中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 4 期: 240003
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 西安交通大学建校130周年专辑

偏振光谱成像技术综述: 原理、现状与关键问题

韩风, 李炳怡, 郭世平, 张凯, 穆廷魁*

西安交通大学物理学院, 物质非平衡合成与调控教育部重点实验室, 空间光学研究所, 西安 710049
*联系人, E-mail: tkmu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-10-30; 接受日期: 2026-01-14; 网络出版日期: 2026-03-13
国家自然科学基金(编号: 62175196)、国家重点研发计划(编号: 2023YFB3906000)、国家博士后研究人员计划(编号: GZB20250076)和中央高校基本科研业务费(编号: xzy012025081)资助项目

摘要 偏振光谱成像技术, 作为一种融合图像、光谱与偏振等多维信息的先进感知手段, 近年来在遥感探测、生物医学、天文观测及纳米光子学等领域展现出巨大潜力. 本文系统梳理了该技术的发展脉络与研究现状, 重点剖析了传统自由空间光学架构下的主要技术路径, 包括分时、分孔径、分振幅、分焦平面及通道调制等体制, 并探讨了新兴的基于超表面的片上集成化方案. 通过对比分析各类方法的成像原理、性能特征与典型应用, 本文深入阐述了其在空间分辨率、光谱精度、系统稳定性及快照成像能力等方面的优势与局限. 文章进一步指出, 系统的小型化、集成化与智能化是未来发展的核心趋势. 本文旨在为偏振光谱成像技术的深入研究和工程应用提供系统性的参考, 并展望其在复杂环境感知、深空探测及下一代集成光子学等领域广阔的应用前景.

关键词 光谱成像, 偏振成像, 偏振光谱成像

PACS: 42.79.-e, 42.25.Ja, 42.30.-d

1 引言

成像技术的发展经历了从单一强度测量到多维度信息融合的过程. 传统的光谱成像技术通过分离不同波长的光谱分量, 能够揭示物质的化学组成与分布特征, 已广泛应用于遥感[1,2]、环境监测[3]和生物医学成像[4]等领域. 然而, 仅依赖光谱信息往往不足以在复杂背景中有效区分目标与环境. 与此相互补充的是偏振成像, 其通过探测光的振动方向和偏振态, 能够提供关于物体表面形貌、几何结构和散射机制的独特信息[5]. 偏振信息与光谱信息在物理机制上通常互不相关, 因此二者的联合获取能够显著增强目标识别与场景解析的能力[6].

近年来, 偏振光谱成像(Spectropolarimetric Imaging, SPI)作为融合偏振与光谱双重信息的新兴手段, 逐渐成为多模态成像的重要研究方向[7]. 与单一模式相比, 偏振光谱成像在复杂背景下的小目标探测中展现出显著优势[8–10]. 例如, 在被动遥感中, 光谱数据揭示材料属性, 而偏振信息则能增强边界与结构特征, 从而实现更高的检测对比度和可靠性[8]; 此外, 在天文学和医学检测中, 偏振光谱被视为潜在的生命探针, 可用于远程识别分子手性特征, 或是探索病理机制[3,11–16].

引用格式: 韩风, 李炳怡, 郭世平, 等. 偏振光谱成像技术综述: 原理、现状与关键问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 240003
Han F, Li B, Guo S, et al. A review of spectropolarimetric imaging: Fundamentals, recent developments, and critical issues (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 240003, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0502

© 2026《中国科学》杂志社

研究人员通过持续进行技术创新，优化仪器设备和数据处理手段，使该技术变得更加高效与精准，为科研探索和实际应用开辟了更广阔的空间. 尽管偏振光谱成像已展现出广阔应用前景，但其发展仍面临多方面挑战. 传统基于机械扫描或液晶器件的系统往往存在稳定性差、时间分辨率不足的问题[17]；而集成化器件虽然体积小巧，却受限于加工工艺和光学效率[18]. 因此，如何在系统结构、数据获取与算法处理等层面实现高分辨率、实时性与小型化的统一，成为该领域的核心科学与工程问题.

本文将系统回顾偏振光谱成像技术的发展脉络与研究进展, 重点介绍偏振光谱成像仪的原理与应用, 仪器的发展和偏振光谱信息的获取与重建，以及新兴的集成超表面方案. 在此基础上，分析现有技术面临的挑战, 并展望未来的发展趋势与应用前景.

2　自由空间系统

偏振光谱成像技术的核心在于实现对光谱与偏振信息的联合获取与解耦，实现对目标的多维光学表征. 在自由空间成像系统中，光的偏振态可由Stokes矢量表示为:

$$\mathbf{S}(\lambda)=\begin{bmatrix}S_0(\lambda)\\S_1(\lambda)\\S_2(\lambda)\\S_3(\lambda)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I_0(\lambda)+I_{90}(\lambda)\\I_0(\lambda)-I_{90}(\lambda)\\I_{45}(\lambda)-I_{135}(\lambda)\\I_R(\lambda)-I_L(\lambda)\end{bmatrix}, \tag{1}$$

其中，$S_0(\lambda)$表示总光强；$S_1(\lambda)$表示水平/垂直线偏振强度差；$S_2(\lambda)$表示+45°/−45°线偏振强度差；$S_3(\lambda)$表示右旋/左旋圆偏振强度差.

在自由空间系统中, 通过偏振调制元件(如旋转波片、液晶可变延迟器或偏振分光器)将偏振信息编码到可被探测器记录的光强信号中，可用测量模型表示为:

$$\mathbf{I}(\lambda)=\mathbf{M}(\lambda)\cdot\mathbf{S}(\lambda), \tag{2}$$

其中，$\mathbf{I}$表示经过偏振调制测得的光强，$\mathbf{M}$为系统偏振调制矩阵，描述光路中调制元件对Stokes矢量的映射关系. 同时，偏振角(AOP)、偏振度(DOP)、线偏振度(DOLP)和圆偏振度(DOCP)的图像可以计算为:

$$\begin{aligned}&\mathrm{AOP}(\lambda)=\frac{1}{2}\arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right),\\&\mathrm{DOP}(\lambda)=\frac{\sqrt{S_1^2+S_2^2+S_3^2}}{S_0},\\&\mathrm{DOLP}(\lambda)=\frac{\sqrt{S_1^2+S_2^2}}{S_0},\\&\mathrm{DOCP}(\lambda)=\frac{S_3}{S_0}.\end{aligned} \tag{3}$$

目前偏振光谱成像技术根据其调制原理与光路结构, 可主要分为分时调制、分孔径调制、分振幅调制、分焦平面调制以及通道调制五大类, 系统原理如图1所示. 本节将系统阐述各类方法的原理、典型系统与研究进展.

2.1　分时调制

分时调制型方法通过在光路中引入波片、液晶可调延迟器(Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR)、电光调制器等主动调控元件，在时间维度上对入射光波的偏振态进行编码调制，并在不同时刻依次获取多组强度测量，从而提取场景的偏振信息. 部分实现方案中可通过扫描或位置切换等方式引入空间变化，但其本质仍对应于不同时间点的连续测量. 再结合光谱分光系统，即可逐次获取目标的多维偏振光谱信息，原理光路如图2所示. 通常，传统时间调制方法依赖机械旋转或电控切换完成偏振态序列采集，这在实现高精度偏振测量的同时，也引入了系统响应延迟和机械稳定性限制，使得瞬态变化场景或快速运动目标的观测存在困难. 而空间调制策略则通过将焦平面分割为多个子区域或利用微偏振阵列，实现单帧快照成像，有效提升了时间分辨率与系统的整体稳定性，避免了机械运动引入的误差，同时简化了系统的动态响应控制[19].

分时调制技术的发展与电控可调器件的进步密切相关. 国际上首个设计用于地球遥感的空间成像光谱偏振设备于1996–1997年开始监测. 在此类仪器中, POLDER通过更换安装在转盘上的光谱滤光片进行多光谱测量, 如图3所示[20,21]. 在其中的三个波长下, 使用旋转的偏振组件(偏振片、半波或四分之一波片)额外进行了偏振测量. 其后续发展型号PARASOL具备多角度观测能力，能够以16个不同的视角捕获场景的多光谱图像. 通过滤光片依次分离出440–1020 nm光谱区域的九个光谱波段. 在三个波长下，额外依次记录了具有不同线偏振方向的图像[22]. 此型号最新仪器的估

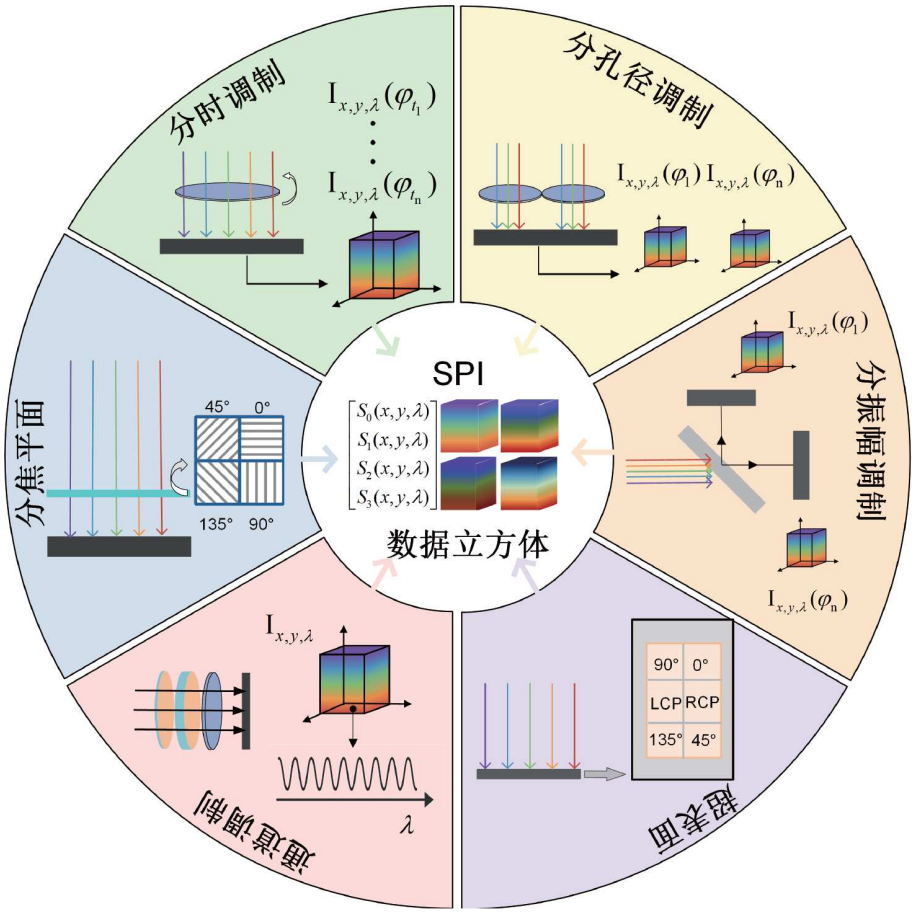


图 1　偏振光谱成像技术的偏振调制方式[5]: 分时调制、分孔径调制、分振幅调制、分焦平面调制、通道调制以及超表面调制

Figure 1　Polarization modulation methods in SPI technology [5]: temporal modulation, aperture division modulation, amplitude division modulation, focal plane division modulation, channel modulation, and metasurface modulation.

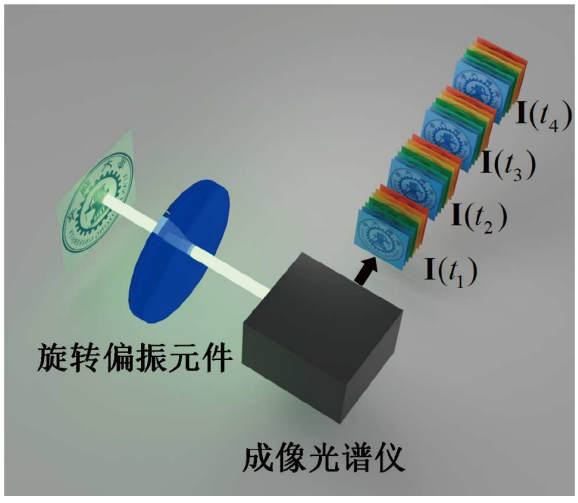


图 2　分时调制型偏振光谱成像技术原理图[5]

Figure 2　Schematic diagram of temporal modulation spectropolarimetric imaging [5].

计偏振测量精度(确定线偏振度)估计为2%. 然而, 基于时间序列的调制方法在移动平台观测时, 即使场景静止也会因不同时刻测量引入偏振误差.

20世纪90年代末, LCVR作为快速电控偏振调制元件被引入光谱偏振成像系统, 利用电控双折射效应调制光的相位延迟, 从而改变输出偏振态, 具有响应速度快、无机械运动、稳定性好的优势. 与此同时, 液晶可调谐滤光片(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF)作为另一种电控分时光谱-偏振选择器件, 也逐渐得到发展, 通过施加电压改变液晶双折射效应, 实现特定波长和偏振态的透过. 1999年, 意大利Duggin等人[23,24]设计了基于LCTF的光谱偏振成像仪, 通过在相机前放置LCTF和旋转偏振片进行偏振测量, 但由于偏振片仍需机械旋转, 导致系统实时性受限且调焦不便.

随后出现了新型的商用偏振器(线栅偏振器)[24], 这些新组件与光电探测器阵列结合使用, 实现了单探测器偏振分光成像, 避免了传统系统中孔径分光或振幅分光的限制. 美国喷气推进实验室Diner等人[25,26]讨论了一种无移动光学组件、包含物镜和一个在设备焦平面分离光谱和偏振通道的光电探测器的多阳极多光谱偏振成像仪(Multiangle SpectroPolarimetric Imager, MSPI)的概念. MSPI的主要任务是在长期飞行任务中, 利用中等空间分辨率和宽视场, 测量多个光谱波段的线偏振度. 该仪器主要由两个光弹调制器和三面反射镜构成, 仪器设计如图4所示.

经过多年开发与测试, NASA研制的机载多阳极光谱偏振成像仪AirMSPI于2010年开始执行观测任务[27]. 该设备由一个八波段相机组成, 沿航迹在±67°范围内进行多阳极光谱偏振成像测量. 通过平台移动时扫描场景来获得二维图像. 其焦平面CCD前集成了与像元高度匹配的光谱与偏振滤光条, 覆盖355–935 nm光谱范围. 在三个波长下进行偏振测量. 相应地, 分配了四行光电探测器, 在三个关键波段, 系统采用微偏振器阵列(0°, 45°, 90°方向)进行偏振调制, 并通过双光弹性调制器与消色差温补四分之一波片, 实现高精度线性偏振度与偏振角解算, 为气溶胶复折射率及粒径分布反演提供关键数据[28]. 尽管AirMSPI在解析前三个Stokes参数方面表现优异, 但由于未设计圆偏振测量通道, 其无法直接获取第四Stokes参数. 然而在大多数自然场景和气溶胶探测应用中, 圆偏振分量通常可忽略(≤0.001), 因此对实际遥感分析影响有限.

近年来, 基于LCVR的技术在高光谱偏振成像领域取得新进展. 2020年, 得克萨斯大学Zhou等人[29]研制了可见光谱段偏振高光谱显微镜, 通过两个偏振片和两个LCVR完成全Stokes偏振成像, 可获取透射光强度及偏振特性, 在生物医学与材料科学中具有应用价值. 2021年, 西班牙马德里国家航空技术研究所的Angulo等人[30]开发了用于小型卫星的液晶高光谱相机, 由两个精密配置的线性偏振器、液晶器件和单色CMOS相机组成, 推动了LCVR在航天遥感中的应用. 西北农林科技大学Xu等人[31]提出基于LCVR的压缩感知高光谱偏振成像技术, 在偏振与高光谱维度同时进行编码与压缩, 显著提升系统压缩比并保持优良性能, 展示了在压缩高光谱偏振成像领域的创新性与应用潜力. 当前研究重点已转向提高电控器件实时性与操作灵活性, 开发无需机械部件的先进调制方法, 以提升系统响应速度与操作简便性.

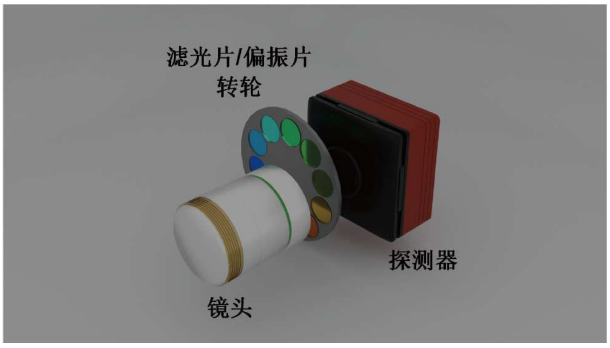


图 3　POLDER遥感装置[20,21]
Figure 3　Layout diagram of the POLDER remote sensing system [20,21].

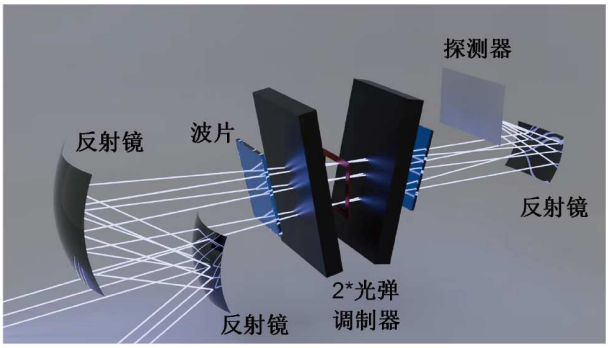


图 4　MSPI系统的示意图[25,26]
Figure 4　Schematic of the MSPI system [25,26].

在地基与遥感应用中, Mantis光谱偏振仪作为代表, 采用推扫式光谱成像结合旋转偏振片的分时调制方式, 能够覆盖382–1017 nm波段并提供997个高光谱通道. 其空间分辨率可达0.14°, 偏振度测量不确定度控制在0.5%以内, 适合全天空观测任务[32]. 该系统尤其在气溶胶探测、大气散射场分析和偏振大气校正中具有重要价值. 亚利桑那大学Tyo和Turner[33]在静态傅里叶光谱仪的干涉仪狭缝前引入由两片电控液晶相位延迟器构成的偏振调制器, 通过连续四步调制序列可获取完整的空间维Stokes矢量, 再结合第二维扫描实现七维数据立方体的重建. 中国科学院安徽光学精密机械研究所开发了名为多角度偏振相机(Directional Polarimetric Camera, DPC)的偏振成像仪器[34]. 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个波段具备偏振测量能力. 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. DPC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, 本质上是将POLDER的时序测量思想通过多个滤光片通道在单次观测中实现, 是分振幅思想在多角度偏振测量中的体现. 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.

2.2　分孔径调制

分孔径调制(Division of Aperture, DoAp)的核心思想是在光学系统的孔径光阑面或入瞳处, 通过特定的偏振光学元件将入射光束分割成多个子孔径, 成像原理如图5所示. 通常在孔径面放置由不同方向的偏振片、相位延迟器(如波片)或双折射棱镜对入射光进行一种特定的偏振态调制(对应Stokes矢量中S_0, S_1, S_2, S_3的测量), 从而使得不同偏振状态的光线能够同时通过光学系统, 并在单次曝光下被同一个探测器捕获.

南京理工大学Meng等人[35]提出分孔径空间调制方案, 以替代传统时间调制方法, 在光学系统孔径光阑面布置由相位延迟片与偏振片构成的偏振调制器, 将入瞳分为四个偏振特性不同的子区域. 结合光场相机与微透镜阵列, 可在单帧内同步记录四个偏振调制后的干涉图像, 实现空间坐标与全Stokes矢量的同步提取, 而光谱维信息仍需通过光程差扫描获取. 光学技术的快速发展导致了具有新特性的光学元件的诞生. 因此, 为实施构建具有新特性集的成像光谱偏振仪的

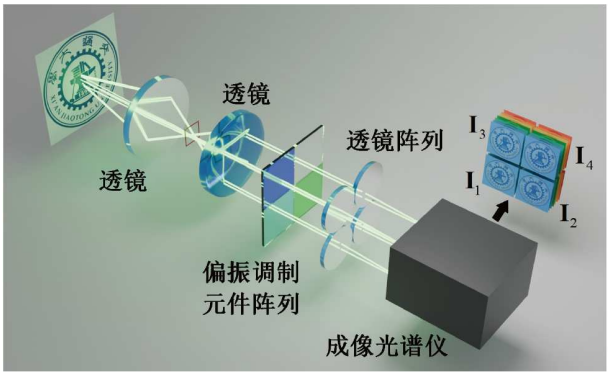


图 5　分孔径调制型偏振光谱成像技术原理图[5]
Figure 5　Schematic diagram of aperture-divided modulation spectropolarimetric imaging [5].

创新原理提供了新的机会.

在此基础上, 西安交通大学Mu等人[7]进一步提出并系统发展了一系列分孔径型偏振光谱成像方法. 2014年, 他们首次将分孔径偏振测量与积分视场光谱学(Integral Field Spectroscopy, IFS)相结合. 该系统在入瞳面通过偏振片和相位延迟器将孔径划分为多个子孔径, 每个子孔径对应一种特定的偏振态调制, 从而使探测器在一次曝光中即可接收到不同偏振态的光强分布. 随后, 这些多通道光强信息经由IFS进一步分光和重排, 被映射到二维探测器平面上, 从而实现了全Stokes参数随波长分布的单帧快照获取. 该方案的核心原理是: 通过“空间分割”完成偏振态并行测量, 再利用“光谱重排”实现光谱维度展开, 从而在单帧中同时编码空间、光谱和偏振三维信息.

随后, Mu等人[36]针对分孔径型系统的性能开展了更深入的理论研究. 他们随后提出了完整的误差建模与补偿框架, 系统分析了光学元件安装误差、入射光束非均匀性、探测器噪声及定标误差对Stokes参数解算的影响机理. 通过建立误差传递模型, 他们定量评估了不同噪声源和系统误差在偏振度、偏振角以及光谱恢复精度上的影响, 并提出相应的校正与补偿方法, 为系统的鲁棒性提升和工程化设计提供了理论依据.

同年, Mu等人[37]又提出并演示了一种基于Wollaston棱镜阵列的快照全Stokes成像仪, 如图6所示. 其原理是在光学系统孔径位置布置多个方向正交的Wollaston棱镜, 每个棱镜能够将入射光分解为互相正交的偏振分量, 进而在探测器上形成多个偏振分量对应的像对. 通过合理设计阵列的排布, 可以在单帧图像中同时获取四个正交偏振通道, 并进一步解算全Stokes参数. 与早期基于波片或线偏振片的分孔径方案相比, Wollaston阵列具有无吸收损耗、高透过率和色散小等优势, 因此能够在保持快照特性的同时提升系统光效率和成像质量. 这一实验展示标志着分孔径偏振成像技术从理论原理走向了实际系统实现, 奠定了后续快照全Stokes偏振光谱成像发展的基础.

在工程化方面, Mu等人[38,39]提出的消色差快照全Stokes成像偏振计(Achromatic Snapshot Full-Stokes Imaging Polarimeter, ASSIP)代表了分孔径偏振调制技术的最新进展, 如图7所示. 该系统采用四象限消色差椭圆分析器作为偏振态分析器, 通过优化设计使系统对高斯噪声和泊松噪声均具有免疫力, 并结合扩展的

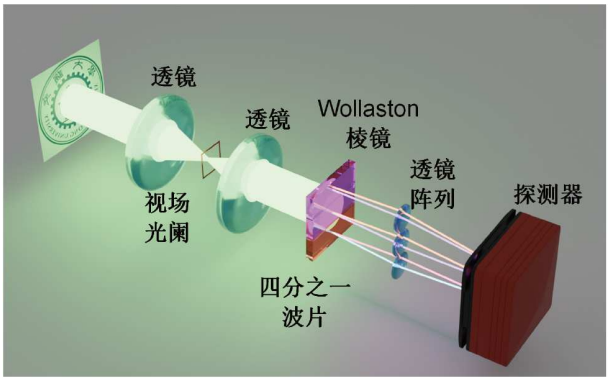


图 6　基于Wollaston棱镜阵列的快照全Stokes成像仪[37]
Figure 6　Snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeter using Wollaston prism array [37].

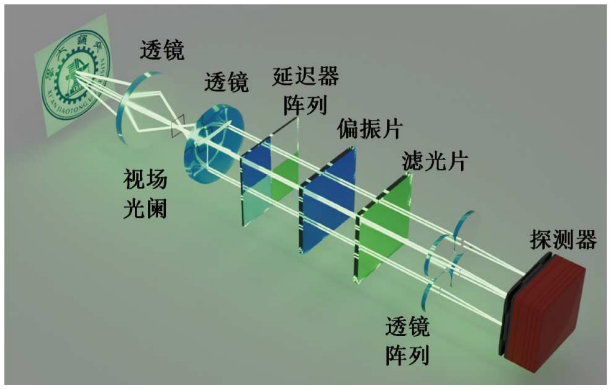


图 7　分孔径型偏振光谱样机ASSIP示意图[38,39]
Figure 7　Schematic of the aperture-division spectropolarimetric prototype ASSIP [38,39].

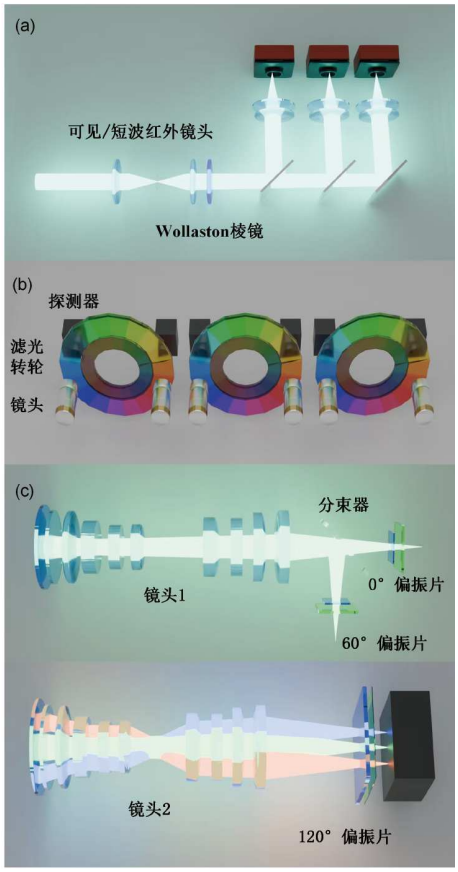


图 8　分孔径型偏振光谱样机示例: (a) Glory传感器[40], (b) 3MI[41–43], (c) CAPI[44]
Figure 8　Examples of aperture-division spectropolarimetric prototypes: (a) Glory sensor [40], (b) 3MI [41–43], (c) CAPI [44].

特征值校准方法进行系统标定，显著提高了在450–650 nm波段内的测量精度与稳定性. ASSIP在不同带宽(10, 25和200 nm)下均表现出良好的性能, 验证了其在复杂场景和动态目标探测中的实用性.

为了同时记录场景、扩大覆盖区域并提高偏振测量数据的精度，多个国家和公司开发了一种气溶胶偏振传感器，如图8(a)所示[40]. 它专为GLORY计划内的长期监测而设计，该计划的目标是确定气溶胶和云的全球分布并研究它们对气候变化的影响. 该传感器包含六个用于可见光和近红外光谱区域(410–2250 nm)的望远镜. 在每个望远镜中, 光束通过Wollaston棱镜在空间上分裂成正交偏振分量. Wollaston棱镜主方向的相互取向，结合二向色分光镜和光谱滤光片，使得可以在每个波长下获得四个具有不同偏振面方向的图像. 系统通过双镜交叉旋转完成场景扫描, 并配备高精度定标系统, 实现了辐射测量与偏振测量的双重精度提升. 场景扫描通过旋转两个交叉的、具有补偿仪器偏振的反射镜来完成. 复杂的校准系统提供了高辐射测量和偏振测量精度，同时其设计理念为后续偏振光谱仪发展提供了重要参考.

为了进一步提升观测能力, 欧洲航天局(ESA)开发了一款名为3MI (Multi-viewing, Multi-channel, Multi-polarization Imager)的先进遥感仪器[41–43]. 3MI由两套共孔径的大视场偏振成像设备组成, 如图8(b)所示, 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. 3MI具备12个光谱通道, 包括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. 其多通道并行探测的架构是分振幅调制技术在新一代星载仪器中的典型应用.

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研发的多波段云和气溶胶探测仪(Cloud and Aerosol Polarization Imager, CAPI)则运用了分孔径的技术手段来测量偏振参数[44]. 如图8(c)所示, 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, 并设计了九个独立的通道, 这些通道可视为并行工作的分振幅探测单元. 在这些通道中, 670和1640 nm波段各配备了三个用于偏振探测的通道, 通过分束器或多个探测器实现不同偏振态的光强测量. 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[45].

2.3　分振幅调制

分振幅调制(Division-of-Amplitude, DoAm)通过在光路上把入射光能量分配到多路并行偏振分析通道, 并在每一路上放置不同的偏振分析器或利用器件本身的偏振敏感性, 来获得多路独立强度投影. 为保证Stokes矢量的可解性, 至少需要三组相互独立的测量以恢复线偏振相关参量, 而完整的全Stokes测量通常需要四组及以上的独立通道, 调制原理如图9所示. 与分孔径调制在孔径平面进行空间划分不同, 分振幅调制强调的是“光路分束”, 其特点是能够实现快照式测量, 避免时间调制造成的误差, 适合与光谱或干涉模块结合. 但由于光能量被分配到多个通道, 分振幅调制系统常面临信噪比下降、通道间增益不匹配和系统体积增大的挑战.

早期的典型工作之一是新奥尔良大学Krishnan等人[46]提出的格栅分振幅光度偏振计(Grating DOAP, G-DOAP). 该方法利用衍射光栅的多阶衍射特性, 在不同衍射阶中形成互相独立的偏振投影, 从而在单帧内实现光谱与全Stokes参数的联合获取. 实验在550–940 nm波段实现了约2–3 nm的光谱分辨率和快速测量能力. 该方案将格栅多阶分束与传统DOAP相结合, 为实现高光谱分辨率的快照式偏振光谱测量提供了重要思路.

分振幅调制技术在星载遥感领域得到了成功且广泛的应用, 其核心优势在于能够通过稳定的光路分束设计, 实现对地观测的高精度与高可靠性. 声光可调谐滤波器(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)作为一种典型的分振幅器件, 被逐步引入偏振光谱成像系统. AOTF是一种依赖双折射声光效应的可调谐窄带滤波器, 当超声波在晶体中传播时, 会形成折射率光栅, 把

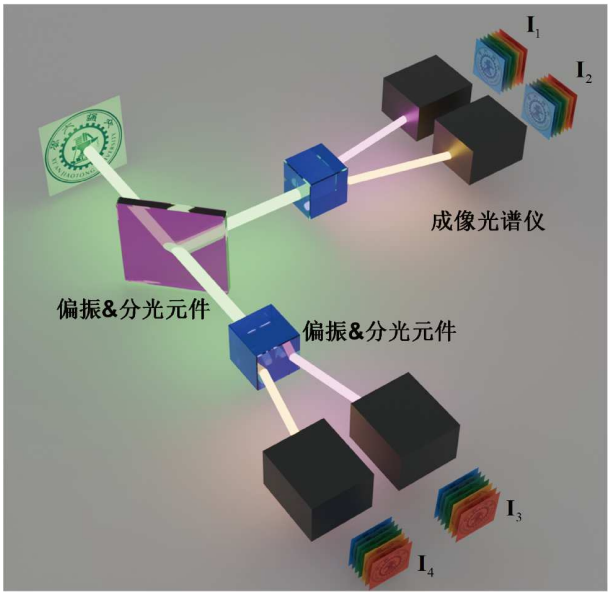


图 9　分振幅调制型偏振光谱成像技术原理图[5]
Figure 9　Schematic diagram of amplitude-division modulation spectropolarimetric imaging [5].

入射光衍射成两路具有正交偏振态的出射光. 这样一来, AOTF在实现波长选择的同时, 也天然完成了“分振幅”, 输出两路互相独立的偏振分量, 其成像基本原理如图10所示. 1997年, 日本国家宇航实验室Suzuki等人[47]研制了基于AOTF的偏振光谱成像探测系统, 展示了其在遥感观测中的潜力. 该系统通过调节射频驱动信号频率来选择输出光的中心波长, 并利用AOTF的双通道输出实现偏振敏感的光谱成像.

2002年, 美国陆军研究实验室Gupta等人[48–50]将AOTF加一个LCVR进行可见近红外光谱偏振成像, 他们将AOTF前放置LCVR对入射光偏振调制, 对+1级衍射光束进行成像. 该系统通过反射镜折叠光路, 减少了系统体积, 但是只能获取线偏振信息. 后续他们将AOTF与两片LCVR结合, 实现了全Stokes光谱-偏振联合测量, 证明了AOTF与电控偏振器件结合的灵活性和固态快照优势.

近年来, 北京航空航天大学Zhang等人[51]提出的偏振复用高通量AOTF系统通过同时利用正、负一阶衍射光进行探测, 有效提升了系统通量并改善了信噪比. 此外, 汕头大学Chen等人[52]基于Mach-Zehnder结构将AOTF与偏振分束器结合, 实现了S和P偏振分量的同步采集, 其调制性能提升93.48%, 信噪比增加

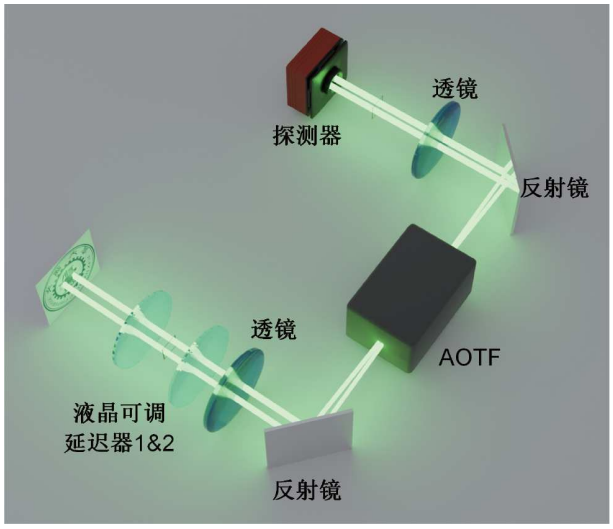


图 10　AOTF光谱偏振成像仪全Stokes偏振测量原理图[48–50]
Figure 10　Schematic of hyper-spectral full Stokes imaging using an AOTF [48–50].

2.59 dB. 印度空间研究组织Jaiswal等人[53]开发了基于AOTF的偏振光谱仪，用于地球反照率和类地行星遥感观测，进一步验证了该技术在宽波段、紧凑化设计和高精度定量测量上的应用潜力.

相比G-DOAP, AOTF具有更强的灵活性和工程化价值: 它不依赖机械扫描即可快速切换波长, 器件小型化、可固态集成，而且双通道输出能满足分振幅偏振测量的要求. 但AOTF也存在带宽有限、入射角依赖、衍射效率随波长和偏振变化等问题，因此在高精度Stokes参数恢复中需要结合消色差光学设计与扩展特征值校准方法来补偿. 总体来看, AOTF提供了一条紧凑、快速、可扩展的分振幅偏振光谱成像实现路径, 正在成为该类技术的重要发展方向.

2.4　分焦平面调制

随着微纳加工工艺的发展，21世纪初期面向像素级的线栅偏振器与偏振光栅(Polarization Grating, PG)逐步商用化. 线栅偏振器由透明衬底上周期性亚波长金属纳米线构成，可兼作衍射光栅与偏振分光元件. 通过将其以0°, 45°, 90°, 135°四种方向集成于探测器像元前形成“超级像素”，可在单次曝光中同步获取四个线偏振取向下的强度图像，从而解算前三个Stokes参数(S_0, S_1, S_2)[54,55]. 基于该技术的偏振相机已在环境监测、地质测绘及弱目标检测等多个领域获得广泛应用[56–58].

近年来，分焦平面型(Division of Focal Plane, DoFP)探测器在偏振光谱成像领域得到广泛应用. 通过在探测器像素阵列上直接集成偏振滤波器阵列，能够在单次曝光下获取空间和偏振信息，再结合光谱分光模块实现多维探测. 然而传统DoFP存在空间采样不足与马赛克插值误差等问题. 西安交通大学Chen等人[59,60]提出了基于压缩感知的快照式成像光谱偏振计. 该方法以编码孔径快照光谱成像(Coded Aperture Snapshot Linear Stokes Imaging Spectropolari-meter, CASSI)为框架，在前端引入DoFP探测器，同时结合压缩感知重建算法，实现了光谱与偏振信息的联合稀疏重建，成像原理如图11所示. 该系统在低信噪比和复杂背景下表现出较强的鲁棒性，能够在单次测量中完成前三个Stokes参量的恢复，为快照式偏振光谱成像提供了一条新的思路. 该方案的最大优势在于利用计算成像思想突破了硬件限制，通过优化编码孔径和稀疏表示模型提升了成像性能. 在具体实现上，研究者首先在CASSI系统中采用了编码光阑，将入射光场在空间-光谱维度进行调制；随后利用DoFP偏振探测器同时获取不同偏振方向的强度分布，从而在一次曝光中保留了丰富的光谱与偏振信息. 由于观测矩阵与稀疏基存在相关性问题，文中提出基于遗传算法的编码孔径优化方法，使得重建的条件数降低，数值解更稳定. 在重建过程中，测试了离散余弦变换和K-SVD稀疏字典作为表示基，结合正交匹配追踪算法求解稀疏

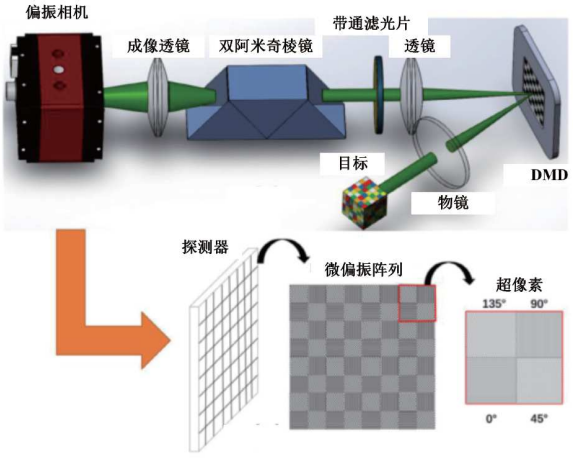


图 11　编码孔径快照式偏振光谱成像仪示意[59]
Figure 11　Schematic of the coded aperture snapshot imaging spectro-polarimeter [59].

系数，能够在单次测量中完成线偏振相关Stokes参量的恢复；若进一步在镜头前引入可旋转延迟器加偏振片的圆偏振分析单元，则可扩展至全Stokes参量的恢复. 实验结果表明，该方法在低信噪比和复杂背景下依然能够准确分离目标与背景，尤其在弱信号检测中表现出优势.

在像素级快照化路线中，西安交通大学Mu等人[61]提出并实验验证了一种新的快照式线Stokes成像光谱偏振仪(Snapshot Linear-Stokes Imaging Spectropolarimeter, SLSIS), 系统光路如图12所示. 该系统将分焦平面微偏振阵列与积分视场光谱学结合，通过两类模块并行完成偏振与光谱编码，从而在单次曝光内获得线偏振Stokes光谱数据立方体：在焦平面前布设0°, 45°, 90°, 135°四种方向的微偏振器以实现分焦平面并行偏振采样；同时使用积分视场单元将二维视场划分为若干子视场并经由多条狭缝或光谱通路分光，最终在探测器上以重新排列的方式同时记录空间、光谱与偏振信息. 该结构无运动部件、可实现单帧快照采集，并在实验中证明能在单一积分时间内输出线偏振-光谱立方体，从而显著提高对动态场景或机载/无人机平台动目标的适应性与时间分辨率. SLSIS的主要优势在于：快照成像、无机械扫描，避免了时间序列测量时的偏振时序误差；系统紧凑、实时性强，适合动态/平台移动观测；直接输出带波长信息的线偏振Stokes曲线, 便于后续物理反演与分类. 其局限性亦明显：由于像素级微偏振阵列与积分视场的结合会在单帧内把光子分摊到“超级像素”上，导致空间分辨率与信噪比之间存在权衡；另外，系统对像素间响应不均，波长-空间配准与复杂定标(偏振校准、光谱定标、畸变/串扰补偿)要求较高，需要设计专门的标定流程与重建/插值算法以恢复高质量的偏振、光谱、空间信息.

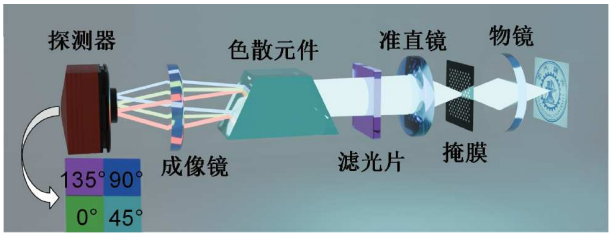


图 12　快照式线偏振成像光谱仪示意[61]

Figure 12　Schematic of the snapshot linear-Stokes imaging spectropolarimeter [61].

2.5　通道调制型

2.5.1　非干涉型通道调制

通道调制型偏振光谱成像(Channeled Spectropolarimetry, CSP)是近年来偏振光谱成像领域中最具代表性的快照式与静态化实现路径之一. 其早期的核心思想是通过在傅里叶域引入“通道”或“载波”，使得不同的Stokes参量能够在同一条光谱上以不同的频率成分加以承载，从而在一次或少数几次曝光中即可重建出随波长变化的全Stokes参数[62,63]. 这种方法相较于传统依赖机械旋转、时间调制或偏振片阵列的方式，具有结构紧凑、光通量高、无运动部件、易于实现快照获取等突出优点. 然而, 通道调制型也面临固有的挑战, 主要包括: 通道串扰、光谱分辨率下降、噪声敏感性、相位标定需求等问题. 因此, 该领域的研究脉络逐渐从“实现可行性”转向“优化建模与重建”，再到“提升鲁棒性与智能化”.

通道调制型的基本原理由北海道大学Oka与Kato首次提出. 他们在工作中提出利用通道调制光谱[62–65]实现偏振信息的编码, 其基本原理如下图13所示, 通过在傅里叶域形成多个调制频带，将Stokes参数分量分别“嵌入”到光谱干涉条纹的不同载波频率上，从而在一次曝光中即可解调得到全Stokes信息. 这一思想突破了传统偏振光谱技术依赖多次测量的限制，被认为是快照式全Stokes光谱偏振成像的开创性工作. 与干涉型方法不同, 通道调制型的本质不在于“相位延迟扫描”, 而是“频谱通道分配”. 在物理上, CSP的核心是将每个Stokes参数通过偏振调制编码为具有不同傅里叶频率的条纹信号, 使得探测器记录的光谱强度$\mathbf{I}(\lambda)$可表

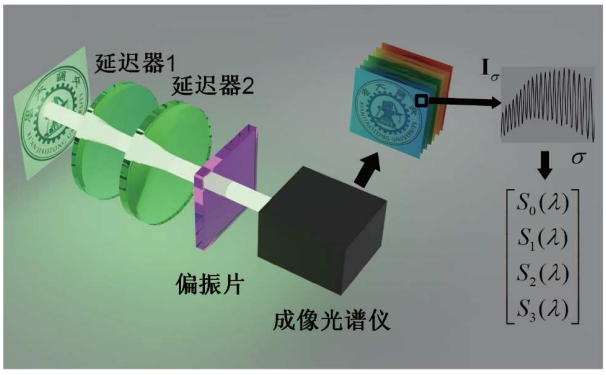


图 13　带通道光谱的光谱偏振仪示意图[62–65]

Figure 13　Schematic of the spectroscopic polarimeter with a channeled spectrum [62–65].

示为:

$$\begin{aligned}\mathbf{I}(\lambda) = {} & (1/2)S_0(\lambda) + (1/2)S_1(\lambda)\cos[\phi_2(\lambda)] \\ & + (1/2)S_2(\lambda)\sin[\phi_2(\lambda)]\sin[\phi_1(\lambda)] \\ & - (1/2)S_3(\lambda)\sin[\phi_2(\lambda)]\cos[\phi_1(\lambda)],\end{aligned} \tag{4}$$

其中$\phi_1(\lambda)$和$\phi_2(\lambda)$表示两个延迟器的延迟相位.

在Oka与Kato之后，研究逐渐转向工程化和实用化. NASA的Sparks等人[17]提出了紧凑、稳健的全Stokes偏振光谱成像方法，强调其在现场环境与航天任务中的可用性. 该类工作关注系统结构优化、抗扰动设计以及高稳定性, 推动了CSP从实验室走向应用.

PG作为一种线性双折射介质空间调制结构, 其光轴呈周期性排列，兼具偏振分光与色散功能[66]. 与Wollaston棱镜不同，PG主要产生正交圆偏振光，其±1级衍射光强与入射光Stokes参数呈线性关系，而零级对偏振不敏感. 消色差PG (450–750 nm)进一步拓展了其在可见光范围内的应用[67]. 美国亚利桑那大学Kudenov等人[68]将两个同旋向等周期消色差PG与线性偏振片结合, 构建了基于PG的Savart型剪切干涉仪, 通过PG的衍射-偏振特性实现光谱与偏振的通道化调制, 再通过计算机层析与迭代算法重建多维数据立方体, 实现紧凑、高精度的偏振光谱成像. 进一步发展中, 美国北卡罗来纳州立大学Kim和Escuti[69,70]提出基于PG的单帧成像光谱偏振仪方案. 该方案在探测器前放置一组具有不同相对取向的PG与相位延迟片，将场景的零级像与不同偏振态的衍射图样叠加投射到探测器上，借助计算机层析与系统传输矩阵重建完整的空间-光谱-偏振数据立方体. 实验验证显示，该方案可实现紧凑、轻量、无运动失调的单帧偏振光谱成像，并且光谱偏振单元可作为薄膜组件直接集成于现有成像系统, 无需在轨进行额外定标或调试. 代表若干薄膜组件集合的光谱偏振单元可以轻松集成到现有的成像系统中.

与此同时，Kudenov等人[71]还提出了一种面向实地应用的推扫式高光谱成像偏振仪. 该系统在450–800 nm波段工作，结合消热化的高阶延迟器与四分之一波片，实现了线性Stokes参数的通道调制获取. 与传统傅里叶型方法不同，该系统通过推扫方式获取场景的二维信息，并在光谱维上实现偏振调制，从而保证了光谱与偏振数据的时间共同采集，避免了旋转器件带来的时间错配. 实验结果表明，该仪器在野外条件下的偏振光谱相对误差均在2.5%以内，显示出较好的稳定性和便携性. 但是仅能获取线性Stokes分量，圆偏振分量缺失；同时分辨率仍受限于通道调制的频带重叠问题, 边缘波段的测量误差更明显.

随着CSP的发展，串扰问题与分辨率下降逐渐成为研究焦点. 在传统CSP中，由于不同Stokes分量的载波频带存在重叠，容易引起信号混叠，导致重建误差，尤其是在窄带信号或高分辨率需求下尤为突出. 传统的CSP系统中，由于延迟量有限，Stokes各分量所对应的傅里叶域载波峰往往彼此靠近甚至发生重叠，导致不同通道间不可避免的频带串扰，在窄带信号和高分辨率应用下尤为突出. 通过叠加高阶延迟, 将Stokes调制条纹的频率“搬移”到更高的傅里叶频率区间，使得各个分量的调制峰间距显著增大，因而在频域内形成互不重叠、清晰独立的通道. 这一“频域分离”策略使得在解调过程中可以通过滤波器分别提取各个载波峰, 从而显著降低了不同Stokes分量间的串扰. 实验结果表明，所恢复的Stokes光谱不仅保留了干涉仪原生分辨率，同时抑制了窄带条件下的信号串扰. 这一工作直接回应了CSP在高精度应用中的痛点，被认为是对Oka-Kato模型的关键改进. 中国科学院长春光学精密机械研究所的Chen等人[72]也提出了基于Savart板与偏振Sagnac干涉的宽带CSP系统，针对的是在宽光谱条件下通道间串扰更加严重的问题. 他们的方案通过光路对称性设计和相位调控策略，有效提升了系统在宽波段内的鲁棒性，展现了CSP技术在复杂光谱环境中的应用潜力. 中国科学院长春光学精密机械研究所的Liu等人[73]则是提出了具有任意波片取向设置的通道型光谱偏振仪. 该研究打破了传统CSP对延迟器快轴角度固定的依赖，并建立了通用模型，针对组装中出现的快轴偏差和环境扰动引起的延迟变化，提出了与之对应的自校准策略以维持系统在温度波动和振动条件下的高精度测量. 这一工作显著降低了装调公差和对实验环境的敏感性，仿真与实验均验证了鲁棒性. 上述的这些工作拓展了CSP在宽谱与复杂场景中的适用性.

传统CSP的解调方法通常依赖傅里叶变换(Fourier Transform Method, FTM), 但这种方法存在几个问题, 串扰不可避免: 频带重叠导致信号混淆; 分辨率下降: 解调后光谱分辨率低于干涉仪原生能力; 相位标定需求: 需要额外的参考测量. 为此, 研究者逐步转向优化与智能重建方法. 美国桑迪亚国家实验室Lee等

人[74,75]将CSP重建问题表述为欠定优化问题(压缩感知重建). 通过稀疏先验提高重建精度与抗噪性, 大幅改善了光谱与偏振信息的保真度. 这一方法被认为是CSP重建的里程碑. 同时还进一步提出基于迭代重建的方法来应对采样非均匀性与噪声干扰. 该方法不依赖严格的傅里叶域分离, 而是通过优化迭代逐步逼近真实解, 提高鲁棒性与适用性.

另一方面, 西安交通大学Chen等人[76]提出的编码孔径全Stokes成像光谱偏振计(Coded Aperture Full-Stokes Imaging Spectropolarimeter, CAFIS)则展示了一种将偏振调制与计算成像相结合的新思路. CAFIS采用旋转延迟器和旋转偏振器作为偏振光谱调制组件, 首先将偏振信息调制到光谱上, 然后通过数字微镜器件进行孔径编码, 最后利用稀疏约束优化算法从编码图像中重建出具有探测器固有空间分辨率的偏振调制光谱图像. 该系统通过四次不同角度的测量即可解调出全Stokes光谱图像, 且采用多次快照方案可进一步提高重建质量, 体现了偏振调制技术与压缩感知理论结合的巨大潜力.

西安交通大学Han等人[77]则在国内延伸了这一思路, 提出了连续滑动迭代重建(Continuous Slide Iterative Method, CSIM)方法. 该方法完全摒弃傅里叶变换与相位标定, 直接在光谱域进行迭代拟合. 实验表明, CSIM不仅有效抑制了串扰与噪声干扰, 还能够保持光谱仪原生分辨率. 这一创新将CSP从传统频域解调推向了“相位无关”的新阶段, 特别适合宽谱、复杂环境下的鲁棒成像. 基于此提出的ORRISp (Optically Replicating and Remapping Imaging Spectropolarimeter)是CSP与光学重映射相结合的代表性成果[78–81]. 该系统实现了单次曝光获取二维场景的全Stokes光谱图像, 并通过连续滑动迭代重建保持了光谱分辨率与偏振恢复的高精度. 实验表明, ORRISp在450–750 nm波段内可提供56个光谱通道, 并维持原生光谱分辨率, 如图14所示. 这一成果不仅在实验室验证了对动态场景的高保真偏振光谱恢复, 还通过外场实验展示了其在地物遥感、气溶胶监测等任务中的可行性.

哈尔滨工业大学Lv等人[82]更进一步, 引入神经网络替代传统傅里叶解析与优化迭代, 提出基于深度学习的CSP重建. 神经网络能够在大数据驱动下自动学习复杂的串扰模式, 从而在推理阶段实现更快、更稳健的Stokes重建. 这标志着CSP重建迈入智能化方向. 合肥工业大学Huang等人[83,84]在此基础上提出了物理引导神经网络(Physics-guided Neural Network), 将CSP物理模型引入深度神经网络的训练过程中, 使物理先验参与参数优化, 为DNN输出结果提供物理指导.

在应用拓展方面, CSP已被逐步引入多个新兴领域. 西安交通大学Tuniyazi等人[14]提出了一系列利用光谱调制极化光谱技术的快照式偏振散射光谱方法,

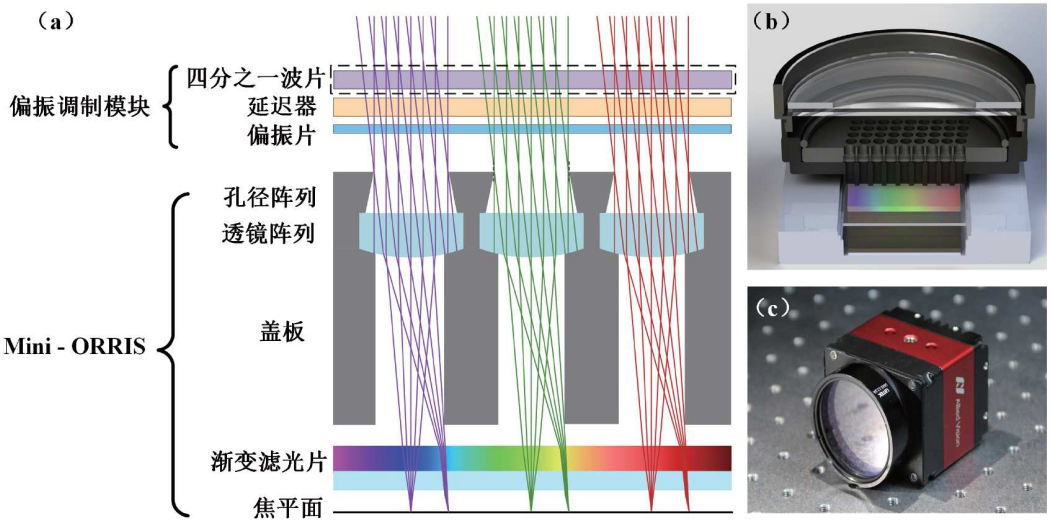


图 14　ORRISp的光路与样机示意图[78–81]: (a) 系统光路图, (b) 相机截面图, (c) 相机实物图

Figure 14　Schematic diagram of ORRISp's optical path and prototype [78–81]: (a) system optical path diagram, (b) camera cross-sectional view, (c) actual camera image.

用于癌症的早期诊断. 他们研究了一种基于通道调制的快照式偏振散射光谱系统, 该系统能够实现对胃癌早期病变的高灵敏检测. 图15(a)和(b)分别展示了系统原理图和实验图. 随后, 该团队又提出了快照式偏振散射光谱内窥镜系统, 进一步将CSP技术引入到临床内镜检测中, 展示了在消化道癌症早期筛查中的巨大应用潜力[15]. 这些研究充分体现了CSP在医学诊断中的独特优势: 其快照式获取能力能够避免病灶运动引起的偏振/光谱失真, 光通量高的特点也适合低光照条件下的活体组织成像.

2.5.2　干涉型通道调制

干涉型成像光谱偏振技术(Interferometric Imaging Spectropolarimetry, ISP)是光谱偏振探测领域中另一条重要的发展路径. 其基本思想是利用傅里叶变换光谱学(Fourier Transform Spectroscopy, FTS)原理, 将光谱与偏振信息耦合到干涉条纹或多端口输出中, 并通过傅里叶变换或反演算法恢复目标的全Stokes参量随波长的变化分布. 与依赖色散分光的传统方法相比, 干涉型系统具有高通光量优势和高分辨率优势, 能够在保持高光谱分辨率的同时实现全Stokes参数的获取. 此外, 共路或静态干涉结构对环境扰动不敏感, 鲁棒性较高, 非常适合弱信号场景和机载、星载平台的应用. 然而, 这类方法的不足在于系统复杂, 对光学器件匹配与相位标定要求较高, 部分液晶/电光调制器件在宽波段下存在透过率限制, 同时数据处理依赖复杂算法, 对噪声敏感, 因而发展目标主要集中在“高分辨率-高鲁棒性-工程化可行性”的平衡上.

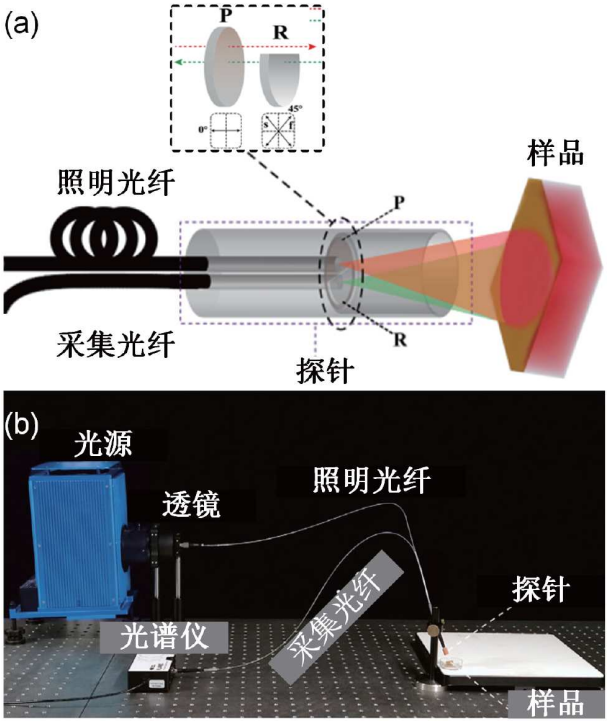


图 15　快照式偏振散射光谱内窥镜系统示意图[15]: (a) 系统光路图, (b) 实物图

Figure 15　Schematic of the snapshot polarimetric scattering spectroscopic endoscopy system [15]: (a) system optical path diagram, (b) physical image.

干涉型ISP的发展经历了从原理验证到静态化, 再到工程化应用的演进. 西安交通大学Zhang等人[85]提出了一种基于傅里叶变换的成像光谱偏振仪, 将修正波片与偏振干涉成像光谱仪(Polarization Interference Imaging Spectrometer, PIIS)结合, 通过相位调制扩展了原始PIIS的功能, 实现了全Stokes参数的测量. 其创新点在于通过相位调制扩展了原始PIIS的功能, 使系统能够在不牺牲光谱分辨率的前提下恢复偏振信息. 该方法的优势在于保持了高光谱分辨率和高通光量, 避免了通道调制方法中分辨率下降的问题. 但与此同时, 该方案依赖于高精度的相位控制与标定, 系统复杂度较高, 对外界扰动的敏感性也制约了其进一步应用. 实验上, 该系统在0.4–1.0 μm波段内实现了全Stokes参数测量, 光谱分辨率优于100 cm^{-1}, 偏振精度控制在0.5%左右, 验证了干涉型ISP的可行性. 紧接着, 西安交通大学Mu等人[86]提出了一种静态高光谱成像线偏振仪(Hyperspectral Imaging Linear Polarimeter, HILP), 如图16(a), 通过引入Savart结构和Wollaston棱镜实现了四路线偏振分量的同时获取, 在一台CCD上获取多幅干涉图. 该系统通过静态干涉结构消除了对运动部件的依赖, 在结构紧凑性与稳定性方面表现突出. 与Zhang等人的方法相比, HILP的最大优势在于快照式获取, 即在单次曝光中即可获得多路干涉图, 显著提升了测量速度和鲁棒性. 这种设计尤其适合机载和星载平台, 对环境适应性强. 然而, 该方法只能恢复线偏振参量, 无法直接获取圆偏振信息, 因而在全Stokes获取方面仍存在不足. 实验表明, HILP在400–700 nm波段范围内实现了2 nm的光谱分辨率, 验证了静态化干涉型ISP的应用潜力.

2013年, 南京理工大学Meng等人[35]提出了基于Sagnac共路干涉仪的全Stokes傅里叶变换成像光谱偏

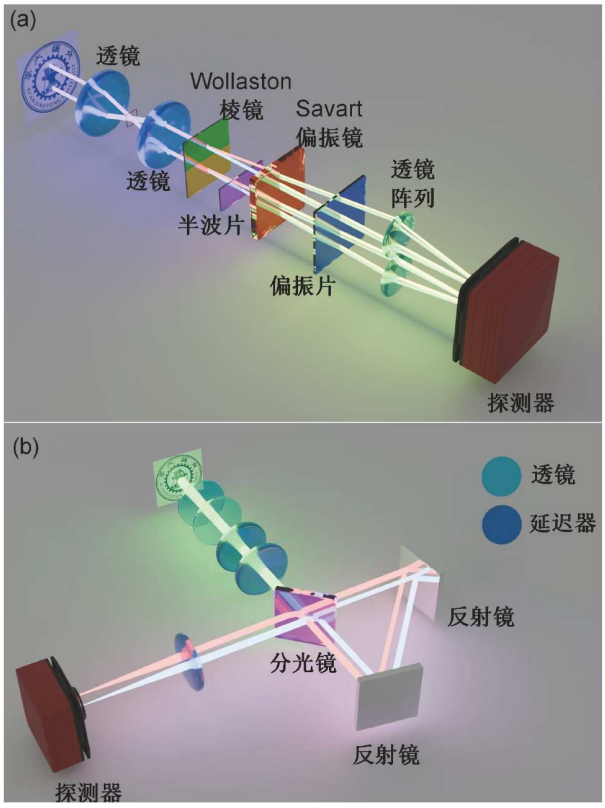


图 16　干涉型ISP系统原理图: (a) HILP[86], (b) FTS[87]
Figure 16　Schematic diagram of interferometric ISP systems: (a) HILP [86], (b) FTS [87].

振仪. 该系统利用Sagnac干涉仪的共路特性, 大幅降低了环境扰动对相位的影响, 从而实现了极高的鲁棒性. 同时, 通过多端口并行输出, 系统能够同步获取四个偏振分量, 实现全Stokes参数的恢复. 其优势在于高通光量和抗噪性能, 特别适合弱信号和复杂背景下的探测任务. 相比之下, 该架构的主要问题在于光学结构复杂, 对器件的一致性和标定精度要求极高. 实验结果显示, 该系统在高噪声环境中仍能保持稳定输出, 展现了工程化应用的潜力. 2014年, Meng等人[87]进一步将时间分割调制与FTS相结合, 如图16(b), 提出了一种全Stokes获取的新方案. 该方法通过时间分割调制产生不同的偏振态, 并在FTS干涉结构中实现偏振信息与光谱信息的联合编码. 与2013年的共路结构相比, 其优势在于结构相对简化, 能够在一定程度上提升系统的抗噪性. 然而, 时间分割调制意味着需要多次曝光, 因而该方案在动态场景中存在局限性. 实验结果表明, 该系统在实验室条件下成功实现了全Stokes获取, 并对噪声性能进行了量化分析, 为后续研究提供了重要参考. 随着研究深入, 静态化与工程化成为新的重点. 随后Barducci等人[88]针对Sagnac成像干涉仪在地球观测中的应用进行了系统的理论研究. 他们重点分析了该类干涉仪在实际光学设计中面临的约束条件, 包括几何结构对相位稳定性的影响、光学元件误差对干涉条纹质量的限制, 以及空间分辨率、光学孔径与探测器尺寸之间的耦合关系. 研究表明, Sagnac架构虽然在共路稳定性和高通光量方面具有明显优势, 但在大视场应用时容易受到像差和光学路径差分布不均的影响, 从而导致干涉条纹畸变和光谱恢复精度下降. 作者提出了通过优化干涉仪几何设计、合理控制入射孔径以及补偿色差像差等方法来减弱这些问题. 这项工作虽然主要集中在理论建模和光学设计约束的分析上, 但对后续干涉型成像光谱偏振仪的系统设计与性能优化提供了重要的指导意义, 也为工程化实现奠定了基础.

西安交通大学Li等人[89]将通道调制与傅里叶变换光谱学相结合, 提出了基于单个Wollaston棱镜干涉仪的静态傅里叶变换成像光谱偏振仪(Fourier Transform Imaging Spectropolarimeter, FTISP). 该方案进一步证明了通道调制与FT光谱学的高度兼容性, 兼具高通量与全Stokes获取的能力. 其意义在于拓展了CSP的实现路径, 奠定了后续基于傅里叶变换光谱仪、计算断层成像光谱仪等架构的研究基础. 西安交通大学Zhang等人[90]则在工程实现上迈出关键一步, 提出了一种基于Savart偏振镜的高通量静态通道干涉成像光谱偏振仪(Channeled Interference Imaging Spectropolarimeter, CIISP), 如图17(a)所示. 该系统在480–960 nm波段工作, 采用时空混合调制模式, 无运动部件, 透过率高, 实验验证了其在目标识别、色彩测量、农业监测等场景中的应用潜力. 这一工作首次将Savart结构与通道调制结合, 强调了其静态化与高通量特性, 具有重要的实用意义. 之后又通过引入Wollaston棱镜与Savart结构, 如图17(b)所示, 结合高阶延迟器, 构成了全分辨通道干涉成像光谱偏振仪(Full-resolution Spectra and Aliasing Reduction Channeled Interference Imaging Spectropolarimeter, FSRCIISP)使得各个Stokes参数的调制频带在傅里叶域得到充分分离, 保证了获取全分辨率光谱和减少混叠功能[91].

2018年, Zhang等人[92]又提出了基于静态偏振干

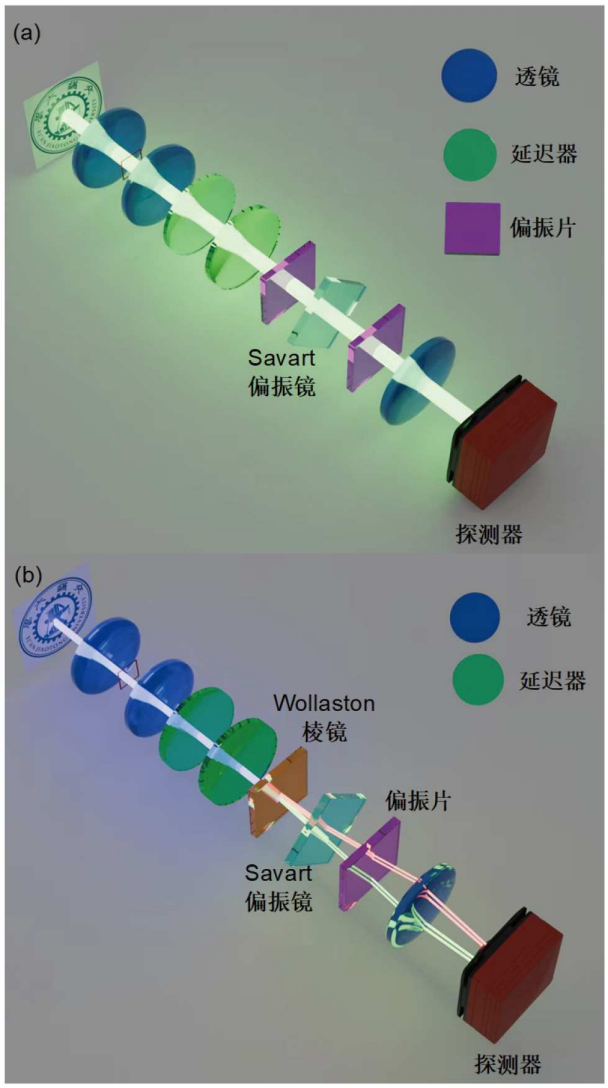


图 17　静态通道干涉成像光谱偏振仪示意图. (a) CIISP[90], (b) FSRCIISP[91]

Figure 17　Schematic of the static channeled interference imaging spectropolarimeter. (a) CIISP [90], (b) FSRCIISP [91].

涉成像光谱仪(Static Polarization Interference Imaging Spectrometer, SPIIS)的方案, 该方法利用Glan-Taylor棱镜作为时间分割调制器, 并结合Savart结构获取干涉条纹, 实现了静态条件下的偏振光谱测量. 与早期的HILP相比, 该方案能够覆盖更宽的波段(480–960 nm), 并在实验中实现了小于3.6%的恢复误差. 其优势在于兼顾高光谱分辨率、通光量和鲁棒性, 同时避免了传统干涉仪的空间混叠问题. 然而, 系统依赖于精确的光学元件对准, 仍存在结构复杂和标定难度高的不足.

2021年, 山东理工大学Bai等人[93]提出了一种结合液晶调制与剪切干涉的静态FTISP. 该系统通过液晶偏振调制器实现偏振态控制, 利用剪切干涉结构完成光谱与偏振的联合编码, 从而避免了机械扫描部件, 提高了系统的鲁棒性与稳定性. 其优点在于实现了全静态化, 结构紧凑, 适合长期运行与复杂环境应用. 缺点是液晶器件在宽波段下存在透过率和相位响应的限制, 同时对温度敏感, 可能影响系统的长期稳定性. 实验验证表明, 该方案能够在保持高光谱分辨率的同时准确恢复全Stokes参数, 展示了进一步工程化的可能. 总体而言, 干涉型ISP的优势主要体现在高光谱分辨率、高通光量和全Stokes获取能力, 适合在弱信号与复杂环境中使用; 其不足在于光学系统复杂、标定难度大、调制器件受限以及算法对噪声敏感. 未来的发展方向包括全静态化宽波段设计、抗噪与标定优化、智能化重建算法以及工程化小型化, 预计将在遥感监测、环境探测、航空航天和军事侦察等领域发挥越来越重要的作用.

从工程应用需求的角度看, 不同自由空间偏振光谱成像调制体制在适用场景和系统取舍上呈现出明显差异. 分时调制方案通常具有较高的偏振测量精度和良好的系统可扩展性, 但依赖多次曝光, 对动态场景和机载平台的适应性有限; 分孔径与分振幅调制通过并行采集提升了快照能力, 更适合对时变目标进行观测, 但在系统体积、光通量利用率及装调复杂度方面需要权衡. 分焦平面调制方案在结构紧凑性和实时性方面具有优势, 适用于资源受限的平台, 但其空间分辨率与偏振精度往往受制于像素级复用. 通道调制方案在通光效率和系统紧凑性方面表现突出, 适合高通量快照成像, 但对通道串扰抑制与解码算法鲁棒性提出了更高要求.

3　片上集成的微纳结构

随着微纳加工与超构材料的发展, 超表面为片上集成化的光谱偏振探测提供了可能. 超表面型偏振光谱成像(Metasurface-based Spectropolarimetric Imaging)是近年来成像光谱学与纳米光子学交叉领域中最为迅速发展的研究方向之一, 如图1所示. 其核心思想在于利用亚波长尺度的纳米结构阵列对入射光的相位、振幅、偏振态以及色散特性进行精确调控, 从而

将传统依赖宏观光学元件(如波片、光栅、棱镜与偏振片阵列等)的分光分偏振功能, 压缩到单层或多层平面化器件之中. 这种方式不仅在器件尺度和功能集成度上展现了显著优势, 同时与快照式成像理念天然契合, 使得偏振光谱成像系统在小型化、片上化以及实时化方向具备了全新的实现路径. 与干涉型和通道调制型方法相比, 超表面型的突出特点是: 它将光学编码与波前调控前移到纳米结构层面, 能够在探测器之前直接完成光谱与偏振信息的多通道分配与映射, 因此能够极大简化后端系统复杂度, 缩短光学链路, 同时保留高维信息获取的潜力.

超表面的概念最早由人造电磁超材料的二维化衍生而来, 其基本原理是通过设计周期性或准周期性的纳米散射单元, 使其在特定波长和偏振下呈现出预定的相位延迟和透射特性. 早期的偏振光学应用主要集中于超表面偏振片、超表面波片与超表面偏振分束器的设计, 这些工作为其在成像领域的应用打下了基础. 真正将超表面引入偏振光谱成像的里程碑性工作之一, 是Chen等人[18]在2016年提出的集成等离子超表面偏振光谱仪. 他们基于金属纳米天线阵列构建了一种能够对不同偏振态和波长进行方向性散射的单片元件, 使得光谱与偏振信息被映射到像面的不同区域. 这项工作首次展示了通过单一平面纳米结构即可同时解码光谱与偏振的可行性, 被认为是超表面型偏振光谱成像的开创性探索. 其技术特点在于等离子共振效应的强耦合能力, 使得极小的单元结构即可在特定波段表现出高度可调的偏振依赖散射模式. 优势在于实现了超紧凑集成, 并直接验证了“平面光学+多维解码”的概念. 然而, 其主要问题也十分明显: 由于金属纳米结构在可见波段存在严重的吸收损耗, 整体透射效率较低; 同时结构参数对入射波长和角度高度敏感, 导致带宽较窄, 限制了实用性.

随着介电超表面的快速发展, 研究者逐渐从金属等离子体转向低损耗的高折射率介质(如TiO_2, Si, GaN等)作为构建材料. 介电超表面不仅可以避免等离子损耗问题, 同时能够在较宽波段内提供高透射效率和可编程的相位控制. 清华大学Ding等人[94]指出, 超表面的引入正在推动快照式光谱成像从传统的光栅-透镜耦合系统逐渐向“平面光学+计算成像”的新范式转变. 在这种范式中, 超表面作为前端编码器, 将多维光场信息(空间、光谱、偏振)通过空间-频谱-偏振的耦合映射直接记录在探测器平面上, 后续再结合稀疏重建或深度学习方法实现高维信息的分离. 这种思路大大减少了机械运动部件和复杂光学链路, 使得快照获取和实时解码成为可能. 技术上的优势在于片上化与快照化的天然兼容性, 使得超表面型系统在体积、重量、功耗等指标上相较传统系统更具竞争力. 然而, 介电超表面在当时仍存在设计复杂度高、单一超表面功能较为有限等问题, 特别是在如何同时兼顾光谱分辨率、偏振测量精度与信号效率之间, 尚需进一步探索. 美国宾夕法尼亚大学Zhang等人[95,96]提出的手性超表面+深度学习快照SPI, 通过设计具有丰富偏振依赖谐振的纳米天线结构, 实现了光谱与偏振信息的联合编码. 而具有强手性响应的meta-atoms, 使超表面能够对包括左/右旋圆偏振在内的偏振态产生可区分的光谱-偏振联合响应, 从而为S_3的重建提供物理可观测性. 二维超表面阵列既作为宽带颜色滤波器, 又作为偏振选择器. 单次曝光即可完成全Stokes光谱的恢复. 同时研究者利用深度学习方法对测量信号进行反演, 显著提升了解调精度与鲁棒性. 在此基础上, Zhang团队还提出了实时机器学习增强的超光谱偏振成像系统. 该系统通过编码手性超表面阵列实现光谱与偏振信息的并行空间编码, 结合深度神经网络解码器, 可经过单次测量重建700–1150 nm波段的全Stokes光谱信息, 同时达到0.23 nm的光谱分辨率和28 fps的实时重建速度. 相较前期的快照SPI系统, 新方案实现了真正意义上的视频级的偏振光谱成像. 该技术兼具小型化与片上集成优势, 在医学诊断、农业监测等领域展现出应用前景, 但其在器件加工复杂性和训练数据需求方面仍面临挑战. 该类方法与传统光学系统相比, 更加突出片上集成和智能化解码.

新加坡国立大学Wen等人[97]进一步提出了一种基于硅基被动超表面阵列的单次曝光光谱椭偏测量系统. 该器件通过设计各向异性与光谱多样性的单元结构, 实现了入射光全Stokes参数的片上编码, 配合迭代优化算法即可在单帧内重建高保真的光谱与偏振信息. 与Zhang等人提出的智能解码式快照SPI相比, 该方案在结构实现上更强调高稳定与高精度, 展示了超表面偏振光谱测量从“智能反演”到“结构编码”的另一种发展路径.

在这一发展进程中, 研究逐渐扩展到红外与热成像等更具应用价值的波段. 美国普渡大学Wang等

人[98]报道了一种旋转堆叠式超表面用于光谱-偏振热成像. 该工作提出通过多层旋转取向的介电超表面堆叠, 实现了对中红外波段光场在偏振和光谱两个维度的解码. 与单层超表面相比, 堆叠结构能够在保证较高透射效率的同时提供更大的设计自由度, 尤其在热红外波段的偏振测量精度上展现出优势. 其技术特点在于利用层间旋转角度引入额外的相位自由度, 从而在探测器面形成高度可控的光谱-偏振映射模式. 该方法的优势是拓展了超表面偏振光谱成像在中红外热成像场景中的适用性, 使其能够在遥感监测、热场分析与红外防御等应用中具备潜在价值. 但同时, 堆叠设计也带来制造复杂度上升与层间误差累积的问题, 尤其是多层对准精度和厚度控制对器件性能有决定性影响, 这使得其在实际推广时仍需更多工艺上的突破.

在偏振成像维度, 西北工业大学Wu等人[99]于2025年报道了一种基于级联超表面的宽带快照Stokes偏振成像方法, 原理图如图18. 该方案通过两级互补设计的介电超表面串联, 分别在偏振态分解与色散补偿上发挥作用, 使得整体系统对入射波长的敏感性大幅降低, 从而实现了跨可见光宽带范围内的稳健Stokes参数测量. 这一设计直接解决了单层超表面由于相位延迟色散性过强导致的偏振解码矩阵随波长剧烈变化的问题, 被认为是超表面偏振光谱成像在宽带化与实用化方向的重要突破. 与此前的金属等离子或单层介电方案相比, Wu等人的工作不仅在原理层面展示了色散补偿的可行性, 更在系统层面上凸显了其应用价值. 其优势在于实现了真正意义上的宽带快照偏振光谱成像, 兼顾了高精度与高效率. 然而, 这类级联设计也面临着器件制造工艺复杂、对层间对准精度要求高等问题, 此外随着层数增加, 整体透射效率不可避免地受到限制, 这些都将在进一步应用中成为必须解决的工程瓶颈.

从功能实现角度看, 超表面型偏振光谱成像主要依赖几类机制. 首先是几何相位与形态相位调控, 通过设计旋转对称或非对称的纳米天线, 实现对不同偏振入射的相位选择性响应, 从而在探测面形成分偏振分量的空间分布. 其次是光谱选择性与色散工程, 通过在单元几何参数上引入波长依赖性, 实现不同波长在不同角度或不同区域的分离. 这类方法能够将光谱分解直接融入到超表面的散射过程中. 最后是空间-频谱-偏振联合编码, 研究者通过复合超表面结构将波长、偏振和空间信息交织编码, 再在探测器平面上形成高维混合信号, 这为单次曝光恢复全Stokes光谱提供了可能性. 这些机制的结合, 使得超表面在成像模式上具有极高的灵活性和扩展潜力.

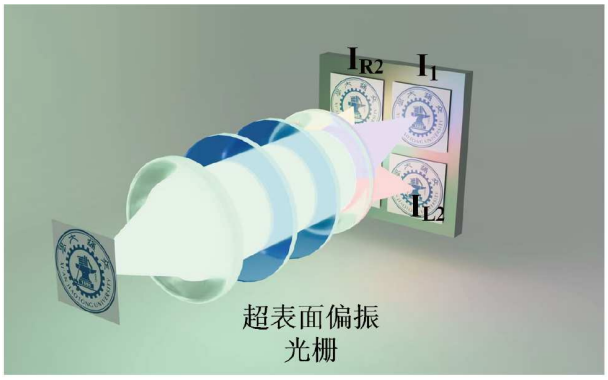


图 18　级联超表面结构示意图[99]

Figure 18　Schematic illustration of cascaded metasurface architecture [99].

尽管优势明显, 超表面型偏振光谱成像仍然面临诸多挑战. 首先是带宽与色散问题, 许多超表面器件在设计时针对单一波长或窄带优化, 导致在宽波段下性能迅速下降, 这严重限制了其实用性. 为此, 级联超表面、多层复合结构以及材料色散补偿等方法被提出, 用以在宽波段内保持稳定的偏振解码矩阵. 其次是效率与损耗问题, 特别是在可见光波段, 金属基超表面存在较强吸收, 虽然介电超表面改善了这一点, 但在复杂功能实现上仍需在透射效率与相位调控能力之间做平衡. 再次是串扰与校准问题, 由于偏振与光谱信息在探测器平面上常常是空间交织或角度分离的, 存在通道间串扰, 这对解码算法和系统标定提出了更高要求. 特别是在宽视场、非理想入射条件下, 串扰问题更为突出. 最后是制造与量产难题, 高性能超表面往往依赖电子束曝光或深度刻蚀工艺, 难以兼顾大面积制备与低成本制造, 这在应用推广上构成一定瓶颈.

针对上述问题, 偏振光谱成像研究在未来发展中正逐渐走向一种“器件-算法联合设计”的整体范式. 一方面, 器件设计不再仅以光学性能最优为目标, 而是更加注重与后端计算方法的协同, 使其编码矩阵具备良好的可逆性与鲁棒性; 另一方面, 计算解码方法从传统的傅里叶变换与矩阵解码扩展到压缩感知、优化迭代乃至深度学习等数据驱动策略. 已有研究表明, 借助神经网络可以有效学习超表面编码过程中引入的复杂串扰与非理想响应, 并在推理阶段实现快速稳健的

Stokes光谱重建. 更进一步, 物理引导的神经网络已经开始被引入, 使得网络在训练时受到超表面物理模型的约束, 提高了泛化能力和物理一致性. 这种“光学编码器+计算解码器”的整体优化思路被认为是超表面型偏振光谱成像未来发展的关键.

与第二章所述自由空间偏振光谱成像体系相比, 基于超表面的片上集成方案通过将光谱与偏振调制功能前移至亚波长纳米结构层面, 在系统小型化、机械稳定性以及单次曝光快照能力方面展现出显著优势. 然而, 受限于器件效率、工作带宽、制造一致性以及系统标定复杂性等因素, 超表面型方案在当前阶段尚难以全面替代成熟的自由空间系统, 更适合作为面向特定应用场景的补充型或新体制探索方向.

同时, 为了从系统层面对不同偏振光谱成像技术路线进行统一比较, 表1总结了目前具有代表性的偏振光谱成像实现方式, 涵盖了传统自由空间体制(时间调制、分孔径、分振幅、分焦平面及通道调制)以及近年来快速发展的片上微纳结构与超表面调制方案. 从对比可以看出, 各类方法在成像维度获取能力、快照特性、系统复杂度与集成潜力等方面各具特点. 传统自由空间方案在偏振精度和物理模型完备性方面具有优势, 但系统体积与动态适应能力受限; 而基于片上微纳结构, 尤其是超表面的调制方案, 通过将光谱与偏振调制前移至纳米结构层面, 在系统紧凑性、单次曝光能力以及与计算成像和智能解码的协同方面展现出显著潜力.

4　总结

偏振光谱成像技术作为光谱学与偏振学交叉发展的重要方向, 已从概念验证逐渐迈向工程化与应用化. 本文重点梳理了分时、分孔径、分振幅、分焦平面及通道调制等自由空间架构, 并进一步讨论了基于超表面的片上集成方案及其在紧凑化与快照成像方面的潜力. 系统比较了其在光谱分辨率、系统稳定性、快照能力以及集成化水平上的优势与局限. 通过对不同技术路线的对比分析可以看出, 各类方法在成像维度获取能力、快照特性、系统复杂度与集成潜力等方面各具优势, 适用于不同的应用场景.

从系统层面看, 尽管偏振光谱成像在体制和实现方式上呈现出多样化发展, 但仍面临若干共性关键问题: 一是空间、光谱与偏振多维信息的高度耦合导致

表 1　偏振光谱成像技术典型实现方式对比(自由空间体制与片上微纳结构)

Table 1　Comparison of typical implementation schemes for spectropolarimetric imaging (free-space architectures and on-chip micro/nanostructures)

方法类别	实现原理	优势	不足	典型应用/代表系统
分时调制	在光路中引入旋转波片、LCVR、电光调制器等元件, 依次改变入射光的偏振态, 在时间维度上实现偏振测量	技术成熟, 偏振测量精度高, 可获取全Stokes参量	实时性差, 易受机械运动/环境扰动影响, 不适合快速场景	POLDER, PARASOL, AirMSPI, Mantis光谱偏振仪等
分孔径调制	在孔径面或光学系统前端划分多个子区域, 通过波片、Wollaston棱镜等实现不同偏振态的同时测量	可实现单帧快照, 全Stokes获取; 避免时间错配	光效率降低, 系统对准误差和噪声敏感, 标定复杂	ASSIP系统, Wollaston阵列偏振仪等
分振幅调制	将光束能量分束到多个并行通道, 每路配置不同偏振分析器或偏振敏感器件	快照式测量, 无需时间扫描; 适合星载应用, 鲁棒性好	光能量分配导致信噪比下降; 系统体积较大, 通道一致性要求高	AOTF偏振光谱仪, ESA 3MI, DPC, CAPI等
分焦平面调制	在探测器像素阵列上集成0°/45°/90°/135°微偏振片, 形成超级像素结构; 单帧即可采集偏振信息	单帧快照, 结构紧凑, 适合动态/机载场景; 易于集成	空间采样不足, 插值误差明显; 空间分辨率与信噪比存在权衡	DoFP偏振相机, SLSIS快照光谱偏振仪等
通道调制	在傅里叶域引入载波频率, 将Stokes参量映射到不同频带; 一次曝光即可解调出偏振光谱	结构紧凑, 通光量高, 无运动部件; 适合快照化与片上实现	易发生串扰, 分辨率下降; 依赖复杂算法和标定	ORRISp, FTISP, CIISP等
超表面调制	利用亚波长纳米结构阵列的偏振与色散响应, 对光谱-偏振信息联合编码, 结合计算成像实现单次曝光重建	片上集成, 天然适配快照成像, 具备实时化潜力	对加工一致性和系统标定敏感; 反演算法复杂	编码超表面快照SPI、单次曝光光谱椭偏/偏振测量等

测量信息不完整与通道串扰问题，这在通道调制、分焦平面等快照体制中更为显著，对获取信息的质量造成影响；二是性能与优化之间的权衡问题，即偏振精度、空间分辨率、光谱分辨率以及光通量等各个性能指标之间存在难以避免的权衡；三是复杂系统工程化存在的挑战，例如，传统自由空间系统存在体积大、装调复杂、稳定性要求高等问题，片上集成方案则面临器件效率、工作带宽、制造一致性及系统标定复杂性等工程问题; 四是算法依赖与实时处理需求, 尤其是对于编码调制、计算成像及超表面方案，高效、鲁棒的反演算法至关重要.

针对上述关键问题，偏振光谱成像未来的研究正逐渐走向一种器件-算法联合设计的整体范式. 在硬件方面, 器件设计不再仅以光学性能最优为目标, 而是更加注重与后端计算方法的协同，使其调制与编码特性具备良好的可逆性与鲁棒性；另一方面，计算解码方法从传统的傅里叶变换与矩阵求解，逐步扩展到压缩感知、优化迭代乃至深度学习等数据驱动策略. 已有研究表明，借助神经网络可以有效学习超表面编码过程中引入的复杂串扰与非理想响应，并在推理阶段实现快速且稳定的Stokes光谱重建；进一步引入物理引导的神经网络，有助于在训练过程中显式融入器件物理约束，从而提升模型的泛化能力与物理一致性. 这种将光学编码器与计算解码器作为统一系统进行协同优化的思路，被认为是超表面型偏振光谱成像未来发展的关键方向.

除偏振光谱成像体制本身的发展外，偏振调控与探测在超快光学领域同样发挥着重要作用. 近年来, 基于飞秒泵浦-探测技术的研究表明, 通过调控激发光与探测光的偏振态，可以实现对相干声子、准粒子动力学以及集体激发模式的选择性探测，从而揭示高温超导、电荷密度波及新型量子态中的关键信息. 例如, 在FeSe基界面超导体系、铁基超导体及高压氢化物中, 超快光学手段已被用于提取超导能隙、电子-声子耦合强度及其随温度和压力的演化特性[100–102]；在层状电荷密度波材料中，超快集体动力学的偏振敏感测量则为发现新兴量子态提供了独特路径[103,104]. 尽管这类研究主要聚焦于时间分辨光谱与非平衡动力学过程, 而非空间分辨成像, 但其在偏振选择规则、偏振态操控以及多自由度耦合表征方面的物理思想，对偏振光谱成像技术在复杂物态探测和极端条件应用中的拓展具有重要启示: 一方面, 超快时间尺度测量可启发发展超高时间分辨率的偏振光谱成像系统，用于捕捉瞬态物理化学过程; 另一方面, 极端条件(超低温、高压、强磁场)下的偏振探测经验可为偏振光谱成像在复杂环境与极端物态探测中的应用提供技术参考.

参考文献

1 Du P J, Xia J S, Xue Z H, et al. Review of hyperspectral remote sensing image classification (in Chinese). J Remote Sens, 2016, 20: 236–256 [杜培军, 夏俊士, 薛朝辉, 等. 高光谱遥感影像分类研究进展. 遥感学报, 2016, 20: 236–256]

2 Benediktsson J A, Palmason J A, Sveinsson J R. Classification of hyperspectral data from urban areas based on extended morphological profiles. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2005, 43: 480–491

3 van Harten G, de Boer J, Rietjens J H H, et al. Atmospheric aerosol characterization with a ground-based SPEX spectropolarimetric instrument. Atmos Meas Tech, 2014, 7: 4341–4351

4 Han L N, Jiao Y Y, Ning W. Application of terahertz imaging and spectroscopy in medical field (in Chinese). J Chongqing Univ Posts Telecommun (Nat Sci Ed), 2021, 33: 242–252 [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. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33: 242–252]

5 Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications. Appl Opt, 2006, 45: 5453–5469

6 Liu Q, Bai C, Liu J, et al. Fourier transform imaging spectropolarimeter using ferroelectric liquid crystals and Wollaston interferometer. Opt Express, 2017, 25: 19904–19922

7 Mu T, Zhang C, Li Q, et al. Snapshot full-Stokes imaging spectropolarimetry based on division-of-aperture polarimetry and integral-field spectroscopy. In: Proceedings of the International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Imaging Spectroscopy; and Telescopes and Large Optics. Bellingham: SPIE, 2014. 79–85

8 Bartlett B D, Gartley M G, Messinger D W, et al. Spectro-polarimetric bidirectional reflectance distribution function determination of in-scene

materials and its use in target detection applications. J Appl Remote Sens, 2010, 4: 043552
9 Chen Z, Zhang C, Mu T, et al. An efficient representation-based subspace clustering framework for polarized hyperspectral images. Remote Sens, 2019, 11: 1513
10 Chen Z, Zhang C, Mu T, et al. Tensorial multiview subspace clustering for polarimetric hyperspectral images. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2022, 60: 1–13
11 Sparks W B, Hough J, Germer T A, et al. Detection of circular polarization in light scattered from photosynthetic microbes. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106: 7816–7821
12 Chen L Y, Duan D D, Wang F, et al. Research progress of non-destructive testing of fruit quality by hyperspectral imaging technology (in Chinese). Guangdong Agric Sci, 2023, 50: 83–94 [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. 广东农业科学, 2023, 50: 83–94]
13 Zhao L L, Zhao Y S. A brief introduction to multi-angle polarization remote sensing technology and its application in lunar resource exploration (in Chinese). Prog Geophys, 2006, 21: 1003–1007 [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. 地球物理学进展, 2006, 21: 1003–1007]
14 Tuniyazi A, Mu T, Jiang X, et al. Snapshot polarized light scattering spectroscopy using spectrally-modulated polarimetry for early gastric cancer detection. J Biophotonics, 2021, 14: e202100140
15 Tuniyazi A, Mu T, Jiang X, et al. Snapshot polarized light scattering spectrometric fiberscopy for early cancer detection. Laser Photonics Rev, 2024, 18: 2400486
16 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 Image Graph, 2023, 28: 1173–1185
17 Sparks W, Germer T A, MacKenty J W, et al. Compact and robust method for full Stokes spectropolarimetry. Appl Opt, 2012, 51: 5495–5511
18 Chen W T, Török P, Foreman M R, et al. Integrated plasmonic metasurfaces for spectropolarimetry. Nanotechnology, 2016, 27: 224002
19 Iglesias F A, Feller A. Instrumentation for solar spectropolarimetry: State of the art and prospects. Opt Eng, 2019, 58: 1
20 Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, et al. The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1994, 32: 598–615
21 Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements. J Geophys Res, 2001, 106: 4913–4926
22 Hasekamp O P, Landgraf J. Retrieval of aerosol properties over land surfaces: Capabilities of multiple-viewing-angle intensity and polarization measurements. Appl Opt, 2007, 46: 3332–3344
23 Loe R S, Duggin M J. Hyperspectral imaging polarimeter design and calibration. In: Proceedings of the Polarization Analysis and Measurement IV. Bellingham: SPIE, 2002. 195–205
24 Nordin G P, Meier J T, Deguzman P C, et al. Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry. J Opt Soc Am A, 1999, 16: 1168–1174
25 Diner D J, Davis A, Hancock B, et al. Dual-photoelastic-modulator-based polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing. Appl Opt, 2007, 46: 8428–8445
26 Diner D J, Davis A, Hancock B, et al. First results from a dual photoelastic-modulator-based polarimetric camera. Appl Opt, 2010, 49: 2929–2946
27 Diner D J, Xu F, Garay M J, et al. The Airborne Multiangle SpectroPolarimetric Imager (AirMSPI): A new tool for aerosol and cloud remote sensing. Atmos Meas Tech, 2013, 6: 2007–2025
28 Mahler A B, McClain S, Chipman R. Achromatic athermalized retarder fabrication. Appl Opt, 2011, 50: 755–765
29 Zhou X, Ma L, Halicek M, et al. Development of a new polarized hyperspectral imaging microscope. In: Proceedings of the Imaging, Therapeutics, and Advanced Technology in Head and Neck Surgery and Otolaryngology 2020. Bellingham: SPIE, 2020. 15–22
30 Angulo L A, Parejo P G, Uribe-Patarroyo N, et al. Hyperspectral camera based on liquid crystals for use in small satellites. In: Proceedings of the Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXV. Bellingham: SPIE, 2021. 283–292
31 Xu Z, Ning J, Xie Y, et al. Compressive Imaging Hyperspectral Polarimeter based on LCVR. In: Proceedings of the OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021 (AIS, FTS, HISE, SENSORS, ES). Washington: Optica Publishing Group, 2021. JTh6A.41
32 Foster R, Gray D, Bowles J, et al. Mantis: An all-sky visible-to-near-infrared hyper-angular spectropolarimeter. Appl Opt, 2020, 59: 5896–5909
33 Tyo J S, Turner T S. Variable-retardance, Fourier-transform imaging spectropolarimeters for visible spectrum remote sensing. Appl Opt, 2001,

40: 1450–1458
34 Li Z, Hou W, Hong J, et al. Directional Polarimetric Camera (DPC): Monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation. J Quant Spectrosc Radiat Transf, 2018, 218: 21–37
35 Meng X, Li J, Xu T, et al. High throughput full Stokes Fourier transform imaging spectropolarimetry. Opt Express, 2013, 21: 32071–32085
36 Mu T, Zhang C, Li Q, et al. Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters. Opt Express, 2015, 23: 10822–10835
37 Mu T, Zhang C, Liang R. Demonstration of a snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeter using Wollaston prism array. J Opt, 2015, 17: 125708
38 Mu T, Bao D, Zhang C, et al. Optimal reference polarization states for the calibration of general Stokes polarimeters in the presence of noise. Opt Commun, 2018, 418: 120–128
39 Mu T, Bao D, Han F, et al. Optimized design, calibration, and validation of an achromatic snapshot full-Stokes imaging polarimeter. Opt Express, 2019, 27: 23009–23028
40 Peralta R J, Nardell C, Cairns B, et al. Aerosol polarimetry sensor for the Glory Mission. In: Proceedings of the Automatic Target Recognition and Image Analysis; and Multispectral Image Acquisition. Bellingham: SPIE, 2007. 1460–1476
41 Marbach T, Phillips P, Schlüssel P. 3MI: The Multi-Viewing Multi-Channel Multi-Polarization Imaging Mission of the EUMETSAT Polar System-Second Generation (EPS-SG) dedicated to aerosol characterization. AIP Conf Proc, 2013, 1531: 344–347
42 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. In: Proceedings of the Polarization Science and Remote Sensing VII. Bellingham: SPIE, 2015. 271–278
43 Manolis I, Grabarnik S, Caron J, et al. The MetOp second generation 3MI instrument. In: Proceedings of the Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVII. Bellingham: SPIE, 2013. 84–96
44 Hou X, Wang Z, Wu L, et al. Selected papers from conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics 2014, Part I. Bellingham: SPIE, 2015. 952101-1
45 Zhang J, Xue C, Gao Z L, et al. Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: Past, present and future. Chin Opt, 2015, 8: 679–698
46 Krishnan S, Hampton S, Rix J, et al. Spectral polarization measurements by use of the grating division-of-amplitude photopolarimeter. Appl Opt, 2003, 42: 1216–1227
47 Suzuki T, Kurosaki H, Enkyo S, et al. Application of an AOTF imaging spectropolarimeter. In: Proceedings of the Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing. Bellingham: SPIE, 1997. 351–360
48 Gupta N, Dahmani R, Choy S. Acousto-optic tunable filter based visible- to near-infrared spectropolarimetric imager. Opt Eng, 2002, 41: 1033–1038
49 Gupta N. Acousto-optic-tunable-filter-based spectropolarimetric imagers for medical diagnostic applications—Instrument design point of view. J Biomed Opt, 2005, 10: 051802
50 Gupta N, Suhre D R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability. Appl Opt, 2007, 46: 2632–2637
51 Zhang H, Zhao H, Guo Q, et al. Polarization-multiplexed high-throughput AOTF-based spectral imaging system. Materials, 2023, 16: 4243
52 Chen L, Zhang S, Zheng W, et al. High light efficiency spectral polarization imaging method based on Mach-Zehnder structured liquid crystal tunable filters and variable retarders. Photonics, 2023, 10: 765
53 Jaiswal B, Singh S, Jain A, et al. AOTF-based spectro-polarimeter for observing Earth as an exoplanet. J Astron Telesc Instrum Syst, 2022, 8: 044007
54 Millerd J, Brock N, Hayes J, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometers. In: Proceedings of the Interferometry XII: Techniques and Analysis. Bellingham: SPIE, 2004. 640–647
55 Brock N, Kimbrough B T, Millerd J E. A pixelated micropolarizer-based camera for instantaneous interferometric measurements. In: Proceedings of the Polarization Science and Remote Sensing V. Bellingham: SPIE, 2011. 290–298
56 Tyo J S, LaCasse C F, Ratliff B M. Total elimination of sampling errors in polarization imagery obtained with integrated microgrid polarimeters. Opt Lett, 2009, 34: 3187–3189
57 Hardie R C, LeMaster D A, Ratliff B M. Super-resolution for imagery from integrated microgrid polarimeters. Opt Express, 2011, 19: 12937–12960

58 LeMaster D A, Hirakawa K. Improved microgrid arrangement for integrated imaging polarimeters. Opt Lett, 2014, 39: 1811–1814

59 Chen Z, Zhang C, Mu T, et al. Coded aperture snapshot linear-Stokes imaging spectropolarimeter. Opt Commun, 2019, 450: 72–77

60 Chen Z, Zhang C, Mu T, 等. Coded aperture full-Stokes imaging spectropolarimeter. Opt Laser Tech, 2022, 150: 107946

61 Mu T, Pacheco S, Chen Z, et al. Snapshot linear-Stokes imaging spectropolarimeter using division-of-focal-plane polarimetry and integral field spectroscopy. Sci Rep, 2017, 7: 42115

62 Oka K, Kato T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum. Opt Lett, 1999, 24: 1475–1477

63 Oka K, Kaneko T. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms. Opt Express, 2003, 11: 1510–1519

64 Kudenov M W, Hagen N A, Dereniak E L, et al. Fourier transform channeled spectropolarimetry in the MWIR. Opt Express, 2007, 15: 12792–12805

65 van Harten G, Snik F, Rietjens J H H, et al. Spectral line polarimetry with a channeled polarimeter. Appl Opt, 2014, 53: 4187–4194

66 Nersisyan S R, Tabiryan N V, Hoke L, et al. Polarization insensitive imaging through polarization gratings. Opt Express, 2009, 17: 1817–1830

67 Oh C, Escuti M J. Achromatic diffraction from polarization gratings with high efficiency. Opt Lett, 2008, 33: 2287–2289

68 Kudenov M W, Escuti M J, Dereniak E L, et al. White-light channeled imaging polarimeter using broadband polarization gratings. Appl Opt, 2011, 50: 2283–2293

69 Kim J, Escuti M J. Snapshot imaging spectropolarimeter utilizing polarization gratings. In: Proceedings of the Imaging Spectrometry XIII. Bellingham: SPIE, 2008. 29–38

70 Kim J, Escuti M J. Demonstration of a polarization grating imaging spectropolarimeter (PGIS). In: Proceedings of the Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing IX. Bellingham: SPIE, 2010. 80– 88

71 Kudenov M W, Lowenstern M E, Craven J M, et al. Field deployable pushbroom hyperspectral imaging polarimeter. Opt Eng, 2017, 56: 103107

72 Chen J, Li X, Jirigalantu J, et al. White-light channeled imaging polarimeter using Savart plates and a polarization Sagnac interferometer. Opt Express, 2023, 31: 18177–18189

73 Liu P, Ju X, Yang B, et al. Channeled spectropolarimeter with arbitrary retarder orientation settings. Opt Express, 2022, 30: 14553–14564

74 Lee D J, LaCasse C F, Craven J M. Compressed channeled spectropolarimetry. Opt Express, 2017, 25: 32041–32063

75 Lee D J, LaCasse C F, Craven J M. Channeled spectropolarimetry using iterative reconstruction. In: Proceedings of the Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XII. Bellingham: SPIE, 2016. 240–253

76 Chen Z, Krafft C, Zhang C, et al. Polarization Raman microscope based on channeled spectropolarimetry. Opt Lasers Eng, 2023, 168: 107666

77 Han F, Mu T, Tuniyazi A, et al. Iterative reconstruction for snapshot intensity-modulated linear imaging spectropolarimetry without Fourier transform and phase calibration. Opt Lasers Eng, 2020, 134: 106286

78 Mu T, Han F, Bao D, et al. Compact snapshot optically replicating and remapping imaging spectrometer (ORRIS) using a focal plane continuous variable filter. Opt Lett, 2019, 44: 1281–1284

79 Mu T, Han F, Li H, et al. Snapshot hyperspectral imaging polarimetry with full spectropolarimetric resolution. Opt Lasers Eng, 2022, 148: 106767

80 Li H, Mu T, Han F, et al. Snapshot miniature optically replicating and remapping imaging spectropolarimeter (MINI-ORRISp): Design, calibration and performance. Opt Lasers Eng, 2023, 169: 107717

81 Han F, Mu T, Li H, et al. Deep image prior plus sparsity prior: Toward single-shot full-Stokes spectropolarimetric imaging with a multiple-order retarder. Adv Photon Nexus, 2023, 2: 036009

82 Lv X, Yang Z, Wang Y, et al. Channeled imaging spectropolarimeter reconstruction by neural networks. Opt Express, 2021, 29: 35556–35569

83 Huang C, Liu H, Wu S, et al. Physics-guided neural network for channeled spectropolarimeter spectral reconstruction. Opt Express, 2023, 31: 24387–24403

84 Huang C, Zhang H, Wu L, et al. High-quality full Stokes polarimetric spectroscopy reconstruction using a model-compensated physics-informed neural network for channeled spectropolarimetry. Opt Express, 2025, 33: 20598–20618

85 Zhang C, Wu H, Li J. Fourier transform hyperspectral imaging polarimeter for remote sensing. Opt Eng, 2011, 50: 066201

86 Mu T, Zhang C, Jia C, et al. Static hyperspectral imaging polarimeter for full linear Stokes parameters. Opt Express, 2012, 20: 18194–18201

87 Meng X, Li J, Song H, et al. Full-Stokes Fourier-transform imaging spectropolarimeter using a time-division polarization modulator. Appl Opt, 2014, 53: 5275–5282

88 Barducci A, Guzzi D, Lastri C, et al. Optical design constrains in triangular Sagnac imaging interferometers for earth observation. In:

Proceedings of the International Conference on Space Optics—ICSO 2010. Bellingham: SPIE, 2017. 463–468

89 Li J, Zhu J, Wu H. Compact static Fourier transform imaging spectropolarimeter based on channeled polarimetry. Opt Lett, 2010, 35: 3784–3786

90 Zhang C, Li Q, Yan T, et al. High throughput static channeled interference imaging spectropolarimeter based on a Savart polariscope. Opt Express, 2016, 24: 23314–23332

91 Zhang C, Quan N, Mu T. Stokes imaging spectropolarimeter based on channeled polarimetry with full-resolution spectra and aliasing reduction. Appl Opt, 2018, 57: 6128–6134

92 Quan N, Zhang C, Yan T, et al. Linear Stokes imaging spectropolarimeter based on the static polarization interference imaging spectrometer. Opt Commun, 2017, 391: 30–36

93 Bai C, Li J, Zhang W, et al. Static full-Stokes Fourier transform imaging spectropolarimeter capturing spectral, polarization, and spatial characteristics. Opt Express, 2021, 29: 38623–38645

94 Ding K, Wang M, Chen M, et al. Snapshot spectral imaging: From spatial-spectral mapping to metasurface-based imaging. Nanophotonics, 2024, 13: 1303–1330

95 Zhang L, Zhou C, Liu B, et al. Real-time machine learning-enhanced hyperspectro-polarimetric imaging via an encoding metasurface. Sci Adv, 2024, 10: eadp5192

96 Zhang L, Zhou C, Ding Y, et al. Smart Snapshot spectropolarimetric imaging enabled by optical metasurfaces and deep learning. In: Proceedings of the 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose. 2023

97 Wen S, Xue X, Wang S, et al. Metasurface array for single-shot spectroscopic ellipsometry. Light Sci Appl, 2024, 13: 88

98 Wang X, Yang Z, Bao F, et al. Spinning metasurface stack for spectro-polarimetric thermal imaging. Optica, 2024, 11: 73–80

99 Wu X, Pan K, Wu X, et al. Wavelength-insensitive snapshot Stokes polarimetric imaging based on cascaded metasurfaces. Adv Photon, 2025, 7: 016008

100 Tian Y C, Zhang W H, Li F S, et al. Ultrafast dynamics evidence of high temperature superconductivity in single unit cell FeSe on $SrTiO_3$. Phys Rev Lett, 2016, 116: 107001

101 Wu Q, Zhou H, Wu Y, et al. Ultrafast quasiparticle dynamics and electron-phonon coupling in $(Li_{0.84}\ Fe_{0.16})OHFe_{0.98}Se$. Chin Phys Lett, 2020, 37: 097802

102 Wu Y L, Yu X H, Hasaien J Z L, et al. Ultrafast dynamics evidence of strong coupling superconductivity in $LaH_{10\pm\delta}$. Nat Commun, 2024, 15: 9683

103 Cheng Y, Zhou F, Teng J, et al. Antiferromagnet-topological insulator heterostructure for polarization-controllable terahertz generation. Nat Commun, 2025, 16: 5656

104 Hasaien J, Wu Y, Shi M, et al. Emergent quantum state unveiled by ultrafast collective dynamics in 1 *T*-TaS_2. Proc Natl Acad Sci USA, 2025, 122: e2406464122

A review of spectropolarimetric imaging: Fundamentals, recent developments, and critical issues

HAN Feng, LI Bingyi, GUO Shiping, ZHANG Kai & MU Tingkui*

MOE Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, Institute of Space Optics, School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
**Corresponding author (email: tkmu@mail.xjtu.edu.cn)*

Spectropolarimetric imaging, which integrates spectral and polarization information, has emerged as a powerful multidimensional imaging technique with remarkable advantages in remote sensing, environmental monitoring, biomedicine, astronomy, and nanophotonics. This paper reviews the development and current progress of spectropolarimetric imaging, with emphasis on free-space implementations including temporal modulation, division of aperture, division of amplitude, division of focal plane, and channel modulation, as well as emerging metasurface-based on-chip schemes. By analyzing the principles, performance characteristics, and representative applications of these methods, their strengths and limitations in terms of spatial resolution, spectral accuracy, system stability, and snapshot capability are highlighted. Furthermore, it is pointed out that device integration, algorithmic intelligence, and system miniaturization will be the key directions for future development. This review aims to provide systematic references for in-depth research and engineering applications, and to envision broad prospects in complex scene detection, aerospace missions, and chip-scale optical systems.

spectral imaging, polarimetric imaging, spectropolarimetric imaging

PACS: 42.79.-e, 42.25.Ja, 42.30.-d

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0502