

文章编号 1004-924X(2024)14-2141-25

高光谱偏振技术的研究进展及展望

颜昌翔^{1,3*}, 张源^{1,2}, 泊建¹, 鞠学平¹, 于博^{1,2}, 李先峰^{1,4}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

4. 长光禹辰信息技术与装备(青岛)有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 高光谱偏振技术是一种融合了高光谱和偏振成像的新兴技术, 其在多个科学领域成为研究热点。本文旨在全面综述高光谱偏振技术的研究进展, 并展望其未来发展方向。首先介绍了高光谱偏振技术的基本原理, 解释了高光谱和偏振成像相结合的优势。然后, 根据不同的设计原理介绍了偏振光谱仪器的分类。接下来详细讨论了该技术在遥感、医学、环境监测、地球科学和材料科学等领域的广泛应用。通过对不同领域的案例研究进行梳理, 展示了高光谱偏振技术在提供更为丰富、精确信息方面的独特优势。最后对高光谱偏振技术目前面临的挑战进行了分析, 包括仪器设备的精密性、数据处理的复杂性以及与其他传感设备的有效融合的问题。针对这些挑战, 探讨了未来技术发展方向。未来的研究应着重于提升该技术的高光谱和时间分辨率, 提高数据处理和分析准确性, 扩展不同应用场景的适用性, 以更好地满足不同领域的需求。综合而言, 高光谱偏振技术作为一种全面、高效的信息获取手段, 在多个领域取得了显著的研究进展。通过优化高光谱偏振技术满足更广泛的应用领域, 高光谱偏振技术有望成为未来科学研究和实际应用中的重要工具。

关键词: 高光谱; 高光谱偏振; 成像技术; 偏振光谱仪

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243214.2141

Development and prospect of hyperspectral polarization

YAN Changxiang^{1,3*}, ZHANG Yuan^{1,2}, BO Jian¹, JU Xueping¹, YU Bo^{1,2}, LI Xianfeng^{1,4}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Center of Materials Science and Optoelectrics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Ysense Information Technology and Equipment (Qingdao) Inc., Qingdao 266000, China)

* Corresponding author, E-mail: yanxc0128@126.com

Abstract: Hyperspectral polarization is a new technology that combines hyperspectral and polarization imaging. It has become a research hotspot in many scientific fields. The research progress of hyperspectral polarization technology is reviewed, and its future development direction is prospected. In this paper, we

收稿日期: 2024-04-16; 修订日期: 2024-05-10.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目资助 (No. 20230201036GX); 青岛产业领军人才工程资助; 泰山产业领军人才工程资助

first introduced the basic principle of hyperspectral polarization technology, and explained the advantages of combining hyperspectral and polarization imaging. Then, the classification of polarization spectrum instruments was introduced according to different design principles. Next, the application of this technology in remote sensing, medicine, environmental monitoring, earth science and material science was discussed in detail. Through the review of case studied in different fields, the unique advantages of hyperspectral polarization technology in providing richer and more accurate information were demonstrated. Finally, the current challenges of hyperspectral polarization technology were analyzed, including the precision of instruments, the complexity of data processing, and the problem of effective integration with other sensing devices. In view of these challenges, the future technology development direction was discussed. Future research should focus on improving the hyperspectral and temporal resolution of the technology, improving the accuracy of data processing and analysis, and expanding the applicability of different application scenarios to better meet the needs of different fields. In summary, hyperspectral polarization technology, as a comprehensive and efficient means of information acquisition, had made remarkable research progress in many fields. By optimizing hyperspectral polarization technology to meet a wider range of applications, hyperspectral polarization technology was expected to become an important tool in future scientific research and practical applications.

Key words: hyperspectral; hyperspectral polarization; imaging technology; polarization spectrometer

1 引言

高光谱偏振技术作为一种综合了高光谱和偏振成像的先进技术,近年来在多个科学领域引起了广泛关注。通过结合高光谱的光谱信息和偏振成像的极化特性,高光谱偏振技术为我们提供了更加全面、深入的材料和场景特性信息^[1-2]。其应用领域涵盖了遥感、医学、生物、海洋和军事等多个领域^[3],为科学研究和实际应用提供了丰富的数据基础。

随着科学技术的飞速发展,高光谱偏振技术在过去的几年里取得了显著的研究进展。从最初在天文学中的应用^[4-5],到如今在医学影像学、环境监测和农业领域的广泛应用高光谱偏振技术不断拓展其应用范围^[6-7]。学者们通过不断创新,改进仪器设备和数据处理方法,使这一技术更加灵活、精确,为科学研究和实际应用提供了更多可能性。

本文旨在对高光谱偏振技术的研究进展进行全面综述,并展望未来可能的发展方向。首先,我们将回顾高光谱偏振技术的基本原理和发展历程,然后详细探讨其在不同领域的应用。最后,我们将对当前技术面临的挑战和未来可能的突破进行讨论,以期对相关研究提供有益的参考

和启示。通过深入了解高光谱偏振技术的最新研究动态,我们有望更好地理解其在不同领域的潜在价值,推动该技术在科学研究和实际应用中的进一步发展。

本文安排如下:第一部分为引言;第二部分介绍高光谱偏振成像技术的发展以及基本原理;第三部分介绍高光谱偏振于其成像仪的发展现状;第四部分结合仪器工作原理介绍了高光谱偏振技术的典型应用;第五部分结合高光谱偏振技术所面临的问题,对现有方法进行分析比较;第六部分总结特点,发掘该技术未来的发展方向和趋势;第七部分为结论。

2 高光谱偏振成像技术

高光谱偏振成像技术是一种结合了光谱学与偏振学的技术,它通过分析物质对不同波长光的吸收特性及偏振状态的变化,实现了更为精细的物质识别与分析。这项技术不仅继承了传统吸收光谱技术的能力,而且通过偏振信息的分析,进一步提高物质识别的准确性和对其特性的检测能力^[8]。本章将探讨高光谱偏振技术的发展历程、基本原理及其在科学研究和实际应用中的分类与作用。

2.1 高光谱成像技术的原理

高光谱成像技术在 20 世纪 80 年代的出现,使得光学遥感进入了一个新的阶段。高光谱遥感能够获取地表物体上百个连续谱段的信息,提供丰富的光谱信息来增强对地物的区分能力^[9-10]。这种技术通过收集每个像素处的光谱信息,生成一个三维数据集,称为超立方体,实现了“图谱合一”^[11]。高光谱成像技术通过其灵活的数据描述方式,包括图像、光谱和特征三种模型,提供了一种全新的研究手段^[12-13]。高光谱成像的光谱带更广、分辨率更高,但同时也带来了信息过度冗余的问题,使得数据处理变得更加复杂^[14]。

高光谱成像系统通常由光学成像设备、光谱仪和探测器组成。光从目标物体反射或发射出来,通过光学成像设备聚焦后进入光谱仪。光谱仪将光分解为多个波长,并由探测器记录每个波长的光强。这样,每个像素对应一个光谱曲线,包含了目标物体在多个波长下的光谱信息。通过分析这些光谱信息,可以识别和区分不同的物质成分^[15]。

2.2 偏振成像技术的原理

偏振成像技术利用光的偏振特性,通过测量和分析光的偏振状态来获取目标物的信息。光波是横波,其电场矢量在传播方向垂直的平面内振动。自然光通常是非偏振光,但经过散射、反射等过程后会产生部分或完全偏振光。偏振成像技术通过测量这种偏振状态的变化来获取目标物的特征^[16]。

偏振成像系统通常由偏振滤光片、成像设备和探测器组成。偏振滤光片可以选择性地透过特定偏振方向的光,通过旋转或使用多个固定偏振方向的滤光片,可以获取不同偏振状态下的图像。这些图像可以用 Stokes 矢量来表示偏振特征参数,从而丰富了对目标物的信息理解,并提升了检测与识别的效率。偏振成像技术是将偏振技术和成像技术融合的技术,其既能够获取目标的二维空间信息,又能测得目标的斯托克斯参量 $S = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$,通过斯托克斯参量进而求出偏振度 DOP 和偏振角 AOP,其表达式如下所示^[17]:

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (1)$$

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (2)$$

偏振成像在多个领域展现出了其优势,如在伪装目标识别、弱信号目标突出以及大气干扰环境下的远距离探测等方面。

2.3 高光谱偏振成像技术的结合

将光谱成像与偏振成像融合,就形成了高光谱偏振成像技术。这种结合的基本原理在于同时获取目标物的光谱信息和偏振信息,高光谱偏振成像系统配备了高光谱相机和偏振滤光片。高光谱相机负责捕捉目标物在不同波长下的光谱信息,而偏振滤光片则用于获取光的不同偏振状态。通过同步获取每个像素的光谱和偏振数据,形成一个包含光谱和偏振信息的多维数据集。这种技术在可见光至近红外波段中,通过分析物质反射的太阳光的偏振状态变化,捕获地表物质的特征信息^[18]。高光谱偏振成像技术能够同时获取目标的空间强度、光谱和偏振信息,构建起数据超立方体,如图 1 所示^[19]为我们提供了一种全新的研究手段。

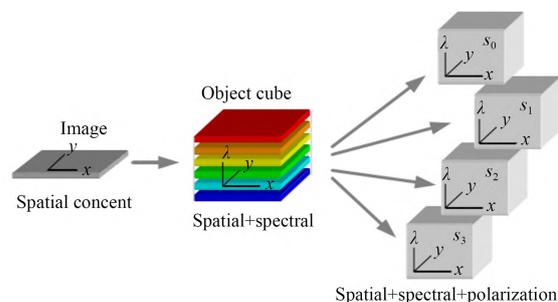


图 1 偏振光谱数据超立方体示意图

Fig. 1 Hypercube diagram of polarization spectral data

3 高光谱偏振成像仪发展现状

目前,国内外对高光谱偏振成像仪的研究逐步深入,出现了多种基于不同原理的探测仪器,预示着这一技术在未来的应用前景将更加广阔。实现高光谱偏振成像可以在偏振成像中加入分光器件,实现对不同光谱的测量,根据不同的设计原理,可以分为色散型、干涉型、滤光片型、计算机层析型等^[20-22]。基于色散的光谱偏振成像技

术是在色散光谱仪中插入偏振探测模块,实现目标的偏振、光谱探测,该技术具有高光谱分辨率且能够同时获取光谱和偏振信息的优点;基于干涉原理的光谱偏振成像技术通过使用干涉仪对入射光进行分波长处理,实现对各个波长分量的偏振状态进行探测。该技术具有高灵敏度的优点,特别适合于进行精确度要求较高的偏振测量任务;滤光片型的光谱偏振成像技术是通过滤光片选择特定波长的光,然后通过偏振元件来测量所选波长光的偏振状态。这种方法具有简单实用的特点,适用于检测特定波长和特定偏振状态的光。特定的偏振状态是指光波振动方向的具体取向,如线偏振、圆偏振或椭圆偏振。其中最常见的是有基于声光可调谐滤光片(Acousto-optic Tunable Filter, AOTF),基于液晶可调谐滤光片(Liquid Crystal Tunable Filters, LCTF)和基于液晶相位延迟器(Liquid-Crystal Variable Retardation, LCVR)^[23];计算层析光谱偏振成像是利用光学层析、光谱分析和偏振分析,通过数学计算将采集到的多波长、多偏振状态的数据转化为样品的空间结构和光学性质信息,这种方法不仅提供了高光谱分辨率的图像,还能够揭示样品内部的微观结构和化学组成。

美国重飞行器研究公司设计了一种快照式光谱偏振成像仪,其原理图如图 2 所示^[24]。该方案通过在色散光谱仪中加入偏振调制模块,将斯托克斯参数调制到光谱信号中,实现了一次成像获取目标的一维空间信息和调制有偏振信息的光谱信号,并通过扫描获取另一维空间信息。这一设计能够一次测量获取全部斯托克斯参数,具有良好的实时性,显著提升了光谱偏振成像的效率和精度。

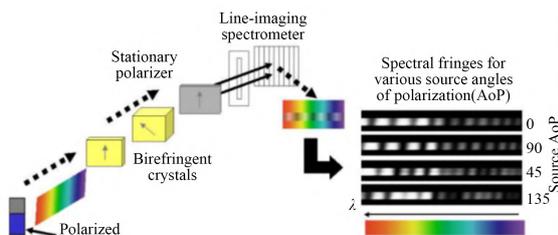


图 2 基于色散光谱仪的光谱偏振成像原理图

Fig. 2 Schematic diagram of spectral polarization imaging based on dispersion spectrometer

西安交通大学的张淳民等^[25]在 2016 年提出了一种高通量静态通道干涉成像偏振光谱仪(Channel Interferometric Imaging Spectroscopy Polarimeter, CIISP),其设计基于通道偏振测量技术以及不存在内部移动元件的 Savart 偏振镜。该方案有效解决通道光谱偏振技术(Channeled Spectropolarimetry, CSP)中存在的偏振光谱信息的混叠效应^[26],通过采用光阑替代传统的狭缝设计,显著提升了光谱仪的光通量,且用 Savart 平板作为干涉器件具有易于装调、系统紧凑的特点,其装置图如图 3 所示。

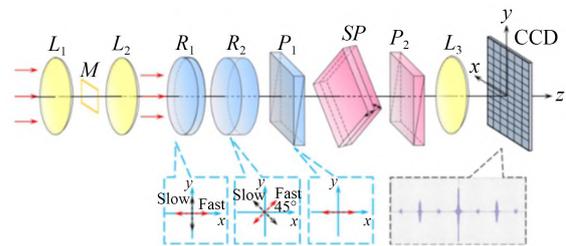


图 3 基于干涉的光谱偏振成像原理图

Fig. 3 Interference based spectral polarization imaging schematic

声光可调谐滤光片(AOTF)是一种基于声光衍射原理制成的可调谐滤光片,能够将分离出偏振方向相互垂直的两束线偏振光。1997年,日本国家宇航实验室研制了基于 AOTF 的光谱偏振成像仪,如图 4(a)所示,其采用两个 CCD 同时接收水平和垂直偏振的图像。这标志着在光谱偏振成像领域取得了重要突破^[27]。卡内基梅隆大学在 1998 年设计了基于 AOTF 和液晶可调谐相位延迟器(LCVR)的全电调谐的光谱偏振成像仪,如图 4(b)所示。这一创新使得光谱范围扩展至 500~1 000 nm,并在光谱成像技术中引入了更高的灵活性^[28]。另外,美国陆军研究实验室的研究团队 Neelam Gupta 等研制了基于 AOTF 和两个 LCVR 的光谱偏振成像仪,实现了完全斯托克斯光谱探测,如图 4(c)所示。这一成果不仅提升了光谱偏振成像技术的分辨率和准确性,还为军事和安全领域的应用提供了重要支持^[29]。

尽管这些仪器的构型在业界已经较为熟知,但其在实际应用中取得的成果仍然值得关注。此外,随着技术的发展,近年来出现了更加先进

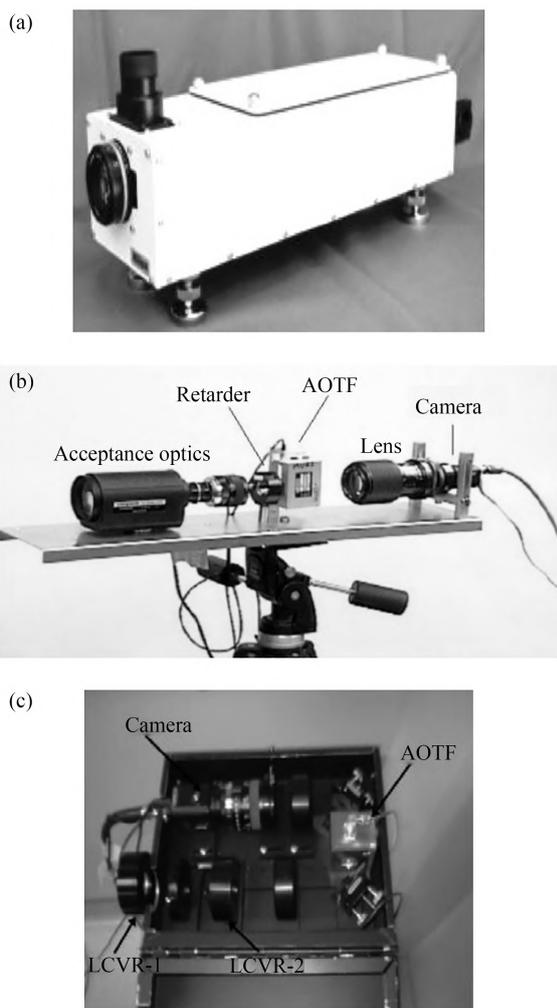


图 4 基于 AOTF 的光谱偏振成像装置

Fig.4 Spectral polarization imaging device based on AOTF

和改进的光谱偏振成像仪器,例如基于新材料或新技术的仪器,以及针对特定应用场景进行优化设计的仪器。

北京航空航天大学的 Zhang 等^[30]提出了一种基于声光可调滤波器(AOTF)并采用偏振多路复用设计的创新型高光谱偏振成像系统,显著提高了光谱成像的通量和信噪比。原理图如图 5 所示,其精妙之处在于,通过同时收集 AOTF 产生的正负一阶光,消除了传统设计中必需的交叉偏振器,使得系统通量提高了两倍以上。此外,该系统还提出了一种优化策略,针对偏振多路复用应用中的 AOTF 设备,优化了晶体几何参数,解决了传统 AOTF 设备在偏振多路复用时可能出现的光谱不一致问题。实验结果验证了该设计

在提升成像质量、简化系统结构以及优化光谱响应方面的有效性,为光谱成像技术在目标检测等领域的应用提供了重要贡献。

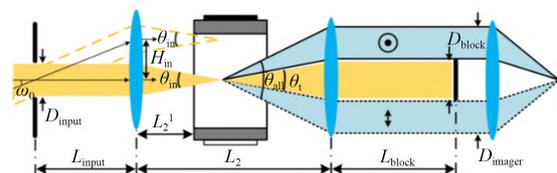


图 5 所提出的 AOTF 光谱成像系统的结构图

Fig.5 Structure diagram of the proposed AOTF spectral imaging system

液晶可调谐滤光片(LCTF)具有调谐工作波段内任意波长的本领,同时具有线偏振器的特点。基于此方法的光谱成像仪具有采集的数据形式简单,易于处理的特点。意大利学者 Duggin 等^[31]于 1999 年设计了基于 LCTF 的光谱偏振成像仪,其示意图如图 6(a)所示。该仪器通过在相机前放置 LCTF 和旋转薄膜偏振片,由于偏振片需要转动,因此实时性不好,且系统调焦不便,但该系统研发成本低、周期短。日本国家宇航实验室于 2001 年和 2003 年分别研制了基于 LCTF 的可见光谱段(400~720 nm)和近红外光谱段(650~1 100 nm)的光谱偏振成像仪,其实物图如图 6(b)所示。该仪器的光学系统由物镜、两个中继镜和 LCTF 组成,由于获取光谱和偏振信息时需要扫描,且偏振扫描过程还需要机械运动部件,因此实时性和稳定性都受到限制^[32-33]。在 2006 年国内西北工业大学将 LCTF 和可见光相机结合设计了光谱偏振成像仪,其实物图如图 6(c)所示,通过旋转 LCTF 获取不同偏振方向的图像^[34]。

鉴于历史上这些技术的广泛应用和技术局限,当前研究的焦点已转向如何提高这些设备的实时性和应用的灵活性。近年来,有关研究团队已经在 LCTF 技术上取得了显著进展,包括开发无需机械部件的电控偏振调制方法,极大地提升了系统的响应速度和操作简便性。此外,新型光谱偏振成像仪正在针对特定应用,如高精度遥感、生物组织成像及光学监测,进行优化。这些进展不仅提升了设备性能,也拓展了 LCTF 技术的应用领域。

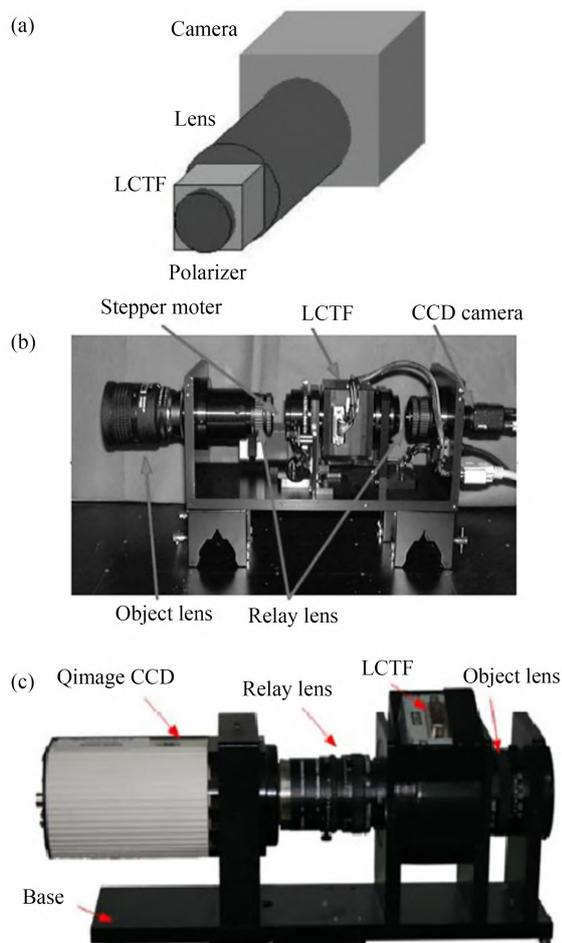


图 6 基于 LCTF 的光谱偏振成像装置

Fig. 6 Spectral polarization imaging device based on LCTF

汕头大学的 Chen 等^[35]提出基于 Mach-Zehnder 结构的液晶可调滤波器和液晶可变延迟器的高光谱偏振成像方法,显著提升了光学系统的透射率和信噪比(SNR)。图 7 为所提出的 AOTF 光谱成像系统的结构图,该方法巧妙地利用了偏振分束器(PBS)同时收集入射光的两个偏振分量,与传统的单通道 LCTF 相比,平均像素强度(MPI)提高了 93.48%,并且通过同时使用 S 和 P 偏振通道,图像的 SNR 增加了 2.59 dB。此外,该系统能够精确地恢复目标场景的偏振信息,具有在宽带宽内高光学效率和全光谱获取偏振信息的潜力,这使得它在低光照条件下获取目标的图像、光谱和偏振信息方面成为一种可行且高效的工具。

基于液晶相位延迟器(LCVR)的高光谱成

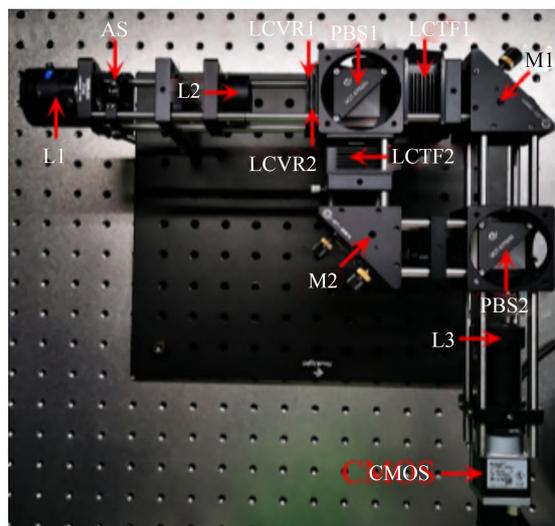


图 7 所提出的 AOTF 光谱成像系统的结构图

Fig. 7 Structure diagram of the proposed AOTF spectral imaging system.

像系统的基本原理是通过多次快速改变 LCVR 两端的电压去调节光轴的指向,从而实现偏振维度调制。最近,液晶可变延迟器(LCVR)技术在光谱偏振成像领域的应用已经取得了显著的技术进展。得克萨斯大学的 Zhou 等^[36]于 2020 年自制出在可见光谱波段工作偏振高光谱显微镜,如图 8(a)所示。该系统采用两个偏振片和两个 LCVR 完成全斯托克斯偏振成像,能生成斯托克斯矢量的所有四个分量,从而全面定义透射光的强度和偏振特性。这种设备在生物医学成像和材料科学中具有重要应用,能提供关于细胞结构和材料应力的详细信息。2021 年西班牙马德里国家航空技术研究所的 Angulo 等^[37]研制用于小型卫星的基于液晶的高光谱相机,器件装置的方案如图 8(b)所示。该高光谱相机主要由两个精密配置的线性偏振器和一个适用于航空应用的液晶显示器,以及一台单色互补性的金属氧化物半导体(CMOS)照相设备所构成。

通过技术改进和针对特定应用的设计优化,基于 LCVR 的设备不仅克服了以往的局限性,还为多个领域提供了独特的解决方案。未来的研究可能会继续探索这些设备在其他复杂环境中的应用潜力,如极端气候条件或高辐射区域的应用。

西北农林科技大学的 Xu 等^[38]提出的基于液晶可变延迟器(LCVR)的压缩感知高光谱偏振

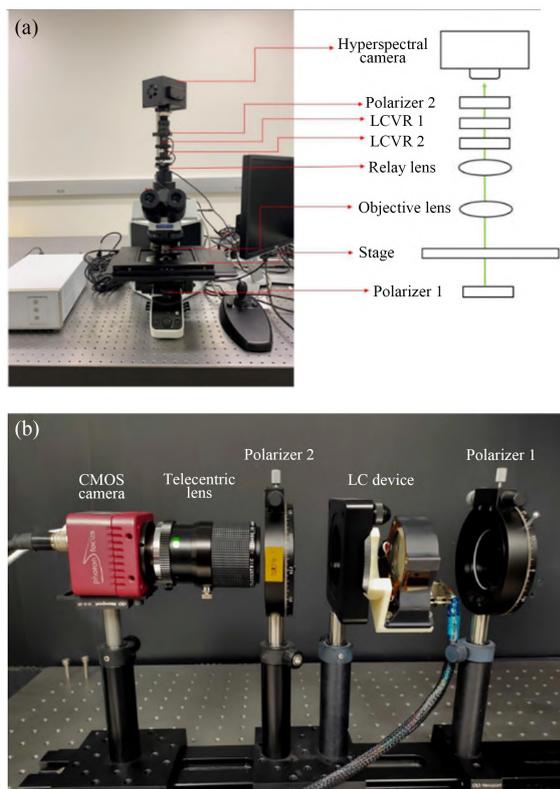


图 8 基于 LCVR 的光谱偏振成像装置

Fig.8 Spectral polarization imaging device based on LCVR

成像技术,通过同时在偏振和高光谱维度进行编码和压缩,显著提高了系统的压缩比并保持了优越的性能。其成像装置如图 9,该技术利用 LCVR 的高折射率、低电压需求、无机械运动 and 良好稳定性等优势,实现了宽调谐范围和高调谐精度,有效地在光谱维度进行编码。实验结果表明,与传统的快速压缩通道光谱偏振测量技术相比,该技术能够在仅有 154 次观测数据的情况下,突破压缩比限制,重建斯托克斯矢量,并保持高重建精度。此外,该技术通过 Legendre 多项式基和系数来表示输入的斯托克斯矢量,并通过 L1-magic 优化算法逆向解码压缩图像,实现高光谱偏振图像的高精度重建,展示了在压缩高光谱偏振成像领域的创新性和应用潜力。

1999 年亚利桑那光科学中心在计算层析光谱仪(CTIS)的物镜前加入旋转偏振片轮,能够获取目标的光谱偏振信息,其实物图如图 10(a)所示^[39]。该仪器结构简单,可以凝视成像,并且具有较高的信噪比,但实时性不佳。此后,该研究中心尝试在 CTIS 的色散元件前加入偏振分析

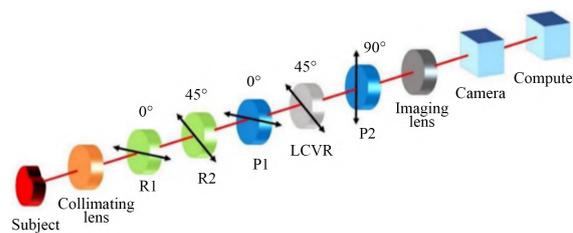


图 9 基于 LCVR 的压缩感知超光谱偏振成像系统成像装置

Fig.9 Experimental setup of a compressed sensing hyper-spectral polarization imaging system based on LCVR.

组件实现光谱偏振测量,基于此原理研制的实物图如图 10(b)所示^[40]。加入的偏振分析组件由一个四象限偏振器和一个四棱锥棱镜组成,可使不同偏振态的光谱在空间上分离,从而实现快照式测量。

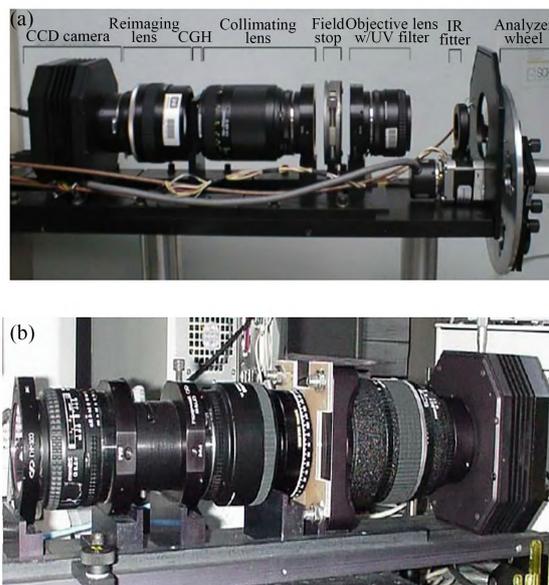


图 10 计算层析光谱偏振成像装置

Fig.10 Computed tomography spectral polarization imaging device

中国科学院安徽光学精密机械研究所开发了一种名为 DPC(定向偏振相机)的偏振成像仪器^[41]。如图 11 所示^[42],该设备的核心功能是利用气溶胶反射光的强度和偏振信息来对气溶胶特性进行推断。DPC 偏振成像仪共设置了 6 个波段获取对地观测数据,其中 3 个波段是偏振的,3 个非偏。其中 495 nm,665 nm 和 865 nm 三个波

段具备了偏振测量的能力。这种设计类似于法国空间局和其他国际合作伙伴共同开发的偏振传感器 POLDER (Polarization and Directionality of Earth's Reflectances), POLDER 是一种遥感技术,主要用于研究地球表面反射光的特性,包括光的偏振状态和方向性。通过测量 0° , 60° 和 120° 三个不同方向上的偏振光强度来执行偏振测量。通过这些波段收集到的气溶胶数据,可以分析气溶胶的浓度、组成和分布等特性,从而更准确地了解和预测大气环境的变化。

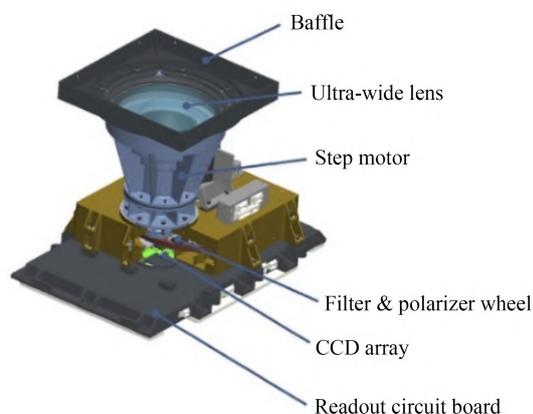


图 11 多角度偏振探测仪装置

Fig. 11 Multi-angle polarization detector device

由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的颜昌翔和张军强等研究人员开发的多波段云和气溶胶探测仪 (Cloud and Aerosol Polarization Imager, CAPI), 运用分振幅的技术手段来测量偏振参数, 如图 12 所示^[43]。该仪器共有六个镜头, 覆盖了从可见光到近红外的五个波段, 具体波长为 380 nm, 670 nm, 870 nm, 1 375 nm 和 1 640 nm, 并设计了九个独立的通道。在这些通道中, 670 nm 和 1 640 nm 波段各配备了三个用于偏振探测的通道。该研究团队也在调制型偏振测量设备的开发方面进行了深入研究^[44]。

为了提升大气气溶胶和云层特性的观测能力, 欧洲航天局 (ESA) 开发了一款名为 3MI (Multi-viewing, Multi-channel, Multi-polarisation imaging mission) 的先进遥感仪器。如图 13 所示, 3MI 由两套共孔径的大视场偏振成像设备组成, 它们的光学镜头、滤光片转轮和面阵探测器共同构成了数据处理和定量研究的基础, 不同

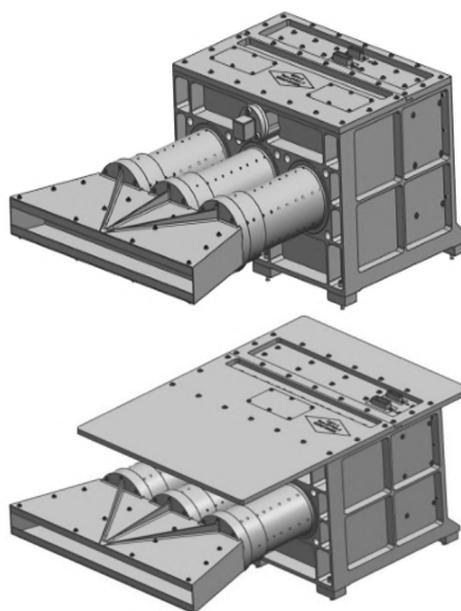


图 12 CAPI 的可见近红外(上)和短波红外(下)模型
Fig. 12 Visible near-infrared (top) and shortwave infrared (bottom) models of CAPI

之处在于它们的探测器分别针对近红外和短波红外波段。具备 12 个光谱通道: 3 个非偏振通道, 6 个可见光至近红外偏振通道, 以及 3 个短波红外偏振通道。该仪器在空间分辨率(星下点 4 km)和视场(114°)方面均有显著提升, 进而提高了气溶胶特性反演的准确性^[45-49]。

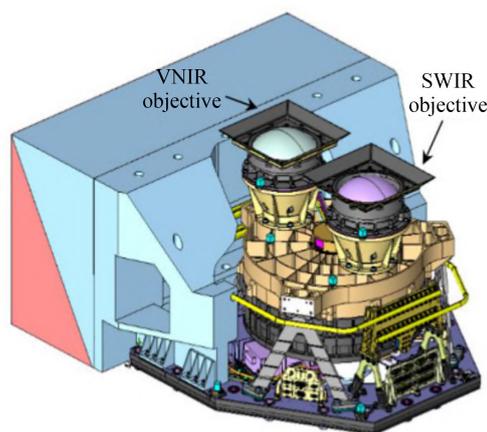


图 13 3MI 结构示意图

Fig. 13 3MI structure diagram

美国国家航空航天局 (NASA) 开发的气溶胶偏振遥感器 (APS) 旨在从 705 km 的轨道高度对地球环境进行观测。该仪器为一种地表扫描

设备,能够捕获从可见光到短波红外波段的光谱辐射数据,以监测气溶胶特性的季节性变化。APS配备了3个可见光通道和6个短波红外通道,利用渥拉斯顿棱镜将光分成不同的偏振状态,通过 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的偏振分析器进行测量,共计36个独立接收通道。这种配置使得APS能够详细分析地表和大气中的气溶胶特性,为大气研究提供重要信息。其结构如图14所示^[50-51]。

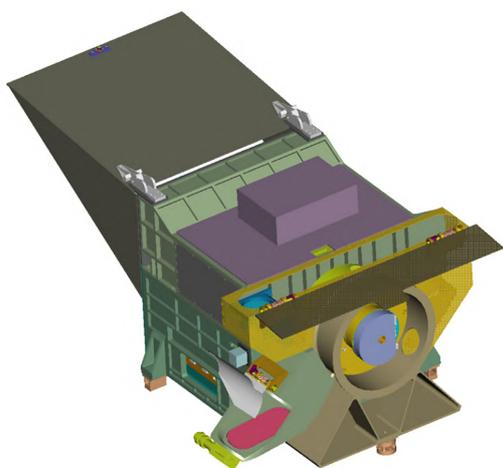


图 14 APS 系统示意图

Fig. 14 APS System diagram

亚利桑那大学和美国喷气实验室合作开发了一种先进的多角度多光谱偏振成像设备(MSPI)。该设备使用了离轴三反望远镜系统,并在偏振模块中集成了两个 $1/4$ 波长光栅调制器。通过在焦平面上配置线偏振片和滤光片,MSPI能够实现多光谱偏振状态的探测。MSPI的光路设计允许通过穿轨扫描方式进行偏振测量。MSPI的探测波段覆盖了从近紫外到短波红外的宽广区域,且偏振测量精度优于 0.5% 。该仪器的特点包括高空间分辨率、广泛的波段覆盖能力以及丰富的偏振测量精度。其设备如图15所示^[52-55]。

4 高光谱偏振技术的典型应用

4.1 环境监测和地理信息系统

在环境监测领域,高光谱偏振技术的应用十分广泛,尤其在水体监测中,通过分析偏振光信



图 15 组装 MSPI 相机

Fig. 15 Assemble the MSPI camera

息,可以有效地监控水质变化、识别和量化水中的悬浮物和溶解物质^[56]。此外,对于植被和生态系统健康的研究,高光谱偏振成像能够揭示植被的生理和生化状态,对于评估生态系统健康、监测干旱和病虫害等具有重要价值^[57]。

4.1.1 水体分析

通过光在水体中的传播,可以通过反射、散射和吸收过程获得有关水体物理、化学特性的信息^[58]。Gilerson等^[59]于2020年利用高光谱偏振成像技术从水面上方测量水体光学参数。研发团队使用了一种无移动部件的快照成像光谱仪,结合计算机控制的滤光片轮和偏振片,首次实现了从水面上方进行高光谱偏振多角度测量。通过与向量辐射传输(VRT)代码的模拟结果比较,验证了测量数据的准确性。从成像光谱仪数据中提取斯托克斯矢量的I、Q、U分量,并计算线性偏振度(DoLP)。此外,还探讨了如何估计偏振测量中的不确定性,并利用这些数据从多角度偏振测量中检索水体参数,如光束衰减系数与吸收系数的比值。研究表明,这种方法能够有效减少水面上方辐射测量的不确定性。

纽约城市大学的T. Harmel等^[60]通过在Long Island Sound Coastal Observational (LIS-CO)平台上部署的超光谱系统和多光谱系统,结合大气-海洋系统的辐射传输模型和数据处理算法,从水面上方的高光谱仪器测量中评估和检索

水下偏振信号。研究团队开发了一种新的数据处理算法,获取的气溶胶数据来校正天空光反射的影响,从而从水面上方的偏振测量中反演水下偏振场。通过与理论计算和实际水下偏振测量的比较,验证了该方法的有效性,为利用偏振信息进行水体成分遥感分析提供了一种新的手段。

纽约市立大学的 Alberto 等^[61]通过在纽约港-桑迪胡克地区的沿海水域进行实地测量,使用一种新开发的超光谱和多角度偏振计,对水下偏振光场进行了详细的分析。研究团队记录了不同站点、大气条件和水体组成下的光谱和角度变化数据,测量了水下偏振光的度量(如偏振度 DOP),并将其与蒙特卡罗辐射传输模型的模拟结果进行了比较。通过这种方法,研究揭示了水体中悬浮颗粒对偏振光的影响,以及如何利用偏振光特性来提高对复杂水体(如沿海水域)的遥感分析能力。

4.1.2 植被和生态系统健康监测

温室气体中,二氧化碳是主要成分。燃烧化石燃料如煤炭释放二氧化碳,称为“碳源”;植被光合作用吸收二氧化碳,称为“碳汇”^[62]。减排和固碳需协同进行:采用绿色低碳生产减少排放,通过生态系统建设增加陆地碳汇。2022年8月4日,长征四号乙运载火箭成功发射陆地生态系统碳监测卫星“句芒号”^[63]。该卫星采用主、被动遥感相结合的体制,利用多种遥感手段如激光、多角度、多光谱、超光谱、偏振等,高精度定量测量植被生物量、叶绿素荧光、气溶胶分布。其数据可为碳汇储量监测、生态资源详查、国家生态工程监测评价提供准确全面的遥感信息。

美国纽约城市学院光学遥感实验室的 Jacek Chowdhary 等^[64]通过建立一个综合考虑碎屑矿物和浮游生物颗粒特性的生物光学模型,对开放海域中水离开辐射度的多角度、多光谱偏振观测进行了深入分析,该模型能够准确模拟和解释水下偏振光特性,为遥感监测海洋生态系统健康、评估海洋生物量和生产力,以及分析气候变化对海洋生态系统的影响提供了一种强有力的工具。

4.2 农业

在农业领域,高光谱偏振技术被用于优化作物健康管理和提高农业生产效率。通过监测作物的光谱和偏振特性,可以及时发现作物生长过

程中的病虫害、水分压力和营养不足等问题^[65]。此技术也有助于土壤分析,包括土壤类型、结构、湿度和有机物含量的精确测量,从而指导精准农业实践^[66]。

4.2.1 作物健康监测

2011年赵文兵等^[67]利用高光谱偏振技术通过分析作物叶片反射光的偏振特性,评估作物的营养水平。具体来说,这项技术利用光谱成像系统配备偏振镜片,收集不同入射角度、不同波长下作物叶片的反射光偏振信息。通过测量不同偏振角度下的光强,并计算偏振度,可以发现偏振度与叶片叶绿素含量之间存在相关性。实验结果表明,红光下的偏振现象对叶绿素含量变化更为敏感,偏振度随着叶绿素含量的增加而减小,且在特定入射角(如 45°)下偏振度达到最大。因此,通过监测作物叶片的偏振光特性,可以为精准农业中的养分管理提供实时监测和快速诊断,有助于优化作物生长条件和提高产量。

2013年,吕云峰以玉米冠层为研究对象^[68],首次通过偏振反射机理分析了玉米冠层反射信息中的偏振现象。在抽穗前不同生长时期,通过垂直观测方向对玉米冠层进行高光谱偏振信息的测量,验证了理论推导,并发现偏振光在总反射光中的比例可达10%。这些结果表明偏振测量可为地面遥感提供额外信息,并提示在反演大气参数时需考虑地表偏振的影响。垂直方向的反射信息与偏振信息的测量结果以 Stokes 参数计算偏振度,描述了抽穗前期不同时间段玉米冠层的偏振特性。从而对抽穗时期玉米进行健康监测。

2019年秦川等^[69]利用高光谱偏振技术快速估算植物叶绿素含量的方法,基于叶绿素颗粒能产生偏振光响应的物理特性,采用叶绿素仪和配备偏振镜的高光谱仪,在多角度观测平台上对桑树、红叶石楠、茶花三种代表性光滑叶片的偏振高光谱特性及其与叶绿素含量的关系进行了测量和分析。结果表明,对于光滑叶片,550 nm 附近的绿峰强度随着叶绿素含量的增加而逐渐降低,表现为偏振高光谱与叶绿素含量之间的非线性关系;其中,绿峰波段的偏振度(DOP)与叶绿素含量的关系最为显著。该研究对进一步开展偏振光遥感评价作物生长状况、灾害及估产具有重要意义。

4.2.2 土壤特性分析

2014年,国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室的韩阳等^[70]本文研究了如何利用高光谱偏振技术对吉林省西部典型盐渍化土壤的光谱特征进行分析,以期建立土壤特性的遥感监测模型。研究首先收集了盐渍化土壤的高光谱数据,然后通过选择合适的波段,提取了光谱吸收特征参数,并通过一阶微分变换增强了光谱特征的差异性。进一步地,研究分析了土壤偏振度与土壤理化属性(如盐度、pH值和电导率)之间的关系,并建立了数学回归模型。结果表明,盐渍化土壤的偏振高光谱信息与土壤理化属性参数之间存在显著的函数关系,这为盐渍化土壤的识别、分类以及土壤偏振传感器的研制和偏振遥感信息的应用提供了理论依据和技术支持。

2018年,东北师范大学的王凌志等^[71]本文研究了如何利用多角度偏振高光谱技术来分析农田土壤的肥力特性。研究团队通过实地测量吉林省典型地区农田土壤的光谱曲线,并探讨了在最佳观测条件下土壤肥力综合指标IFI与土壤光谱曲线之间的关系。研究发现光线探测天顶角、探测方位角、偏振状态均会影响土壤光谱曲线,但对光谱形状和走向的影响不大。通过一阶微分和对数运算处理光谱数据,在特征波段上建立肥力模型,结果显示土壤肥力与光谱反射比呈现负相关,与光谱吸光度呈现正相关,与光谱反射比的一阶微分相关性不确定。研究最终建立了土壤肥力估算模型,其中光谱反射比与土壤肥力的二次函数拟合优度最佳,在560 nm和860 nm处决定系数分别达到0.876和0.867,为精准农业提供理论基础和技术支持。

2021年Sun等^[72]研究团队通过构建偏振计测量了八种阿波罗月球土壤的偏振光谱,并使用辐射传输方程来计算光学常数的真实指数,以及重现月球土壤的垂直和平行偏振光谱。研究表明,偏振度与月球土壤的成分和成熟度有关。将极化度和垂直分支与平行分支之差与FeO和TiO₂的丰度和土壤成熟度进行相关分析,结果表明,这两个极化指标与土壤组成和土壤成熟度都有一定的相关性。这一发现对于估计月球土壤的粒径具有潜在的应用价值。

4.3 军事和安全

在军事和安全领域,高光谱偏振技术提供了一种独特的监视手段,能够提高目标探测、识别和分类的准确性。特别是在掩蔽和伪装条件下,偏振信息有助于揭示目标的隐藏特征,增强远程探测系统的性能^[73]。

4.3.1 目标探测和识别

2017年王小龙等^[74]基于偏振探测原理和反射光的偏振特性理论,使用一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统,研究了荒漠伪装目标在不同光照强度和观测角度条件下的高光谱偏振特性。研究对象包括荒漠伪装网、荒漠伪装板、坦克缩比目标和悍马车缩比目标。研究结果给出了荒漠背景下伪装目标的典型探测波段区间,为荒漠背景下伪装目标的检测提供科学指导。

2019年徐文斌等^[75]针对红外高光谱偏振特性及其在伪装目标识别的应用展开研究,通过实施长波红外高光谱偏振成像实验,收集到塑料、玻璃及铝等材质在三个不同温度下的详细图像数据。并进一步比较分析了这两类伪装目标在相同温差环境下,其光谱辐亮度与偏振度的变化情况。研究表明:在同样温度下它们的红外偏振特性增强程度显著高于辐射亮度,这种影响表现出明显的波段选择性特征。此外,当温度差别逐渐加大时,这两类伪装目标的红外偏振特性提升量差距亦随之增加。因此,利用伪装目标偏振特性增强量的差异性可以为实现目标的有效识别开辟新的技术路径。

鉴于传统检测方法无法同时获取伪装材料的偏振信息与光谱信息的限制,研究利用高光谱偏振成像技术对典型伪装材料进行检测和分析。贾睿等人在2020年采用一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统,对伪装涂层和伪装网等典型伪装材料进行高光谱偏振检测^[76]。通过解析出伪装材料的9个偏振参数,研究了伪装材料与背景的相对反射率随光谱变化的规律。结果表明,通过差异的偏振特性选择合适的偏振参数能够增强目标的纹理细节特征并提高其对比度。对光谱偏振特性的分析表明,在760 nm检测波段能够快速准确地检测伪装材料。

4.3.2 导航和定位

地球大气中的太阳光散射会产生特定的偏

振特性,这一现象为利用大气散射的偏振状态分布及其与太阳照射和地面观测几何关系的匹配,提供了地球大气层导航的新途径^[77]。但是,气象条件的变化导致大气成分的变动,进而直接影响光的散射分布和基于偏振状态分布的定位精度,使得偏振导航的方向精度在实际使用中受到大气状态的显著影响。1997年Dimitrios Lambrianos和他的团队在苏黎世大学开发了一个自主移动机器人 Sahabot,它能够利用偏振光罗盘导航,模仿昆虫如沙漠蚂蚁的导航能力^[78]。通过在北非沙漠中进行的实地测试,研究者评估了三种不同的偏振光模式解析模型。实验结果揭示了“同时模型”在导航精度上的优势,该模型能够持续地从视觉信息中获取方向,而不需要在旅途中进行扫描。这项研究不仅验证了昆虫导航机制的有效性,还为未来光学导航技术的发展提供了新的思路。

为了探究不同气候条件下天空偏振状态变化的内部机理,安徽大学的王昊等人于2024年开发了一种天空可见近红外光谱偏振状态自动测量装置^[79]。该装置能够根据需要执行定时、定区域、多种天气条件下的天空光谱偏振状态测量,通过分时偏振和同时分光谱的非成像测量方式进行。并且能够在不同气象条件下稳定测量天空光谱偏振状态,为研究天空偏振状态的影响机制提供了数据支持,为地球大气层内导航提供了可能。

4.4 医学和生物医学

医学和生物医学是高光谱偏振技术应用的重要领域。在癌症检测方面,这种技术能够帮助医生区分健康组织和肿瘤组织,提高诊断的准确率。在组织工程和细胞成像中,高光谱偏振成像为无损检测提供了新的可能,有助于深入理解细胞结构和功能^[80]。

4.4.1 癌症检测

2005年华东师范大学的魏荣慧等^[81]使用荧光偏振光谱法来探测光动力治疗过程中癌细胞膜流动性的变化。实验中,以DPH(1,6-二苯基-1,3,5-己三烯)作为荧光探针,研究了金属酞菁配合物苯硫基钛菁锌在光照下对乳腺癌细胞膜流动性的影响。结果表明,光照激发光敏剂后,荧光标记团的偏振度增大,癌细胞膜流动性降

低,微黏度升高,这表明光动力治疗能够通过影响癌细胞膜的流动性来抑制癌细胞的增殖。因此,偏振光谱技术可以作为检测光动力治疗癌症效果的一种手段。

口腔鳞状细胞癌(以下简称 OSCC)是种较为普遍的癌症,但治愈率并不理想。因此,及早发现并准确定位病灶极为关键。2022年南开大学的胡慕芸等^[82]利用偏振敏感光学相干层析技术(PS-OCT)提取细部组织结构和偏振信息,提升了疾病诊断的特异性。他们创建了一套高分辨率的PS-OCT系统,并用其拍摄了OSCC离体样本的图像。初步观察显示,OSCC在偏振上表现出独特的双折射特性,积累的相位延迟可有效区分健康组织和患处。研究结果明确指出:PS-OCT图像可卓越区分OSCC与正常组织。这充分展示了高分辨率PS-OCT在术前检查、确诊和定位病灶等方面的优势。因此偏振光谱技术在癌症检测、手术快速检测以及确定病变边界等一系列应用领域有着巨大潜力。

4.4.2 组织工程和细胞成像

由细胞核体积的缩减,以及胶原质化学构成的调整,均可潜在地波及对应组织的光学折射参数的变动,从而改变组织散射光线的偏振态。利用光谱反演技术,对相关组织散射光线偏振特性进行精确测量与深入剖析,便有可能推导出该组织的内部构造,例如细胞核的直径,以及胶原质的总量等精细信息^[83]。2009年西北工业大学的赵永强等^[84]研究发现,皮肤的病理学变化将导致其组织结构的双折射与构成发生转变,而这一现象可通过组织对光线散射的偏振以及光谱变化的测量加以评估。光散射偏振光谱法被证明是一种有效的手段,以实现这些功能性的病理学分析的量化。为此,呈现出一款创新设计的上皮组织成像偏振光谱仪,用以精确捕获组织中光谱、偏振以及空间特性变化的细节,并且还提出了一种独特的偏振光谱校正策略。实验结果显示,使用偏振光谱成像方案有望有效区分各类不同的病理组织。另外,借助光谱与偏振信息的结合,我们能够深度解析组织内部的生化代谢与构造特征。

4.5 遥感探测

在遥感领域,高光谱偏振技术的应用极大扩

展了对地球表面和大气的监测能力^[85]。从海洋生态系统的健康,到大气中气溶胶的分布,再到城市和自然景观的变化,高光谱偏振成像为环境监测、气候变化研究和资源管理提供宝贵的数据和新的洞察力^[86]。

4.5.1 大气成分分析

根据大气偏振散射模型,抽取不同波段云层的偏振态,可以很好地探测地面上空云的分布、云的种类和高度、云和大气气溶胶粒子的尺寸分布,这些在偏振光谱探测下都有很好的识别效果^[87]。偏振光谱探测还可用于探测上层大气中自然形成的亚稳态原子氧的谱线来测量上层大气风场的速度和温度,这为大气物理研究提供了有用的数据。

CAPI是中国二氧化碳观测卫星(TAN-SAT)的关键设备,能够进行多光谱偏振探测,帮助提高温室气体监测的准确性。基于该设备,Ding等^[88]在2021年提出了一种新的近紫外到近红外(NNDT)波段阈值云检测方法。该方法利用 $0.38\ \mu\text{m}$ 波段和该波段与 $1.64\ \mu\text{m}$ 波段的比值来区分云和晴朗天空,有效利用了近紫外波段在云和地面物体辐射特性上的差异。NNDT算法避免了对热红外波段和地表最小反射率数据库的依赖,为气溶胶和 CO_2 参数的准确反演提供了可能。

2022年中国科学院的王佳佳等^[89]依据DPC卫星在轨道上采集到的多角度偏振辐射观测数据,详细地解析了作为观测对象的云团的反射率特征、云相态分布及其影响因素——偏振角空间分布资讯。研究揭示了强对流云团的偏振信息对于辨识其他云团有着显著的优势,借助偏振信息来确定强对流云团的位置并提前预警,将有助于我们更好地掌握天气状况,提升星载偏振探测载荷在大气领域的应用价值。

4.5.2 地表和海洋遥感

面对我国对于海洋溢油及赤潮的精准监测所面临的紧迫需求,我们需重点攻克复杂海况下海洋环境监测中所存在的“视距受限”、“识别困难”以及“难以区分”这三个主要问题。2022年长春理工大学的史浩东等^[90]基于对现有的光学监测手段的优良特性及其局限性的深入剖析,提出了一套创新的“光谱+偏振+红外探测”多维度

海洋监测方案。并对各类典型海洋目标的多元特性生成、传播、捕获、分析及识别反演过程进行了全面而细致的梳理。同时,通过采用先进的偏振探测技术,成功地对不同的赤潮优势种进行了精确的分类识别,如图16所示。

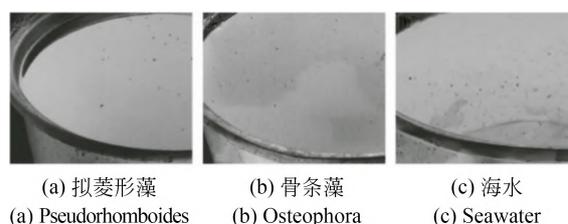


图 16 不同赤潮优势种及海水偏振图像

Fig. 16 Polarizing images of different dominant species of red tide and seawater

2019年中国科学院的李清灵等^[91]测量了不同种类和厚度油膜和纯净水面紫外到近红外波段的多角度偏振反射光谱,分析液体样本的光谱起偏特性、折射率等性质。所提出的实验方法具备在其他油类物质以及油脂薄膜偏振度测量中实施应用的潜力。经过充分实验验证所得出的溢油光谱数据,为未来机载偏振遥感工作中的波段及其观测角度选择,提供了坚实的理论基础及实证支持。进一步优化与相关偏振图像进行分析比较后,预期能实现对溢油污染区域以及油脂薄膜类别进行更为精准的定量评估解析。这样的科研突破,为未来偏振高光谱技术在机载环境下开展多维度且高精度的海洋光学监测系统研究及实践应用工作,建立了稳固的理论基石。

5 高光谱偏振的关键技术

探究高光谱偏振技术的关键技术,主要分为以下几个方面:首先,创新光学系统设计是实现该技术理想效果的基础保障。其次,高效的数据处理算法则是决定高光谱偏振技术能否真实反映被测对象属性的关键所在。最后,将高光谱偏振技术与其他传感设备的有效融合,也是其未来发展的重要方向之一。

5.1 光学系统的设计

在第3节中详细介绍了基于高光谱偏振技术

的各种仪器。在仪器的发展历程中每种仪器都有各自的优势。创新光谱偏振探测系统设计是高光谱偏振技术成功应用的基础,需要不断推进光学元件的研发,以提高传感系统的偏振光谱分辨率。采用新型材料和先进的光学组件,例如偏振分束器和可调谐滤波器,能够有效增强系统的性能^[92-93]。

Zhang 等^[94]利用偏振分束器件将偏振入射光调制并转换为具有正交偏振的不同透射光谱的两个输出,提供两个通道的高光谱信息。此系统采用紧凑的框架设计,无需色散元件或额外的相机即可进行快照高光谱成像。这种设计在同时获取光谱和偏振信息的同时,简化了系统结构并提高了数据采集速度和灵活性。

Zhang 等^[95]利用 1/4 波片和液晶可调谐滤光片(LCTF)实现偏振调制和分裂的高光谱全偏振成像系统。通过将 LCTF 的高光谱分辨率与波片的偏振调制能力相结合,该系统在较宽光谱范围内实现了高效的偏振测量,极大地提高了成像效果和分辨率精度。

在光学系统设计中,优化光路布局和消除光学系统中的噪声源是确保获得清晰、准确的高光谱偏振数据的重要任务。Zhang 等^[96]提出利用 LCTF 进行偏振成像光学系统的设计。该技术结合了 LCTF 的无运动部件和偏振测量高精度的特点,同时具有系统微分效应小、结构紧凑、可靠性高的优势。长春理工大学的陈圣等^[97]设计的光谱相机辐射定标测试系统,实现了对光谱相机的光谱图像进行平场校正,去除了光谱图像中的固定图像噪声,提升了光谱图像的清晰度和对比度。这种结合光谱定标和偏振测量的技术,有助于提高整体成像质量。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的鞠学平^[98]提出了一种改进的偏振光谱强度调制模型,并基于此模型开发了一种实验室标定技术,用于精确标定多级波片的偏振误差。通过这种模型,将光谱与偏振信息有机结合,提高了系统的偏振探测精度。李作恩^[99]设计了一种低偏振效应膜系,通过同时控制 S 光和 P 光的透过率和相位延迟,以减少望远镜组的偏振效应。该方法有效降低了通道型偏振光谱仪望远镜组的

偏振效应,从而提高了仪器的偏振探测精度。杨斌^[100]使用无偏光源标定系统的偏振效应,基于矢量辐射传输模型对中心视场绝对辐射定标系数、光学镜头起偏度和系统低频相对透过率等参数进行了精确标定。该方法能有效提高多通道型偏振成像仪的偏振定标效率,满足了大气气溶胶测量精度的要求。代虎^[101]通过优化检偏器的方位角,提高了仪器的信噪比,并推导了该仪器的辐射模型,给出了辐射定标和偏振定标的待定参数与确定方法。这种方法使高光谱和偏振测量更为精确、可靠。邢文赫^[102]建立了系统偏振辐射传输模型,提出了系统地面偏振辐射联合标定方法,实现了偏振与辐射定标参数的解耦精确标定。该方法解决了系统中偏振探测模块的快轴方位角误差、光学系统的偏振效应以及在轨工作过程中环境变化引起的系统误差和随机误差问题,提高了系统的偏振探测精度。泊建^[103]提出了一种改进的空间调制偏振成像系统,通过移除传统结构中的半波片并采用两块 Savart 偏光镜作为核心调制模块,成功解决了装调过程中的角度误差问题,并提高了偏振信息解调的精度。新系统通过不同通道的频域滤波函数优化,进一步提升了信噪比,为偏振成像技术的发展和應用提供了有效的结构优化方案。

这些研究成果显著提高了高光谱偏振成像系统的性能和稳定性。在光学系统设计中,光谱和偏振技术的结合尤为关键。通过优化光学元件和系统布局,消除噪声源,精确标定系统参数等手段,实现了高精度、高可靠性的偏振光谱探测。这些技术的融合和创新,为高光谱偏振技术的实际应用提供了坚实基础,并将推动其在科学研究和工程应用中的广泛发展。

5.2 数据处理算法

高效的数据处理算法对于充分利用高光谱偏振技术提供的信息至关重要。采用机器学习和深度学习技术,能够更好地提取并理解光谱偏振数据中蕴含的信息,为进一步的应用提供更多可能性。

李铁等^[104]利用卷积网络提取图像中的局部特征,包括纹理和形状等信息。图像中各类物体和区域间的差异被这些局部特征反映出来,实现

对高光谱图像中的各个像素更好的分类性能。Masato^[105]利用机器学习处理偏振高光谱数据对塑料进行目标分类,结果表明高光谱偏振成像在目标分类方面具有更高的分类精度,机器学习对高光谱偏振图像分类能够自动学习复杂的特征关系,提高分类准确性和效率。

提高数据处理效率和准确性的重要手段还包括数据融合和多模态信息整合。Qian等^[106]基于物理退化模型并结合偏振恢复和光谱融合提出了一种基于高光谱偏振成像的水下图像恢复方法。光谱数据融合的方法对于增强由不同材料组成的物体在不同成像距离下的水下图像的可见性和对比度是有效的。Shen等^[107]提出差异增强和交织序列融合检测算法,设计偏振参数图像,增强特征波段偏振图像的目标对比度;融合差异增强和交织序列映射结果,对目标图像背景噪声进行抑制,增强了复杂场景下光谱偏振探测的性能。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的李文杰等^[108]基于DPC的多角度偏振数据,开发了一种新的气溶胶细粒子光学厚度反演算法。该算法利用米散射计算气溶胶辐射贡献,并采用经验正交函数方法计算地表贡献,结合矢量辐射传输方程进行光学厚度的反演。不仅提高了气溶胶细粒子光学厚度反演的精度,而且为DPC有效监测气溶胶的时空分布提供了技术支持。王含文^[109]提出了一种结合信息量和类间可分性的降维方法,首先利用局域波段指数(LBI)计算高光谱数据的信息量,初步筛选出信息量大的波长。然后,通过引入遗传机制的二进制粒子群算法(BPSO),以类间距离最大化为目标,对波长进行进一步的优化选择。为高光谱图像中颜色相近地物的分类问题提供了一种有效的降维方法。

5.3 与其他传感设备的有效融合

最后,将高光谱偏振技术与其他传感设备进行有效融合,是推动该技术未来发展的关键方向之一。通过与激光雷达、红外传感器等设备的集成,可以实现多源数据的协同采集和分析。这种融合还可以扩展高光谱偏振技术的适用范围,使其在军事、环境监测、农业等领域得到更广泛地

应用。因此,跨学科的合作和技术整合将成为未来高光谱偏振技术发展的重要动力,推动其在实际应用中取得更大的突破。

Yao等^[110]提出将C波段和L波段四极化遥感立体测绘数据(SAR)的后向散射系数以及各自的极化分解参数,与高光谱成像系统所采集的数据有机结合,从而能够精确而有效地进行植物生态系统类型的识别。这种方法通过融合高光谱和偏振数据,增强了对地物的识别和分类能力。Sun等^[111]将红外传感设备与高光谱偏振技术结合,测量光学级CaF₂含有零内部水和内部水的蛋白石样品的偏振红外光谱。该结合方法拓展了高光谱偏振技术在材料科学和矿物检测中的应用。Luo等^[112]将3D高光谱模块相机前放置了一个液晶可调谐滤波器,这两个模块通过双路径配置耦合,允许偏振信息合并成具有光谱信息的综合点云,收集到的数据直接融合到5D数据集中。能够同时检测宏观物体的表面形状、光谱特征和偏振状态。该项技术在生物检测、精准农业和先进制造业等领域具有巨大的应用潜力。Liu等^[113]利用分段线性拼接方法,将高光谱偏振激光雷达与微波辐射计进行融合,消除了激光雷达底层数据的盲区、实现平滑过渡。边界层内大气温度误差减小、测量的信噪比较高,提升微波辐射计的探测精度。两者融合提升了微波辐射计空间分辨率,又解决激光雷达的探测盲区,实现二者的优势互补。

6 高光谱偏振技术展望

高光谱偏振技术作为一种集成了高光谱成像和偏振测量的先进技术,已经在多个领域展现出其独特的应用价值和发展潜力。结合前面讨论的技术应用和仪器发展现状,我们可以预见该技术未来的发展方向和趋势。

6.1 技术创新与仪器优化

未来的研究将继续致力于提高高光谱偏振仪器的性能,包括增强光谱分辨率、提升信噪比、优化系统的稳定性和实时性。提高高光谱偏振仪器性能的探索也可以包括具体的技术路径,例如采用新材料或新技术如量子点传感器以提高

光谱分辨率和信噪比。探讨如何通过改进光学设计和电子控制系统来优化系统稳定性和实时性。小型化和低成本化可以通过采用集成光学芯片和微型机电系统(MEMS)技术来实现,这些技术如何具体应用于高光谱偏振仪器,以及它们对野外应用的具体好处,如减少携带重量,提高设备的易用性和可访问性。

6.2 数据处理与算法发展

随着计算能力的提高和算法的发展,特别是机器学习和深度学习技术的应用,通过算法的优化,将使得从高光谱偏振数据中提取有用信息变得更加高效和准确。将重点放在开发更加精确和快速的数据处理算法,特别是利用人工智能技术,如机器学习和深度学习,来处理和分析高光谱偏振数据。例如,可以开发用于自动识别和分类大气颗粒或地表材料的深度神经网络模型。这将极大地促进高光谱偏振技术在环境监测、农业管理、医学诊断等领域的应用。

6.3 多学科交叉与融合应用

高光谱偏振技术与其他传感技术的融合,如激光雷达、红外传感器等,可以提供更全面的监测数据。这种数据融合有助于在更多维度上理解和分析被观测的对象,如结合激光雷达的高空间分辨率和高光谱偏振的化学识别能力。通过多源数据的集成和分析,可以提供更加精确的环境和目标信息,从而在复杂场景中实现更有效地监测和识别。此外,该技术在农业、环境监测、医学诊断等领域的应用在未来将进一步深化,与其他学科如生态学、材料科学等的交叉融合将产生新的研究热点和应用场景。

6.4 实时监测与预警系统

发展高光谱偏振技术的实时监测能力是未来的关键目标。这包括提高数据采集速度和处理效率,以便快速响应环境变化和潜在灾害。结合自动数据传输和分析,可以建立高效的环境和

灾害预警系统,如用于早期监测森林火灾或监测城市空气质量。这些系统将依赖于高度可靠和准确的传感器网络,能够在全球范围内提供及时的预警信息。

6.5 国际合作与数据共享

在全球化的背景下,国际合作和数据共享在推动高光谱偏振技术的发展中扮演着重要角色。未来将看到更多的国际研究项目和合作平台,旨在标准化数据收集、处理和共享流程。这不仅将加速科学研究,还将帮助各国更好地应对全球环境问题,如气候变化和生物多样性保护。通过这些合作,全球科研社区可以共同利用这些先进技术,解决跨区域和全球性的问题,也将推动该技术在更广泛领域的创新和应用。

7 结 论

高光谱偏振技术,作为光学探测技术中的先进分支,因其具备高光谱分辨率、高灵敏度、快速测量能力及便于携带等特点,在短短 20 多年的发展中已经成为光学探测领域的一个重要方向。本文对高光谱偏振技术进行综述,对其关键技术进行了深入探讨和简要分析。首先,对高光谱偏振技术的原理及偏振高光谱仪器进行了解读;随后,我们针对该技术的实际应用范畴及其广度做出细致且周密的分析;最后,重点讨论了该技术的三个关键点以及对未来发展方向的展望。期望通过本文能为相关研究者提供有益借鉴和启示。

总体而言,高光谱偏振技术的发展不仅依赖于单一技术的进步,而是多技术领域协同发展的结果。未来的研究将可能集中于提高系统的集成度、降低成本和增强用户体验,以推动这项技术在更广泛的实际应用场景中的部署。

参考文献:

- [1] 谢俊, 邱江磊, 秦玉文. 深度学习在水下成像技术中的应用(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 1101001.
XIE J, DI J L, QIN Y W. Application of deep

- learning in underwater imaging (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 1101001. (in Chinese)
[2] 梅安新. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

- MEI A X. *An Introduction to Remote Sensing*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)
- [3] 谢向生,刘忆琨,梁浩文,等. 散斑相关成像:从点扩展函数到光场全要素[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111004.
- XIE X S, LIU Y K, LIANG H W, *et al.* Speckle correlation imaging: from point spread functions to light field plenoptics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111004. (in Chinese)
- [4] 赵丽丽,赵云升. 浅谈多角度偏振遥感技术及其在探测月球资源中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 1003-1007.
- ZHAO L L, ZHAO Y S. The study of exploring major minerals on the lunar surface with multi-angle polarization technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(3): 1003-1007. (in Chinese)
- [5] HEGE E K, O'CONNELL D, JOHNSON W, *et al.* Hyperspectral imaging for astronomy and space surveillance[C]. *Imaging Spectrometry IX, California, USA*. SPIE, 2004.
- [6] 刘银年. 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 439-459.
- LIU Y N. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 439-459. (in Chinese)
- [7] 韩丽娜,教媛媛,宁威. 太赫兹成像和光谱在医疗领域的应用综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(2): 242-252.
- HAN L N, JIAO Y Y, NING W. Application of terahertz imaging and spectroscopy in medical field[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2021, 33(2): 242-252. (in Chinese)
- [8] 赵景怡,赵茂雄,石磊,等. 角度分辨光谱技术及其应用[J]. 光学学报, 2023, 43(16): 3788/AOS230860.
- ZHAO J Y, ZHAO M X, SHI L, *et al.* Angle-resolved spectroscopy and its applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(16): 3788/AOS230860. (in Chinese)
- [9] 陈述彭. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- CHEN S P. *Mechanism of Remote Sensing Information* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [10] 杜培军,夏俊士,薛朝辉,等. 高光谱遥感影像分类研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 236-256.
- DU P J, XIA J S, XUE CH H, *et al.* Review of hyperspectral remote sensing image classification [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2016, 20(2): 236-256. (in Chinese)
- [11] 张号远,李映,姜晔楠. 深度学习在高光谱图像分类领域的研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2018, 44(6): 961-977.
- ZHANG H K, LI Y, JIANG Y N. Deep learning for hyperspectral imagery classification: the state of the art and prospects[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(6): 961-977. (in Chinese)
- [12] KUMAR B, DIKSHIT O, GUPTA A, *et al.* Feature extraction for hyperspectral image classification: a review[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(16): 6248-6287.
- [13] 陈龙跃,段丹丹,王凡,等. 高光谱成像技术在水果品质无损检测中的研究进展[J]. 广东农业科学, 2023, 50(7): 83-94.
- CHEN L Y, DUAN D D, WANG F, *et al.* Research progress of non-destructive testing of fruit quality by hyperspectral imaging technology [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2023, 50(7): 83-94. (in Chinese)
- [14] 高红氏,朱敏,曹雪莹,等. 多尺度融合注意力机制的胆囊癌显微高光谱图像分类[J]. 中国图象图形学报, 2023(4): 1173-1185.
- GAO H M, ZHU M, CAO X Y, *et al.* A micro-hyperspectral image classification method of gallbladder cancer based on multi-scale fusion attention mechanism [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2023(4): 1173-1185. (in Chinese)
- [15] VANE G, GOETZ A F H. Terrestrial imaging spectroscopy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(1): 1-29.
- [16] GOLDSTEIN D, GOLDSTEIN D H. *Polarized Light, Revised and Expanded (2nd ed.)*[M]. CRC Press. 2003.
- [17] 张伟,战俊彤,张肃,等. 粗糙水面环境溢油目标多角度可见光偏振特性[J]. 光学学报, 2023, 43

- (6): 3788/AOS221428.
- ZHANG W, ZHAN J T, ZHANG S, *et al.* Polarization characteristics of multi-angle visible light of oil spill target in rough water environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43 (6) : 3788/AOS221428. (in Chinese)
- [18] 孙晓兵, 洪津, 乔延利等. 地物光谱偏振成像技术应用及发展[C]. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 中国海洋学会海洋遥感专业委员会, 中国遥感委员会, 中国气象学会卫星气象学委员会, 中国宇航学会遥感专业委员会. 第十四届全国遥感技术学术交流会论文摘要集, 2003: 1.
- SUN X B, HONG J, QIAO Y L, *et al.* Application and development of spectral polarization imaging technology of ground objects [C]. *Key Laboratory of Marine Environmental Science and Numerical Simulation of State Oceanic Administration, Ocean Remote Sensing Committee of Chinese Society of Oceanography, Remote Sensing Committee of China, Satellite Meteorology Committee of Chinese Meteorological Society, Remote Sensing Committee of Chinese Society of Astronautics. Abstract collection of the 14th National Remote Sensing Technology Academic Exchange Conference*, 2003: 1. (in Chinese)
- [19] GORBUNOV G G, DRICHKO N M, STARICHENKOVA V D, *et al.* Polarization hyperspectrometers: a review[J]. *Journal of Optical Technology*, 2018, 85(5): 291-295.
- [20] 刘春雨, 丁祎, 刘帅, 等. 滤光片分光型高光谱相机发展现状及趋势(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 3788/IRLA20210981.
- LIU C Y, DING Y, LIU S, *et al.* Development status and trend of filter hyperspectral camera (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 3788/IRLA20210981. (in Chinese)
- [21] 王耀利. 基于 AOTF 的光谱偏振成像系统及其成像质量研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- WANG Y L. *Spectral Polarization Imaging System Based on AOTF and Its Imaging Quality Research*[D]. Taiyuan: North University of China, 2016. (in Chinese)
- [22] 冀海月, 李双, 向光峰, 等. 空间振幅调制光谱偏振测量技术信息提取研究[J]. *光学学报*, 2023, 43(12): 3788/AOS221952.
- JI H Y, LI S, XIANG G F, *et al.* Research on information extraction of spectrum polarization measurement technology based on spatial amplitude modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43 (12): 3788/AOS221952. (in Chinese)
- [23] 张瑞. 基于声光和液晶调制的高精度高光谱全偏振成像系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- ZHANG R. *Research on High-precision and High-spectral Fully Polarized Imaging System Based on Acousto-optic and Liquid Crystal Modulation* [D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)
- [24] JONES S H, IANNARILLI F J, KEBABIAN P L. Realization of quantitative-grade fieldable snapshot imaging spectropolarimeter [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6559.
- [25] ZHANG C M, LI Q W, YAN T Y, *et al.* High throughput static channeled interference imaging spectropolarimeter based on a Savart polariscope [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23314.
- [26] 袁恒. 基于铁电液晶调制和双折射干涉的高光谱偏振成像方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- YUAN H. *Research on Hyperspectral Polarization Imaging Method Based on Ferroelectric Liquid Crystal Modulation and Birefringence Interference*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [27] SUZUKI T, KUROSAKI H, ENKYO S, *et al.* Application of an AOTF imaging spectropolarimeter [C]. *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing, SPIE Proceedings. San Diego, CA, USA. SPIE*, 1997.
- [28] DENESLOUIS J, GOTTLIEBMILTON S, *et al.* Spectropolarimetric imaging for object recognition [C]. *Image Sources and Sensors*. March 1, 1998; <https://doi.org/10.1117/12.300052>
- [29] GUPTA N, SUHRE D R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability [J]. *Applied Optics*, 2007, 46 (14): 2632.
- [30] ZHANG H, ZHAO H J, GUO Q, *et al.* Polarization-multiplexed high-throughput AOTF-based

- spectral imaging system [J]. *Materials*, 2023, 16 (12): 4243.
- [31] LOE R S, DUGGIN M J. Hyperspectral imaging polarimeter design and calibration [C]. *Polarization Analysis and Measurement IV*. San Diego, CA, USA. SPIE, 2002.
- [32] HOMMA K, SHINGU H, YAMAMOTO H, *et al.* Agro-environment observation using near-infrared LCTF spectropolarimeter [C]. *Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications II*. November 8-12, 2004. Honolulu, USA. SPIE, 2005.
- [33] 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 X Q, XIANG L B, HUANG M, *et al.* Advance in imaging spectropolarimeter [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31 (7) : 1968-1974. (in Chinese)
- [34] ZHAO Y Q, PAN Q, ZHANG H C. Fuse spectropolarimetric imagery by D-S reasoning [C]. *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VII, SPIE Proceedings*. Orlando (Kissimmee), FL. SPIE, 2006.
- [35] CHEN L X, ZHANG S Y, ZHENG W B, *et al.* High light efficiency spectral polarization imaging method based on mach-zehnder structured liquid crystal tunable filters and variable retarders [J]. *Photonics*, 2023, 10(7): 765.
- [36] ZHOU X M, MA L, HALICEK M, *et al.* Development of a new polarized hyperspectral imaging microscope [C]. *Imaging, Therapeutics, and Advanced Technology in Head and Neck Surgery and Otolaryngology 2020*. February 1-6, 2020. San Francisco, USA. SPIE, 2020.
- [37] AYUSO-ANGULO L, GARCÍA PAREJO P, URIBE-PATARROYO N, *et al.* Hyperspectral camera based on liquid crystals for use in small satellites [C]. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXV*. September 13-18, 2021. *Online Only, Spain*. SPIE, 2021.
- [38] XU Z L, NING J L, XIE Y G, *et al.* Compressive Imaging Hyperspectral Polarimeter based on LCVR [C]. *OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021 (AIS, FTS, HISE, SENSORS, ES)*. Washington, DC. Washington, D. C. : *Optica Publishing Group*, 2021.
- [39] MILES BRIAN H, GOODSON RICKY A, DERENIAKE EUSTACE L, *et al.* *Computed-tomography imaging spectropolarimeter (CTISP) : instrument design, operation, and results*, Proc. SPIE 3753, Imaging Spectrometry V. October 27, 1999; <https://doi.org/10.1117/12.366280>
- [40] MILES B H, KIM B. Nonscanning computed tomography imaging spectropolarimeter (NS-CTISP) : design and calibration [C]. *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VI*. Orlando, FL. SPIE, 2004.
- [41] 顾行发, 陈兴峰, 程天海, 等. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标 [J]. *物理学报*, 2011, 60 (7): 165-172.
GU X F, CHEN X F, CHENG T H, *et al.* In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7) : 165-172. (in Chinese)
- [42] LI Z Q, HOU W Z, HONG J, *et al.* Directional Polarimetric Camera (DPC) : monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 218: 21-37.
- [43] ZHANG J Q, SHAO J B, YAN C X. Cloud and aerosol polarimetric imager [C]. *Selected Papers from Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics: Optical Imaging, Remote Sensing, and Laser-Matter Interaction 2013*. SuZhou, China. SPIE, 2014.
- [44] 张军强, 薛闯, 高志良, 等. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势 [J]. *中国光学*, 2015, 8 (5): 679-698.
ZHANG J Q, XUE C, GAO Z L, *et al.* Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: past, present and future [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 679-698. (in Chinese)
- [45] MARBACH T, PHILLIPS P, SCHLUSSEL P. 3MI: the multi-viewing multi-channel multi-polarization imaging mission of the EUMETSAT polar

- system - second generation (EPS-SG) dedicated to aerosol characterization [C]. *AIP Conference Proceedings. Dahlem Cube, Free University, Berlin*. AIP, 2013.
- [46] MARBACH T, RIEDI J, LACAN A, *et al.* The 3MI mission: multi-viewing-channel-polarisation imager of the EUMETSAT polar system: second generation (EPS-SG) dedicated to aerosol and cloud monitoring [C]. *Polarization Science and Remote Sensing VII. San Diego, California, USA*. SPIE, 2015:.
- [47] MANOLIS I, GRABARNIK S, CARON J, *et al.* The MetOp second generation 3MI instrument [C]. *SPIE Proceedings, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVII. Dresden, Germany*. SPIE, 2013.
- [48] MARBACH T, FOUGNIE B, LACAN A, *et al.* Vicarious calibration of the multiviewing channel polarisation imager (3MI) of the EUMETSAT Polar System-Second Generation (EPS-SG) [C]. *SPIE Proceedings, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XX. Edinburgh, United Kingdom*. SPIE, 2016.
- [49] 张一鹏. 偏振成像系统的数据处理与定量化研究 [D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2020.
ZHANG Y P. *Research on Data Processing and Quantification of Polarization Imaging System* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [50] ELDERS J P, AZENE H M, BETRAUN G T, *et al.* Aerosol Polarimeter Sensor (APS) contamination control requirements and implementation [C]. *Optical System Contamination: Effects, Measurements, and Control 2010. San Diego, California, USA*. SPIE, 2010.
- [51] PERALTA R J, NARDELL C, CAIRNS B, *et al.* Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [C]. *MIPPR 2007: Automatic Target Recognition and Image Analysis; and Multispectral Image Acquisition. Wuhan, China*. SPIE, 2007.
- [52] DINER D J, DAVIS A, HANCOCK B, *et al.* Dual-photoelastic-modulator-based polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(35): 8428.
- [53] DINER D J, DAVIS A, HANCOCK B, *et al.* First results from a dual photoelastic-modulator-based polarimetric camera [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(15): 2929.
- [54] DINER D J, XU F, GARAY M J, *et al.* The airborne multiangle spectropolarimetric imager (irMS-PI): a new tool for aerosol and cloud remote sensing [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(8): 2007-2025.
- [55] 褚君浩, 胡志高. 红外偏振效应和偏振遥感研究进展 [J]. *遥感学报*, 2018, 22(6): 926-934.
CHU J H, HU Z G. Recent progress on infrared polarization effect and polarization remote applications [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2018, 22(6): 926-934. (in Chinese)
- [56] 刘银年, 薛永祺. 星载高光谱成像载荷发展及关键技术 [J]. *测绘学报*, 2023, 52(7): 1045-1058.
LIU Y N, XUE Y Q. Development and key technologies of spaceborne hyperspectral imaging payload [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(7): 1045-1058. (in Chinese)
- [57] 唐华俊. 农业遥感研究进展与展望 [J]. *农学学报*, 2018, 8(1): 175-179.
TANG H J. Progress and prospect of agricultural remote sensing research [J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 175-179. (in Chinese)
- [58] 薛庆生, 白皓轩, 李辉, 等. 水下高光谱成像探测技术研究进展(特邀) [J]. *光子学报*, 2021, 50(12): 1201001.
XUE Q S, BAI H X, LI H, *et al.* Development of underwater hyperspectral imaging detecting technology (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(12): 1201001. (in Chinese)
- [59] GILERSON A, CARRIZO C, IBRAHIM A, *et al.* Hyperspectral polarimetric imaging of the water surface and retrieval of water optical parameters from multi-angular polarimetric data [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(10): C8-C20.
- [60] HARMEL T, TONIZZO A, IBRAHIM A, *et al.* Measuring underwater polarization field from above-water hyperspectral instrumentation for water composition retrieval [C]. *Remote Sensing of*

- the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions* 2011. Prague, Czech Republic. SPIE, 2011.
- [61] TONIZZO A, ZHOU J, GILERSON A, *et al.* Polarized light in coastal waters: hyperspectral and multiangular analysis[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5666.
- [62] 杨卫东, 曾联波, 李想. 碳汇效应及其影响因素研究进展[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(2): 151-167.
YANG W D, ZENG L B, LI X. Advances in research of carbon sinks and their influencing factors evaluation[J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(2): 151-167. (in Chinese)
- [63] 曹海翔, 张新伟, 邱心怡, 等. 2023. 遥瞰山河拱卫九重——陆地生态系统碳监测卫星“句芒号”[J]. *自然资源科普与文化*, (2): 14-21.
CAO H Y, ZHANG X W, Qiu X Y, *et al.* Remote view of mountains and rivers: terrestrial ecosystem carbon monitoring satellite "Ju Mang". *Natural Resources Science Popularization and Culture*, (2): 14-21. (in Chinese)
- [64] CHOWDHARY J, CAIRNS B, TRAVIS L D. Contribution of water-leaving radiances to multiangle, multispectral polarimetric observations over the open ocean: bio-optical model results for case 1 waters[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5542-5567.
- [65] 韩阳, 赵云升, 赵乃卓, 等. 森林土壤多角度高光谱偏振反射影响研究初探[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 702-706.
HAN Y, ZHAO Y S, ZHAO N Z, *et al.* Effects of multi-angle hyperspectral polarized reflection by forest soil[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 702-706. (in Chinese)
- [66] 陈雅兰, 孙可, 韩兰芳, 等. 土壤中微塑料的分离及检测方法研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 364-380.
CHEN Y L, SUN K, HAN L F, *et al.* Separation, identification, and quantification methods in soil microplastics analysis: a review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 364-380. (in Chinese)
- [67] 赵文兵, 马万征. 利用偏振信息进行作物营养水平检测的初步研究[J]. *农业装备技术*, 2011, 37(6): 43-45.
ZHAO W B, MA W Z. Primary research of crops nutrition detective based on polarization information [J]. *Agricultural Equipment & Technology*, 2011, 37(6): 43-45. (in Chinese)
- [68] 吕云峰. 基于垂直观测的植被冠层高光谱偏振反射特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(4): 1028-1031.
LÜ Y F. Study of hyperspectral polarized reflectance of vegetation canopy at nadir viewing direction [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(4): 1028-1031. (in Chinese)
- [69] 秦川, 黄敬峰, 王海峰, 等. 光滑叶片的偏振高光谱特性及与叶绿素含量的关系[J]. *气象科学*, 2019, 39(3): 421-426.
QIN C, HUANG J F, WANG H F, *et al.* Polarized hyperspectral characteristics of smooth leaves and its relationship with chlorophyll content [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2019, 39(3): 421-426. (in Chinese)
- [70] 韩阳, 秦伟超, 王野乔. 吉林省西部典型盐渍化土壤偏振反射高光谱特征与模型研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(6): 1640-1644.
HAN Y, QIN W C, WANG Y Q. Study on the polarized reflectance hyperspectral characteristics and models of typical saline soil in the west of Jilin Province, China [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1640-1644. (in Chinese)
- [71] 王凌志, 韩阳, 潘倩. 多角度偏振高光谱的农田土壤肥力模型研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1): 240-245.
WANG L Z, HAN Y, PAN Q. Study on farmland soil fertility model based on multi-angle polarized hyper-spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(1): 240-245. (in Chinese)
- [72] SUN L Z, LUCEY P G, HONNIBALL C I, *et al.* Hyperspectral polarimetry of eight Apollo soils [J]. *Icarus*, 2022, 372: 114740.
- [73] 沈英, 刘贤财, 王舒, 等. 基于偏振编码图像的低空伪装目标实时检测[J]. *兵工学报*, 2024, 45(5): 1374-1383.
SHEN Y, LIU X C, WANG S, *et al.* Real-time detection of low-altitude camouflage targets based

- on polarization coded images[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(5): 1374-1383. (in Chinese)
- [74] 王小龙, 王峰, 刘晓, 等. 荒漠背景下典型伪装目标的高光谱偏振特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051101.
WANG X L, WANG F, LIU X, *et al.* Hyperspectral polarization characteristics of typical camouflage target under desert background[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051101. (in Chinese)
- [75] 徐文斌, 陈伟力, 李军伟. 长波红外高光谱偏振特性的伪装目标识别方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(1): 235-240.
XU W B, CHEN W L, LI J W. Identification method of camouflaged objects based on long-wave infrared hyperspectral polarization characteristic[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(1): 235-240. (in Chinese)
- [76] 贾睿, 王峰, 尹璋堃, 等. 典型伪装材料高光谱偏振特性实验检测与分析[J]. *红外技术*, 2020, 42(12): 1170-1178.
JIA R, WANG F, YIN Z K, *et al.* Experimental detection and analysis of hyperspectral polarization characteristics of typical camouflage materials[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(12): 1170-1178. (in Chinese)
- [77] 褚金奎, 付佳新, 刘建英. 基于介质超表面的集成化偏振光传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(17): 02.
CHU J K, FU J X, LIU J Y. Integrated polarized light sensor based on dielectric metasurface[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2024, 61(17): 02. (in Chinese)
- [78] LAMBRINOS D, KOBAYASHI H, PFEIFER R, *et al.* An autonomous agent navigating with a polarized light compass[J]. *Adaptive Behavior*, 1997, 6(1): 131-161.
- [79] 王昊, 孙晓兵, 刘晓, 等. 天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪设计[J]. *大气与环境光学学报*, 2024, 19(1): 111-124.
WANG H, SUN X B, LIU X, *et al.* Design of automatic measuring instrument for sky visible and near-infrared spectral polarization state[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2024, 19(1): 111-124. (in Chinese)
- [80] 李伟, 吕蒙, 陈天虹, 等. 高光谱图像在生物医学中的应用[J]. *中国图象图形学报*, 2024, 26(8): 1764-1785
LI W, LYU M, CHEN T H, *et al.* Application of a hyperspectral image in medical field: a review[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2024, 26(8): 1764-1785 (in Chinese)
- [81] 魏荣慧, 黄燕萍, 李珊珊, 等. 荧光偏振光谱法探测光动力过程中癌细胞膜的流动性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(11): 1827-1829.
WEI R H, HUANG Y P, LI S S, *et al.* Fluorescence polarization used to derive cell membrane fluidity during photodynamic therapy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(11): 1827-1829. (in Chinese)
- [82] 胡慕芸, 杨迪, 杨子晗, 等. 基于偏振敏感光学相干层析术的口腔鳞状细胞癌组织成像[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1017002.
HU M Y, YANG D, YANG Z H, *et al.* Polarization-sensitive optical coherence tomography for oral squamous cell carcinoma tissue imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1017002. (in Chinese)
- [83] 赵永强, 潘泉, 程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
ZHAO Y Q, PAN Q, CHENG Y M. Imaging spectropolarimetric remote sensing and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [84] ZHAO Y Q, ZHANG L, PAN Q. Spectropolarimetric imaging for pathological analysis of skin[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(10): D236-D246.
- [85] 汪钱盛, 罗海燕, 李志伟, 等. 温室气体星载被动遥感探测载荷研究进展[J]. *遥感学报*, 2023, 27(4): 857-870.
WANG Q S, LUO H Y, LI Z W, *et al.* Research progress of spaceborne passive remote sensing detection payload of greenhouse gases[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(4): 857-870. (in Chinese)
- [86] 秦冰雪, 曾静静. 全球温室气体遥感卫星发展现状[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(9): 4961-4974.
QIN B X, ZENG J J. Development status of glob-

- al greenhouse gas remote sensing satellite industry [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(9): 4961-4974. (in Chinese)
- [87] 丁宁, 于博, 颜昌翔, 等. 星载气溶胶被动光学遥感仪器: 进展与未来展望[J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1701002.
DING N, YU B, YAN C X, *et al.* Spaceborne aerosol passive optical remote sensing instruments: progress and future prospects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1701002. (in Chinese)
- [88] DING N, SHAO J B, YAN C X, *et al.* Near-ultraviolet to near-infrared band thresholds cloud detection algorithm for TANSAT-CAPI[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1906.
- [89] 王佳佳, 捉汝芳, 刘晓, 等. 强对流云团偏振辐射特性分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0901003.
WANG J J, TIR F, LIU X, *et al.* Analysis of polarization radiation characteristics of strong convective cloud clusters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0901003. (in Chinese)
- [90] 史浩东, 王稼禹, 李英超, 等. 复杂海况下海洋生态环境多维度光学监测方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600004.
SHI H D, WANG J Y, LI Y C, *et al.* Multi-dimensional optical monitoring method of marine ecological environment under complex sea conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600004. (in Chinese)
- [91] 李清灵, 尹达一. 椭偏测量法的油膜紫外可见-近红外光谱光谱偏振特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(6): 1661-1666.
LI Q L, YIN D Y. A study of spectral polarization properties of oil slick with ellipsometry from ultraviolet to near-infrared[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(6): 1661-1666. (in Chinese)
- [92] 周冬梅, 王爱环, 李翠然, 等. 基于三波导定向耦合器的紧凑型偏振分束器的设计[J]. *光子学报*, 2022, 51(1): 0151119.
ZHOU D M, WANG A H, LI C R, *et al.* Design of compact polarization beam splitter based on triple-waveguide directional coupler [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(1): 0151119. (in Chinese)
- [93] 黄新, 蒙庆华, 张克智, 等. 微法布里-珀罗腔可
调谐滤波器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1100005.
HUANG X, MENG Q H, ZHANG K Z, *et al.* Research progress of micro fabry-perot cavity tunable filter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1100005. (in Chinese)
- [94] ZHANG Y, WANG C, LIU X Y, *et al.* Bi-channel compressive hyperspectral imager based on polarization conversion metasurface[J]. *Optics Communications*, 2023, 549: 129942.
- [95] KUN Y Z, JIA R, XUE M G, *et al.* Design and implementation of a hyperspectral full polarization imaging system [C]. *Second Target Recognition and Artificial Intelligence Summit Forum. August 20-22, 2019. Changchun, China.* SPIE, 2020.
- [96] ZHANG L, YANG Y, ZHAO S, *et al.* Hyperspectral full polarization imaging system based on spatial modulation [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(5): 1428-1435.
- [97] 陈圣, 谭勇. 光谱相机的固定图像噪声消除技术研究[J]. *传感器技术与应用*, 2022(2): 227-235.
CHEN S, TAN Y. Research on fixed image noise cancellation technology of spectral camera [J]. *Journal of Sensor Technology and Application*, 2022(2): 227-235. (in Chinese)
- [98] 鞠学平. 通道型偏振光谱遥感仪器强度调制模块误差分析与修正研究[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), 2019.
JU X P. *Error Analysis and Correction of Intensity Modulation Module of Channel Polarization Spectrum Remote Sensing Instrument*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [99] 李作恩, 鞠学平, 胡春晖, 等. 通道型偏振光谱望远镜组偏振效应分析与优化[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(12): 1728-1735.
LI Z E, JU X P, HU C H, *et al.* Analysis and optimization of polarization effect of telescope group of channel polarization spectrometer [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(12): 1728-1735. (in Chinese)
- [100] 杨斌, 颜昌翔, 张军强, 等. 多通道型偏振成像

- 仪的偏振定标[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1126-1134.
- YANG B, YAN C X, ZHANG J Q, *et al.* Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1126-1134. (in Chinese)
- [101] 代虎. 偏振探测与成像系统研究及优化[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- DAI H. *Research and Optimization of Polarization Detection and Imaging System*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [102] 邢文赫. 通道色散型偏振光谱成像系统偏振辐射标定研究[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), 2021.
- XING W H. *Study on Polarization Radiation Calibration of Channel Dispersive Polarization Spectrum Imaging System* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [103] 泊建. 快照式空间调制型计算层析偏振光谱成像技术研究[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), 2022.
- BO J. *Study on Snapshot Spatial Modulation Computed Tomography Polarization Spectroscopy Imaging Technology*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [104] 李铁, 高乔裕, 李文许. 卷积增强动态图卷积特征提取的高光谱图像分类[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(20): 13.
- LI T, GAO Q Y, LI W X. Hyperspectral image classification based on convolutional feature extraction of convolution enhanced dynamic graphs [J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2024, 61(20): 13. (in Chinese)
- [105] SUZUKI M, DOI K, *et al.* Near-infrared hyperspectral circular polarization imaging and object classification with machine learning [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(3): 706.
- [106] QIAN J M, LI J X, WANG Y B, *et al.* Underwater image recovery method based on hyperspectral polarization imaging [J]. *Optics Communications*, 2021, 484: 126691.
- [107] 沈英, 黄伟达, 周则兵, 等. 基于特征波段偏振成像的差异增强伪装目标检测[J]. 兵工学报, 2024, 8:1-10.
- SHEN Y, HUANG W D, ZHOU Z B, *et al.* Contrast Enhancement for Camouflage Target Detection based on Characteristic Band Polarization Imaging [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 8: 1-10. (in Chinese)
- [108] 李文杰. 基于DPC多角度偏振数据的气溶胶细粒子光学厚度反演研究[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), 2022.
- LI W J. *Inversion of Optical Thickness of Aerosol Fine Particles Based on DPC Multi-angle Polarization Data* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [109] 王含文. 植被及颜色相近地物分类的高光谱图像降维方法研究[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), 2022.
- WANG H W. *Research on Hyperspectral Image Dimensionality Reduction Method for Classification of Vegetation and Similar Color Objects* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [110] YAO H, FU B L, ZHANG Y, *et al.* Combination of hyperspectral and quad-polarization SAR images to classify marsh vegetation using stacking ensemble learning algorithm [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5478.
- [111] SUN L Z, LUCEY P G, FISHER E A. Using polarized infrared spectroscopy to characterize surface adsorbed and internal water in planetary materials[J]. *Icarus*, 2024, 411: 115924.
- [112] LUO J, FORSBERG E, HE S L. 5D-fusion imaging for surface shape, polarization, and hyperspectral measurement[J]. *Applied Optics*, 2022,

61(26): 7776-7785.

- [113] 刘晶晶,李开良,徐梓翔,等. 基于偏振高光谱激光雷达和微波辐射计的大气温度探测和融合算法研究[J]. 光子学报, 2021, 50(7): 203.

LIU J J, LI K L, XU Z X, *et al.* Atmosphere temperature profiling and a fusion algorithm based on polarization HSRL and MWR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 203. (in Chinese)

作者简介:



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,1995年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1998年于浙江大学获得硕士学位,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感仪器的光机电一体化技术,多光谱、超光谱空间遥感成像技术、偏振探测技术、可调谐半导体激光吸收光谱技术、腔衰荡光谱技术等方面的研究。
E-mail:yancx0128@126.com