

偏振探测成像技术研究进展及其军事应用

李 林, 张国清, 周战荣, 耿 燚

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 对代表性的偏振探测技术及其在军事领域中的主要应用给出了总结。首先, 介绍了利用琼斯矩阵和穆勒矩阵进行偏振探测的基本原理; 其次, 就 4 种常见的偏振探测技术的实现方法及其优缺点进行了讨论, 包括分时偏振成像技术和同时偏振成像技术 (包括分振幅偏振成像、分孔径偏振成像、分焦平面偏振成像技术); 然后, 介绍了偏振探测技术在目标探测、图像去雾、导航、地雷探测等军事方面的典型应用; 最后, 指出了偏振探测技术目前存在的难点问题以及未来发展展望。

关键词: 偏振光; 琼斯矩阵; 穆勒矩阵; 偏振探测技术; 军事应用

中图分类号: TN201, TN209

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)05-109-10

Progress and Military Applications of Polarization Detection Imaging Technology

LI Lin, ZHANG Guoqing, ZHOU Zhanrong, GENG Yi

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

ABSTRACT: Representative polarization detection technologies and its applications in military were summarized. Firstly, the basic principles of polarization detection using Jones matrix and Muller matrix were introduced. Secondly, four common polarization detection techniques, including the division-of-time polarization imaging as well as the division-of-amplitude polarization imaging, the aperture-divided polarization imaging and the division-of-focal-plane polarization imaging of the simultaneous polarization imaging, and their advantages and disadvantages were discussed. Then, typical applications of polarization detection technology in the military field, such as target detection, image dehazing, navigation and landmine detection, were introduced. Finally, the current difficulties and an outlook on the development of polarization detection technology were provided.

KEYWORDS: polarized light; Jones matrix; Muller matrix; polarization detection technology; military application

传统光学成像探测利用光的强度信息进行成像, 而偏振探测作为光学探测的重要补充, 把传统光学成像元件捕捉到的三维信息 (光强、光谱和空间) 扩充成七维信息 (光强、光谱、空间、

偏振度、偏振方位角、偏振椭率、旋转方向), 是获得目标偏振信息的重要技术手段, 可以增强对目标的探测和识别能力。

由于不同物体的色彩、材料、粗糙度、形状

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 火箭军工程大学青年基金 (2021QN-B039)

第一作者: 李林 (1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事理论物理与偏振成像研究。E-mail: 1506202028@qq.com

引用格式: 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.

以及观察角度的不同,反射光的偏振特性就会不同。目标独特的偏振特性决定了偏振探测成像技术具有传统成像技术所无法比拟的优点^[1-2]:一是偏振探测成像技术具有更容易发现伪装、隐藏目标的优势;二是在复杂环境背景中,更容易分辨出人造目标;三是在烟尘、雾霾环境中,可以保持良好的作用距离。基于此,从20世纪70年代开始,西方国家便对偏振探测成像技术在军事方面的应用展开了不留余力的研究。特别是美国,经过多年的研究,偏振探测成像技术处于世界领先的地位。我国在偏振探测成像技术方面的研究起步较晚,但也取得了一些有价值的成果。

基于此,本文对偏振探测成像技术及其在军事领域的主要应用进行综述。

1 偏振探测基本原理

在光与媒介的相互作用中,媒介的材料、颜色、粗糙度等因素会使光束的偏振态发生改变,出射光的偏振信息可以反映出媒介的偏振特性,其可用琼斯矩阵或穆勒矩阵表示。

1.1 琼斯矩阵

琼斯矢量,即 $[E_x, E_y]^T$,可以描述一般椭圆偏振光的偏振特性^[3]。其中, E_x 、 E_y 分别为光波在坐标轴 x 、 y 方向的分量。琼斯矩阵 J 用于描述光学元器件对偏振光的影响,偏振光经过光学元器件后的偏振态可以表示为

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

在光路中,第 i 个光学元器件的琼斯矩阵记作 J_i ($i=1, 2, \dots, n$)。经过 n 个元器件后,偏振光的偏振态变为

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = J_n \cdots J_2 J_1 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

以上就是利用琼斯矩阵进行偏振探测的基本原理。由于琼斯矢量的构建需要光的相位信息,所以其实际应用功能有限,仅能够用来表示完全偏振光,部分偏振光和完全非偏振光不能用琼斯矢量表示。

1.2 穆勒矩阵

斯托克斯矢量^[4-5] $S=(S_0, S_1, S_2, S_3)$,可以描述光的偏振特性,其各分量与电场分量的关系为

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_y E_x^* \\ i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: S_0 为光的总强度; S_1 为 x 、 y 方向上的偏振分量光强的差值; S_2 为偏振方向为 45° 和 135° 方向上偏振分量光强的差值; S_3 为右旋偏振光分量和左旋偏振光分量光强的差值。

穆勒矩阵 M 是 4×4 阶实矩阵^[6],作用于斯托克斯矢量,可以解释光波在传输过程中偏振态的改变。用 S 表示入射光的偏振态, S' 表示出射光的偏振态,两者的变换关系可以表述为

$$S' = MS \quad (4)$$

具体地,

$$\begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

当入射光依次通过光路中的 n 个元器件时,每个元器件的穆勒矩阵记作 M_i ($i=1, 2, \dots, n$),最终,入射光和出射光偏振态的关系为

$$S' = M_n \cdots M_2 M_1 S \quad (6)$$

以上就是利用穆勒矩阵进行偏振探测的基本原理。因为斯托克斯矢量可以表述所有光波的偏振性质,所以,穆勒矩阵可以表示所有的光路系统,比琼斯矩阵的应用范围更加广泛。

2 偏振探测成像技术

偏振探测成像技术^[7-9]分为分时偏振成像和同时偏振成像。分时偏振成像是在成像系统中加入旋转偏振片或者调制器件来实现。同时偏振成像可以一次获得4幅不同的偏振图像,具体可分为分振幅型、分孔径型以及分焦平面型。

2.1 分时偏振成像

图1给出了分时偏振成像的原理。在电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)前加入旋转线偏振片,通过改变角度获得不同线偏振方向的强度图像,最后计算获得线偏振度图像或偏振角图像。

法国的Polder是分时偏振成像的代表仪器,利用步进电机带动转轮,获得 0° 、 60° 以及 90° 方

向上的偏振图像^[10-11]。中科院安徽光学精密机械研究所最早制造出了分时偏振成像照相机——多波段偏振 CCD 相机, 可以得到 0°、60° 以及 120° 方向上的偏振图像^[12-14]。

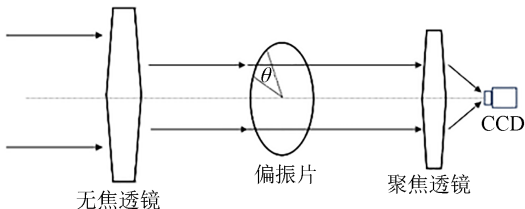


图 1 分时偏振成像系统

Fig. 1 Division-of-time polarization imaging system

分时偏振成像系统结构简单、成本较低且容易实现, 但此类型的系统只能对静态目标进行偏振成像, 无法应用于动态目标的偏振成像。

2.2 同时偏振成像

为了克服分时偏振成像系统的缺点, 实现对运动目标进行偏振探测成像, 科学家开始对同时偏振成像系统进行研究, 具体可分为分振幅型、分孔径型以及分焦平面型。

2.2.1 分振幅偏振成像

美国 Azzam 等^[15-17]研制出了世界上第一台利用分振幅的方法进行高速测量偏振图像的装置。该系统是利用分光棱镜以及偏振分光棱镜将入射光分成 4 路偏振光束, 然后通过 CCD 探测器获取目标 4 个偏振方向上的偏振图像, 进而得到目标的偏振信息^[18], 如图 2 所示。

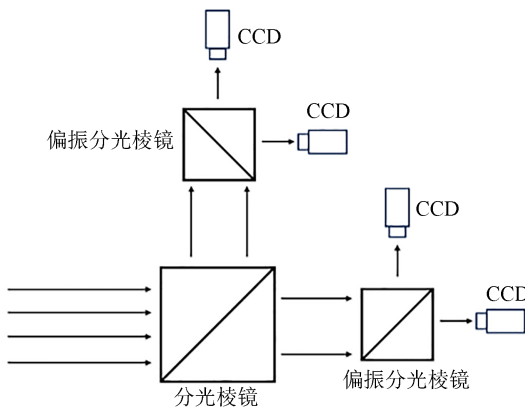


图 2 分振幅偏振成像系统

Fig. 2 Division-of-amplitude polarization imaging system

此系统能够快速采集、实时处理目标的偏振信息, 同时兼备抗振动、抗冲击以及抗过载能力, 可以很好地适应导弹发射以及飞行过程中的振动、冲击以及过载造成的影响。该系统可装载在导弹

上, 提高对目标的检测能力, 特别是在复杂天气条件下对目标的识别率。

该系统也存在一些问题: 一是质量、体积大, 制作成本高; 二是由于工艺加工造成的误差, 各光路的光学性能存在差异, 导致得到的 4 幅图像存在差别, 如何减小相应误差值得研究^[19-20]; 三是由于使用到了多路探测, CCD 探测器响应存在时间差, 从而导致复原出来的目标的偏振信息存在一定的误差。

针对以上问题, 科研人员研制出了分孔径偏振成像系统。

2.2.2 分孔径偏振成像

分孔径偏振成像系统将入射光分解到 4 个通道中, 每个通道分别放有不同偏振方向的偏振片, 然后利用中继透镜将这 4 束光聚焦到 CCD 的焦平面上, 从而得到 4 幅不同偏振信息的图像, 如图 3 所示。

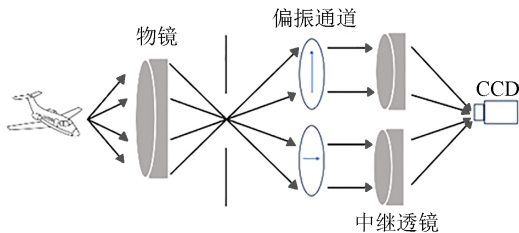


图 3 分孔径同时偏振成像系统

Fig. 3 Aperture-divided simultaneous polarization imaging system

中科院长春精密光学机械与物理研究所王琪等^[21]设计了一种分孔径红外偏振成像系统, 采用了共孔径与子孔径结合的技术, 此系统的实时性好, 结构紧凑。刘尊辈等^[22]设计了一种分孔径紫外多波段成像系统, 采取了前置分孔径系统加后置合像系统的形式, 可以提高探测的准确性, 减少背景干扰。

分孔径偏振成像系统可将同一视场中不同偏振方向的图像投影到同一焦平面阵列的不同位置上, 采用单探测器同时获取多个偏振方向数据, 实现实时采集和处理, 能够对战场地机动目标进行实时偏振成像探测, 具有结构紧凑、体积小、质量小, 容易实现的优点, 应用比较广泛。但是由于系统具有多个探测通道, 不易设计和装调, 灵活性差。另外, 由于这种成像系统的相机存在位置偏差, 从而导致采集到的图像需要配准才能够得到精准的偏振信息, 如何对偏振图像进行准确配准是这种系统面临的一个重要问题。

2.2.3 分焦平面偏振成像

分焦平面偏振成像系统是将像素级别的阵列式偏振片耦合在探测器光敏面元上,如图4所示,焦平面上的每1个像素对应1个微偏振片,每4个像素组成一个 2×2 的矩阵,分别采集 0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向上的偏振光。

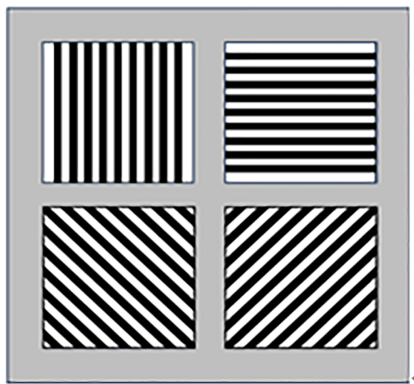


图4 分焦平面偏振成像元件

Fig. 4 Elements of division-of-focal-plane polarization imaging system

焦平面上的每4个像素可以融合成单个偏振成像探测元,从而实现对目标场景的同时偏振探测。最早由美国科学家Nordin等^[23]制造了256像素 $\times$ 256像素的微偏振阵列,每个像素单元尺寸为 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ 。国内中国科学技术大学研制了分辨率320像素 $\times$ 240像素的微偏振阵列^[24],单元尺寸为 $7.4 \mu\text{m}$ 。北京理工大学研制了分辨率为640像素 $\times$ 480像素,单元尺寸 $7.4 \mu\text{m}$ 的微偏振阵列^[25]。

美国空军实验室研制出了一种新型分焦平面偏振成像探测器,该探测器可以同时获取入射光中的圆偏振分量和线偏振分量,大大提高了偏振探测能力。由于圆偏光在雾霾天气条件下具有良好的保偏性质,所以,可以增强探测系统雾霾天气下的穿透能力^[26],应用前景十分广泛。

分焦平面偏振方法与上述其他3种方法相比,具有不存在视场偏差、获得偏振信息精度较高、体积小、结构紧凑、灵活性好、集成度高等优点,是当前偏振成像研究的主流方向。

通过以上对偏振成像系统的总结,综合比较了它们的优劣如表1所示。

通过对比发现,4种偏振成像系统各有优缺点,能够解决其他偏振成像系统缺点的同时,自身也携带着不足。所以,研究一个能够满足成本低、质量小、体积小、结构简单、分辨率高、加工工艺难度低以及可以对动态目标实时成像的偏

振成像的系统是未来的发展方向。

表1 不同偏振成像系统的特点对比

Tab. 1 Comparison of characteristics of different polarization imaging systems

偏振成像方案	优点	缺点
分时偏振成像	结构简单 成本低	不适于 动态场景
分振幅	抗过载能力强 动态实时探测	体积大成本高 工艺加工误差 CCD响应误差
分孔径	体积质量小 动态实时探测	图像需配准 灵活性差
分焦平面	精度集成度高 体积质量小 视场偏差小 动态实时探测	成本高 封装工艺复杂 分辨率较低

3 偏振探测技术在军事中的应用

3.1 目标探测

战争中,各方都尽可能采用多种伪装技术手段,以达到隐藏军事部署、欺骗迷惑敌军侦察、甚至误导敌军决策的目的。常用的伪装手段是涂抹伪装染料,使目标光谱尽可能与背景光谱相一致,所以传统的光强检测手段很难有效分辨隐藏在背景中的目标。根据偏振原理,即使目标和背景光谱信息一致,但它们的偏振信息差别明显。偏振探测除了能够获得目标光强信息外,还能获得目标的偏振信息,所以,可以有效地识别复杂背景中的伪装目标。

美国Polaris Sensor Technologies公司^[27]研究利用长红外波段偏振成像仪(Long Wave Infra-Red Imaging Polarimeter, LWIR-IP)通过拍摄 0° 、 45° 、 90° 、 135° 这4个角度的偏振图像,证实长波红外偏振光学成像技术能够有效地探测海上目标。2019年9月,美军与该公司就红外热成像技术签订了一份450万美元的合同,该项目持续到2021年。

美国亚利桑那大学Tyo等^[28]利用红外偏振成像系统开展了隐蔽目标成像研究实验。实验结果显示:在可见光以及红外波段成像中,车辆完全隐藏在了树荫里;而红外偏振图像显示出了车辆和背景的偏振信息差别,将车辆从背景中凸显出来,提高了对目标的探测能力。如图5所示。

美国空军实验室开展了对小型无人机在树林

背景下的长波段红外偏振探测实验^[29]。实验表明，在复杂背景下，长波段红外偏振成像可以有效抑制噪声，凸显目标。

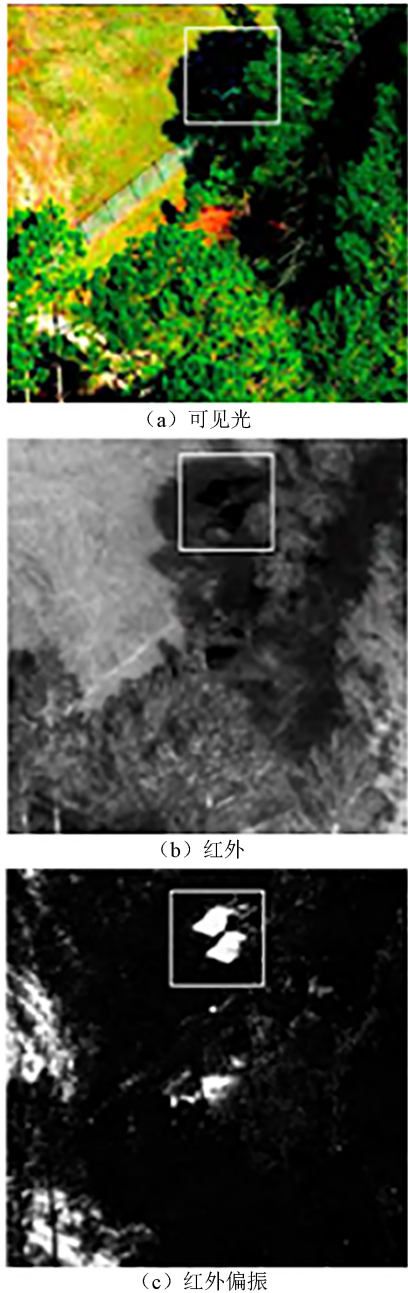


图 5 可见光、红外、红外偏振成像效果对比^[28]
Fig. 5 Images obtained by visible light imaging, infrared light imaging and infrared polarization imaging^[28]

国内，西安应用光学研究所王军等^[30]研制了红外分时偏振成像系统，通过偏振分量图的伪彩色融合处理，得到偏振融合图像，与传统热成像仪对比，验证了红外偏振成像技术对伪装目标探测识别的优越性。

长春理工大学高天元等^[31]利用分振幅偏振成

像系统进行了目标装甲车探测实验，如图 6 所示。结果表明，经过偏振处理后的图像，使目标装甲车更容易从草坪中识别出来，每个图像中方框内装甲车与草坪的对比度提高了 44.87%。

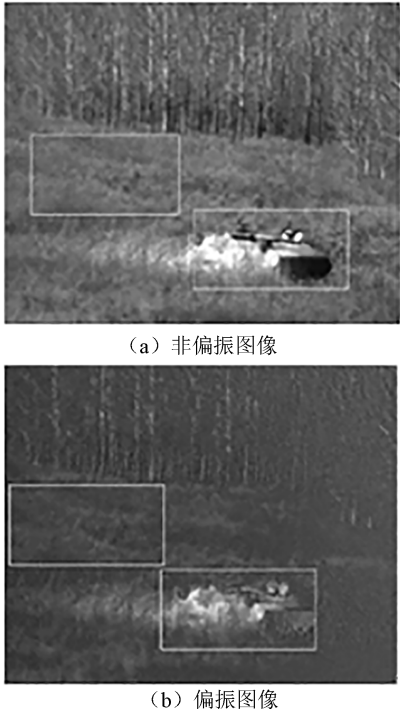


图 6 草地背景下的非偏振与偏振图像对比^[31]
Fig. 6 Nonpolarized and polarized images under grass background^[31]

苏州大学贺虎成^[32]利用分孔径偏振成像系统对隐藏在背景中的目标进行了偏振探测，可有效获取目标的 Stokes 矢量图像，增强目标探测与识别能力。

3.2 偏振去雾

雾霾会对光产生散射、吸收及反射，使目标景象的特征细节变得模糊甚至丢失，图像对比度下降，对交通、监测、遥感以及军事侦察活动产生负面影响。在战场上，雾霾大大缩短了探测距离，导致难以及时收集战场情报，贻误战机。由于雾霾等颗粒散射太阳光形成的大气光具有偏振特性，因此，偏振去雾用于各种雾霾天气。基于此，对偏振去雾技术的研究有着重要的军事价值。

美国 Chenault 等^[33]通过研究偏振光在散射介质中的传播机制，利用几种典型介质（牛奶和烟雾）进行了偏振成像研究，得到了目标的 Stokes 矢量图。实验结果表明：偏振成像能够改善介质中图像的清晰度，增强在浑浊介质中的目标成像质量，特别是通过全 Stokes 进行偏振图像处理后

成像质量更好,如图7所示。

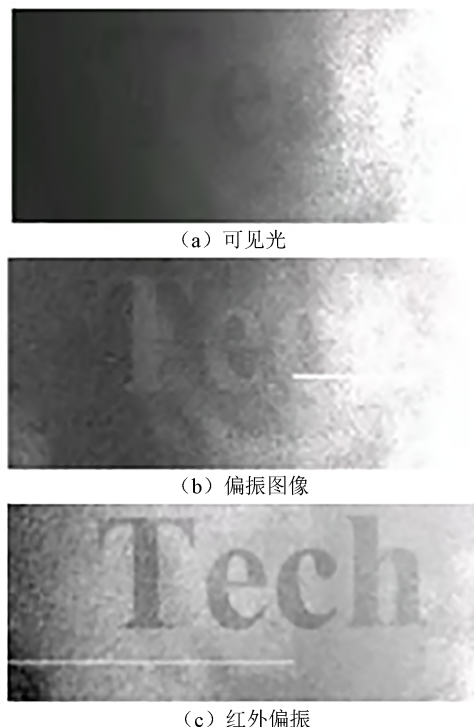


图7 烟雾中成像效果对比^[33]

Fig. 7 Images in smoke obtained by different methods^[33]

以色列 Namer 等^[34]在雾霾天气条件下开展了偏振成像实验研究,通过分析大气散射模型,指出雾霾等散射介质会对光的传输以及成像造成一定程度的影响,导致成像效果的对比度、清晰度降低以及成像的作用距离缩短。利用大气光的偏振度以及无穷远大气光强的计算,结合偏振成像实验指出,偏振成像能够减弱甚至过滤这些散射介质的不良影响,从而改善成像效果,提高成像的作用距离。

大连交通大学赵永峰等^[35]利用分焦平面偏振成像系统在不同浑浊水质条件下进行了成像实验,使用混合增强的水下降质偏振图像清晰化的方法对偏振图像进行处理。结果表明,处理后的图像对比度和饱和度较高,目标的形状特征与细节信息清晰可见。如图8所示。

3.3 偏振导航

偏振导航基于大气层中存在的偏振信息,是一种自主性强、没有累积误差以及实时性好的新型导航方式。太阳光在进入大气层之前是没有偏振的自然光,进入大气层后由于大气层中的分子、气溶胶粒子以及固体颗粒对太阳光的散射作用,改变了光的偏振状态,从而产生天空偏振光。自然界中的很多动物可以感受到偏振光,它们可以

通过偏振进行导航、捕猎等行为。例如,蜜蜂的复眼能够直接探测到线偏振光并利用偏振信息进行导航^[36]。研究人员借助于蜜蜂导航的特点,通过测量晴朗、多云等天气情况下天空光偏振角以及偏振度等偏振模式^[37],为偏振导航的实现提供了坚实基础。

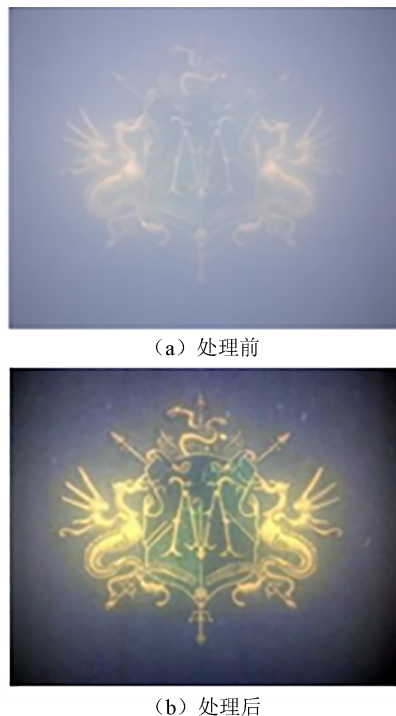


图8 浑浊水质中成像的增强效果对比^[35]

Fig. 8 Images through turbid water before and after enhancement by polarization imaging^[35]

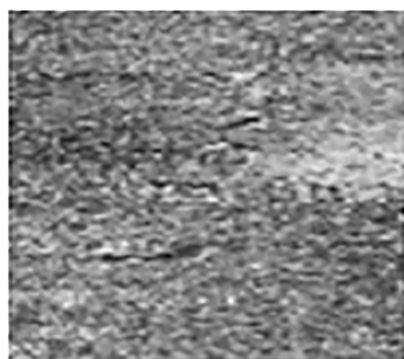
基于此,国内外相关研究学者对天空光偏振模式开展了大量的观测和研究。Hegedüs 等^[38]利用全天空成像偏振仪,在北冰洋、匈牙利测量了阴天天气情况下的天空光偏振模式,偏振度较低,最大值出现在地平线附近,处于0.04和0.16之间;同年,该研究团队测量了烟雾弥漫条件下的天空光偏振模式^[39],由于烟雾颗粒的散射作用,天空光偏振度不超过0.14,整个天空光偏振度平均值为0.08。在国内,闰皓等^[40]研究了大气偏振度与PM2.5颗粒浓度的关系,研究指出,随着颗粒浓度的升高,大气偏振度以指数形式衰减。崔岩团队^[41]研究了气溶胶浓度的变化对天空光偏振模式分布的影响,随着气溶胶浓度的提高,偏振度减小,但偏振方位角几乎不受影响。

目前,虽然惯性导航、星光导航、卫星导航等技术取得了快速的发展,但是面对高精度的实战要求、强干扰的复杂环境,无论从导航技术本

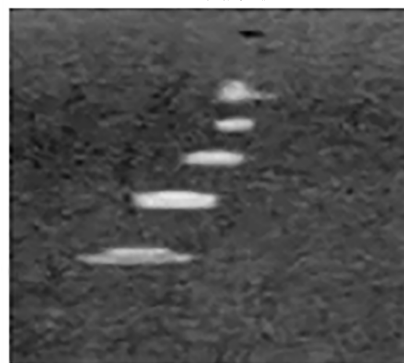
身的长远发展考虑, 还是从强军兴军的需求出发, 研究新型、适应性强的导航技术是非常必要的。偏振导航作为一种无源的、被动的新型自主导航方法, 开展这方面研究, 研发新型组合导航技术对建立高精度的自主导航系统有着十分重要的意义, 对于车辆、船舶、飞机、导弹等领域的应用具有广泛的前景^[42]。

3.4 地雷探测

瑞典国防机构研究所的科学家^[43]对地雷的探测进行了研究, 该团队搭建了中波段 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、长波段 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 红外探测系统。图9为地雷的非偏振(传统)成像和红外偏振成像对比, 可以看出, 与传统的无偏振红外探测系统相比, 红外偏振探测系统能够更有效地探测与识别目标, 在遮蔽目标探测方面显示出更大的优势^[44-45]。



(a) 红外非偏振



(b) 红外偏振

图9 红外偏振、非偏振成像效果对比

Fig. 9 Images obtained by infrared polarization imaging and non-polarization imaging

英国国防科技实验室利用 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中红外波段, 搭建了焦平面偏振探测系统, 进行了一系列的扫雷实验^[46], 通过红外图像与偏振图像的融合处理, 显著提高了成像系统的探测识别能力, 进一步证实了红外偏振探测成像在对地雷成像效果方面明显优于非偏振红外探测技术。

4 展望

(1) 偏振探测技术涉及光波的理论研究、光波的调制与传播、探测器信息的接收与编码、图像处理等多个方面, 所以, 偏振探测的一个重要问题就是处理庞大的信息量。鉴于此, 提高偏振探测系统的实时性是未来的一个重要发展方向。

(2) 偏振探测本身也具有局限性, 在有些条件下, 比如在天气晴朗的条件下, 偏振探测成像效果不如可见光成像效果。所以, 开展偏振探测技术的适用条件研究, 更好地扬长避短, 是一个值得研究的课题。

(3) 随着人工智能的发展, 以及深度学习在偏振成像中的应用, 使用智能化的偏振探测成像技术拍摄更加清晰的图像也日渐成为热门的研究领域。

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及应用研究[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] JONES R C. A new calculus for the treatment of optical systems: Description and discussion of the calculus[J]. Journal of the Optical Society of America, 1941, 31(7): 488-493.
- [4] STOKES G G. On the change of refrangibility of light[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1852, 142: 463-562.
- [5] 何启浩. 斯托克斯矢量和穆勒矩阵在偏振光中的应用研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2018, 44(5): 526-529.
HE Q H. Application of Stokes vector and Mueller matrix in polarized light[J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2018, 44(5): 526-529.
- [6] BROSSEAU C. Fundamentals of polarized light:

- A Statistical Optics Approach[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998: 210-211.
- [7] 戴万田, 王锦津, 谢欣, 等. 偏振探测技术的应用需求发展研究[J]. 光电技术应用, 2023, 38(5): 6-12, 82.
- DAI W T, WANG J J, XIE X, et al. Requirements and development of polarization detection technology[J]. Electro-Optic Technology Application, 2023, 38(5): 6-12, 82.
- [8] 罗海波, 张俊超, 盖兴琴, 等. 偏振成像技术的发展现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 109-118.
- LUO H B, ZHANG J C, GAI X Q, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 109-118.
- [9] 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.
- [10] GOLOUB P, CHEPFER H, HERMAN M, et al. Use of polarization for cloud study[C]//Proceeding of the Optical Engineering and Instrumentation. Washington, D. C., USA: SPIE, 1997, 3121: 330-341.
- [11] BRÉON F M, DESCHAMPS P Y. Optical and physical parameter retrieval from POLDER measurements over the ocean using an analytical model[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 43(2): 193-207.
- [12] 莫春和, 段锦, 付强, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(下)[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 265-270.
- MO C H, DUAN J, FU Q, et al. Review of polarization imaging technology for international military application (II)[J]. Infrared Technology, 2014, 36(4): 265-270.
- [13] 王洪亮. 中波红外光谱偏振成像技术及系统研究[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), 2018: 62-66.
- WANG H L. Study on polarization imaging technology and system of medium-wave infrared spectropolarimetric imaging technology[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018: 62-66.
- [14] 孙晓兵, 乔延利, 洪津. 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.
- SUN X B, QIAO Y L, HONG J. 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.
- [15] AZZAM R M A, DE A. Optimal beam splitters for the division-of-amplitude photopolarimeter[J]. Journal of the Optical Society of America, A: Optics, Image Science, and Vision, 2003, 20(5): 955-958.
- [16] EI-SABA A M, AZZAM R M A. Design and analysis of a beam splitter for the equipartition of infrared input power[C]//SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. Washington, D. C., USA: SPIE, 1999, 3754: 336-345.
- [17] AZZAM R M A, SUDRADJAT F F. Single-layer-coated beam splitters for the division-of-amplitude photopolarimeter[J]. Applied Optics, 2005, 44(2): 190-196.
- [18] 程敏熙, 何振江, 黄佐华. 分振幅法偏振光斯托克斯参量测量系统[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 93-97.
- CHENG M X, HE Z J, HUANG Z H. Polarimeter system of stokes parameters based on division-of-amplitude[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 93-97.
- [19] 殷玉龙, 孙晓兵, 宋茂新, 等. 分振幅型全Stokes同时偏振成像系统波片相位延迟误差分析[J]. 物理学报, 2019, 68(2): 102-114.
- YIN Y L, SUN X B, SONG M X, et al. Phase delay error analysis of wave plate of division-of-amplitude full Stokes simultaneous polarization imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(2): 102-114.
- [20] 李松, 张然, 陈永台, 等. 分振幅偏振成像相机标定方法研究[J]. 光子学报, 2020, 49(7): 141-148.
- LI S, ZHANG R, CHEN Y T, et al. Calibration methods of amplitude-division polarization imaging camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(7): 141-148.
- [21] 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 Optics, 2018, 11(1): 92-99.
- [22] 刘尊辈, 蔡毅, 刘福平, 等. 分孔径紫外多波段成像光学系统设计[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1476-1485.
- LIU Z B, CAI Y, LIU F P, et al. Aperture-divided ultraviolet multiband imaging optical system[J]. Chinese Optics, 2021, 14(6): 1476-1485.
- [23] NORDIN G P, MEIER J T, DEGUZMAN P C, et al. Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1999, 16(5): 1168-1174.
- [24] ZHANG Z G, DONG F L, CHENG T, et al. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry[J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(10): 105002.
- [25] 李佳昕, 白廷柱, 崔志刚, 等. 像素偏振成像系统的耦合实现[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 119-125.
- LI J X, BAI T Z, CUI Z G, et al. Coupling implementation of pixel polarization imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(9): 119-125.
- [26] VAN DER LAAN J D, SCRYMGEOUR D A, KEMME S A, et al. Detection range enhancement using circularly polarized light in scattering environments for infrared wavelengths[J]. Applied Optics, 2015, 54(9): 2266-2274.
- [27] HARCHANKO J S, CHENAULT D B. Water-surface object detection and classification using imaging polarimetry[C]//Optics and Photonics 2005. Washington, D. C., USA: SPIE, 2005, 5888: 588815.
- [28] 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.
- [29] RATLIFF B M, LEMASTER D A, MACK R T, et al. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data[C]//SPIE Optical Engineering and Applications. Washington, D. C., USA: SPIE, 2011, 8160: 816002.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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: 115-123.
- HE H C. Study on optical system of simultaneous and complete polarization imaging[D]. Suzhou: Soochow University, 2014: 115-123.
- [33] CHENAULT D B, PEZZANITI J L. Polarization imaging through scattering media[C]// International Symposium on Optical Science and Technology. Washington, D. C., USA: SPIE, 2000, 4133: 124-133.
- [34] NAMER E, SHWARTZ S, SCHECHNER Y Y. Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 472-493.
- [35] 赵永峰. 水下分焦平面偏振成像系统及图像处理方法[D]. 大连: 大连交通大学, 2022: 60-62.
- ZHAO Y F. Underwater division of focal plane polarization imaging system and image processing methods[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2022: 60-62.
- [36] ROSSEL S, WEHNER R, et al. Polarization vision in bees[J]. Nature, 1986, 323: 128-131.
- [37] MA T, HU X P, ZHANG L L, et al. An evaluation of skylight polarization patterns for navigation[J]. Sensors, 2015, 15(3): 5895-5913.
- [38] HEGEDÜS R, AKESSON S, GÁBOR H, et al. Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies[J]. Journal of the Optical Society of America, A: Optics Image Science & Vision, 2007, 24(8): 2347-2403.
- [39] HEGEDÜS R, AKESSON S, GÁBOR H, et al. Anomalous celestial polarization caused by forest fire smoke: why do some insects become visually disoriented under smoky skies[J]. Applied Optics, 2007, 46(14): 2717-2726.
- [40] 闫皓, 梁建琦, 唐军. 大气偏振度 PM_{2.5} 粒子浓度特性[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(13): 107-114.
- YAN H, LIANG J Q, TANG J. The character-

- istics of atmospheric polarization and PM2.5 particle concentration[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(13): 107-114.
- [41] 崔岩, 张西光, 周鑫昌, 等. 气溶胶对天空光偏振分布的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 9-16. .
CUI Y, ZHANG X G, ZHOU X C, et al. Effect of aerosol on polarization distribution of sky light[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 9-16.
- [42] 周军, 刘莹莹. 基于自然偏振光的自主导航新方法研究进展[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 409-414.
ZHOU J, LIU Y Y. Research progress of polarized skylight navigation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 409-414.
- [43] 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]//Proceedings of SPIE. Washington, D. C., USA: SPIE, 2002, 4481: 257-269.
- [44] WANG X, XIA R Q, JIN W Q, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014 (10): 3175-3182.
- [45] 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.
- [46] 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]//Defense and Security Symposium. Washington, D. C., USA: SPIE, 2007, 6553: 655314.