

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202506008

偏振成像探测军事应用及关键技术分析

王锴楠, 张志伟, 王晓伟

(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘 要: 针对目标探测技术在现代军事领域面临的辨识度、穿透性与抗干扰能力等多重挑战, 归纳总结了偏振成像探测技术的独特优势和关键技术。首先, 对比分析了 6 种偏振成像方法的基本原理和优劣势, 包括分时、分振幅同时、分孔径同时、分焦平面同时、新兴的通道调制和超表面偏振成像。然后, 梳理总结了偏振成像探测技术在军事目标探测、穿烟透水探测和偏振成像导航 3 种军事场景下的应用与前景。同时, 对目标偏振特性、偏振传输特性、偏振成像探测方法和设备、以及图像处理算法 4 类关键技术进行了分析。最后, 结合应用需求提出了偏振成像探测技术的未来发展趋势, 以期为相关研究提供参考和借鉴。

关键词: 偏振成像; 目标探测; 目标偏振特性; 偏振传输特性

中图分类号: O436.3, TN209 **文献标志码:** A **开放科学标识码(OSID):**

文章编号: 2097-2741(2025)06-0075-16



听语音
与作者互动
聊科研

Polarization Imaging Detection for Military Applications and Key Technique Analysis

WANG Kainan, ZHANG Zhiwei, WANG Xiaowei

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The unique advantages and key techniques of polarization imaging detection technology were summarized in response to the various challenges faced by target detection technology in modern military fields, such as identification, penetrability and anti-interference capability. First, the basic principles, advantages and disadvantages of six polarization imaging methods were comparatively analyzed, including time division, amplitude division, aperture division, focal plane division, emerging channel modulation, and metasurface polarization imaging. Subsequently, the applications and prospects of polarization imaging detection technologies in three military scenarios were summarized, namely military target detection, smoke and water penetration detection, and polarization imaging navigation. Four key techniques were analyzed, namely target polarization characteristics, polarization transmission characteristics, polarization imaging detection methods and equipment, and image processing algorithms. Finally, future development trends of

收稿日期: 2025-06-05

修回日期: 2025-08-12

录用日期: 2025-08-29

基金项目: 国家自然科学基金 (61505254)

第一作者: 王锴楠 (2003—), 男, 硕士研究生, 主要从事偏振成像研究。E-mail: 13525399369@163.com

引用格式: 王锴楠, 张志伟, 王晓伟. 偏振成像探测军事应用及关键技术分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (6): 75-90. WANG Kainan, ZHANG Zhiwei, WANG Xiaowei. Polarization imaging detection for military applications and key technique analysis[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (6): 75-90.

polarization imaging detection technologies were discussed based on the application requirements, aiming to provide valuable insights and references for related researches in this field.

KEYWORDS: polarization imaging; target detection; target polarization characteristic; polarization transmission characteristic

在复杂战场环境与多样化伪装手段并存的现代军事领域,目标探测技术正面临辨识度、穿透性与抗干扰能力的多重挑战。偏振成像探测技术作为光电探测领域的前沿突破,通过解析目标与环境的偏振态差异,为破解传统强度成像探测的局限性提供了解决方案。该技术通过捕获光波振动方向的矢量信息,构建包含强度、光谱与偏振多维特征的目标特性表征体系,展现出“凸显复杂背景下军事目标轮廓、穿透烟雾霾尘等恶劣天气屏障和精准辨别军事目标真伪”的独特技术优势,在侦察战场态势、探测与识别军事目标、开展紧急搜救等军事领域均有广阔的应用前景^[1-6]。

从技术路线分析,偏振成像探测效能受到目标特性传输链路的系统因素影响,其军事应用涉及4大关键技术。1)目标偏振特性测试分析与建模:建立各型号军事装备的偏振特性模型数据库是精准识别的必要基础^[7-9];2)大气信道对目标特性传输影响因素研究:充分了解大气介质中偏振传输受环境因素影响的内在机理是准确获取偏振特性的前提^[10-11];3)新型偏振成像探测设备研制:军载偏振成像探测设备要求小型化、高精度、实时、高度集成,中国现有设备仍处于开发阶段^[12-13];4)偏振图像处理算法:能够有效削减雾霾、水下等因素对目标成像质量的不良影响,提高探测准确率^[14-15]。

本文首先对不同偏振成像方法的基本原理和优劣特性进行介绍,进而给出偏振成像探测技术在军事领域的应用与前景;然后,详细说明偏振成像探测技术投入军用的4项关键技术;最后,就应用需求提出了偏振成像探测技术未来发展趋势。

1 偏振成像方法

偏振成像是基于光波偏振特性获取目标特性的技术,主要原理是通过探测目标射出光波的偏振状态,例如偏振度、偏振角等,来获取强度成像难以反馈的物理信息。当光与物体相互作用时,物体表面粗糙度、材质或几何结构会改变入射光的偏振特性;成像系统利用分光器件和偏振传感

器,分离不同偏振方向的入射光;通过计算斯托克斯矢量、偏振度等参量,重建目标的偏振信息,实现成像探测^[16-18]。根据获取偏振态图像的方式,偏振成像可以分为以下几类。

1.1 分时偏振成像

通过在成像设备前设置机械旋转起偏元件或连续周期性调制元件,按照时间序列获取不同偏振角度的目标图像 I_1 、 I_2 、 I_3 等,基于探测器像元接收到的光强等,使用反演算法计算出每个像素的斯托克斯矢量 $S=[S_0 S_1 S_2 S_3]^T$,从而推导获得目标的偏振度(degree of polarization, DoP= $\sqrt{(S_1^2+S_2^2+S_3^2)}/S_0$)、偏振角(angle of polarization, AoP= $(1/2)*\text{atan2}(S_2 S_1)$)和偏振椭圆率角(ellipticity angle, χ)等参数^[19]。分时偏振成像的简易原理如图1所示, θ 为偏振片的旋转角度。

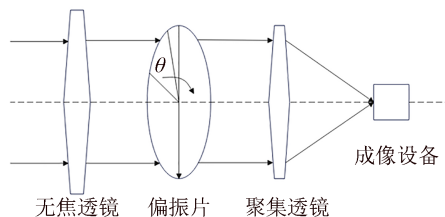


图1 机械旋转式分时偏振成像原理示意

Fig. 1 Schematic of the principle of mechanical rotating time-division polarization imaging

该方法结构简单、成本低,可通过更换线(圆)偏振片采集全偏振分量,每次测量仅针对单一偏振态,偏振测量精度高,能满足静态场景下的材料偏振特性测量。但按照时间序列获取偏振图像的方式易被机械旋转结构影响其成像稳定性,且仅适用于静态目标探测、动态场景下会产生运动伪影。因此,分时偏振成像的发展关键是高速电控调制优化动态性能,发展多模态融合成像,推动系统集成化、小型化,优化配准算法^[20]。

1.2 分振幅同时偏振成像

为解决动态场景兼容难题,学者们提出了分振幅同时偏振成像。将总光强为 S_0 的入射光束通过多组分光器件与透光轴角度不同的偏振棱镜按比例分为4路,同时进入4组独立的光电探测器,一次性得到4组目标偏振态图像,经过图像配准与

增益校正, 反演得到每个像元的斯托克斯矢量 $S = [S_0 \ S_1 \ S_2]^T$, 进而计算出目标的线偏振度 (degree of linear polarization, DoLP) 与 AoP 等^[21], 基本原理如图 2 所示。

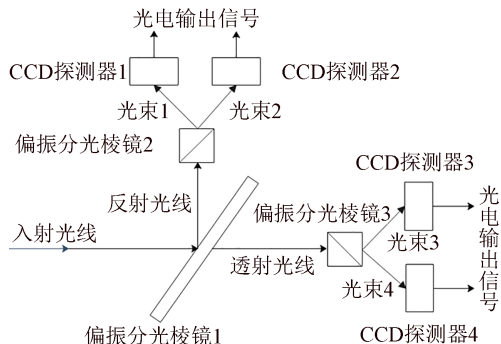


图 2 分振幅同时偏振成像原理示意

Fig. 2 Schematic of the principle of split-amplitude simultaneous polarization imaging

此方法实现了一次性获取四通道偏振态图像, 能够实时探测运动目标, 避免了因时间延迟导致的动态场景误差。但由于多次分光, 各光路需要严格对齐光轴, 避免产生配准误差, 因而设备使用的精密器件与配准工艺要求高, 系统结构复杂、体积庞大、机动性差, 且分束过程复杂, 光能损失严重。目前, 该方法仅能满足实验室应用, 难以实现军用随车探测。未来, 分振幅偏振成像应结合超构表面或自由曲面追求设备的小型化、提高机动能力, 基于新型探测器解决光能损失问题, 优化配准算法、降低误差影响。

1.3 分孔径同时偏振成像

为简化内部光路、提高设备机动性, 学者们提出了分孔径同时偏振成像。物镜接收的入射光线经过孔径光阑后, 被准直并射入 4 组离轴放置的微透镜阵列上。微透镜阵列后方紧贴放置着透光轴角度为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的偏振片阵列, 光线穿过通道, 在焦平面不同区域上形成各个方向的偏振态图像。经过图像配准与增益校正, 对每个像元求解线性方程组得到斯托克斯矢量 $S = [S_0 \ S_1 \ S_2]^T$, 进一步计算得出目标的偏振特性。考虑到探测器温度升高会导致出现热噪声等, 影响探测器的响应均匀性与精度, 因而设置制冷器保证探测器在低温条件下维持高效、均匀、低噪声工作^[22], 分孔径同时偏振成像原理如图 3 所示。

该方法可实时探测运动目标, 实现不同偏振方向的视场共轴, 无需分光器件, 结构紧凑、体

积较小、图像集中。但多通道的结构不仅牺牲了部分空间分辨率, 还导致了视差的产生, 加剧了微阵列结构的校准复杂性。此方法充分简化了内部光路, 提高了设备的小型化和机动性, 但受限于视差校正算法的缓慢发展, 无法满足高精度偏振测量与复杂场景的应用。未来, 应进一步优化分孔径偏振成像的光学设计, 减少像差和误差的引入, 同时优化误差补偿算法, 提高系统的成像质量和稳定性。

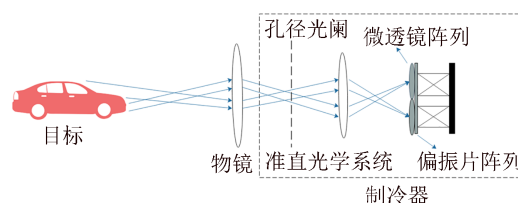


图 3 分孔径同时偏振成像原理示意

Fig. 3 Schematic of the principle of split-aperture simultaneous polarization imaging

1.4 分焦平面同时偏振成像

为彻底解决设备小型化与实时成像探测的兼容问题, 随着微纳技术的发展, 学者们提出了分焦平面同时偏振成像。将微偏振片阵列直接集成在焦平面阵列前, 焦平面阵列上的像元与偏振元件一一对应, 实现像元级的偏振滤波。再将焦平面阵列上相邻的 4 个像元视为 1 组偏振超像素 (2×2), 每组超像素对应 4 个角度的微偏振片。提取超像素中 4 个像元的强度值 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 、 I_{135° , 忽略微小视差, 直接计算得到超像素位置对应的斯托克斯矢量, 进一步计算像素级的偏振参数, 再基于邻域超像素或原始像元的强度值进行插值得到全分辨率图像^[23-24], 简易原理如图 4 所示。

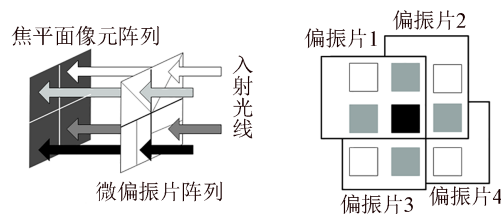


图 4 分焦平面同时偏振成像原理示意

Fig. 4 Schematic of the principle of split-focal-plane simultaneous polarization imaging

该方法实现了高度集成的实时偏振成像探测, 体积小、结构紧凑, 顺应小型化与集成化的发展趋势; 但由于采用超像素插值算法, 实际图像分辨率有所降低; 且每个像素对不同参数的响应不

同,需逐像素进行标定,过程复杂。目前,分焦平面偏振成像已极大程度兼顾了偏振成像设备的小型化与实时性,分辨率降低的问题可以通过优化插值算法进行补偿,能够满足绝大部分偏振探测场景,已成为动态场景偏振测量的主流方案。未来,应优化偏振光栅性能,提高消光比,增强系统的检偏能力和抗干扰性能,同时发展非均匀性校正算法与超分辨率重建技术,提高成像精度,减少误差影响。

1.5 通道调制偏振成像

考虑到进一步提高偏振成像分辨率以得到更优的探测效果,随着计算能力的提高,学者们提

出了通道调制偏振成像的方法。入射光进入准直系统得到平行光束,经过滤波片滤去杂光后射入萨瓦板进行分光,再由 22.5° 的半波片改变振动面方向,得到两束与 x 轴成 45° 角的光束,再次射入萨瓦板进行分光,产生 4 道具有特定偏振态和传播方向的相干光束。四道光束起偏后由成像透镜汇聚到焦平面探测器上相干叠加,形成包含空间载频的干涉条纹图像^[25-26]。对捕获的干涉图进行二维傅里叶变换,得到频谱($F_-(u,v)$),选取合适的带通滤波器隔离出包含偏振特性信息的边带,进行逆傅里叶变换与解调,得到斯托克斯矢量,进一步计算得到偏振参数,原理如图 5 所示。

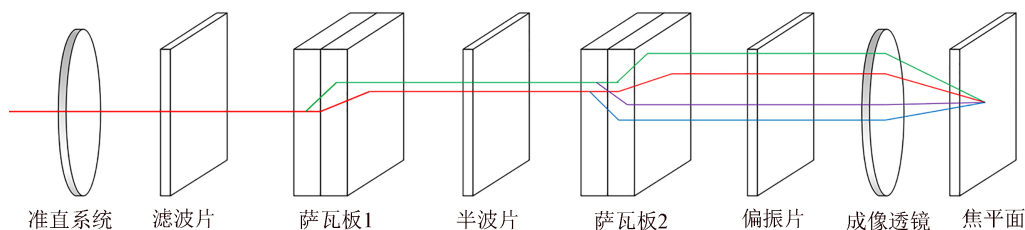


图 5 通道调制偏振成像原理示意

Fig. 5 Schematic of the principle of channel-modulated polarization imaging

在通道调制偏振成像方法中,所有光学元件均可装配在 CCD 相机内,体积小、结构紧凑,可单次曝光获取全斯托克斯参数,适用于运动目标的成像探测,无需牺牲空间分辨率,充分满足各类应用需求。但受限于波段宽度,目前仅适用于单色光,且系统对环境变化敏感、需要动态补偿,加之解调算法复杂,应用难度高。目前,中国处于通道调制成像器件开发研究阶段,未完全实现工程应用。未来,应聚焦突破宽波段成像技术,拓宽有效光谱范围;深入研究偏振参数重建算法,结合先进的处理方法,提高重建精度和鲁棒性,以提高成像精度。

1.6 超表面偏振成像

近年来,随着纳米技术的高速发展,学者们对传统偏振成像体积、功能单一性及效率瓶颈进行研究突破,提出将超表面应用于偏振成像的理念。超表面由亚波长共振单元以亚波长间隔按准周期排列组成,是通过天然材料加工得到的二维微结构材料,可以展现天然不具备的物理特性,通过改变光与共振单元的相互作用,能够改变光的振幅、频率、偏振等多维特性^[13]。超表面主要用于取代光栅与透镜两类器材。1) 凭借改变光特性的能力将入射光束按照预设的衍射级次与光束

强度进行分割,呈现光束通过孔径光阑的分光效果;超表面材料类光阑的能力如图 6 (a) ~ (b) 所示。其中, ω_0 表示频率选择表面的通带中心频率,即透射率(或反射率)最大对应的频率点; $\Delta\omega$ 表示频率选择表面的通带宽度,即透射率高于某一阈值的频率范围。2) 类似微透镜序列,按需求设计后的超表面可将射入的光线在目标位置上会聚或发散^[27],如图 6 (c) ~ (d) 所示。

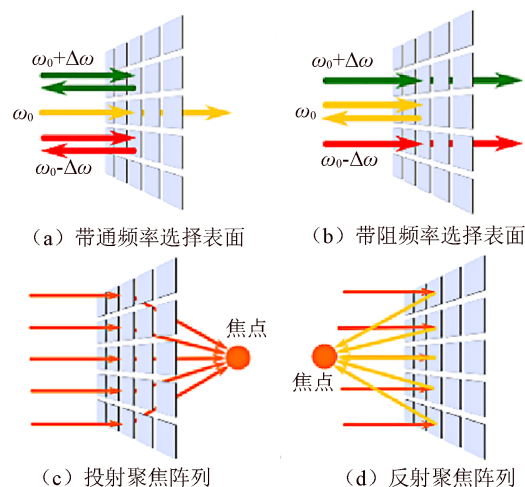


图 6 表面部分功能示例^[28]

Fig. 6 Examples of metasurface functions^[28]

超表面材料具有极轻量化、设计灵活的特性,

又与传统光学器件具备兼容性，既能解决光学器件体积大、不便携带的问题，又可以有效提高结构集成、降低生产难度。此外，其特有的偏振复用特性和精准光波调控能力能有效提高成像质量，丰富元件功能。在军事领域中，超表面材料轻量化、高集成的特性可有效增强军用探测系统的机动性，其精准多维光场调控能力能够实现精准目

标探测、抗干扰光探测及隐身涂层的探测与开发等，具有广泛的军事应用前景。未来，应通过优化算法和加工精度等，提高超表面偏振器件的效率与带宽，开发具有宽带消色差特性的超表面器件，实现动态可调的偏振调控功能。

结合上述原理分析，各偏振成像方法适用条件及优缺点如表1所示。

表 1 不同偏振成像方法适用条件及优缺点比较

Table 1 Comparison of applicable conditions and advantages VS disadvantages of different polarization imaging methods

偏振成像方法	分量及适用条件	优点	缺点	图像误匹配
机械旋转式 分时偏振成像	线偏振分量， 适用于静态目标	结构简单、 易于制造、 成本低	体积较大、 不适用于动态目标	光学元件 机械旋转轴 偏离光轴
周期性调制 分时偏振成像	线偏振分量、 圆偏振分量， 适用于静态目标	体积小、 调制速度快、 扫描范围宽、 波长稳定性好	探测距离短、 无法实时观测、 不适用于动态目标	
分振幅 偏振成像	线偏振分量、 圆偏振分量， 适用于动态场景	分辨率高、 可实时探测、 无运动元件、 稳定性好	体积大、 机械配准工艺要求高、 成本高、 检测器接收到的光强较弱	偏振态图像标定、 后位置偏差固定、 需经过差值处理
分孔径 偏振成像	线偏振分量、 圆偏振分量， 适用于动态场景	结构紧凑、 体积小、 无运动元件、 稳定性好、 视场共轴	产生视差、 成本高、 分辨率损失	
分焦平面 偏振成像	线偏振分量， 适用于动态场景	结构紧凑、 体积小、 集成度高、 同轴光学设计、 无运动元件、 稳定性好	集成难度大、 成本极高、 测量精度低、 图像配准误差大、 分辨率损失	
通道调制 偏振成像	线偏振分量、 圆偏振分量， 适用于动态场景	分辨率高、 体积小、 成本低、 无运动元件、 稳定性好	环境敏感、 解调复杂度高、 调制器校准要求高、 可能引入噪声	需经过 傅里叶逆变换 重建偏振参量、 得偏振特性信息
超表面 偏振成像	线偏振分量、 圆偏振分量， 适用于动态场景	轻量化、 设计灵活、 高集成度、 集成难度低、 精准的光波调节能力	加工精度要求极高、 校准与标定难度高、 工作带宽较窄、 影响光学调控性能	元件所属成像系统 图像误匹配方法

2 军事应用

2.1 军事目标探测

军事目标主要包括伪装目标、地雷、装备车

辆和雷达等，准确地探测识别军事目标是精准打击的前提。近年，国内外均将偏振成像探测技术应用于军事目标探测领域，以期获得更优的侦察效果，掌握战时决策先机。

军事伪装手段包括迷彩涂料、伪装网和红外伪装等,通过改变目标光谱使其与自然环境趋于一致,使传统的强度、光谱探测方法失效,而偏振成像探测技术以其对伪装隐身目标极强的针对性,为破解伪装、精确侦测提供新的方案^[29]。2000年,美国空军研究实验室率先针对伪装进行偏振研究,测量了多种颜色与粗糙度的铝板上联邦标准涂料的偏振特性,初步得到了民用场景与伪装涂料的偏振特性资料^[30]。2003年,瑞典国防研究局对不同层数伪装网覆盖目标进行偏振透视成像实验,结果表明,目标伪装网层数越高,偏振成像探测观察优势越明显。针对涂料和伪装网的研究通用于其他伪装手段的攻破研究,验证了偏振成像探测技术对破解各类伪装以及侦测隐身目标具有独特优势和广阔前景。

地雷探测需要在混乱的地面背景下精确捕捉掩埋导致的土壤扰动,基于偏振成像探测凸显自然背景下人造目标的优势,各国尝试设计地雷探测设备。2007年,英国国防科技实验室和美国合作开发了一种探测地雷的车载系统。实验得出,中、长波红外波段加入偏振能明显增强地雷探测能力,验证了偏振成像探测技术针对地雷探测的显著效果^[31]。因此,后续美国、荷兰、瑞典等各国均基于偏振成像探测持续开发地雷探测技术^[32-34]。

后续,各国发现偏振成像探测技术对隐藏在复杂自然背景中的车辆装备具有极佳的探测效果。2006年,美国空军实验室对隐匿在森林背景中的皮卡车进行探测实验,结果如图7所示。在其他技术无法有效探测到隐藏车辆的条件下,红外偏振能够显著凸显森林背景中的皮卡车^[35]。2011年,美国空军研究实验室于俄亥俄州 Wingmasters 靶场进行了模型飞机追踪实验,对其在天空、草坪、树林背景下进行对比成像,得出长波红外偏振成像在不同复杂背景下均展现出更优的目标探测能力。两组探测实验直接显示了偏振成像探测技术在复杂自然环境中隐藏车辆装备探测领域的应用前景^[36]。

中国偏振成像军事目标探测应用起步较晚,主要用于研究复杂自然背景下车辆装备目标探测。2012年,王军等^[37]对伪装车辆与坦克进行探测,发现红外偏振成像探测伪装目标的效果优于传统热成像。2017年,高天元等^[38]对隐匿在草丛和沙堆的装甲车进行探测,结果如图8所示,偏振成像

探测有效削减了背景干扰,凸显出隐匿的装甲车。2022年,郝佳等^[39]对室内的飞机模型和草场上的车辆、坦克进行探测实验,发现偏振图像中目标与背景的对比度较非偏振图像大幅提升,隐藏目标被显著凸显。目前,中国已成功验证了偏振成像探测技术在有效凸显目标、提升识别率方面的优势,并进行了一系列实验室研究,但相较强国,技术上仍存在差距:1) 偏振成像探测仪器落后,成像分辨率低,探测稳定性尚未达到军载配备要求;2) 军事目标偏振特性测试匮乏,识别所需数据尚不充分;3) 偏振特性受环境因素影响机理尚未形成。

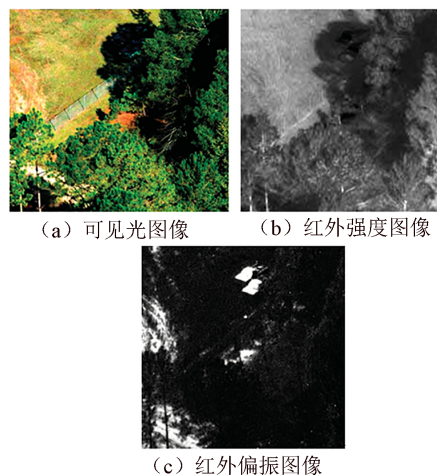


图7 不同探测手段下皮卡车成像结果对比^[35]

Fig. 7 Comparison of imaging results of pickup trucks under different detection methods^[35]

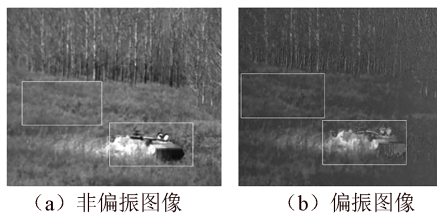


图8 隐藏装甲车的非偏振与偏振图像对比^[38]

Fig. 8 Unpolarized vs. polarized images of a hidden armored vehicle^[38]

2.2 穿烟透水

现代战争环境复杂、恶劣,光学探测手段极易因烟霾、浮尘介质频繁散射而失效,若能实现穿透烟雾与水体精准探测,有利于监视敌方动向、明确敌方意图。由于偏振属性在散射介质中特性保持能力强,受水面耀光影响程度低,因而偏振成像探测在雾霾、水下能保持较高的目标成像质量^[29, 40]。因此,偏振成像探测技术适用于恶劣雾

霾环境、战场硝烟环境及水下岸防目标探测军事应用。

国外学者研究偏振光穿透不同浑浊介质的成像探测起步较早。2000 年, Chenault 等^[41]穿透牛奶和烟雾进行探测, 发现一定浊度范围内, 偏振成像探测能够显著提高目标背景对比度, 证实了偏振成像探测技术能够有效提高烟雾与水下环境中的目标探测精度、抑制杂波干扰。2013 年, Brousseau 等^[42]构建起一种实时偏振差成像相机, 该设备得到的偏振图像有效提高了成像清晰度, 大幅提高了可见性, 为偏振成像穿透烟雾、水体的目标探测投入实际应用提供了重要技术支持。

2014 年, Fu 等^[43]提出穿透浑浊介质的偏振图像融合方法讨论, 我国偏振穿烟透水探测领域开始推进。2015 年, Duan 等^[44]在水雾环境下进行探测实验, 发现偏振图像目标亮度更高、边缘清晰、更为凸显, 说明了偏振成像具有穿透烟雾探测的优势。2019 年, Xie 等^[45]基于靶场子弹模型搭建了烟尘环境偏振成像平台, 验证了偏振成像探测在烟尘昏暗条件下的成像优势, 并提出了一种基于模糊自适应的偏振图像融合算法, 处理后的图像可以清晰地观察到子弹的照亮区域和表面纹理, 显著提高了目标成像的对比度与可识别性, 此研究为黑夜烟雾环境战略目标探测提供了重要数据和技术铺垫。2025 年, Xiang 等^[46]提出了一种用于复杂散射介质高分辨率成像的主动偏振迭代优化方法, 重建图像较原始图像分辨率显著提升, 细部放大图边缘也变得更加清晰, 优化效果明显, 该算法为高分辨率穿烟透水目标探测提供了技术参考。

目前, 各强国偏振穿烟透水成像探测领域成果多被隐藏, 或已转化为军事成果。近年, 中国针对该领域研究趋于热门, 提出许多切实有效的成像、优化方法, 应重点关注探测设备的开发生产, 追赶国际军用设备差距。

2.3 偏振成像导航

目前, 主流导航技术有全球定位系统(global positioning system, GPS)和惯性导航系统(inertial navigation system, INS)。考虑到战场环境混乱恶劣, GPS 信号差且战时卫星系统可能会被禁用, GPS 不宜作为主要导航手段。INS 虽然具有独立性和抗干扰性, 但战场条件下, 其初始化需求难以满足, 导航误差随距离积累的特性也不能满足长距离导航任务的精确度要求。因此, 偏振

成像导航以其无源独立、自主导航的优势成为卫星拒止环境下的新兴导航技术。

偏振成像导航源自仿生科学, 生物学家观察昆虫觅食过程发现沙蚁^[47]、墨鱼^[48]、北美帝王蝶^[49]等能够离开巢穴百米觅食并准确返回, 原理是其视觉结构通过探测太阳光受大气分子散射作用形成的稳定天空光偏振态进行导航^[50]。基于此, 学者们尝试开发偏振成像导航器件。2000 年, 国外学者 Lambrinos 等^[51]最先设计出具有远距离导航能力的偏振视觉机器人 Sahabot 2, 实现了偏振成像导航机载运行。2023 年, Courtier 等^[52]建立了一种基于重建斯托克斯图像的偏振成像导航系统, 并装配于旋转平台与地面车辆分别进行测试。与 GPS、INS 导航系统相比, 此系统虽精度稍差, 但具有独立依靠相机成像、无需其他传感器的独特优势。此研究对应定点雷达与移动车载两种重要的导航手段, 为偏振成像导航技术投入应用提供了实验数据与技术准备。

2022 年, 李宇阳等^[53]针对视野遮挡问题提出基于图像相似块偏移的修复模型, 修复图像展示了其有效降低航向角误差, 提高导航精度的能力。该模型为避免环境遮挡、增强偏振成像导航的环境适应性提供了有效技术支撑。2024 年, 路澳航等^[54]基于纳米压印技术集成金属纳米光栅阵列设计了新型成像式偏振导航传感器, 既具有大范围探测天空偏振信息的能力, 还具有误差小、轻量化、无需配准的优势, 有效增强了无人机等小型装备完成侦察搜救等紧急任务的能力。

3 关键技术

3.1 目标偏振特性

目标偏振特性是光照射到目标或背景时, 反射光与散射光的电矢量分量振幅改变, 光线转变为线偏振光或部分偏振光而展现出的偏振态特性, 基于目标偏振特性可以得出目标的纹理结构、表面形态和材料类型等^[1]。

偏振成像探测能够有效凸显自然背景中的人工目标, 但考虑到战场环境下可能出现伪造目标干扰探测, 要确保精准探测识别, 需要对各种目标的偏振特性充分了解, 建立系统全面的目标偏振特性数据库。因此, 目标偏振特性研究有两个关键技术难题: 一是采集不同目标与背景的偏振特性并建立数据库; 二是探究不同因素对目标偏

振特性的影响。

3.1.1 军事目标和背景偏振特性数据库的建立

国外重视采集不同目标、背景的偏振特性,很早就开始不同目标和背景的系统性全条件偏振特性采集工作,已建立系统全面的军事装备偏振特性数据库。2000 年,美国空军实验室探测了 12 种美联邦标准油漆涂制铝样品的偏振特性^[55]。2011 年,美国陆军实验室等提出偏振图像采集实验项目 SPICE。使用中长波偏振红外系统进行 7 个月不间断的偏振特性测量,初始探测目标为军用作战车辆,后更改为俄罗斯 2S3 榴弹炮,最终获得 81 936 张有效偏振特性图像文件,其中包含各种不良天气下的目标/背景图像^[56]。

2015 年, Fu 等^[57]建立偏振双向反射分布函数半球探测系统,对金属、木材等材料的偏振特性进行探测。2024 年,尹艺臻^[58]针对稀土锆酸盐进行偏振特性测试,该材料为高温热障涂层材料,为伪装目标偏振特性研究提供了数据帮助。同年,刘承麟等^[59]建立了材料表面偏振六参量双向反射分布函数模型,并进行了偏振特性测试,有效提升了偏振特性测量精度,为目标偏振特性采集技术升级提供了数据和理论支持。

目前,中国目标偏振特性采集工作较国外在民用目标或背景方面的差距有所缩小,并提出了一些利于偏振特性测量的方法和仪器,但军事目标偏振特性数据仍极为缺乏,成为限制偏振成像探测技术落地军用的关键桎梏,亟待解决。未来,应组织专业科研团队,针对军事目标偏振特性采集,研发高精度的测量仪器与方法,建立完善的数据采集体系,制定标准化的采集流程,确保数据的全面性和准确性,助力偏振成像在军事领域的落地应用。

3.1.2 目标偏振特性影响因素分析

目标偏振特性的影响因素研究旨在增强偏振模型可信度,提高探测识别精度。其影响因素大致可分为两类:一是探测因素,包括探测位置、环境温度;二是目标本身因素,包括材料、粗糙度和表面纹理和背景特殊属性^[60]。

目前,中国目标偏振特性影响因素研究稳步推进。2022 年,杨志勇等^[61]提出了基于双向反射分布函数的热辐射环境下目标红外偏振度模型,给出了目标红外偏振特性及环境热辐射强度之间的变化关系。基于此,2023 年,蔡伟等^[62]针对复杂环境下金属多涂层目标提出了一种反映其红外

偏振特性的分析模型,并给出了涂层数量和热辐射强度对红外偏振特性的影响机理,为战场环境下关键伪装目标探测补充了重要理论依据。同年,宿德志等^[63]针对强辐射背板对目标偏振度的影响进行研究。图 9 中给出了目标温度为 30℃、40℃ 和 50℃ 时,目标与背板夹角由 87° 升高至 141° 的耦合效应实验偏振图像,最右列为无辐射图像。得出结论,强辐射背板作用下温度越高,辐射耦合效应更明显,目标偏振度幅值降低比例越大的影响机理,为海面等强反射场景下的目标探测提供了重要理论基础。

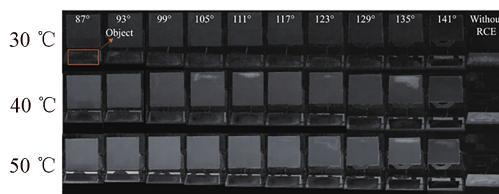


图 9 有无强辐射背板下红外偏振图像^[63]

Fig. 9 Infrared polarized images with and without strong radiation backplane^[63]

截至 2014 年,美国数字成像与摇感实验室开发的 DIRSIG 建模软件仍为世界最常用的目标偏振特性仿真软件,配置了完整的目标偏振特性仿真模型^[64]。近年来,我国虽然也有以军事应用为导向的目标偏振特性影响因素研究,但数量有限,各影响因素的机理研究较国外理论体系仍存在差距。因此,我国应整合研究资源,系统测试军事装备偏振数据,构建本土数据库,搭建国产偏振特性建模模型,以弥补我国在偏振理论研究上的差距。

3.2 偏振传输特性

偏振具有独特的信息携带能力,通过分析目标发出或反射的偏振光,能够获得许多特性信息。然而,由于大气中存在微粒、凝团和溶胶粒子,目标物体发出的偏振光受到多重散射作用,强度降低、偏振态改变,致使传递的信息受损。为实现偏振信息的高保真传输,学者们开始研究偏振在信道介质中的传输特性。

目前,中国对不同信道环境中不同因素对偏振传输影响机理的研究还处于初始阶段。2016 年,张肃等^[65]采用实验和模型计算方法研究不同浓度煤烟环境下偏振光的传输特性,得到偏振度随煤烟浓度增加而降低的变化关系。2021 年,赫立群等^[66]对海雾中不同海雾粒子粒径、入射光偏振态、

波长对偏振度的影响进行研究, 得到海雾粒子半径对偏振度的影响规律和一些海雾环境下偏振光的基本属性。基于此, 谢国芳等^[67]进行了多层海雾环境偏振传输特性分析, 得到湿度、波长对偏振度的影响方式, 并发现圆偏振光更适用于复杂海雾环境信息传输。

目前, 美国已完成了一系列有关偏振传输特性的基础研究, 开发了偏振仿真计算模块 MOD-TRAN-P, 已拥有系统的偏振大气传输模型供仿真研究和军事应用^[64, 68]。而中国在该领域的研究目前尚不完善, 极大程度限制了远距离偏振成像探测技术的落地应用。唯有建立起包含各种环境因素的偏振大气传输模型, 才能实现偏振成像探测技术服务于远距离机载与星载侦察, 精确打击目标。

3.3 偏振成像探测方法及设备

偏振成像探测方法的选取和设备研制是实际应用的终极难题。随着新型材料和制造工艺的升级, 新型偏振成像探测设备性能提高、结构更加紧凑、技术升级, 符合军用探测设备实时、小型化、高精度、高度集成化的要求。

通过统筹各种偏振成像探测方法的优劣特性发现, 分焦平面同时偏振成像、通道调制偏振成像和超表面偏振成像以其携带性好、应用广泛、探测性能强的优势成为实际应用的主流选择。

3.3.1 分焦平面同时偏振成像方法及设备

分焦平面同时偏振成像设备开发的主要研究方向有微偏振阵列等器件的设计优化、残缺信息插值算法、非均匀性矫正方法等。

2012 年, Kulkarni 等^[69]设计出能够同时感知强度、偏振、光谱信息的分焦平面偏振传感器, 实现了拓宽信息采集渠道、提高探测精度的效果。2020 年, 孙嵩^[70]就分焦平面纳米线栅偏振成像系统中纳米线栅元件非均匀性影响成像质量的难题, 提出校正算法以提高系统成像精度。2021 年, 尹佳琪等^[71]针对噪声影响提出一种基于图像非局部自相似性和相似块矩阵的主成分分析去噪方法, 有效削减了探测设备受到噪声的影响, 显著提高了图像质量。

3.3.2 通道调制偏振成像方法及设备

由于此方法是基于滤波解调、信息重建的技术原理, 因而容易在滤波处理和特性重建过程中产生信息破坏现象。对此, 中国学者进行了针对性的研究优化。2021 年, Yan 等^[72]基于高频调制

频谱包络曲线和最小二乘法提出了新的窄带全偏振光谱重建方法, 有效降低了通道调制重建误差。2024 年, Zhang 等^[73]提出了一种基于深度学习的混合特征调制自编码器解调方法, 解决了高频信息丢失的问题, 显著改善了解调性能。

3.3.3 超表面偏振成像方法及设备

基于全电介质超构表面材料, 偏振成像实现了由反射式到投射式、由偏振滤波调控到偏振复用调控、由非全斯托克斯到全斯托克斯探测的重要转化, 实用性大大增强^[12]。目前关键的研究方向有超表面偏振成像设备质量、性能的进一步优化、超表面元件融入传统偏振成像系统的结构设计创新和基于超表面光学调控特性的偏振元件功能扩展。

2018 年, Arbabi 等^[74]提出了一种以电介质超表面取代偏振滤波的全斯托克斯分焦平面偏振成像器件, 突破了偏振滤波器件的 50% 理论效率极限。2022 年, Zhang 等^[75]针对超表面器件易被窄带宽和串扰影响图像质量这一难题, 基于偏振相位优化设计了一种无串扰消色差宽带宽的全斯托克斯偏振成像系统, 实现了忽略串扰、消除色差的应用效果。

国外偏振成像探测设备研制起步早, 具有充分的开发经验和研制基础。近年来, 基于通道调制等新兴方法持续产出性能优异的新型探测设备。而中国偏振成像探测设备仍处于开发阶段, 性能落后、功能缺陷较多, 难以满足军用需求, 亟待开发军事导向的新型偏振成像探测设备, 缩小探测性能差距。

3.4 偏振图像算法

目标探测识别时, 直接由偏振成像探测设备得到的偏振图像常因外界恶劣环境或不良图像特性等因素影响精准识别率, 而基于原始图像使用处理算法能够有效改善图像质量、还原偏振信息。

近年, 人工智能和深度学习算法快速发展, 我国学者以此为基础大量开发新型偏振图像处理算法, 以期从图像处理层面解决偏振成像探测中遇到的难题, 主要包括图像去雾算法、图像去散射算法、图像融合算法、图像恢复算法等。

2021 年, Zhang 等^[76]提出基于偏振特性的条件生成对抗性去雾算法, 得到的无雾图像清晰度显著提高, 结构相似度与信噪比也有所改善。2022 年, Ling 等^[77]基于联合天空分割提出了一种透射优化算法, 能显著抑制大面积天空图像中的

光晕效应。如图 10 所示, 此算法处理图像能有效实现去雾效果。

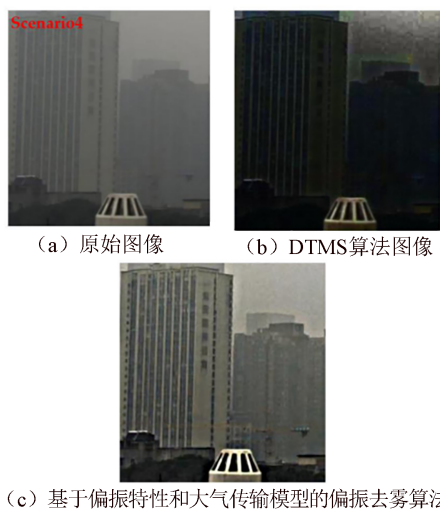


图 10 不同去雾算法处理后的图像^[77]

Fig. 10 Images after processing with different defogging algorithms^[77]

对于水下偏振图像, 复杂的微粒散射导致特性图像清晰度差而难以解析。2025 年, Li 等^[78]提出了一种基于动态对比度约束和自适应遗传算法的水下偏振去散射算法, 实现了不同浑浊度下不同材质目标的图像质量增强。如图 11 所示, 处理后的图像有效消除了后向散射, 水下图像的清晰度较其他算法明显提高。除此以外, 对水下浑浊图像进行算法恢复也是一种行之有效的解决方法。2022 年, 桂心远等^[79]提出了一种基于深度学习和偏振成像的多浑浊度水下图像恢复方法, 实验得到了浑浊度较低时可使用较大步长加快恢复, 浑

浊度较高时可使用较小步长得到更优恢复质量的操作规律, 验证了该方法对恢复浑浊水下图像的优越性。

随着多模态图像融合领域兴起, 红外偏振与可见光图像结合增强探测效果的融合算法得到广泛研究。2021 年, Wang 等^[80]提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换和卷积神经网络的图像融合算法, 如图 12 所示。可以看出, 融合图像的边缘强度和视觉效果明显优化, 显著突出了伪装隐藏目标, 为进一步应用于实际探测、提高识别率打好基础。

4 中国偏振成像探测技术未来发展趋势

本文对偏振成像探测技术军事应用前景及落地军用的 4 项关键技术进行了详细的叙述和分析, 偏振成像探测技术树状图如图 13 所示。并基于应用需求, 提出偏振成像探测技术未来发展趋势。

1) 重视目标偏振特性研究体系建设, 集中力量开展军事目标及典型环境的高精度偏振特性测量, 搭建覆盖全波段的标准化数据库, 构建复杂影响因素下目标偏振特性的机理模型, 为偏振侦察系统提供数据支撑。

2) 加强大气传输特性研究, 系统开展不同环境下, 偏振光传输衰减与退偏机理的实验与建模工作, 如雾霾、沙尘、海雾等。建立融合气溶胶粒径分布、温湿度等多参数偏振传输模型, 加快开发自主可用的偏振大气传输仿真模型, 并针对典型军事场景构建高精度传输数据库, 如远海、

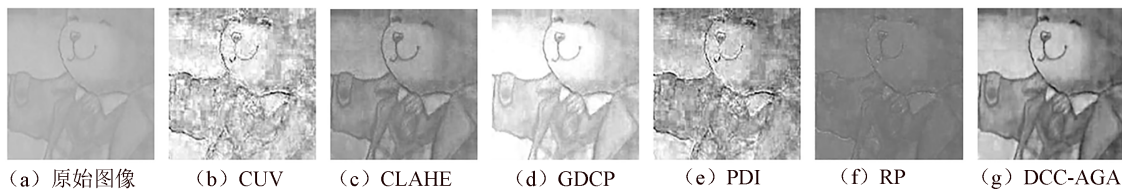


图 11 不同水下去散射算法的输出图像和识别结果^[78]

Fig. 11 Output images and recognition results of different underwater de-scattering algorithms^[78]

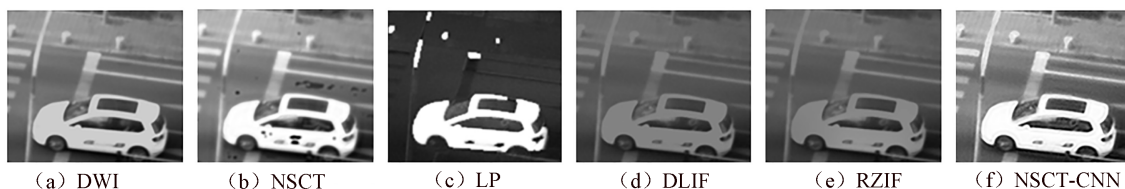


图 12 不同图像融合算法处理图像效果对比^[80]

Fig. 12 Comparison of processed images using different image fusion algorithms^[80]

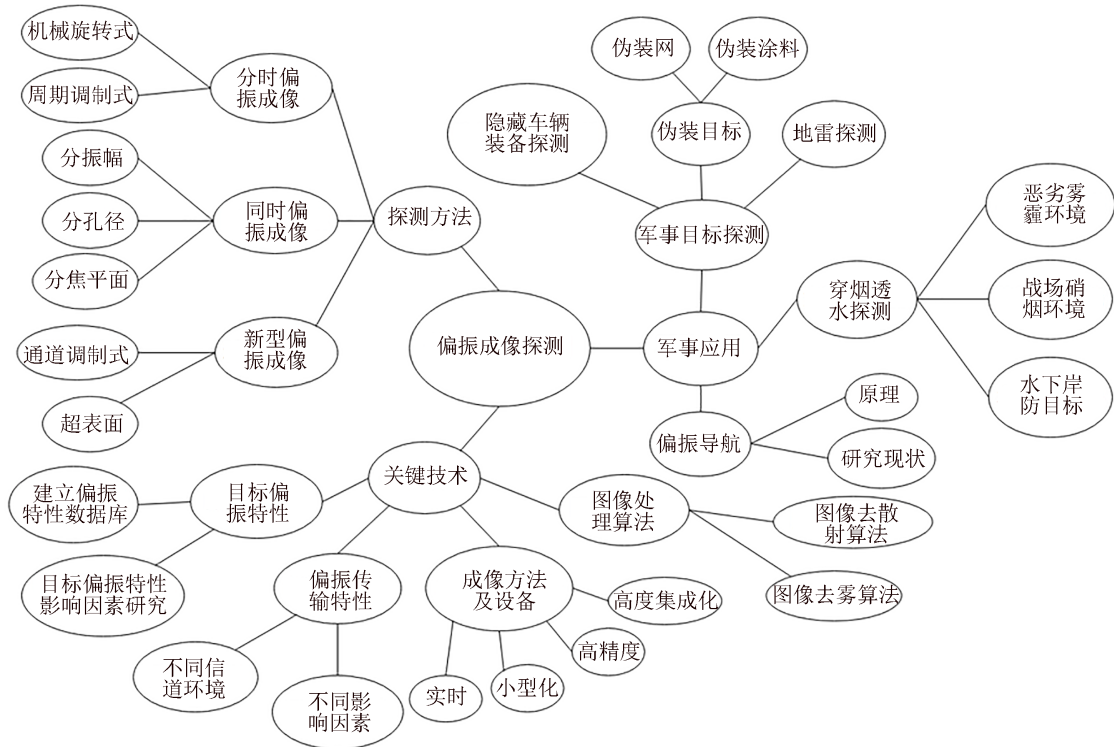


图 13 偏振成像探测技术树状图

Fig. 13 Tree diagram of polarization imaging detection techniques

高原、城市等，以提升复杂环境下目标偏振成像探测的有效作用距离和识别精度。

3) 重点突破军用导向的新型偏振成像设备研制，着力发展分焦平面与超表面偏振成像等前沿技术，实现设备小型化、高集成度与高精度的实时探测，为我军复杂环境下全天候快速目标侦察提供可用设备。

4) 顺应人工智能发展，加强智能化偏振图像处理算法研发，实现偏振图像的高效去噪、增强与解译，为未来智能侦察系统开发提供算法基础与研究样本。

参考文献

[1] 李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
LI S J, JIANG H L, ZHU J P, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 803-809.

[2] 姜会林, 付强, 段锦, 等. 红外偏振成像探测技术与应用研究[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 345-349.
JIANG H L, FU Q, DUAN J, et al. Research on infrared polarization imaging detection technology and application[J]. Infrared Technology, 2014,

36(5): 345-349.

[3] 史冬冬, 刘利民, 黄富瑜, 等. 红外偏振成像技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(22): 43-53.
SHI D D, LIU L M, HUANG F Y, et al. Research progress in infrared polarization imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(22): 43-53.

[4] 周强国, 黄志明, 周炜. 偏振成像技术的研究进展及应用[J]. 红外技术, 2021, 43(9): 817-828.
ZHOU Q G, HUANG Z M, ZHOU W. Research progress and application of polarization imaging technology[J]. Infrared Technology, 2021, 43(9): 817-828.

[5] ZHANG Y, FU Q, LUO K M, et al. Analysis of two-color infrared polarization imaging characteristics for target detection and recognition[J]. Photonics, 2023, 10(11): 1181.

[6] 李林, 张国清, 周战荣, 等. 偏振探测成像技术研究进展及其军事应用[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(5): 109-118.
LI L, ZHANG G Q, ZHOU Z R, et al. Progress and military applications of polarization detection imaging technology[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(5): 109-118.

[7] GU X S, FU Q, WANG L Y, et al. Analysis

- and Inversion of Target Polarization Characteristics Based on pBRDF[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2024, 35(5): 1073-1083.
- [8] 宿德志, 刘亮, 吴世永, 等. 辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 318-328.
- SU D Z, LIU L, WU S Y, et al. Influence of radiation coupling effect on polarization characteristics of targets[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 318-328.
- [9] 杨志勇, 张志伟, 蔡伟, 等. 基于 Mueller 矩阵的目标偏振特性分析[J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 138-147.
- YANG Z Y, ZHANG Z W, CAI W, et al. Analysis of polarization characteristics of targets based on Mueller matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 138-147.
- [10] 郭忠义, 汪信洋, 李德奎, 等. 偏振信息传输理论及应用进展(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 24-42.
- GUO Z Y, WANG X Y, LI D K, et al. Advances on theory and application of polarization information propagation(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 24-42.
- [11] 孙鑫栋, 孟峰旭, 徐文森, 等. 三非环境偏振传输研究综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(9): 89-100.
- SUN X D, MENG F X, XU W S, et al. Summary of research on polarization transmission in three typical environments[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(9): 89-100.
- [12] 黄天, 张浩楠, 赵雨, 等. 基于超构表面的偏振成像器件研究进展[J]. *中国激光*, 2024, 51(17): 72-89.
- HUANG T, ZHANG H N, ZHAO Y, et al. Research progress of polarization imaging devices based on metasurface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(17): 72-89.
- [13] 陈绩, 叶欣, 吴悦, 等. 中国光学十大进展: 基于超构透镜阵列的新型成像器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(22): 11-28.
- CHEN J, YE X, WU Y, et al. China's top 10 optical breakthroughs: advancements in optical imaging devices based on metalens arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(22): 11-28.
- [14] LI S Y, GAO M J, FAN X R, et al. A method for generating pseudo-polarization images[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2024, 31: 3030-3033.
- [15] ZHANG L, YANG F B, JI L N. Multi-scale fusion algorithm based on structure similarity index constraint for infrared polarization and intensity images[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 24646-24655.
- [16] 刘敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. *光学技术*, 2013, 39(1): 56-62.
- LIU J, XIA R Q, JIN W Q, et al. Review of imaging polarimetry based on Stokes Vector[J]. *Optical Technique* 2013, 39(1): 56-62.
- [17] 李智渊, 翟爱平, 冀莹泽, 等. 光学偏振成像技术的研究、应用与进展[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(9): 298-313.
- LI Z Y, ZHAI A P, JI Y Z, et al. Research, application and progress of optical polarization imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(9): 298-313.
- [18] WANG Y, SU Y Q, SUN X Y, et al. Principle and implementation of stokes vector polarization imaging technology[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6613.
- [19] 张卫红, 李校博, 张永宁, 等. 分时型偏振成像探测系统开发与应用[J]. *光电技术应用*, 2023, 38(5): 30-36, 78.
- ZHANG W H, LI X B, ZHANG Y N, et al. Development and application of time-sharing polarization imaging detection system[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2023, 38(5): 30-36, 78.
- [20] 杨志勇, 王晓伟, 杨雨豪, 等. 分时型长波红外偏振成像系统图像配准研究[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(5): 44-52.
- YANG Z Y, WANG X W, YANG Y H, et al. Study of image registration in the division-of-time long-wave infrared polarization imaging system[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2024, 38(5): 44-52.
- [21] 崔文煜, 黄文娟, 易维宁. 分束型同时偏振成像系统定标及预处理方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 106-117.
- CUI W Y, HUANG W J, YI W N. Calibration and preprocessing method for amplitude divided simultaneous imaging polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 106-117.
- [22] 王琪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 分孔径红外偏振成像仪光学系统设计[J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 92-99.
- WANG Q, LIANG J Q, LIANG Z Z, et al. Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager[J]. *Chinese Op-*

- tics, 2018, 11(1): 92-99.
- [23] 张俊超, 伍彩云, 罗毅东, 等. 分焦平面偏振超分辨成像技术的研究现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(7): 205-218.
- ZHANG J C, WU C Y, LUO Y D, et al. Research status and prospects on super-resolution imaging technology for division-of-focal-plane polarimeters[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(7): 205-218.
- [24] 郝婧蕾, 张蓓, 赵永强. 分焦平面偏振光谱成像技术研究进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 82-93.
- HAO J L, ZHANG B, ZHAO Y Q. Research progress of division-of-focal-plane polarization spectral imaging technology[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 53(4): 82-93.
- [25] 张宁, 朱京平, 宗康, 等. 通道调制型偏振成像系统的波段宽度限制判据[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 204-210.
- ZHANG N, ZHU J P, ZONG K, et al. Imaging spectral bandwidth criterion equation of channeled modulated polarization imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 204-210.
- [26] 李浩, 朱京平, 张宁, 等. 半波片角度失配对通道调制型偏振成像效果的影响及补偿[J]. 物理学报, 2016, 65(13): 120-126.
- LI H, ZHU J P, ZHANG N, et al. Effect of half wave plate angle mismatch on channel modulating imaging result and its compensation[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(13): 120-126.
- [27] 周俊焯, 郝佳, 余晓畅, 等. 面向偏振成像的超构表面研究进展[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(5): 973-995.
- ZHOU J Z, HAO J, YU X C, et al. Recent advances in metasurfaces for polarization imaging[J]. Chinese Optics, 2023, 16(5): 973-995.
- [28] 闫超. 基于超表面的红外偏振相关电磁调控研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019: 14-15.
- YAN C. Research on infrared polarization-dependent electromagnetic manipulation with metasurfaces[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences), 2019: 14-15.
- [29] 赵永强, 乔新博, 李宁, 等. 偏振视觉[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(7): 1620-1645.
- ZHAO Y Q, QIAO X B, LI N, et al. Polarization vision[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2024, 54(7): 1620-1645.
- [30] GOLDSTEIN D H. Polarimetric characterization of federal standard paints[C]//Polarization Analysis Measurement, and Remote Sensing III. San Diego, CA, United States: International Symposium on Optical Science and Technology, 2000: 112-123.
- [31] DEAS R M, PLAYLE N A, LONG K J. Trial of a vehicle mounted UK electro-optic countermeasure sensor system as part of a UK/US collaborative program[C]//Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XII. Orlando, Florida, USA: SPIE, 2007: 55314.
- [32] CONNOR B, CARRIE I, CRAIG R, et al. Discriminative imaging using a LWIR polarimeter[C]//Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications V Cardiff, Wales, United Kingdom: SPIE, 2008: 71130K.
- [33] DEJONG W, CREMER F, SCHUTTE K, et al. Usage of polarisation features of landmines for improved automatic detection[C]//Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V. Orlando, FL, United States: Aero-Sense 2000, 2000: 241-252.
- [34] FORSELL G, HALLBERG T. Calibrated sensitive polarization measurement methods in the regions 3-5 μm and 8-12 μm , corrected for contributions to the detector signal from the polarizer [C]//Polarization Analysis and Measurement IV. San Diego, CA, USA: SPIE, 2002: 257-269.
- [35] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. Applied Optics, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [36] RATLIFF B M, LEMASTER D A, MACK R T, et al. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data[C]//Polarization Science and Remote Sensing V. San Diego, California, USA: SPIE, 2011: 816002.
- [37] 王军, 丁娜, 李建军, 等. 红外偏振成像对伪装目标的探测识别研究[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 441-445.
- WANG J, DING N, LI J J, et al. Infrared polarization imaging: detection and recognition of camouflage target[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 441-445.
- [38] 高天元, 周扬. 分振幅偏振成像实验装置的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 9-12.
- GAO T Y, ZHOU Y. Experimental verification

- of simultaneous polarization imaging detection[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 40(3): 9-12.
- [39] 郝佳, 周奎, 王文正, 等. 基于红外偏振成像的背景淹没目标探测应用研究[C]//中国指挥与控制学会. 第十届中国指挥控制大会论文集(上册). 北京: 兵器工业出版社, 2022: 6, 656-661.
- [40] 梁健, 巨海娟, 张文飞, 等. 偏振光学成像去雾技术综述[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 9-21.
LIANG J, JU H J, ZHANG W F, et al. Review of optical polarimetric dehazing technique[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 9-21.
- [41] CHENAULT D B, PEZZANITI J L. Polarization imaging through scattering media[C]//Polarization Analysis Measurement, and Remote Sensing III. San Diego, CA, United States: SPIE, 2000: 124-133.
- [42] BROUSSEAU D, PLANT J, THIBAUT S. Real-time polarization difference imaging (rPDI) reveals surface details and textures in harsh environments[C]//Photonic Applications for Aerospace, Commercial, and Harsh Environments IV. Baltimore, Maryland, USA: SPIE, 2013: 87200E.
- [43] FU Q, MO C H, LIU B Y, et al. Study on polarization image methods in Turbid medium[C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Infrared Technology and Applications. Beijing, China: SPIE, 2014: 93002B.
- [44] DUAN J, ZHAN J T, ZHANG S, et al. Experiment of polarization transmission characteristics and polarization imaging in simulation smoke/fog environment[C]//AOPC 2015: Optical and Optoelectronic Sensing and Imaging Technology. Beijing, China: SPIE, 2015: 96740D.
- [45] XIE M L, LIU P, MA C W, et al. Research on active polarization imaging experiments and key technologies in smoke and dust environment[J]. Optik, 2019, 198: 163309.
- [46] XIANG M, DONG X, WANG T Y, et al. Active polarization high-resolution imaging through complex scattering media[J]. Advanced Photonics Nexus, 2025, 4(1): 016013.
- [47] DUPEYROUX J, VIOLLET S, SERRES J R. An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 117: 40-56.
- [48] CARTRON L, DARMAILLACQ A S, JOZET-ALVES C, et al. Cuttlefish rely on both polarized light and landmarks for orientation[J]. Animal Cognition, 2012, 15(4): 591-596.
- [49] DYER A G, GREENTREE A D, GARCIA J E, et al. Correction to: Einstein, von Frisch and the honeybee: a historical letter comes to light[J]. Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 2021, 207(4): 457.
- [50] 华豆, 范之国, 金海红, 等. 成像系统中偏振片初始方向对大气偏振模式测量精度的影响与校正方法[J]. 光学学报, 2022, 42(22): 57-67.
HUA D, FAN Z G, JIN H H, et al. Influence of initial orientation of polarizer in imaging system on measurement accuracy of atmospheric polarization pattern and correction method[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 57-67.
- [51] LAMBRINOS D, MÖLLER R, ABHART T, et al. A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 30(1-2): 39-64.
- [52] COURTIER G, LAPRAY P J, ADAM R, et al. Ground vehicle navigation based on the skylight polarization[C]//2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway, NJ, USA: IEEE 2023: 1373-1379.
- [53] 李宇阳, 王霞, 赵家碧, 等. 基于局部大气修复的偏振导航方法[J]. 兵工学报, 2022, 43(12): 3062-3069.
LI Y Y, WANG X, ZHAO J B, et al. Polarization navigation algorithm based on local atmosphere image restoration[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(12): 3062-3069.
- [54] 路澳航, 关传洸, 纪元宇, 等. 基于Zynq处理器的成像式偏振导航传感器[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(6): 122-130.
LU A H, GUAN C L, JI Y Y, et al. Imaging polarization navigation sensor based on Zynq processor[J]. Micronanoelectronic Technology, 2024, 61(6): 122-130.
- [55] 王煜, 刘海峥, 史泽林, 等. 红外偏振成像探测技术研究进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 67-81.
WANG Y, LIU H Z, SHI Z L, et al. Research progress on infrared polarization imaging detection and applications[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 53(4): 67-81.
- [56] WOOLLEY M, MICHALSON J, ROMANO J. Observations on the polarimetric imagery collection

- experiment database[C]//Polarization Science and Remote Sensing V. San Diego, California, USA: SPIE, 2011: 81600P.
- [57] FU Q, ZHU Y, ZHANG S, et al. Study on the measurement system of the target polarization characteristics and test[C]//AOPC 2015: Optical Test, Measurement, and Equipment. Beijing, China: SPIE, 2015: 96771X.
- [58] 尹艺臻. 稀土锆酸盐 RE₂Zr₂O₇ 材料的 Mueller 矩阵特性研究[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(4): 606-612.
- YIN Y Z. Study on Mueller matrix properties of rare earth zirconate RE₂Zr₂O₇ materials[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(4): 606-612.
- [59] 刘承麟, 战俊彤, 张肃, 等. 基于改进型 Blinn 遮蔽函数的目标材料表面可见光偏振反射研究[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(5): 1162-1174.
- LIU C L, ZHAN J T, ZHANG S, et al. Visible polarized reflection of target material surface based on improved Blinn masking function[J]. Chinese Optics, 2024, 17(5): 1162-1174.
- [60] ZHANG Z W, YANG Z Y, LI G P, et al. Analysis of influence factors of target polarization characteristics[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 21784.
- [61] 杨志勇, 陆高翔, 张志伟, 等. 热辐射环境下目标红外偏振特性分析[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 192-201.
- YANG Z Y, LU G X, ZHANG Z W, et al. Analysis of infrared polarization characteristics of target in thermal radiation environment[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 192-201.
- [62] 蔡伟, 陈栋, 杨志勇, 等. 热辐射环境下多涂层目标红外偏振特性分析[J]. 光学学报, 2023, 43(22): 49-56.
- CAI W, CHEN D, YANG Z Y, et al. Analysis of infrared polarization characteristics of multi-coated targets in thermal radiation environment[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(22): 49-56.
- [63] 宿德志, 刘亮, 吴世永, 等. 辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(2): 318-328.
- SU D Z, LIU L, WU S Y, et al. Influence of radiation coupling effect on polarization characteristics of targets[J]. Chinese Optics, 2023, 16(2): 318-328.
- [64] 段锦, 付强, 莫春和, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 190-195.
- DUAN J, FU Q, MO C H, et al. Review of polarization imaging technology for international military application I[J]. Infrared Technology, 2014, 36(3): 190-195.
- [65] 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): 311-318.
- ZHANG S, ZHAN J T, BAI S K, et al. Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 311-318.
- [66] 赫立群, 段锦, 张肃, 等. 激光在海雾环境中偏振传输特性仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 311-317.
- HE L Q, DUAN J, ZHANG S, et al. Simulation of polarization transmission characteristics of laser in sea fog environment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 311-317.
- [67] 谢国芳, 段锦, 王佳林, 等. 基于多层海雾环境的偏振光传输特性分析[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(10): 137-148.
- XIE G F, DUAN J, WANG J L, et al. Analysis of polarized light transmission characterization based on multilayer sea fog environment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(10): 137-148.
- [68] NOTHDURFT R E, YAO G. Effects of turbid media optical properties on object visibility in subsurface polarization imaging[J]. Applied Optics, 2006, 45(22): 5532-5541.
- [69] KULKARNI M, GRUEV V. A division-of-focal-plane spectral-polarization imaging sensor[C]//Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing X. Baltimore, Maryland, SA: SPIE, 2012: 83640K.
- [70] 孙嵩. 纳米线栅偏振成像系统应用研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020: 49-67.
- SUN H. Application research of nanowire polarization imaging system[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020: 49-67.
- [71] 尹佳琪, 王世勇, 李范鸣. 基于改进主成分分析的分焦平面偏振图像去噪算法[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 64-73.
- YIN J Q, WANG S Y, LI F M. Division-of-focal-plane polarization image denoising algorithm based on improved principal component analysis[J]. Acta

- Optica Sinica, 2021, 41(7): 64-73.
- [72] YAN T Y, ZHANG C M, WANG Y Q, et al. The narrowband full polarization spectra reconstruction for static channeled spectropolarimetry[J]. Optik, 2021, 247: 167852.
- [73] ZHANG N, ZHAO M F, ZHANG Z N, et al. A novel demodulation method of the channeled modulated polarization imaging pictures by hybrid feature modulated autoencoders[J]. Optics Express, 2024, 32(18): 31473-31484.
- [74] ARBABI E, KAMALI S M, ARBABI A, et al. Full-stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2018, 5(8): 3132-3140.
- [75] ZHANG Y X, PU M B, JIN J J, et al. Cross-talk-free achromatic full Stokes imaging polarimetry metasurface enabled by polarization-dependent phase optimization[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(11): 220058.
- [76] ZHANG J J, BAO K S, ZHANG X, et al. Conditional generative adversarial defogging algorithm based on polarization characteristics[C]//2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 2148-2155.
- [77] LING F, ZHANG Y, SHI Z G, et al. Defogging algorithm based on polarization characteristics and atmospheric transmission model[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8132.
- [78] LI Y F, SUN X D, ZHANG J Q, et al. Underwater polarization de-scattering method with dynamic contrast constraint and adaptive genetic algorithm[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 183: 112375.
- [79] 桂心远, 张然, 成昊远, 等. 基于神经网络和偏振成像的多浑浊度水下图像恢复[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 62-68.
- GUI X Y, ZHANG R, CHENG H Y, et al. Multi-turbidity underwater image restoration based on neural network and polarization imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 62-68.
- [80] WANG S F, MENG J, ZHOU Y, et al. Polarization image fusion algorithm using NSCT and CNN[J]. Journal of Russian Laser Research, 2021, 42(4): 443-452.

(编辑: 夏菁)