

基于数字微镜器件(DMD)的高光谱成像 技术研究进展

阮育娇*

(厦门市计量检定测试院, 福建 厦门 361004)

摘要: 高光谱成像技术能够同时获取目标的空间和光谱信息,在遥感、生物学及材料分析等领域展现出巨大的应用潜力。然而,传统机械扫描方式存在效率低、光通量受限及稳定性不足等问题,制约了其进一步推广。近年来,数字微镜器件(DMD)凭借其高速调制、宽波段响应与高可靠性等优势,被广泛应用于高光谱成像系统的优化与创新。文章系统综述了基于DMD的高光谱成像技术的研究进展,涵盖推扫式、编码孔径、快照式、显微与视频化以及超快过程捕获等多类架构,并在统一指标下对其性能进行横向比较。研究表明,DMD系统覆盖波段已从可见光扩展至近红外;光谱分辨率由复用型系统的3.73 nm提升至可调谐架构的0.2 nm;成像速度涵盖10 Hz光谱视频、超过30 fps的高光谱视频,以及3.85 THz帧率的瞬态捕获。进一步分析了系统在稳定性、对准容差、环境适应性及数据处理负荷等方面面临的工程化挑战,并对其在微型化、智能化与多模态融合等方面的发展前景进行展望。

关键词: 数字微镜器件; 高光谱成像; 推扫式; 编码孔径; 压缩感知

中图分类号: TN29 **文章编号:** 1001-5868(2025)05-0765-12

Research Progress of Hyperspectral Imaging Technology Based on Digital Micromirror Devices

RUAN Yujiao

(Xiamen Institute of Measurement and Testing, Xiamen 361004, CHN)

Abstract: Hyperspectral imaging (HSI) technology, which can simultaneously capture spatial and spectral information, has substantial application potential in fields such as remote sensing, biomedicine, and material analysis. However, conventional mechanical scanning systems suffer from low efficiency, limited light throughput, and insufficient stability, restricting their widespread practical deployment. In recent years, digital micromirror devices (DMD) have been widely adopted to optimize and innovate hyperspectral imaging systems, providing high-speed modulation, broad spectral response, and excellent reliability. This review provides a systematic overview of DMD-based HSI, covering push-broom, coded-aperture, snapshot, microscopic, video-based, and ultrafast transient imaging architectures, and presents a unified quantitative comparison of their performance. The research results show that the spectral coverage of DMD systems has been extended from the visible range to near-infrared windows; spectral resolution ranges from 3.73 nm in multiplexed systems to 0.2 nm in tunable architectures; imaging speed includes 10 Hz spectral video

收稿日期: 2025-07-04.

基金项目: 国家市场监督管理总局项目(2023MK135).

* 通信作者: 阮育娇

and >30 fps hyperspectral video, and even reaches a frame rate of 3.85 THz in ultrafast systems. In addition, this review examines the engineering challenges of the system, such as stability, alignment tolerance, environmental robustness, and computational burden, and outlines future research directions such as miniaturization, intelligent control, and multimodal integration.

Key words: digital micromirror device; hyperspectral imaging; push-broom; coded aperture; compressive sensing

0 引言

高光谱成像技术自20世纪80年代兴起以来,逐渐成为遥感、农业监测与生物医学诊断等领域的核心技术。该技术能够同时获取目标物体的空间信息和连续光谱信息,相比传统的RGB成像或窄带多光谱成像,可为物质识别与分类提供更丰富的数据支持。

传统推扫式高光谱成像系统通常依赖机械狭缝对目标场景进行逐行扫描。尽管此类系统在空间与光谱分辨率方面表现优异,但其机械扫描需要狭缝或目标相对移动,不仅增加了系统的能耗,还可能影响稳定性和可靠性。此外,机械扫描方式的成像速度较低,难以满足动态场景与实时成像的需求;狭缝结构还会限制光通量,降低信号噪声比与光收集效率^[1-3]。

近年来,随着光学器件与计算成像技术的发展,高光谱成像系统正朝着小型化、实时化和智能化方向发展。其中,数字微镜器件(DMD)凭借高刷新率、可编程控制及无机械磨损等特性,成为替代机械狭缝的理想选择^[4-8]。DMD通过微镜阵列的快速偏转实现对光场的调制,既可充当空间光调制器,也可作为动态扫描单元,显著提高系统的灵活性。结合压缩感知理论,DMD能够在降低数据冗余的同时提升成像效率,进一步推动快照式、显微成像等新型架构的发展。这种基于编码与计算机重建的成像方式^[9-12],突破了传统系统在体积、速度与灵活性方面的限制,为高光谱成像技术的广泛应用开辟了新途径。

与硅基液晶(LCoS)和声光调制器(AOM)等空间光调制器件相比,DMD展现出多方面的综合优势。在调制速度方面,DMD基于微机电系统(MEMS)的翻转原理,其微镜切换速度可达微秒级,典型二进制模式的刷新率超过20 kHz(如DLP9500可达23 148 Hz),远高于LCoS的60~240 Hz,AOM虽具兆赫兹量级带宽,但受有效孔径限制,难以应用于宽视场成像^[6]。在光学效率方面,DMD采用高反射率

铝微镜,在可见至近红外波段反射率可达88~92%,且无偏振依赖;而LCoS需配合偏振光学元件,光效明显降低^[2]。在光谱范围方面,DMD已有产品可覆盖至红外波段(700~2 500 nm,如DLP2010NIR和DLP4500NIR),LCoS则多局限于400~900 nm,AOM的光谱响应受晶体材料限制,适用性较窄。在可靠性方面,DMD作为全固态器件具有优异的稳定性和抗过载能力,LCoS则易受液晶老化与热漂移影响,AOM则受声学 and 热效应限制。综合来看,DMD具有高速调制、宽光谱响应、高光效和可靠性等综合优势,是当前高光谱成像系统的理想核心器件。需要指出的是,LCoS在相位调制和全息应用中仍具有不可替代性,AOM在特定窄带超快调制领域也有其价值,这体现了不同器件在不同场景下的互补性。

尽管DMD在高光谱成像中的应用已取得显著进展,但其在实时成像效率、复杂场景适应性以及低成本工程化等方面仍面临诸多挑战。因此,本文系统梳理了基于DMD的高光谱成像原理与系统架构,总结不同方案的性能特征,并探讨其在实际应用中的潜力与未来发展方向。

1 技术原理

1.1 DMD工作原理

数字微镜器件是德州仪器公司开发的一种微机电系统空间光调制器,每个微镜可以在两个稳定状态之间快速切换,从而实现对入射光的空间调制。DMD芯片的基本结构包括微镜阵列、CMOS(互补金属氧化物半导体)内存、控制电路和光源。微镜阵列由数十万至数百万个可单独控制的微镜组成,如图1所示^[13]。在光源发出的光照射到DMD芯片上后,控制电路接收来自计算机或其他设备的数字信号,这些信号决定了每个微镜的状态。根据输入的数字信号,每个微镜会旋转到对应的位置:开或关。“开”状态的微镜反射的光会被收集到成像路径中,“关”状态的微镜反射的光则被引导至光陷阱吸收。通过控制每个微镜

的开和关,DMD 芯片可以调制通过的光线,实现图像显示或光信号编码。DMD 的微镜控制是通过其下方的 CMOS 电路来实现的,每个微镜都有一个对应的电极,当在电极上施加电压时,微镜会因静电力而倾斜。通过精确控制施加在电极上的电压,可以实现对微镜倾斜角度的精准调节,从而调制光线。

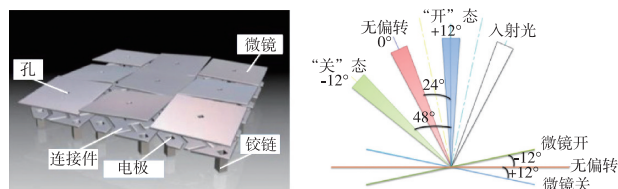


图1 DMD 结构图^[13]

1.2 推扫式光谱成像原理

基于 DMD 的推扫式光谱成像技术是一种创新的高光谱成像方法。该方法用 DMD 代替传统推扫式光谱成像系统中的机械狭缝和扫描机构,在芯片级尺寸上实现推扫以及多种扫描方式的集成,可有效提升系统稳定性,并促进成像系统的小型化。按光路调制方式可分为照明推扫和成像推扫,按光谱维度处理方式,可分为逐行光谱推扫和压缩感知推扫。

基于 DMD 的照明推扫型光谱成像技术的核心原理是利用 DMD 在照明光路中对目标场景进行逐行动态编码照明,通过精确控制 DMD 微镜阵列的翻转状态,选择性地将光源(如 LED 或激光)的光束反射至目标物的特定扫描行,同时探测器同步采集该行的反射或荧光信号,实现目标区域的选择性增强照明与信号获取。该技术通过编程优化照明模式,可显著提升目标特征的信噪比或特定波段的响应强度,尤其适用于低照度环境、荧光激发或需要抑制背景干扰的场景,例如生物样本的荧光标记成像、工业零件表面缺陷检测等主动照明应用。

成像推扫式光谱成像技术则是通过将目标光线分光后投射至 DMD 微镜阵列,利用其快速可编程特性对光谱维度进行动态编码,同时结合镜片翻转推扫运动实现空间维度的逐行采样。DMD 按预设模式选择性反射特定波段的光谱信息至探测器,再通过计算重建算法获取完整的高光谱数据立方体。该技术兼具高光谱分辨率与灵活的光谱调制能力,广泛应用于遥感监测、精准农业、环境监测以及生物医学成像等领域,为物质成分的识别与分析

提供了高效解决方案。

逐行光谱推扫是传统高光谱成像模式,每推扫一行,DMD 编码该行所有光谱通道,探测器同步记录,所处理的数据量较大。结合压缩感知理论,压缩感知推扫利用 DMD 进行空间编码,单次推扫获取压缩数据,然后通过算法重建高光谱图像;该技术大幅降低了数据的采集量,提高了成像速度,但对编码和解码算法的依赖性较强。

1.3 编码孔径与可编程调制原理

DMD 的可编程性和高速响应使其成为编码孔径高光谱成像的理想选择,利用 DMD 对入射光进行编码调制,DMD 位置放置不同,光谱成像系统的结构也有所差异。根据 DMD 器件放置位置可分为两种结构:一种是空间维编码型结构,DMD 位于物镜成像面,在光谱分离前优先控制空间维度;另一种是光谱维编码型结构,DMD 位于光谱色散面,在光谱分离后直接调控波长维度。

空间编码技术通过 DMD 对目标空间信息进行二进制调制,如哈达玛(Hadamard)矩阵^[14]或随机模板,探测器记录编码后的混叠图像后,利用计算重建算法恢复高光谱数据立方体。该技术光通量高,无需机械狭缝,其核心是通过空间维度的编码-解码过程实现信息高效获取,适用于静态场景高精度成像或动态目标监测。光谱维编码技术则利用 DMD 在光谱维度进行调制,结合色散元件实现波段分离或选择。通过在色散方向加载编码模板或直接控制 DMD 反射特定波段,实现光谱信息的灵活提取。该技术光谱分辨率高,适用于物质鉴别(如化学成分分析)或窄带成像(如农业监测)。与空间编码不同,它更关注光谱维度而非空间维度的信息优化,常需严格的光学校准。两类技术可单独使用,也可结合形成混合编码方案,同步优化空间和光谱分辨率,以满足复杂场景测试需求,尤其在生物医学、工业检测等对多维信息同时需求强烈的领域。

2 基于 DMD 的高光谱成像系统实现

2.1 多曝光快照式光谱成像系统

基于 DMD 的多曝光快照式光谱成像系统(DMD-SSI)可替代基于压电平台的多曝光编码孔径快照光谱成像仪(CASSI)系统,通过 DMD 实现

压缩感知(CS)测量模式,以重建成像场景的空间/光谱信息,系统采用二元随机模式完成压缩感知测量过程^[15-19]。

图2展示了该DMD-SSI系统的工作原理示意图^[20],系统为双光路架构,包含成像光路和中继-色散光路两部分。在成像光路中,物镜负责将目标光学图像聚焦至DMD表面。中继-色散光路采用中继透镜/棱镜组合结构,将经DMD调制的图像光强以光谱色散形式成像于CCD相机上,这些光谱色散图像构成了成像场景的多组压缩感知测量数据。通过将二维压缩感知测量数据输入两步迭代收缩/阈值算法,可重建原始场景的三维空间/光谱信息。

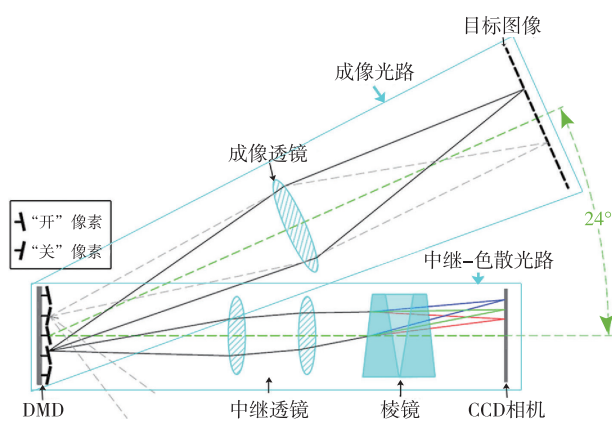
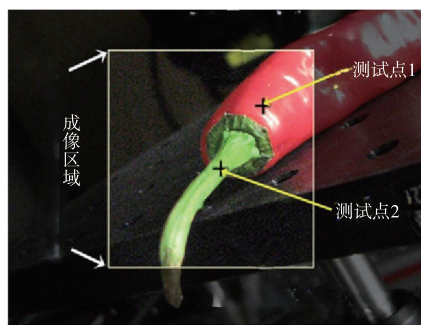
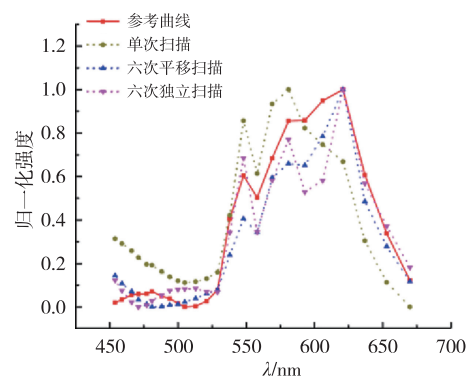


图2 DMD-SSI系统工作原理示意图^[20]

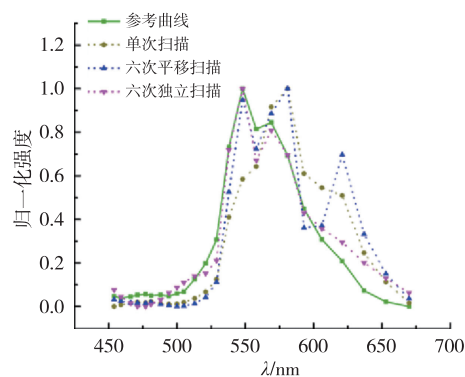
该系统采用的DMD器件可实现像素间距 $13.68\ \mu\text{m}$ 的压缩感知测量模式,该尺寸大于光掩模技术的最小可实现像素间距^[15]。基于CS测量结果,可实现24个光谱图像的同步重建。在被测样品的两个测试点测量了24个光谱通道的强度变化,如图3所示,结果表明采用多次曝光测量模式得到的空间/光谱数据具有更优的光谱精度。



(a) 被测样品照片



(b) 测试点1的实验光谱曲线和参考光谱曲线对比



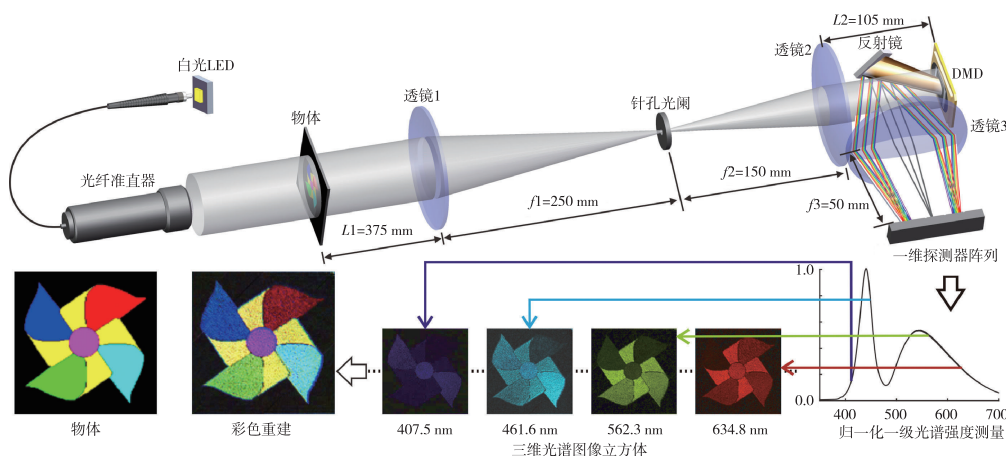
(c) 测试点2的实验光谱曲线和参考光谱曲线对比

图3 被测样品测试结果^[20]

2.2 复用光谱成像系统

复用光谱成像系统为一种结构较简单的高光谱成像系统,其创新性在于利用复用型DMD同步实现空间成像的光强调制与光谱测量的衍射分光功能。系统仅由透镜组、数字微镜器件和一维探测器阵列构成,其结构如图4所示^[21]。采用白光LED作为光源,照射样品通过透镜组成像于DMD表面。采用 128×128 像素分辨率的32 768幅Hadamard编码掩模进行图像调制^[22-23],通过差分测量法有效降低环境光波动影响。经DMD调制的图像由反射镜转向,通过透镜在焦平面形成分布,由一维探测器阵列记录光谱强度分布。基于Hadamard编码掩模及其对应光谱分布的对应关系,重构不同波长下的二维图像,最终合成三维光谱图像立方体。

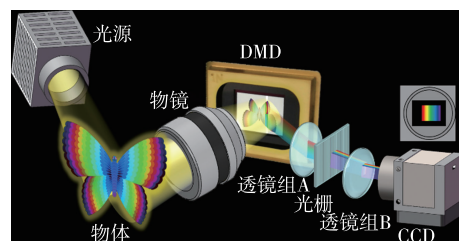
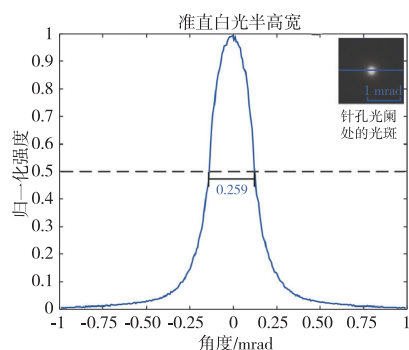
系统实测光谱曲线如图5所示,对应光谱分辨率为 $3.73\ \text{nm}$,测量结果与理论计算值高度吻合。另外采用压缩采样策略,系统可完成帧率高达10 Hz的连续实时光谱视频采集。这一成果突破了传统光谱测试系统在功能集成方面的技术瓶颈,充分展示了DMD在光谱调制原理上的独特创新应用。同时,该系统架构不仅有望轻松扩展至紫外和

图4 复用光谱成像系统结构示意图^[21]

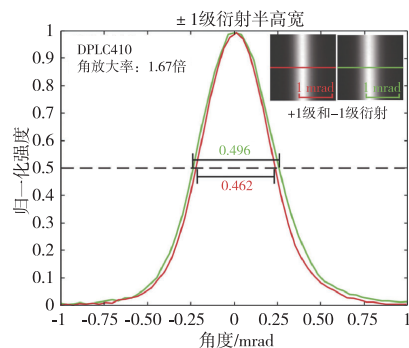
红外波段,更为研制低成本、小型化高光谱成像仪提供了全新技术路线。

2.3 空间与光谱分辨率可调谐高光谱成像系统

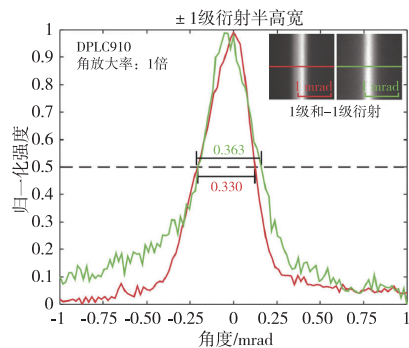
基于DMD的空间和光谱分辨率可调谐高光谱成像(DSSRT-HSI)系统的原理示意图如图6所示^[24]。该系统主要由空间调制子系统和光谱色散子系统组成,通过编程控制DMD微镜的列扫描单元宽度实现空间分辨率动态调节。空间调制子系统包括物镜和DMD,光谱色散子系统包括透镜组、光栅和CCD。如图6所示,通过DMD的顺序选择,系统能够快速获取目标物体的三维数据立方体。光谱分辨率可调谐则通过像素融合法实现:将相邻CCD像素合并为“超级像素”,牺牲部分光谱分辨率(0.2 nm/px)以降低数据量。例如,合并5个像素可将光谱分辨率从0.2 nm扩展至1 nm,适用于无需高光谱分辨率的快速检测。

图6 DSSRT-HSI系统的原理示意图^[24]

(a) 准直白光半高宽测试



(b) 采用DPLC410型DMD时422 nm处±1级衍射峰测试结果

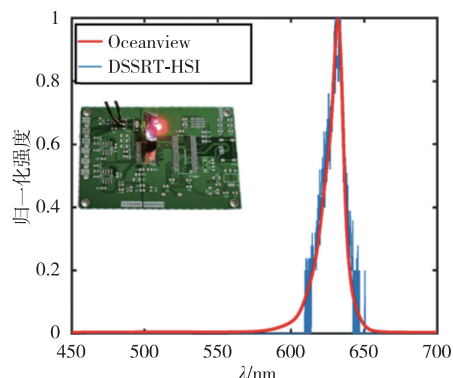


(c) 采用DPLC910型DMD时422 nm处±1级衍射峰测试结果

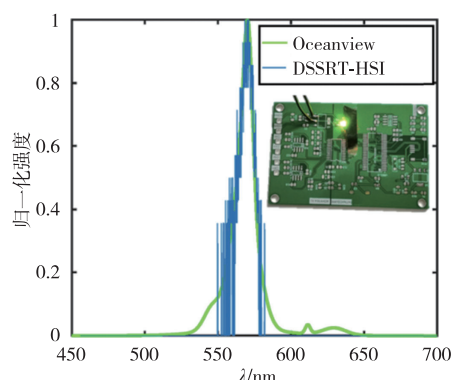
图5 复用光谱成像系统实测光谱曲线^[21]

分别采用该系统和商用光谱仪对红光和绿光发光二极管(LED)进行测试。图7所示结果不仅验证了DSSRT-HSI系统的有效性,更表明其具备优异的光谱分辨率性能,最高光谱分辨率可达0.2 nm;而且该系统在9 cm成像距离下可实现最小65.1 μm空间分辨率,适用于大视场遥感(如28°FOV)和医学组织高精度光谱分析。该系统的主要优势在于其灵活性和实时性,避免了传统机械扫描方式的局限性^[25],通过编程控制DMD微镜,能够根据具体应用需求调整

空间和光谱分辨率,从而在不同的应用场景中发挥最佳性能。



(a) 红光 LED 光谱



(b) 绿光 LED 光谱

图7 DSSRT-HSI系统与Oceanview光谱仪测试光谱图^[24]

2.4 列编码扫描孔径高光谱成像系统

列编码扫描孔径高光谱成像系统(CCSA-HIS)通过数字微镜器件(DMD)构建复用编码矩阵,实现一维多列并行光谱采集^[26]。其核心在于设计 $N \times N$ 编码矩阵 A 。 A 代表多路传输矩阵如式(1)所示,矩阵每行对应一次测量中激活的DMD列组合,通过复用技术显著提升系统性能。系统可采用两种矩阵生成策略: Hadamard 矩阵变换和随机循环矩阵生成算法。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

CCSA-HIS采用旋转 45° 的DMD作为编码孔径如图8所示。主成像光路将目标成像于DMD表面,光谱色散光路由准直透镜、300线/mm透射光栅和科研级CMOS(sCMOS)探测器组成。DMD的 45° 倾斜布局优化了光路共面性,并通过多列编码模式替代机械狭缝,消除运动部件带来的振动与延迟^[26]。

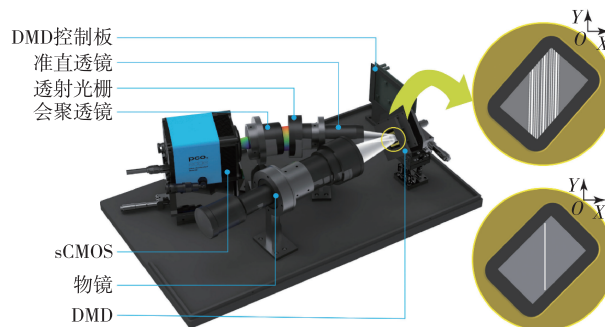


图8 CCSA-HIS的3D模型,可采用多路列编码扫描模式(DMD沿Z轴旋转 45°)和单通道扫描模式^[26]

利用CCSA-HIS系统分别采用复用通道数 $p=32, 64, 128, 256$ 和 320 等参数进行实验数据采集,并在相同曝光时间下同步采集线扫描模式($p=1$)数据。如图9所示,在相同曝光时间内,该系统获得的图像信噪比(SNR)相较线扫模式提升约4倍,且复用通道数 p 越大,图像信噪比越高。当复用通道数 $p=128$ 时,系统SNR较线扫描提升4倍,数据采集效率提高26倍(曝光时间从1000 ms缩短至38 ms)。

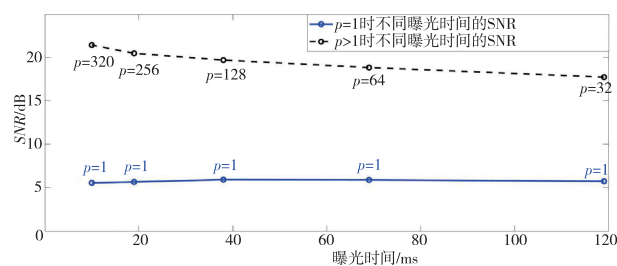
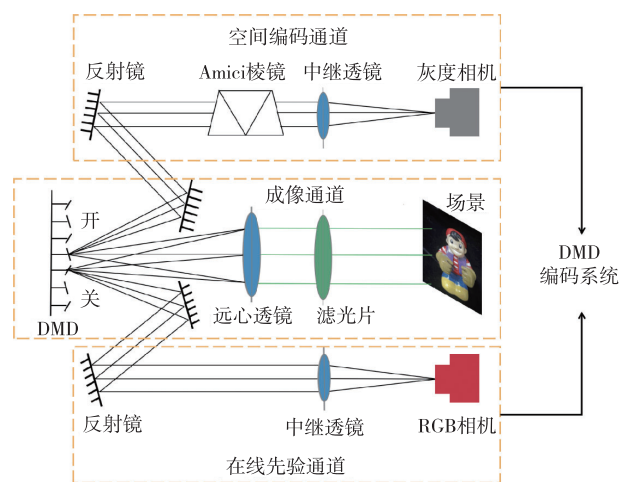
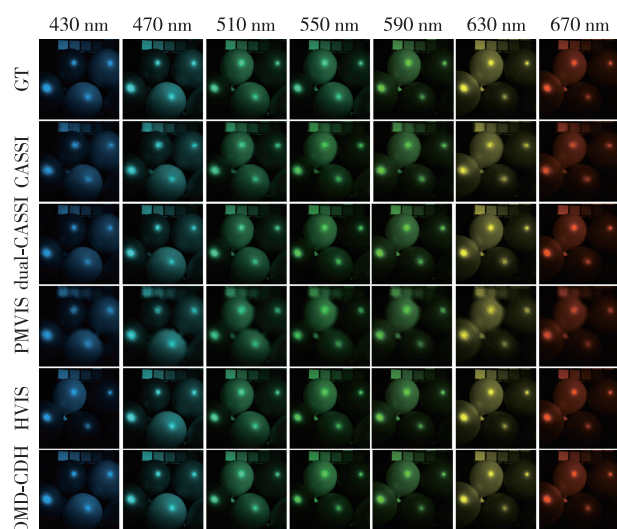


图9 相同曝光时间下多路复用测量与线扫描模式的信噪比对比^[26]

2.5 双通道DMD编码系统

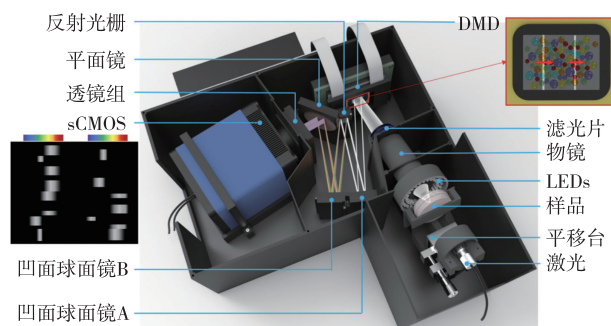
双通道DMD编码系统(DMD-CDH)光路分为三通道^[27],如图10所示。成像通道:DMD将目标反射至空间编码通道与在线先验通道;空间编码通道:反射光经阿米西(Amici)棱镜色散后,sCMOS捕获低分辨率光谱图像(140×912 像素,30通道);在线先验通道:互补编码模板生成高分辨率空间信息,指导光谱重建。

实验比较DMD-CDH系统与其他成像系统在CAVE数据集上的重建效果,如图11所示。通过轻量级卷积神经网络(CNN)融合双通道数据,DMD-CDH系统在CAVE数据集上实现峰值信噪比(PSNR)50.26 dB,较传统CASSI系统提升40%。菱形-方形像素对准方案解决DMD微镜与探测器像素非对齐问题,校准误差小于1 px,且通过分光与空间编码协同实现30 fps高光谱视频输出^[27]。

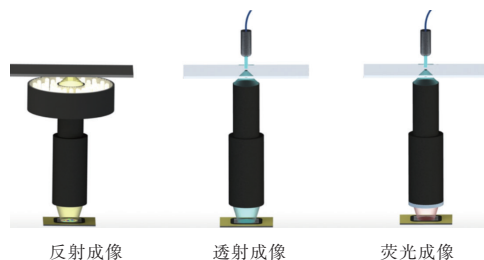
图 10 DMD-CDM 系统示意图^[27]图 11 各成像系统在 CAVE 数据集上重建效果对比^[27]

2.6 多线并行扫描高光谱显微系统

多线并行扫描高光谱系统(DFMLPS-HSM)通过 DMD 动态控制扫描线数量 N , 来适应不同应用需求的线扫描 HSM 系统, 实现显微成像效率的灵活优化^[28-29]。系统设置图如图 12 所示, DMD 作为多线扫描器, 每次将 N 列微镜同时通电, 将包含 N 个离散列的部分图像反射至光谱色散子系统。该图像经凹球面镜 A 准直后, 由反射光栅进行色散。生成的 N 个空间非重叠光谱经凹球面镜 B 和透镜组聚焦至 sCMOS 相机, 最终记录为光谱色散图像。随着 N 列微镜组同步旋转并连续扫描, 被处理的部分图像持续更新。当最后一组 N 列微镜对应的光谱色散图像被采集后, 系统即完成全视场多线扫描流程, 获得样品的三维数据立方体。系统集成反射、透射和荧光多模式成像如图 12(b)所示。



(a) 3D 模型和光路示意图



(b) 三种不同成像模式

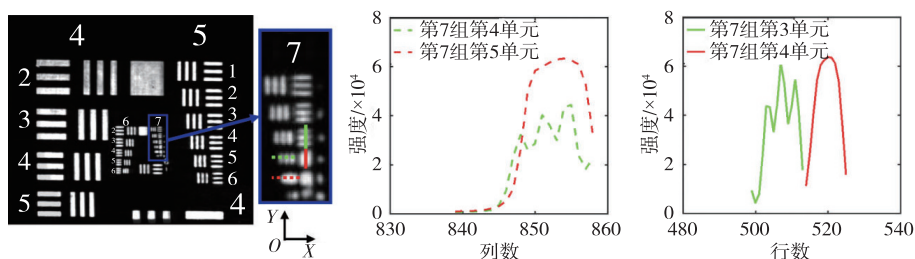
图 12 系统设置示意图^[29]

系统使用 488 nm 激光对分辨率靶进行透射成像, 曝光时间设置为 6 ms 时计算得到扫描时间仅为 426 ms ($N=15$), 较单线模式提速 15 倍。图 13 为系统空间分辨率与光谱测量结果, 该系统能够在 X 方向能够分辨出 $2.76 \mu\text{m}$ 的线宽, 在 Y 方向能够分辨出 $3.1 \mu\text{m}$ 的线宽。图 13(b) 为该系统与商用光谱仪测得的手机屏幕各颜色光谱数据的对比, 结果也表明了该系统在光谱测试方面具有较高精度。

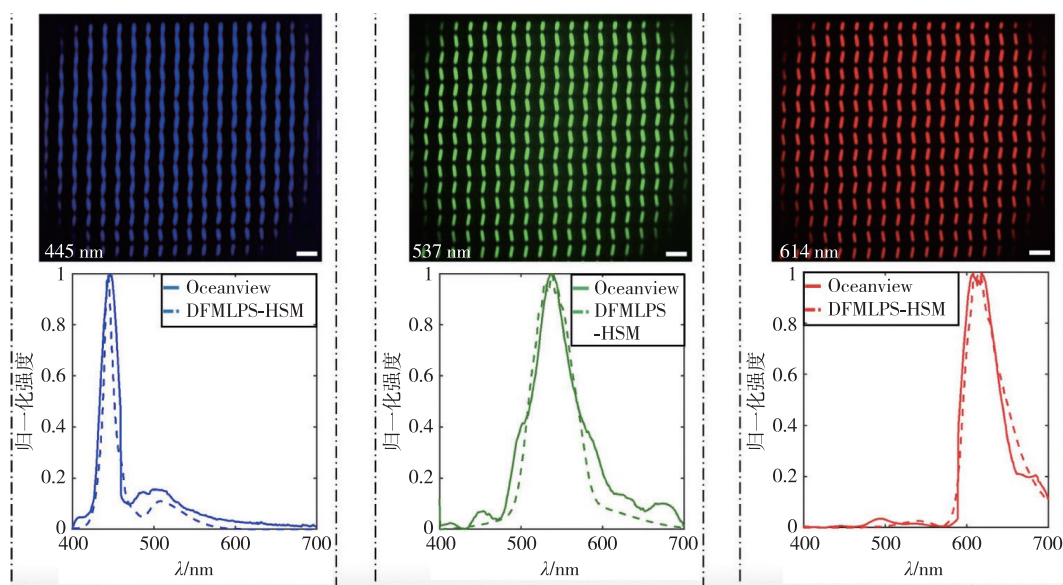
2.7 压缩超快光谱成像系统

压缩超快时间光谱(CUST)成像^[30-31]是压缩感知光谱成像在超快时间维度的扩展, 主要是以极低采样率捕获瞬态光谱动态, 如光子传播、飞秒化学反应过程。该技术将压缩感知与超快探测手段(如条纹相机、单像素探测器)相结合, 通过在时间维度实施稀疏采样, 实现对飞秒至皮秒级瞬态光谱动态的捕获与重建。

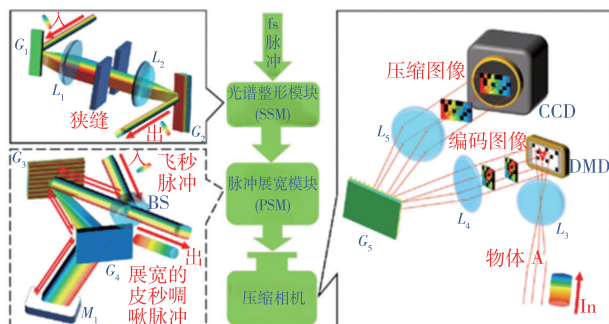
CUST 成像技术的原理如图 14 所示, 系统由三个模块组成: 光谱整形模块(SSM)、脉冲展宽模块(PSM)和压缩相机模块。通过调节 SSM 模块里面的 4F 光学系统傅里叶平面上的狭缝, 可以选择飞秒激光脉冲的特定光谱段, 飞秒脉冲在 PSM 模块中被光栅展宽。展宽脉冲穿过待测超快物体通过成像透镜投射到 DMD 上, 然后经编码和色散处理后由 CCD 传感器接收记录, 通过压缩感知算法从记录的图像中重建出待测物体的时空分布。



(a) 分辨率靶及相关单元的轮廓分布图

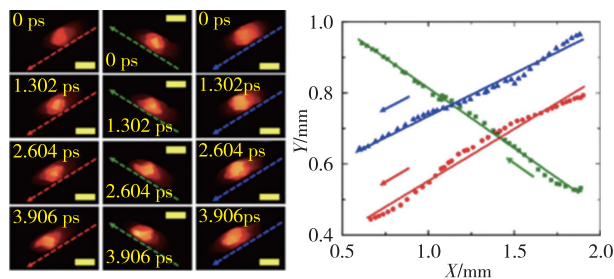


(b) 手机屏幕三色显示(蓝色、绿色、红色)的光谱图

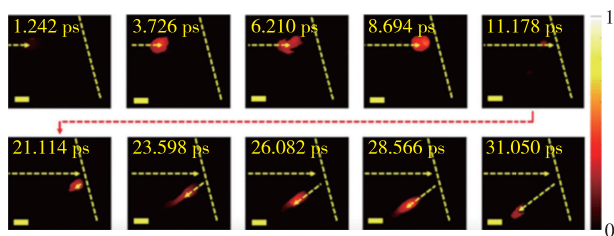
图 13 系统空间分辨率与光谱测量^[29]图 14 压缩超快时间光谱成像原理图^[30]

利用该系统记录瞬态光传播过程,图 15(a)展示了三个直线传播的光脉冲,帧间隔为 260 fs,以每五帧取一帧的方式呈现快照,相邻快照间的时间间隔为 1.302 ps。图像显示光脉冲以每帧约 50 μm 的步长逐步移动。图 15(b)展示了帧间隔 414 fs 的 60 帧光反射记录。CUST 成像系统可实现 3.85 THz 的超高帧率和亚纳米级光谱分辨率,能够单次记录 60 帧的超快图像,精确捕捉非线性介质中光传播、反射和自聚焦等 30 ps 内的动态过程。这种集高帧率、

高光谱分辨率与大帧数于一体的新型成像模式,为超快光谱分析、等离子体诊断、生物荧光成像等前沿研究提供突破性的观测工具。



(a) 飞秒光脉冲的三组时序快照及脉冲中心运动轨迹拟合



(b) 反射光脉冲快照

图 15 光传播超快成像^[30]

2.8 其他基于DMD的高光谱研究进展

除上述典型架构外,近年来,结合DMD的前沿探索相继报道。例如,Xu等^[32]提出一种基于DMD空间光调制与单像素探测器的压缩高光谱视频系统,该系统结合深度学习重建算法,实现了64个光谱通道的128×128像素高光谱图像的重建,每秒超过4帧,压缩比为900倍,显著提升了成像速度与压缩效率。Liu等^[10]提出一种新型基于DMD的紧凑型反射光路CSI系统(DRTR-CSI),通过集成DMD和分束器实现光学架构创新,并结合基于Transformer的重建方法,实现快速采集和重建256×256×22分辨率(465~675 nm波段)的光谱图像数据。Meng等^[33]则将量子点探测器与DMD-单像素压缩感知架构相结合,实现了近红外波段的高光谱成像,拓展了DMD技术在长波段探测中的应用潜力。这些最新工作展示了DMD高光谱成像在视频化、快速高效光谱图像重建与红外扩展等方向的前沿进展,为未来实用化和多场景应用提供了新的思路。

3 性能对比

基于DMD的高光谱成像系统在不同架构下展现出各自优势与局限。为便于综合分析,本文从波段范围、空间分辨率、光谱分辨率、成像速度、信噪比等特性进行了量化比较,如表1所示。

在空间与光谱分辨率方面,推扫式与可调谐分辨率系统(如DSSRT-HSI)通常具备更高的精度,可达到数十微米与亚纳米量级,而复用与快照式结构则在分辨率上略有牺牲。相较之下,复用型、双通道DMD系统在成像速度方面优势明显,可实现10 Hz光谱视频乃至30 fps动态图像,适合动态场景应用,CUST系统可实现3.85 THz帧率的瞬态捕

获。在信噪比方面,多列编码(CCSA-HIS)和双通道系统结构通过提升光通量与复用采样,在相同曝光条件下实现了数倍的SNR提升。

在数据处理方面,压缩感知与编码孔径方案需要复杂的迭代反演或深度学习重建算法,计算量较大,但在GPU和边缘计算平台的支持下已逐渐具备准实时能力。相较之下,传统逐行推扫系统处理链条更为直接,但采集效率较低,难以满足高通量需求。

总体而言,DMD高光谱成像在性能表现上体现出典型的“分辨率-速度-效率”权衡关系:推扫式架构强调精度,复用与快照式架构突出速度与实时性,多线与多通道系统则在保持采样效率的同时提升了信噪比。如何根据应用场景在不同架构间实现合理选择与优化,是未来系统设计的关键问题。

4 应用实例

4.1 生物医学与荧光成像

在生物医学领域,高光谱成像可同时提供组织的形态与分子信息,有助于实现无创诊断与早期病变识别。基于DMD的系统尤其适合荧光标记实验:通过照明推扫或多线并行结构,可针对特定波段实现高信噪比采集,抑制背景噪声。已有研究利用DMD高光谱系统对量子点标记的肿瘤细胞进行荧光成像,成功分辨癌细胞边界并分析发射光谱特征,实现对肿瘤区域的高精度检测。这类方法不仅提升了细胞和组织层面的空间分辨率,还能在动态条件下实现快速成像,为临床实时诊断和术中导航提供了参考^[27]。

表1 基于DMD的典型高光谱成像系统性能比较

系统名称	波段范围	空间分辨率	光谱分辨率/通道数	成像速度	SNR特性	代表应用
DMD-SSI ^[20]	450~670 nm	像素间距13.68 μm	24光谱通道	/	PSNR:33.55 dB	静态场景
复用型DMD系统 ^[21]	400~700 nm	128×128 px	3.73 nm	10 Hz光谱视频	/	实时监测、工业
DSSRT-HIS ^[22]	450~650 nm	可调,65.1μm(最优)	可调,0.2 nm(最优)	逐线扫描,实时	SNR随扫描线宽增加而提升	遥感、生物医学
CCSA-HIS ^[26]	400~750 nm	300 μm	1 nm	效率提升26倍	SNR提升4倍	高速检测
双通道DMD系统 ^[27]	400~900 nm	1 140×912 px	12.5 nm	30 fps 视频	PSNR:32.19 dB,提升40%	动态场景
DFMLPS-HSM ^[29]	450~700 nm	最小可分辨线宽≤3.1 μm	0.2 nm	扫描时间426 ms	/	显微、生物医学
CUST系统 ^[30-31]	400~1 000 nm	微米量级	<1 nm	3.85 THz,60 帧	瞬态过程捕获	超快物理、生物荧光
压缩高光谱视频系统 ^[32]	361~827 nm	128×128 px	7.3 nm	>4 fps,压缩比900×	PSNR: 28.03 dB	动态场景
DRTR-CSI ^[10]	465~675 nm	256×256 px	22光谱通道	实时采集	PSNR: 34.30 dB	生物医学、食品安全
近红外光谱成像系统 ^[33]	1 050~1 630 nm	128×128 px	8.59 nm	/	34.7 dB	工业、食品检测

4.2 工业与食品安全检测

在工业与食品安全检测中,传统成像方法对表面缺陷、异物污染等问题的识别往往依赖单一波段,容易漏检。DMD 高光谱成像系统通过灵活的波段选择与编码或扫描方式,测得产品光谱特征,实现快速、准确的物料分选及产品质量控制。例如基于DMD的反射式压缩光谱成像系统通过采集水果在传送带移动时编码的单次曝光值,清晰区分出水果种类与成熟度^[10]。相比机械狭缝系统,DMD方案在体积、成本和维护便利性上具有潜在优势,更适合集成到流水线中实现高通量、非破坏性的在线质量检验。

4.3 遥感、农业和环境监测

在遥感与农业应用中,高光谱数据能够有效区分作物种类、监测生长状态并诊断病虫害。基于DMD的推扫与可调谐分辨率系统(如DSSRT-HSI,见图16)能够在在大视场条件下灵活调整空间与光谱分辨率,实现从宏观遥感到微观植株分析的多尺度观测^[24]。在环境监测方面,DMD的光谱维编码技术可选择性地针对污染物敏感波段进行快速检测,从而显著提升监测效率。依托其高度可编程特性,同一平台能够兼顾水体富营养化监测、空气污染检测以及地表覆盖变化分析等任务^[5],展现出在环境与生态监测领域的广阔应用潜力。

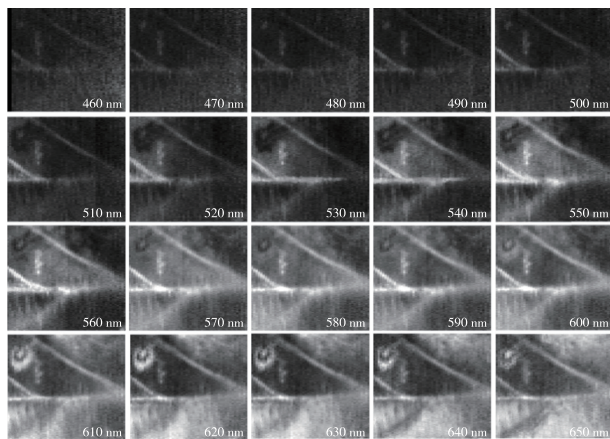


图16 叶片在460~650 nm波段的高光谱灰度图像^[24]

4.4 超快现象观测

超快过程如飞秒激光与物质相互作用、等离子体演化及非线性光学效应的观测,对时间和光谱分辨率要求极高。传统机械推扫方式无法捕获皮秒量级的瞬态。基于DMD的压缩超快光谱成像突破了采样速率限制,能够在单次实验中以3.85 THz帧率和亚纳米光谱分辨率记录数十帧瞬态图像。结

合DMD光谱成像系统,采用时间分辨采集方案,采集等离子体时空演化结果(见图17),显示了不同光谱线的等离子体存在细微的时空演化特征^[34]。这为研究光子传播、自聚焦、激光等离子体相互作用等前沿物理问题提供了新的观测窗口,也为化学反应动力学和生物超快荧光过程的实时探测创造了条件。

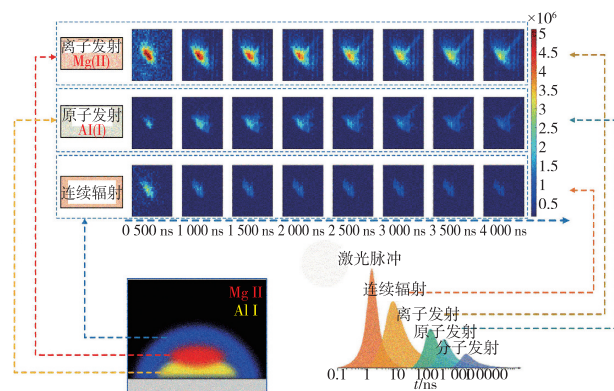


图17 等离子体的时空演化结果示意图^[34]

5 总结与展望

DMD 凭借其高速可编程调制特性,为高光谱成像提供了新的体系结构和实现手段,在遥感监测、生物医学和工业检测等领域展现出广泛应用潜力。

然而,从实验室研究走向工程化与产业化应用,基于DMD的高光谱成像仍面临若干关键挑战。第一,稳定性与可靠性:虽然DMD芯片经TI验证可支持大于 1×10^{12} 次切换和大于10万小时寿命,并能承受1500 g冲击和20 g振动,但在长期运行中仍需关注热管理、表面污染和镀膜老化等问题,这些因素可能导致反射率下降和镜面卡滞^[6]。第二,对准容差与几何畸变:高光谱成像系统普遍存在smile与keystone畸变,如果DMD与色散元件、探测器的几何关系不精确,会造成光谱通道错位,进而影响重建精度。近年来已有研究提出基于几何建模和标定的校正方法,但对于便携化或动态环境应用仍是挑战^[35]。第三,环境适应性:在遥感、无人机或现场检测中,温度漂移、振动和灰尘都会导致成像性能波动。现有试验多在实验室环境下进行,缺乏对复杂环境下鲁棒性的系统评估。如何实现小型化封装并保证环境适应性,是走向产业化的关键一步^[26]。第四,数据处理负荷:压缩快照类系统(如CASSI、CCSA-HIS、双通道系统)依赖于复杂的重

建算法。虽然深度学习已显著提升重建速度和精度^[10],但仍存在对训练数据依赖强、解释性不足的问题。在实际应用中,如何在低功耗嵌入式硬件上实现实时重建,是亟需解决的工程难点。

未来,基于DMD的高光谱成像技术的发展路线可分为三个阶段。短期阶段,发展重心在于硬件基础的夯实,致力于解决当前系统的工程化瓶颈:一方面推动DMD器件自身及其驱动、光学路径的微型化与集成化设计,以适配无人机、便携检测设备等移动平台;另一方面全面提升系统的稳定性与鲁棒性,通过优化散热、抗振动设计和校准算法,确保其在复杂工业现场及户外环境下的长期可靠运行。中期阶段,核心突破将依赖于人工智能的深度融合,重点研发专用于高光谱数据处理的轻量化深度学习模型,嵌入边缘计算单元,实现对海量光谱数据的实时压缩、重建与解析,为实时在线检测及分析提供技术支撑。长期发展,应积极推动多模态融合与标准化应用,将DMD高光谱与偏振、相位、荧光等手段结合,以增强复杂目标的多维信息获取能力;建立从数据格式、校准流程到分析模型的标准体系,实现规模化、标准化的实际应用,推动其向综合感知与智能决策平台发展。

因此,如何降低系统成本、提高环境适应性以及拓展新的应用场景,仍是未来研究的重点方向。随着器件技术、算法模型和应用需求的持续演进,DMD高光谱成像有望逐步突破实验室验证的局限,迈向实际工程与产业应用,在高精度材料检测、精准农业、智慧医疗和国防安全等领域发挥更大作用,为多模态融合和标准化应用奠定基础。

参考文献:

- [1] Goetz A F H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: a personal view [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: S5-S16.
- [2] Lu G, Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(1): 10901.
- [3] Sellar R G, Boreman G D. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(9): 1614-1624.
- [4] Hagen N, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 090901.
- [5] Wu B, Liu C, Xu R, et al. A target-based non-uniformity self-correction method for infrared push-broom hyperspectral sensors [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1186.
- [6] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [C]// *Conference on MOEMS Display and Imaging Systems*, 2003: 1-12.
- [7] Liang Q, Ren W, Jin B, et al. High-fidelity tissue super-resolution imaging achieved with confocal2 spinning-disk image scanning microscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 260.
- [8] Liu J, Zaouter C, Liu X, et al. Coded-aperture broadband light field imaging using digital micromirror devices [J]. *Optica*, 2021, 8(2): 139-142.
- [9] Wang Q, Luo H, Li Z, et al. High dynamic range spatial heterodyne one-dimensional imaging spectroscopy based on a digital micromirror device [J]. *Optics Express*, 2024, 32(13): 22067-22077.
- [10] Liu X, Wang C, Zhang Y, et al. DMD-based reflective compressive spectral imaging system coupled with transformer-based reconstruction method [J]. *Optics Letters*, 2025, 50(7): 2362-2365.
- [11] Liu S, Zou W, Sha H, et al. Deep learning-enhanced snapshot hyperspectral confocal microscopy imaging system [J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 13918-13931.
- [12] Descour M, Dereniak E. Computed-tomography imaging spectrometer: experimental calibration and reconstruction results [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4817-4826.
- [13] Wang Q, Luo H, Li Z, et al. Digital micromirror device and spatial heterodyne spectroscopy combined modulation interference spectroscopy [J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127595.
- [14] Swift R D, Wattson R B, Decker J A, et al. Hadamard transform imager and imaging spectrometer [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(6): 1595-1609.
- [15] Wagadarikar A A, Pitsianis N P, Sun X, et al. Video rate spectral imaging using a coded aperture snapshot spectral imager [J]. *Optics Express*, 2009, 17(8): 6368-6388.
- [16] Kittle D, Choi K, Wagadarikar A, et al. Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(36): 6824-6833.
- [17] Baraniuk R G. Compressive sensing [lecture notes [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4): 118-121.
- [18] Wu Y, Ye P, Mirza I O, et al. Experimental demonstration of an optical-sectioning compressive sensing microscope (CSM) [J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24565-24578.
- [19] Bioucas-Dias J M, Figueiredo M A T. A new twIst: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(12): 2992-3004.
- [20] Wu Y, Mirza I O, Arce G R, et al. Development of a digital-micromirror-device-based multishot snapshot spectral imaging system [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2692-2694.
- [21] Chen W, Sun M J, Deng W J, et al. Hyperspectral imaging via a multiplexing digital micromirror device [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106889.

- [22] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, et al. A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 3464.
- [23] Sun M J, Edgar M P, Phillips D B, et al. Improving the signal-to-noise ratio of single-pixel imaging using digital microscanning[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10476-10485.
- [24] Dong X, Xiao X, Pan Y, et al. DMD-based hyperspectral imaging system with tunable spatial and spectral resolution[J]. Optics Express, 2019, 27(12): 16995-17006.
- [25] Wagadarikar A, John R, Willett R, et al. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. Applied Optics, 2008, 47(10): B44-B51.
- [26] Shi Y, Xiao X, Tong G, et al. Column coded scanning aperture hyperspectral imaging system [J]. Optics Express, 2023, 31(22): 37229-37240.
- [27] Ma M, Niu Y, Gao D, et al. Efficient hyperspectral video reconstruction via dual-channel DMD encoding [J]. Remote Sensing, 2025, 17(2): 190.
- [28] Cao X, Du H, Tong X, et al. A prism-mask system for multispectral video acquisition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2423-2435.
- [29] Dong X, Tong G, Song X, et al. DMD-based hyperspectral microscopy with flexible multiline parallel scanning [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2021, 7: 68.
- [30] Lu Y, Wong T T W, Chen F, et al. Compressed ultrafast spectral-temporal photography[J]. Physical Review Letters, 2019, 122(19): 193904.
- [31] Yang C, Cao F, Qi D, et al. Hyperspectrally compressed ultrafast photography [J]. Physical Review Letters, 2020, 124(2): 023902.
- [32] Xu Y, Lu L, Saragadam V, et al. A compressive hyperspectral video imaging system using a single-pixel detector [J]. Nature Communications, 2024, 15: 1456.
- [33] Meng H, Gao Y, Wang X, et al. Quantum dot-enabled infrared hyperspectral imaging with single-pixel detection[J]. Light, Science & Applications, 2024, 13(1): 121.
- [34] Gu T, Xu Z, Wang Z, et al. Design and analysis of a spectral imaging detection instrument based on a digital micromirror device[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2025, 40(9): 2573-2581.
- [35] Lee J, Son D, Kim H, et al. Development of a digital micromirror device-based hyperspectral imaging system with dynamically adjustable measurement regions [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 26587.

作者简介:

阮育娇(1985—),女,福建省漳州市人,博士,高级工程师,主要研究方向为光电计量测试技术。