合而成,覆盖了0.4~11.5 μm的光谱范围。因为它都是由电子控制的,所以响

应速度快,时效性更好。但是噪声对声光传感器影响较大,因此成像信噪比较低^[3,7-8]。

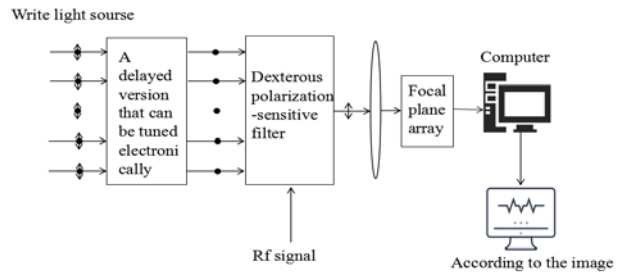


图1 AOTF偏振光谱成像仪设计原理

Fig.1 AOTF polarization spectral imager design principle

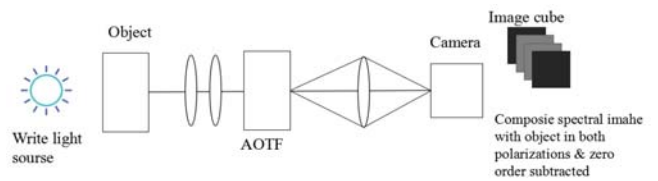


图2 基于AOTF的偏振成像光谱仪

Fig.2 Polarization imaging spectrometer based on AOTF

ARL的Neelam Gupta领导的小组对基于AOTF的成像偏振光谱系统(imaging spectropolarimeter, ISP)做了深入的研究^[3,9]。研制出宽波段、小型化、稳定的、可进行编程的ISP型号。该小组对基于AOTF的ISP采用了3种常用的设计方式,分别为:①在AOTF前放置LCVR对每一波长产生两个相位延迟值,得到两个正交偏振的衍射光束,用一个相机对其中一个衍射光束进行成像;②利用一个相机同时对AOTF出射的两个衍射光束进行成像;③利用两个相机分别对两个偏振方向正交的光束成像。该小组对基于AOTF的ISP除了采用上述常用的3种方式外,还研制了基于两个LCVR和AOTF的全Stokes ISP,图3为此系统的结构示意图^[10]。

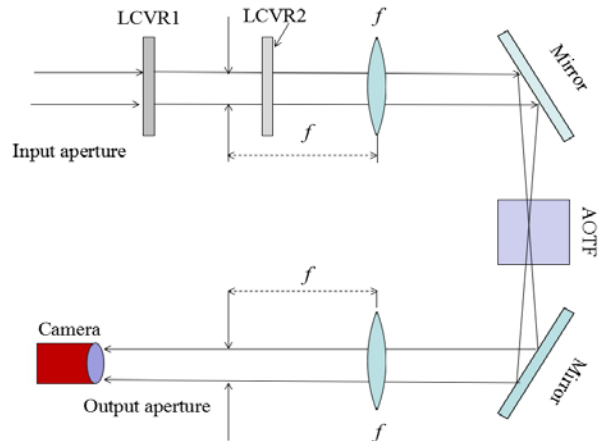


图3 基于AOTF的全StokesISP系统

Fig.3 All-ISP Stokes system based on AOTF

2002年,曹汉军等人^[11]在自然光条件下,用实验

型偏振 CCD 相机进行了自然目标和人工目标的偏振图像获取实验。结果表明使用偏振成像技术能够获得清晰的人造目标图像。

中国科学院上海技术物理研究所(Shanghai Institute of Technical Physics, SITP)通过分析地面物体对反射光的偏振特性,得出偏振特性与目标的本身特性(如辐射温度、表面发射率)、探测波长、观察角度、环境温度、周围环境热辐射以及相对湿度有关^[12]。

2007年,杨伟锋,洪津和乔延利等人^[13]研制的无人机电载偏振 CCD 相机,保证了三路光学系统,提高了系统抗震能力和可靠性,使成像质量显著提高。

2008年,美国雷神公司(Raytheon Company)研发了长波红外(HgCdTe)和中波红外(InSb)分焦平面红外偏振探测系统,即在探测器焦平面上加工偏振元件^[14]。实验结果证明达到了实时检测的要求,偏振光栅消光比达到100dB以上,图4为分焦面偏振成像系统结构。

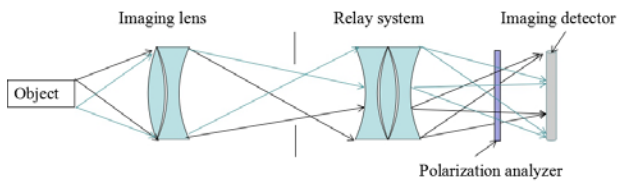


图4 分焦面偏振成像系统结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of polarization imaging system on focal plane

2009年, Lavigne 等人^[15]研发了一套四波段偏振成像系统,该系统可以对长波红外、中波红外、短波红外以及可见光进行探测。其中的可见光通道含有6个不同波段的滤光片,在四波段成像系统前面安装了可以同步旋转的偏振片,获得了四个偏振方向的图像。

2011年亚利桑那大学 Julia Craven 等人^[16]利用傅里叶变换成像光谱仪和通道调制技术研制出红外波段全斯托克斯高光谱成像系统。2012年,美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)研制了新型圆偏振滤光片的偏振成像系统,该偏振片能够同时获得入射光中的线偏振分量以及圆偏振分量。圆偏振光在云雾环境中有着较强的保偏能力,能够增强探测系统对云雾的穿透能力。由于该技术实现了全偏振实时成像,在军事上应用前景十分广阔^[17-18]。

美国北卡罗来纳州大学研制了偏振光栅的SISP^[3, 19-20],即采用多个偏振光栅和波片,通过焦平面阵列,可以同时获得有关目标物的光谱色散和偏振衍射,再通过计算机的融合复原技术得到目标物的偏振和光谱等信息。此系统具有实时性好、较高的能量

利用率和结构紧凑等特点,图5为光栅干涉型偏振成像系统。

2013年苏州大学贺虎成^[21]研制了可见光的分孔径偏振成像光学系统。此系统通过孔径光阑分割离轴的方式,使同轴光学成像系统分解为多组相同的偏心子系统,通过在各组子系统内设置滤光片或者偏振片,再通过中继透镜使其成像在同一个焦平面探测器上,图6为分孔径偏振成像光学系统。此系统具有结构简单,数据处理速度快等优点。

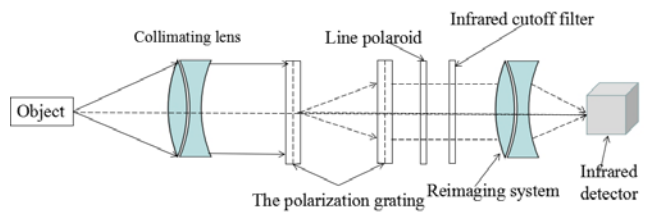


图5 光栅干涉型偏振成像系统

Fig.5 Grating interferometric polarization imaging system

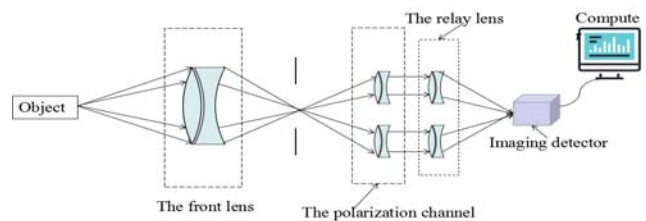


图6 分孔径偏振成像光学系统

Fig.6 Sub-aperture polarized imaging optical system

2014年,大连理工大学的 Chu X.等使用纳米压印技术对双层铝纳米线栅进行了集成化^[22],在蓝光波段的灵敏度有较好的表现。之后,中国科学技术大学的 Zhang 等人将像素式微偏振片阵列(pixel type micro polarizer array, PMA)应用于实时可见成像的偏振测量的想法,于2015年将使用电子束曝光制备的PMA集成到CCD传感器中,实现了实时相位检测^[23]。

2016年,河南理工大学的 LU B.和中科院重庆绿色智能研究院的 SHEN J.等人研制了一种宽带太赫兹偏振系统,即通过在硅衬底两侧制作双层线栅^[24]。同年,耶拿大学的 Siefke 等人^[25]研制了具有二氧化钛线栅结构的偏振系统。通过使用自对准双图案化(Self-aligned Double Patterning, SADP)技术制备的周期较小和纵横比较大的光栅,可用于远紫外光谱范围。对该偏振系统进行测试,结果表明波长为193nm时获得了384dB的偏振消光比和10%的透射率,波长为248nm时得到774dB的偏振消光比和16%的透射率。

2017年,哈佛大学物理系的 Shin 等人利用纳米压印技术制备了高性能线栅偏振系统^[26]。与传统的偏振

系统（如沃拉斯顿棱镜等）相比，金属线栅不仅具有容易集成，结构紧凑等优点，而且具有较大视场、较宽光谱范围、较高的偏振消光比以及透过率，图7为典型的线栅结构示意图。金属线栅通常指在透明基底上设置远小于入射光波长的金属栅条，那么平行于栅条的横电光（transverse electric, TE）无法通过金属栅条，并被反射，垂直于栅条的横磁光（transverse magnetic, TM）将直接透过。

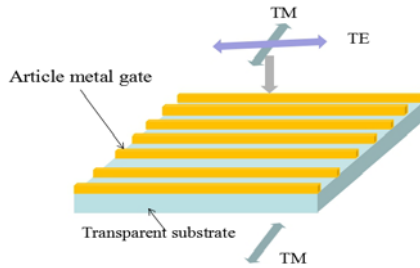


图7 线栅结构

Fig.7 Raster structure

2020年，长春理工大学设计了具有双沃拉斯顿棱镜的偏振成像系统，该系统由双沃拉斯顿棱镜、偏振分光棱镜、1/2波片、双透镜、CCD探测器等部分组成^[27]。实验结果表明该偏振成像系统可以提高在复杂环境下对目标的探测能力，图8为沃拉斯顿棱镜原理结构，图9为双沃拉斯顿棱镜偏振成像系统。

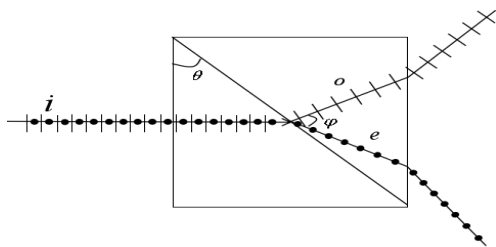


图8 沃拉斯顿棱镜原理结构

Fig.8 Wollaston prism

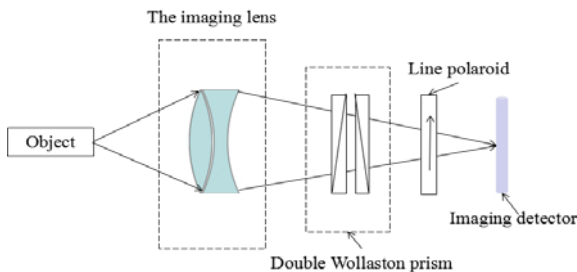


图9 双沃拉斯顿棱镜偏振成像系统

Fig.9 Wollaston prism polarization imaging system

1.2 偏振成像仪器的研究

从1984年，美国国家航空航天局（national aeronautics and space administration, NASA）先后6次在发现号（Discovery）航天飞机上采用偏振双相机仪器，在一对瞄准并且同步的相机前加一对透过轴互

相垂直的偏振滤光片，通过调整滤光片组，使其中一个胶片光强达到最大，而另一个胶片光强趋于最小，测得斯托克斯参量的 S_0 和 S_1 ，且精度只有20%左右^[28]。

ARL研制了具有较宽光谱范围的LWIR偏振成像仪器（Long wave infrared polarization imager, LIP），这是应用比较广泛的典型偏振成像设备^[29]。LIP的组成以及结构如图10所示。

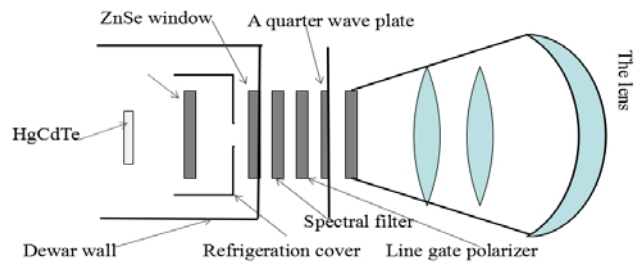


图10 LIP的组成以及结构示意图

Fig.10 Lip is a schematic diagram of its composition and structure

1990年12月，美国研制出地球观测扫描偏振计（earth observing scanning polarimeter, EOSP），在地球观测系统（earth observing scanning, EOS）上有12条具有偏振分析功能的探测通道，其主要任务是利用偏振光研究大气气溶胶的光学厚度、光学性质的变化、粒子大小、云顶的气压以及云层种类等^[30]。

1991年，NASA研制了室内单叶的偏振光二向性反射测量装置，通过此装置对地面目标进行了探测实验^[31]。之后，NASA将AOTF技术和CCD相机结合研制了偏振成像光谱仪，获得了正交偏振光谱图像，此外还进行了地基天文观测实验。

1995年上海技术物理研究所开始研制卷云探测器^[32]，于1997年进行航空校飞实验，该探测器具有偏振测量性能，是探测大气气溶胶、云层种类的专用仪器。

1996年，法国国家空间研究中心（french national centre for space research, CNES）研制的地球反射偏振测量仪（polarization and directionality of the earth reflectance, POLDER），能够从不同的观测角度测量地球大气对太阳辐射的双向反射率和偏振度，可用于研究陆地表面状况、海洋状况、云的类型以及大气气溶胶浓度等。它由日本ADEOS-II卫星携带进入空间运行轨道^[33]。POLDER采用线性偏振片，由滤光片对光谱信息进行分离，图11为POLDER的光学原理图。

1998年，美国犹他州立大学空间动力实验室研制出红外高光谱成像偏振仪（hyperspectral imaging polarimeter, HIP）。该仪器装载在空军KC-135型飞机平台上，探测后向散射太阳光光谱，得到几百幅对地观测的偏振图像^[34]。

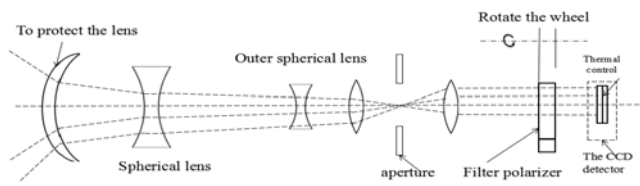


图 11 POLDER 的光学原理图

Fig.11 An optical schematic of POLDER

1999年, Alabama 大学^[35]研制了一种分焦平面偏振成像仪器, 与传统偏振仪器相比, 它没有使用分光元件, 而是将微偏振片直接安装到偏振仪器像元的表面, 单次曝光同时能够获得4个方向的起偏信息。同年, 美国重飞行器研究公司研制了偏振光谱强度调制技术 (polarization spectral intensity modulation technique, PSIM) 与狭缝式棱镜色散成像光谱仪相结合的快照式成像光谱偏振仪 (snapshot imaging spectropolarimeter, SIS), 并进行了机载飞行实验^[3,36]。

美国亚利桑那大学与美国陆军工程研发中心合作, 于1999年在层析成像光谱仪 (computer tomography imaging spectrometer, CTIS) 的基础上通过在物镜前方添加偏振片转轮的方式设计了层析 ISP (computer tomography imaging spectropolarimetry, CTISP)^[9]。之后在 CTISP 基础上引入通道型偏振技术 (channeled spectropolarimetry, CSP), 研制出快照式层析成像通道型光谱偏振仪 (computer tomographic imaging channeled spectropolarimeter, CTICSP)^[37]。

2000年, 上海技术物理研究所研制了六通道分光偏振计, 该仪器可以实现全偏振的测量, 并从空中获得了地面不同目标的遥感数据^[38]。该仪器波段跨度从近红外到短波红外 (670~2150 nm), 光信号分别经过准直透镜, 1/4 波片, 起偏器以及滤光片, 最后经会聚透镜将各束光会聚到各自的探测器上。通过转动 1/4 波片并固定检偏器组合可以实现目标的全偏振探测, 因为能够检测斯托克斯矢量的四个参数, 因而可以检测圆偏振光, 偏振测量精度高于 1%^[17]。2003年, 安徽光机所研制了机载多波段偏振 CCD 相机, 该相机具有多个偏振角, 可同时获取同一目标同一波段的信息, 于12月搭载 Y-12 飞机进行了航空校正实验, 首次在国内获得航空偏振图像^[39]。2007年, 我国发射的嫦娥一号卫星, 其中有效载荷包括干涉成像光谱仪、CCD 立体相机等, 成功获取了月球表面影像和立体图像。2008年, 我国发射的 HJ-1A 卫星, 是环境与灾害监测预报小卫星星座的一颗卫星, HJ-1A 卫星搭载了 CCD 相机和高光谱成像仪, 高光谱成像仪具有 ±30°侧视能力和星上定标功能。

同年, 美国雷神公司 (Raytheon Company) 研制

出中波红外、长波红外、中/长双色凝视型 FPA 和长波扫描型 FPA 等红外偏振焦平面探测器。该探测器由于扩增了焦平面探测阵列规模, 表现出极好的探测性能^[40]。

2014年, 西安交通大学穆延魁和张淳民等人研制了差分偏振干涉成像光谱仪, 此仪器是基于 Savart 偏振成像系统研制的, 可以同时获取二维目标的正交偏振组分的高光谱偏振信息^[41-42]。Savart 干涉偏振成像仪与棱镜干涉偏振成像仪都具有结构紧凑, 能量利用率高等优点, 但也具有类似的缺点, 例如用于宽波段时, 不同波长的干涉图像相互影响, 导致成像偏差较大。图 12 为典型的 Savart 干涉偏振成像仪结构。

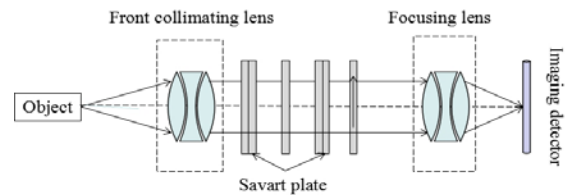


图 12 Savart 干涉偏振成像仪结构示意图

Fig.12 Savart interference polarization imager

2016年, 张海洋等人^[43]使用多线阵分焦平面型偏振仪器进行了偏振遥感探测, 推导了光学系统以及非理想偏振片的偏振传递矩阵, 并对相应的参数进行了标定, 实验结果表明该探测器有着较高的探测精度。2018年5月, 我国发射的 GF-5 号卫星, 是具有高分辨率和高精度的对地观测卫星, 观测波段从紫外波段到长波红外波段^[44]。GF-5 号卫星装备有 6 台先进的有效载荷, 其中一台是大气多角度偏振探测仪, 可以进行多角度偏振成像。大气多角度偏振探测仪星下点空间分辨率优于 3.5 km。图 13 为多角度偏振成像仪及仪器结构。

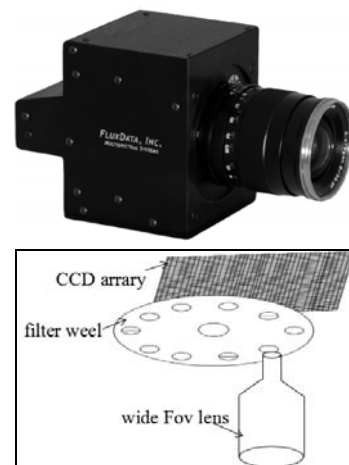


图 13 多角度偏振成像仪 (上) 及仪器结构 (下)

Fig.13 Multi-angle polarization imager (up) and instrument structure (down)

近年来由于椭圆偏振光谱仪在半导体、金属和有机物的检测中不破坏样品，并且不需要真空条件，使椭圆偏振光谱仪在无损检测技术中也成为一个极具潜在应用前景的技术。HORIBA Jobin Yvon 公司最新研制的 MM-16 相调制型椭圆偏振光谱仪，首次采用液晶盒作为偏振光调制器的光电型相位调制椭圆偏振光谱仪^[45]。该仪器具有运行速度快、稳定性好、精确度高等特点，同时还提供了微光斑配置，可以实现对样品细微变化的研究，图 14 和图 15 分别为 MM-16 相位调制椭圆偏振光谱仪和原理示意图。

1.3 对目标物的观测偏振信息研究

经过实验表明偏振信息对研究和检测岩矿、森林火灾、植被与土壤分类、大气环境监测、冰川、海岸线轮廓以及江海湖泊表面的状况等方面具有极大的优势。

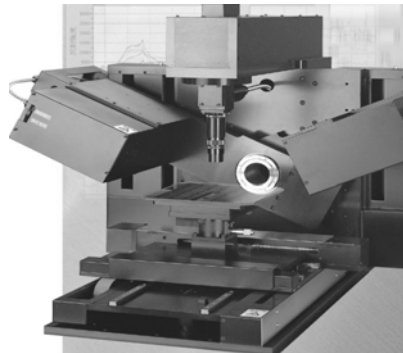


图 14 MM-16 相位调制椭圆偏振光谱仪

Fig.14 MM-16 phase modulation ellipsometry spectrometer

1987 年，Grant 等人研究了如何利用偏振特性将镜面反射与散射分离的技术问题^[46-47]。指出树叶不仅具有单纯的散射，而且还会发生镜面反射，镜面反射发生在叶子表面。同年，Paul Woessner 不仅研究了植被的偏振特性，而且分析了土壤的偏振特性，实验结果表明入射角和目标反射率对偏振度会产生影响，且偏振度与目标反射率存在反比关系^[48-49]。

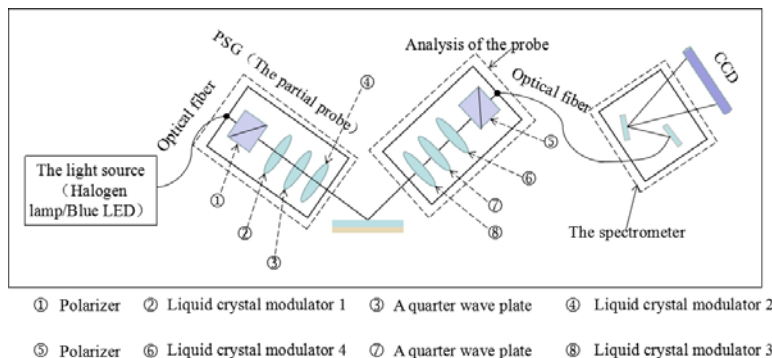


图 15 MM-16 相位调制椭圆偏振光谱仪原理示意图

Fig.15 MM-16 phase modulation ellipsometric spectrometer schematic diagram

1988 年，赵云升等^[50]通过偏振信息不仅获得了土壤的偏振反射特征，还分析了影响土壤偏振反射的主要因素。在实验中测得了反射率与土壤种类、入射角、探测角、方位角的关系。

1990 年，L. B. Wolff 等人^[51]通过偏振菲涅尔系数识别目标物是导体还是绝缘体，该方法假设表面反射以镜面反射为主，所需光源是理想的点光源，所以会产生较大的误差。Hua 等人利用目标物反射前后光束相位的差异来判断目标物是金属还是绝缘体，具体可通过检测反射光的偏振相角图像确定图像中每一点像素为导金属还是绝缘体。该方法与 L. B. Wolff 使用的方法相比，具有较好的鲁棒性以及准确度，容易对室外的物体进行分类，但噪声污染对偏振相角图像的影响非常大^[52-53]。

1999~2002 年纽约大学的 Egan W. G. 等人^[54-55]使用柯达彩色红外相机 (DSC460)，拍摄 C-130 飞机和 B-52 轰炸机。该相机对短波红外比较敏感，通过分析获得的红外偏振图像，能够得出飞机各部位的红外偏振特征。实验表明红外偏振图像比红外强度图像更容易区分背景中的飞机。2005 年，美国海军研究实验室 (United States Naval Research Laboratory, NPL) Pries 和 AFRL 的 Goldstein 等人对不同种类的材料进行了偏振实验，结果表明不同种类的材料具有不同的偏振特性^[56]。

2007 年左右，美国亚利桑那大学与 AFRL 等单位合作使用被动式红外偏振成像技术探测在野外环境中隐藏的车辆，图 16 为不同成像条件下野外环境中的车辆^[57-59]。由图像可以看出偏振成像技术能够在复杂环境中凸显目标，提高对目标探测的准确度。

2008 年，北京航空航天大学运用偏振成像和 HIS 伪彩色编码技术^[60]，对不同种类的材料进行偏振成像实验，结果表明偏振图像能够很好地区分不同种类的材料，而强度图像则无法区分。

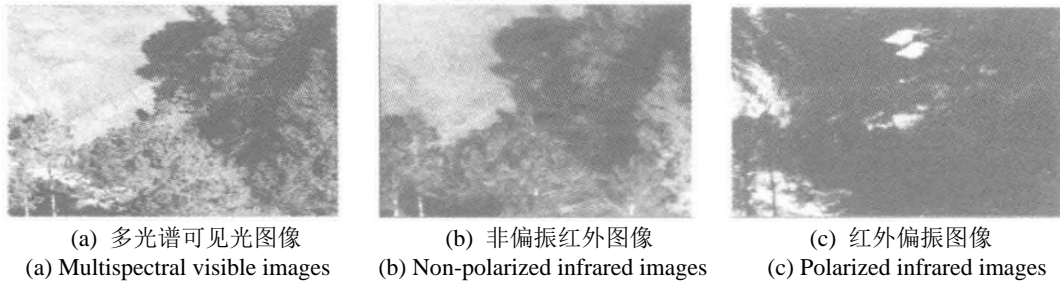


图 16 不同成像条件下野外环境中的车辆

Fig.16 Vehicles in field environment under different imaging conditions

2011年, AFRL 使用长波红外分焦平面探测器对飞机模型目标进行了偏振成像实验。实验获取了多幅可见光, 长波红外和长波红外偏振图像, 可以看出长波红外偏振成像很好地抑制了复杂背景的干扰, 能够凸显目标信息^[61]。

2012年, 王霞等人研究了大气对红外偏振成像的影响, 对短波, 中波以及长波光波的偏振特性进行了模拟仿真分析^[62]。实验结果表明: 对于短波红外波段, 当背景与目标的反射率差别较大时, 强度探测效果优于偏振; 对于中波红外波段, 由于目标和背景的对比如比较复杂, 如果目标的偏振特性比较明显, 那么偏振探测效果优于强度; 对于长波红外波段, 主要是目标与背景的自发辐射, 当两者偏振特性差别很大时, 偏振探测拥有较稳定和好的性能^[17]。

2013年, 河海大学王慧斌等人提出了一种分级多尺度融合的水下偏振图像处理方法^[63]。该方法通过使用非负矩阵分解对偏振参量图像进行了融合增强, 获得含有局部特征完整的信息和冗余度低的偏振参量融合图像; 然后利用二维经验模式分解分别将偏振参量融合图像以及偏振强度图像进行多尺度变换, 将获得的高低频段图像分别进行了加权平均融合, 融合权重使用穷举搜索法得出; 最终通过将高低频融合结果进行反变换得到了最终的融合图像。经过仿真表明: 该融合方法对增强图像细节和提高水下偏振图像对比度方面效果比较明显。

通过以上研究进展可以看出偏振成像技术在不同的领域都具有广阔的应用前景, 目前已经成为国内外研究的热点之一。国外对于偏振技术的研究起步较早, 且偏振成像技术越来越趋于成熟, 而我国起步较晚, 在一些关键技术方面还有待突破与完善, 如偏振计算方法研究、偏振成像系统的实现、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、复杂信道表征技术、偏振目标识别算法研究、复杂信道下的偏振辐射传输模型构建技术以及针对相对运动的目标探测等, 还需要进一步实现对目标的高分辨率成像。

2 偏振成像技术的典型应用

2.1 偏振技术在军事领域的应用

2.1.1 导弹追踪

在复杂背景下, 由于存在大量辐射强度与目标物相似的物体, 因此目标物的红外图像对比度会降低, 不利于区分目标物。目标物的偏振特性与目标物的材料性质、辐射温度和表面粗糙度等因素有关, 此外人工目标和自然背景物体的偏振特性差别很大, 因此偏振成像技术可以大大提高图像对比度, 增加探测距离和精度, 提高信噪比。

由于飞机在发射导弹的过程中和发射后会产生很高的热量和大量的气体, 会形成对比明显的偏振特性, 因此使用偏振技术可有效地对目标进行追踪, 如图 17。由于飞机表面有着光滑的金属涂层, 且诱饵弹经过燃烧后产生大量的烟尘等物质, 在偏振度方面呈现出很大不同, 利用偏振成像技术有助于提高干扰对抗技术^[64]。



图 17 飞机具有偏振特性

Fig.17 Polarization properties of aircraft

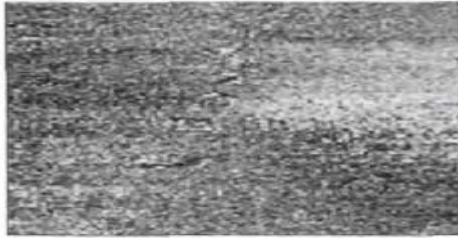
2.1.2 地雷探测

瑞典国防研究机构的 Göran Forssell 对地雷的探测进行了深入研究, 该团队研发了中、长波红外偏振探测系统。实验表明, 与传统的红外探测器相比, 红外偏振探测器能更加有效地识别与探测目标, 提升了探测器对目标物的探测能力。图 18(a)是应用红外偏振技术的扫雷车图片; 图 18(b)是非偏振的传统红外探测器对地雷探测的图像; 图 18(c)是红外偏振探测器对地雷探测的图像^[65]。

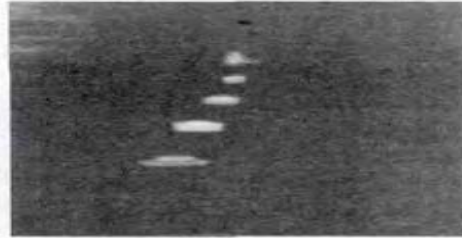
通过图 18 分析可知红外偏振探测器具有传统红外探测器不具备的优势, 利用偏振特性可以有效地识别目标。又因为金属物体的偏振度相对较大, 所以更容易把目标物从背景中区分出来。



(a) 扫雷车
(a) Mine-clearing vehicles



(b) 非偏振的传统红外探测
(b) Conventional infrared detectors without polarization



(c) 红外偏振探测
(c) Infrared polarization detector

图 18 红外偏振、非偏振成像对比

Fig.18 Comparison of infrared polarization and non-polarization imaging

2.1.3 水下目标探测

根据偏振原理可知,不同的目标物有着不同的偏振特性,通过偏振特性可以更好地把水下的人造目标从自然背景中区分出来,减少自然背景噪声的影响。在军事上通过偏振成像技术不仅可以有效地对敌人的潜艇、水雷进行探查,而且可以用于打捞、搜救等工作。

2.1.4 伪装军事目标

通过伪装技术可以改变目标物向外的辐射特性,因此被传统红外探测设备探测到的概率就会减小^[66-67]。由

于人造伪装涂料或者伪装网与背景存在偏振特性的差异,因此使用红外偏振探测设备更容易在伪装条件下发现和识别目标。根据国外的相关研究实验,如图 19,偏振器探测角度设定为 66°,无论是否使用伪装技术,红外偏振技术对目标物的识别效果都要优于传统探测器^[68-70]。

通过实验图像分析可以得出,红外偏振成像技术对于目标的识别能力优于传统红外成像技术,突破了传统红外探测器在背景干扰和红外伪装等方面的局限性,能够更加准确、清楚地识别目标。



(a) 传统红外探测,无伪装网

(a) Conventional infrared detectors, without camouflage nets



(b) 红外偏振探测,无伪装网

(b) Infrared polarization detector, without camouflage nets



(c) 传统红外探测,有伪装网

(c) Conventional infrared detectors, with camouflage nets



(d) 红外偏振探测,有伪装网

(d) Infrared polarization detector, with camouflage nets

图 19 对伪装目标野外探测图像对比

Fig.19 Comparison of field detection images of camouflage targets

2.2 偏振技术在民用领域的应用

2.2.1 医学诊断

Sokolov 等^[71]发现利用偏振光照明探测目标的反射光谱与 Mie 散射理论计算可以得到上皮组织细胞核的大小和形态分布。Alfano 小组^[72-73]研究发现不同波长的偏振光在组织中穿透的深度不同，提出一种光谱偏振差成像方法 (spectral polarization difference imaging, SPDI)，该方法可以提高皮下组织的成像对比度。由于细胞核大小的变化以及胶原质成分的变化都会影响光在组织中的反射、折射、散射和吸收，组织散射光的偏振态就会产生变化，通过对偏振态进行分析可以反演出组织的结构，如脂质膜的大小和结构，细胞核和红血球大小、胶原纤维的形貌和结构等^[74]。生物及人体组织会因为结构的差异而产生不同的吸收，进而表现出不同的偏振信息。使用偏振成像技术可以检测生物组织的偏振特征，然后通过对比和分析，可以得知生物组织是否产生病变。如将偏振光谱成像探测应用于黑痣癌变的检测中，能快速准确地检测出癌变的黑痣。图 20 为红外偏振诊断仪图片。

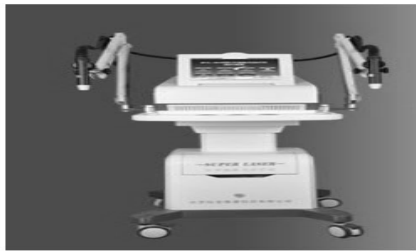


图 20 红外偏振治疗诊断仪

Fig.20 Infrared polarization therapy diagnostic instrument

2.2.2 海洋环境监测

星载的偏振光谱成像仪，可以有效地识别海水、冰川和陆地，同时可以得到更准确的海岸线轮廓。星载的遥感仪器在对地目标的观测中，由于水面的强反射可能会对遥感仪造成损害，因此可以通过使用偏振技术减弱强反射。而且有的研究已经表明，通过偏振成像技术能够检测出海水是否被污染（如石油泄漏）、云雾粒径大小、海面上的云雾状况、海平面高度以及海水辐射状况等，图 21 为西安交通大学自主研制的星载偏振成像光谱仪样机。

2.2.3 航空遥感与大气探测

航空遥感是指以飞机、气球和飞艇等为平台搭载传感器在空中进行探测的技术。通过使用航空遥感可以扩大偏振成像光谱仪的探测视场，增大观察角。在遥感平台上搭建偏振成像设备，利用偏振原理可以区分与识别不同的地形和地貌，图 22 为西安交通大学自主研制的机载偏振成像光谱仪样机。



图 21 星载偏振成像光谱仪

Fig.21 On board polarization imaging spectrometer

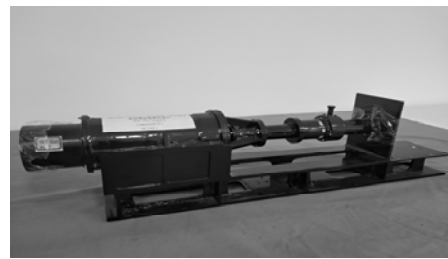


图 22 机载偏振成像光谱仪

Fig.22 Airborne polarization imaging spectrometer

偏振光谱探测器可以探测不同云层的偏振态，通过分析偏振图像可知道云层的高度、大气气溶胶粒子的大小、云的种类、大气中的烟尘雾霾状况以及云层中的含水量状况等^[75]。

2.2.4 探测空间碎片

由于近几十年太空探索技术的不断进步，产生的太空垃圾逐渐增多，如损毁的卫星残骸、外壳、小的元器件等，严重威胁航天器的运行安全，对太空的探索带来了诸多不便。通过利用偏振光谱成像探测技术，并通过多元特征融合等识别技术，可以实现对空间碎片的高效探测。

偏振成像技术不仅在国防领域，而且在民用领域也得到了广泛应用，为进一步提高识别与探测目标物体的精度和准确性，在偏振技术中往往需要结合成像特性定标与校正技术、图像融合技术和图像重构技术等。

3 我国偏振成像技术存在的主要问题与建议

我国在偏振成像理论上经过多年的积累，目前逐渐趋于成熟，与国外差别不是很大，但还需进一步的完备，如偏振光线追迹理论。目前国内在偏振技术上主要表现为关键技术、应用系统和偏振信息处理等方面不太成熟，对这几方面的问题，需要从以下几个方面考虑：

1) 在偏振成像理论方面，偏振成像技术在应用的过程中受到许多因素的影响，例如大气环境（传输介质）、目标表面粗糙度、观测角度、目标辐射温度、

目标发射率以及偏振图像的获取方式等。因此我们需要对偏振成像理论以及影响偏振的因素系统全面地给予考虑。通过构建相应传输方程的数学模型和建立成像系统优化设计平台,分析与验证各个因素对偏振特性的影响,从而逐步形成系统全面的偏振成像理论。

2) 在关键技术方面,由于我国对偏振技术研究较晚,目前国内还没有形成一体化、集成化产业集团,对一些精密的偏振器件的制作与加工存在困难,对高精度的器件需要进一步提高技术水平,如偏振焦平面探测器等。

3) 在应用系统方面,我国对多波段目标探测、空间目标探测、海上目标探测以及地面目标探测等方面缺乏完备的应用系统。对此我国应该借鉴国外的成熟系统,根据本国所需,研制出符合本国情况的应用系统。为了进一步提高应用系统的分辨率和准确度,在系统中可以融合成像特性定标与校正技术、图像融合技术以及图像重构技术等。

4) 在偏振信息处理方面,我们知道图像中的测量误差和噪声会影响后续的图像参数。因此可以通过多角度测量、图像预滤波和图像融合等3种方法减小测量误差以及噪声对后续图像参数的影响。

4 总结

本文首先介绍偏振成像技术的研究进展,其次重点介绍了偏振成像技术在军事和民用领域的典型应用,可以看出偏振成像技术在凸显目标、穿透气体障碍物、识别目标以及辨别目标真伪等方面具有独特的优势。

偏振成像技术是传统探测技术与偏振原理的有机结合,是一个新兴的交叉学科,现在已经成为国内外重点研究的课题。偏振成像技术不仅可以获得传统入射光强图像,而且可以得到目标物不同起偏方向的偏振图像,偏振度图像,偏振角图像,光谱和外部轮廓等丰富的实效信息。目前国内外市场对偏振成像设备的需求量日益增长,对其分辨率和准确度的要求也越来越高,这就需要产业集团与科研单位齐心协力,研发出具有自主知识产权、高精度和高分辨率的偏振成像仪器,更好地为我国的国防建设和民生服务。

参考文献:

[1] 李广德,刘东青,王义,等.热红外伪装技术的研究现状与进展[J].*红外技术*,2019,41(6):495-503.
LI Guangde,LIU Dongqing,WANG Yi,et al. Research status and progress of the thermal infrared camouflage technology[J].*Infrared Technology*,2019,41(6):495-503.
[2] 张肃,战俊彤,白思克,等.烟雾浓度对偏振光传输特性的影响[J].*光学学报*,2016,36(7):303-310.

ZHANG Su,ZHAN Juntong,BAI Sike,et al. Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light[J].*Acta Optica Sinica*,2016,36(7):303-310.
[3] 王新全,相里斌,黄旻,等.成像光谱偏振仪研究进展[J].*光谱学与光谱分析*,2011,31(7):1968-1974.
WANG Xinquan, XIANG Libin, HUANG Min, et al. Advance in imaging spectropolarimeter[J].*Spectroscopy And Spectral Analysis*,2011,31(7):1968-1974.
[4] 薛鹏.基于AOTF分光和LCVR相位调制型光谱偏振成像技术研究[D].太原:中北大学,2017.
XUE Peng. Research on spectral polarization imaging technology based on AOTF spectroscopy and LCVR phase modulation[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
[5] 张淳民,穆廷魁,颜廷昱,等.高光谱遥感技术发展展望[J].*航天返回与遥感*,2018,39(3):108-118.
ZHANG Chunmin, MU Tingkui, YAN Tingyu, et al. Overview of hyperspectral remote sensing technology[J].*Spacecraft Recovery & Remote Sensing*,2018,39(3):108-118.
[6] 李力,刘旭,李海峰,等.分光棱镜型分振幅光度式偏振测量系统的研究[J].*光学仪器*,1999(Z1):159-165.
LI Li, LIU Xu, LI Haifeng, et al. Research on a beam splitting prism type amplitude-divided photometric polarization measurement system[J].*Optical Instruments*,1999(Z1):159-165.
[7] ZHANG Z, Blum R S. A categorization of multiscale- decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[C]//*Proceedings of the IEEE*,1999,87(8):1315.
[8] Taylor J S, Davis P S, Wolff L B. Underwater partial polarization signatures from the Shallow water Real-time imaging polarimeter[C]//*OCEANS '02 MTS/IEEE*,2002:1526-1534. doi: 10.1109/OCEANS.2002.1191863.
[9] ZHAO Y, GONG P, PAN Q. Object detection by spectropolarimetric imagery fusion[J].*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,2008,46(10):3337-3345.
[10] Duggin M J, Loe R S. Calibration and exploitation of a narrow-band imaging polarimeter[J].*Optical Engineering*,2002,41(5):1039-1047.
[11] 曹汉军,乔延利,杨伟锋,等.偏振遥感图像特性表征及分析[J].*量子电子学报*,2002,19(4):373-378.
CAO Hanjun, QIAO Yanli, YANG Weifeng, et al. Characterization and analysis of the polarization images in remote sensing[J].*Chinese Journal of Quantum Electronics*,2002,19(4):373-378.
[12] 杨之文,高胜钢,王培纲.几种地物反射光的偏振特性[J].*光学学报*,2005,25(2):241-245.
YANG Zhiwen, GAO Shenggang, WANG Peigang. Polarization of reflected light by earth objects[J].*Acta Optica Sinica*,2005,25(2):241-245.
[13] 杨伟锋,洪津,乔延利,等.无人机电偏振CCD相机光机系统设计[J].*光学技术*,2008,34(3):469-473.
YANG Weifeng, HONG Jin, QIAO Yanli, et al. Optical-mechanical system design of unmanned aerial vehicle polarization CCD camera[J].*Optical Technique*,2008,34(3):469-473.
[14] 罗海波,刘燕德,兰乐佳,等.分焦平面偏振成像关键技术[J].*华东交通大学学报*,2017,34(1):8-13.
LUO Haibo, LIU Yande, LAN Lejia, et al. Key Technologies of polarization imaging for division of focal plane polarimeters[J].*Journal of East China Jiaotong University*,2017,34(1):8-13.
[15] Lavigne D A, Breton M, Fournier G, et al. A new passive polarimetric imaging system collecting polarization signatures in the visible and infrared bands[C]//*SPIE Defense, Security, & Sensing*,2009:730010.
[16] Craven Jones J, Kudenov M W, Stapelbroek M G, et al. Preliminary

- results from an infrared hyperspectral imaging polarimeter[C]// *Proceedings of SPIE*, 2011, **8160**: 81600T.
- [17] 黄飞. 红外偏振探测关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. HUANG Fei. Research on key technologies of infrared polarization detection[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [18] Laan J, Scrymgeour D A, Kemme S A, et al. Range and contrast imaging improvements using circularly polarized light in scattering environments[C]// *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, **8706**(5): 87060R.
- [19] Tyo J S, Turner T S. Variable-retardance, Fourier-transform imaging spectropolarimeters for visible spectrum remote sensing[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(9): 1450-1458.
- [20] Kim J, Escuti M J. Snapshot imaging spectropolarimeter utilizing polarization gratings[C]// *SPIE Conference on Imaging Spectrometry*, 2008, **7086**: 708603.
- [21] 贺虎成. 分孔径同时偏振成像光学系统的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014. HE Hucheng. Research on split aperture simultaneous polarization imaging optical system[D]. Soochow: Soochow University, 2014.
- [22] 陈星, 于淼, 曹亮, 等. 周期性微偏振片阵列特性研究[J]. *现代物理*, 2019, **9**(1): 23-31. CHEN Xin, YU Miao, CAO Liang, et al. Study on characteristics of periodic micropolarizer array[J]. *Modern Physics*, 2019, **9**(1): 23-31.
- [23] 张志刚, 董凤良, 程腾, 等. 基于像素偏振片阵列的实时动态相位测量技术[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, **45**(5): 491-497. ZHANG Zhigang, DONG Fengliang, CHENG Teng, et al. Real-time dynamic phase measurement based on pixelated micropolarizer array[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2015, **45**(5): 491-497.
- [24] LU B, WANG H, SHEN J, et al. A high extinction ratio THz polarizer fabricated by double-bilayer wire grid structure[J]. *AIP Advances*, 2016, **6**(2): 25215.
- [25] Siefke T, Kley E, Tuennermann A, et al. Design and fabrication of titanium dioxide wire grid polarizer for the far ultraviolet spectral range[C]// *Proceedings of SPIE*, 2016: 992706.
- [26] SHIN Y J, SHIN M J, GUO L J, et al. Fabrication of contact lens containing high-performance wire grid polarizer[J]. *Polymer International*, 2017, **66**(9): 1269-1274.
- [27] 秦晓. 红外偏振光成像研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012. QIN Xiao. Research on infrared polarized light imaging[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [28] 宋茂新. 航空多角度偏振辐射计的光机设计研究[D]. 北京: 中国科学院大学中国科学院研究生院, 2012. SONG Maoxin. Research on the opto-mechanical design of aviation multi-angle polarization radiometer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences; Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [29] 李军伟, 陈伟力. 红外偏振成像技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. LI Junwei, CHEN Weili. *Infrared Polarization Imaging Technology and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2017: 60.
- [30] Kawata Y, Yamazaki A, Kusaka T, et al. Aerosol retrieval from airborne Polder data by multiple scattering model[C]// *International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE Xplore*, 1994, **4**: 1895-1897.
- [31] 晏磊, 相云, 李宇波, 等. 偏振遥感研究进展[J]. *大气与环境光学报*, 2010, **5**(3): 162-174. YAN Lei, XIANG Yun, LI Yubo, et al. Progress of polarization remote sensing research[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(3): 162-174.
- [32] 张肇先, 王模昌. 探测云和大气气溶胶的专用仪器--卷云探测仪(模样)[C]//中国地球物理学会第13届年会, 1997: 207. ZHANG Zhaoxian, WANG Mochang. Cirrus Cloud Detector, a special instrument for detecting clouds and atmospheric aerosols (pattern)[C]// *The 13th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society*, 1997: 207.
- [33] Williams J W, Tee H S, Poulter M A. Image processing and classification for the UK remote minefield detection system infrared polarimetric camera[J]. *SPIE Defense + Commercial Sensing*, 2001, **4394**(1): 139-152.
- [34] Jensen G L, Peterson J Q. Hyperspectral imaging polarimeter in the infrared[C]// *Infrared Space borne Remote Sensing VI*, 1998: 42-51.
- [35] Nordin G P, Meier J T, Deguzman P C. Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry[J]. *Journal of the Optical Society of America, A, Optics, Image science, and Vision*, 1999, **16**(5): 1168-1174.
- [36] Jones S H, Iannarilli F J, Kebabian P L. Realization of quantitative-grade fieldable snapshot imaging spectropolarimeter[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(26): 6559.
- [37] Miles B H, Goodson R A, Dereniak E L, et al. Computed-tomography imaging spectropolarimeter (CTISP): instrument concept, calibration and results[C]// *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 1999: 235-245.
- [38] 邵卫东, 王培纲, 王桂平, 等. 分光偏振计技术研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 60-64. SHAO Weidong, WANG Peigang, WANG Guiping, et al. Study on Spectropolarimeter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(1): 60-64.
- [39] 陈立刚, 洪津, 乔延利, 等. 一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(10): 2384-2387. CHEN Ligang, HONG Jin, QIAO Yanli, et al. Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(10): 2384-2387.
- [40] 赵劲松. 偏振成像技术的进展[J]. *红外技术*, 2013, **35**(12): 743-750. ZHAO Jinsong. Developments of polarization imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(12): 743-750.
- [41] 穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 等. 差分偏振干涉成像光谱仪 I. 概念原理与操作[J]. *物理学报*, 2014(11): 110701. MU Tingkui, ZHANG Chunmin, LI Qiwei, et al. The polarization-difference interference imaging spectrometer-I. concept, principle, and operation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014(11): 110701.
- [42] 穆廷魁, 张淳民, 赵葆常. 偏振干涉成像光谱仪中Wollaston棱镜光程差及条纹定位面的精确计算与分析[J]. *物理学报*, 2009, **58**(6): 3877. MU Tingkui, ZHANG Chunmin, ZHAO Baochang. Calculation of the optical path difference and fringe location in polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(6): 3877.
- [43] 张海洋, 张军强, 杨斌, 等. 多线阵分焦平面型偏振遥感探测系统的标定[J]. *光学学报*, 2016, **36**(11): 311-318. ZHANG Haiyang, ZHANG Junqiang, YANG Bin, et al. Calibration for Polarization Remote Sensing System with Focal Plane Divided by Multi-Linear Array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(11): 311-318.
- [44] 李照洲, 伽丽丽, 谢一沁, 等. GF-5卫星多角度偏振成像仪在轨偏振标定[J]. *大气与环境光学报*, 2019, **14**(1): 22-27. LI Zhaozhou, JIA Lili, XIE Yisong, et al. In-Flight polarimetric calibration of directional polarization camera on GF-5 satellite[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, **14**(1): 22-27.
- [45] 俞昱. 新型椭圆偏振光谱仪MM-16[J]. *现代科学仪器*, 2005(3): 85-88. YU Gang. New Ellipsometer MM-16[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2005(3): 85-88.
- [46] GRANT L. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, **22**(2): 309-322.

- [47] 吴太夏. 偏振方向反射与二向性反射定量关系研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.
WU Taixia. Research on the quantitative relationship between polarization direction reflection and bidirectional reflection[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2006.
- [48] Woessner P, Hapke B. Polarization of light scattered by clover[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, **21**(3): 243-261.
- [49] 韩阳. 长白山地区森林土壤含水量定量遥感研究——利用多角度偏振高光谱信息与MODIS影像数据[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
HAN Yang. Research on quantitative remote sensing of forest soil water content in Changbai Mountain: Using Multi-angle Polarized Hyperspectral Information and MODIS Image Data[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
- [50] 赵云升, 金伦, 张洪波, 等. 土壤的偏振反射特征研究[J]. *东北师大学报: 自然科学版*, 2000, **32**(4): 93-102.
ZHAO Yunshen, JIN Lun, ZHANG Hongbo, et al. Study on the polarized reflectance characteristics of soil[J]. *Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition*, 2000, **32**(4): 93-102.
- [51] Wolff L B. Polarization-based material classification from specular reflection[J]. *IEEE Computer Society*, 1990, **12**(11): 1059-1071.
- [52] Katkovsky L V, Belyaev B I, Belyaev Y V, et al. Spectropolarizational technique for detection of manmade objects in visible and near infrared spectral ranges[C]// *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 1999, **2**: 1381-1383.
- [53] 都安平, 赵永强, 潘泉, 等. 基于偏振特征的图像增强算法[J]. *计算机测量与控制*, 2007, **15**(1): 106-108.
DU Anping, ZHAO Yongqiang, PAN Quan, et al. Image enhancement algorithm based on polarization character[J]. *Computer Measurement & Control*, 2007, **15**(1): 106-108.
- [54] Egan W G, Duggin M J. Engineering, Optical enhancement of aircraft detection using polarization[C]// *Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing III*, 2000: 172-178.
- [55] Egan W G, Duggin M J. Synthesis of optical polarization signatures of military aircraft[C]// *Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing IV*, 2002: 188-194.
- [56] Goldstein D H. Polarimetric characterization of federal standard paints[C]// *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2000: 112-123.
- [57] Tyo J S, Ratliff B M, Boger J K, et al. The effects of thermal equilibrium and contrast in LWIR polarimetric images[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(23): 15161-15167.
- [58] Gurton K, Felton M, Mack R, et al. MidIR and LWIR polarimetric sensor comparison study[C]// *SPIE Conference on Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets*, 2010: 76640L-76641L.
- [59] 姜会林, 付强, 段锦, 等. 红外偏振成像探测技术及应用研究[J]. *红外技术*, 2014, **36**(5): 345-349.
JIANG Huilin, FU Qiang, DUAN Jin, et al. Research on infrared polarization imaging detection technology and application[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(5): 345-349.
- [60] 孙晨. 偏振图像的伪彩色增强方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
SUN Chen. Research on false color enhancement methods of polarized images[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [61] Ratliff B M, Lemaster D A, Mack R T, et al. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data[C]// *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2011, **8160**: 25-31.
- [62] ZOU X, WANG X, JIN W, et al. Atmospheric effects on infrared polarization imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2): 304-308.
- [63] 王慧斌, 廖艳, 沈洁, 等. 分级多尺度变换的水下偏振图像融合[J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 186-192.
WANG Huibin, LIAO Yan, SHEN Jie, et al. Method of Underwater Polarization Image Fusion Based on Hierarchical and multi-scale transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 186-192.
- [64] 刘珂, 李丽娟, 王军平. 红外偏振成像技术在空空导弹上的应用展望[J]. *航空兵器*, 2016(4): 47-51.
LIU Ke, LI Lijuan, WANG Junping. Application and prospect of infrared polarization imaging technology in air-to-air missile[J]. *Aero Weaponry*, 2016(4): 47-51.
- [65] 王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. *红外与激光工程*, 2014(10): 3175-3182.
WANG Xia, XIA Runqiu, JIN Weiqi, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014(10): 3175-3182.
- [66] 李广德, 刘东青, 王义, 等. 热红外伪装技术的研究现状与进展[J]. *红外技术*, 2019, **41**(6): 495-503.
LI Guangde, LIU Dongqing, WANG Yi, et al. Research status and progress of the thermal infrared camouflage technology[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(6): 495-503.
- [67] 赵永强, 马位民, 李磊磊. 红外偏振成像进展[J]. *飞控与探测*, 2019, **2**(3): 77-84.
ZHAO Yongqiang, MA Weimin, LI Leilei. Progress of infrared polarimetric imaging detection[J]. *Flight Control & Detection*, 2019, **2**(3): 77-84.
- [68] 王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(7): 0704002-1-0704002-7.
WANG Xia, LIANG Jian'an, LONG Huabao, et al. Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(7): 0704002-1-0704002-7.
- [69] 李范鸣, 牛继勇, 马利祥. 基于红外偏振特性的空间目标探测可行性探讨[J]. *应用光学*, 2013, **34**(4): 653-657.
LI Fanming, NIU Jiyong, MA Lixiang. Feasibility analysis of space target detection based on infrared polarization properties[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(4): 653-657.
- [70] 陈伟力, 孙秋菊, 王淑华, 等. 目标表面发射率对红外辐射偏振特性的影响分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, **37**(3): 737-742.
CHEN Weili, SUN Qiuju, WANG Shuhua, et al. Influence analysis of target surface emissivity on infrared radiation polarization characteristics[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(3): 737-742.
- [71] Sokolov K, Drezek R, Gossage K, et al. Reflectance spectroscopy with polarized light: is it sensitive to cellular and nuclear morphology[J]. *Optics Express*, 1999, **5**(13): 302-317.
- [72] Demos S G, Alfano R R. Optical polarization imaging[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(1/3): 150-155.
- [73] Demos S G, Radousky H B, Alfano R R. Subsurface imaging using the spectral polarization difference technique and NIR illumination[C]// *Optical Tomography and Spectroscopy of Tissue III*. 1999: 406-410.
- [74] ZHAO Y, ZHANG L, PAN Q. Spectropolarimetric imaging for pathological analysis of skin[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(10): D236-46.
- [75] Frost J W, Nasr Ad Dine F, Rodriguez J, et al. A handheld polarimeter for aerosol remote sensing[C]// *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2005: 269-276.