

文章编号 1004-924X(2023)21-3096-15

数字微镜器件光谱成像技术进展

石颖超^{1,2}, 张路明^{1,2}, 陈 飞^{1,2}, 苑伟政^{1,2}, 虞益挺^{1,2*}

(1. 西北工业大学 宁波研究院 机电学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室 陕西省微纳机电系统重点实验室,
陕西 西安 710072)

摘要:数字微镜器件(DMD)作为一种灵活、可编程、可独立寻址的空间光调制器件,广泛地应用于无掩膜光刻、光束整形、全息成像、共焦测量等领域。在光谱成像领域,DMD能够对成像视场进行精细可控的调制,从而代替传统的机械掩膜版和机械扫描结构。综述了近年来DMD在光谱成像领域的研究进展和应用情况,详细论述了基于DMD的编码孔径和推扫式光谱成像系统的光学系统基本结构及工作原理;梳理了基于DMD的光谱成像系统从哈达玛变换光谱成像到推扫式光谱成像的发展脉络;详细介绍了研究人员为克服DMD微镜的衍射以及像面倾斜等像差所做的相关研究工作。最后,总结了基于DMD的光谱成像技术的独特优势,讨论了基于DMD的光谱成像技术未来的发展方向与应用前景。

关键词:数字微镜器件;光谱成像;编码孔径;哈达玛变换;推扫式

中图分类号:TP731;TH745 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233121.3096

Progress in spectral imaging technology of digital micromirror devices

SHI Yingchao^{1,2}, ZHANG Luming^{1,2}, CHEN Fei^{1,2}, YUAN Weizheng^{1,2}, YU Yiting^{1,2*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Ningbo Institute of
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace (Ministry of Education),
Key Laboratory of Micro and Nano-Electro-Mechanical Systems of Shaanxi Province,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

* Corresponding author, E-mail: yyt@nwpu.edu.cn

Abstract: In recent years, digital micromirror device (DMD), as a flexible, programmable, and independently addressable spatial light modulation device, has been widely used in maskless lithography, beam shaping, holographic imaging, confocal measurement, and other fields. The flexible modulation mode also gives DMD unique advantages in spectral imaging. It can flexibly modulate the imaging field of view, replacing the traditional mechanical mask and scanning structure. In this study, DMD's research progress and application in spectral imaging in recent years was reviewed. The basic structure and working principle of the optical system of the aperture-coded and push-broom spectral imaging system based on DMD were

收稿日期:2023-05-10;修订日期:2023-06-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51975483, No. 52205603);宁波市自然科学基金资助项目(No. 202003N4033)

discussed in detail and the development of a spectral imaging system based on DMD from Hadamard transform spectral imaging to push-broom spectral imaging was summarized. The relevant research work to overcome the DMD's diffraction owing to the micro-mirror and inclination of the image plane was introduced. Finally, The unique advantages of spectral imaging technology based on DMD was summarized and the future development direction and application prospect of spectral imaging technology based on DMD was discussed.

Key words: digital micromirror device; spectral imaging; coded aperture; Hadamard transform; push-broom

1 引言

数字微镜器件的诞生改变了传统光谱成像技术的格局。光谱成像技术不仅具有成熟的理论支撑,而且具有极强的发展潜力。光谱成像系统不同于光谱仪,不仅能够获取观测区域的光谱信息,同时也能获取观测区域的空间信息,实现“图谱合一”。1983年,世界上最早的一台光谱成像仪 AIS-1 诞生于美国 NASA 喷气动力实验室^[1]。如今,经过 40 年的发展,光谱成像技术具有多种分类标准,按照扫描方式可以分为摆扫式^[2]、推扫式^[3]、凝视式^[4]和快照式^[5]等类型。

数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)的诞生和发展与光谱成像技术处于同一时期。1982年,DMD被作为一种空间光调制器件诞生于德州仪器实验室^[6],早期主要应用在投影显示领域。经过科研人员不断的挖掘和探索,DMD的应用领域也从传统的投影显示领域扩展到无掩膜光刻^[7-9]、光束整形^[10-13]、全息成像^[14-15]和共焦测量^[16-17]等领域。

灵活的调制模式赋予了 DMD 在光谱成像领域的独特优势,通过对成像视场的灵活设置,可以代替传统推扫式和快照式光谱成像系统中的机械狭缝和机械掩模版。传统推扫式光谱成像系统通常由尺寸较大的扫描机构和其他光学元件构成,而 DMD 的使用可以替代其中的扫描机构,在芯片级别的尺寸上实现推扫以及多种扫描方式^[18],可以进一步提升系统的稳定性并缩小系统的体积。同时,DMD 的微镜阵列是一种天然的可编程掩模版,能够代替传统的机械掩模版。通过对 DMD 微镜阵列进行编程,可以获得诸如哈达玛变换掩模版等多种形式的编码孔径光谱成像仪^[19]。近年来,研究人员已提出多种基于

DMD 的不同类型的光谱成像系统^[20-21],但在应用领域基于 DMD 的光谱成像系统还存在一些难点亟待解决。

本文详细介绍了两类基于 DMD 的光谱成像系统的组成和工作原理,一类是利用 DMD 进行推扫的光谱成像系统,另一类是利用 DMD 进行编码孔径的光谱成像系统。除此之外,还详细介绍了基于 DMD 光谱成像系统具有的衍射像差和像面倾斜导致的像差以及消除 DMD 像差的相关研究,并探讨了基于 DMD 的光谱成像系统的优化和发展方向。

2 系统组成与工作原理

按照在光谱成像系统中的作用,DMD 可以分为两大类:编码孔径光谱成像和推扫式光谱成像。在编码孔径光谱成像系统中,DMD 的主要功能是代替机械掩模版实现可编程掩膜;在推扫式光谱成像系统中,DMD 的作用是代替机械狭缝完成扫描功能。DMD 作为整个光谱成像系统的核心器件,起着举足轻重的作用。

DMD 的发展始于 1977 年由著名物理学家拉里·霍姆贝克领导的德克萨斯仪器公司。之后,德克萨斯仪器公司获得了美国国防部的一个项目,要求制造一种可以调节光线的设备。经过多年的研究和开发,霍姆贝克提出利用微镜作为一种开关来调制光。Instruments Homebeck 公司在 1987 年研发了第一台数字微镜设备^[6],并于 1991 年获得 DMD 设计的第一项专利,这是数字微镜器件最早的原型,标志着 DMD 真正意义上的诞生。DMD 早期主要应用于投影显示,随着研究人员的不断开发,DMD 的应用领域越来越广泛。

DMD 的微镜结构包含两部分,一部分是位于底部的 CMOS 电路,另一部分是位于上部的铝制微机械结构,如图 1(b)所示。DMD 工作时,通过底部的 CMOS 电路传输电信号,通过静电力驱动依附于铰链上的微镜进行双稳态偏转,偏转角度随 DMD 规格的不同而变化。需要注意的是,DMD 微镜是沿着正方形的对角线进行偏转的。DMD 只有在不加电压的情况下才会处于水平状态。工作时,每个微镜要么处于开态,要么处于关态。

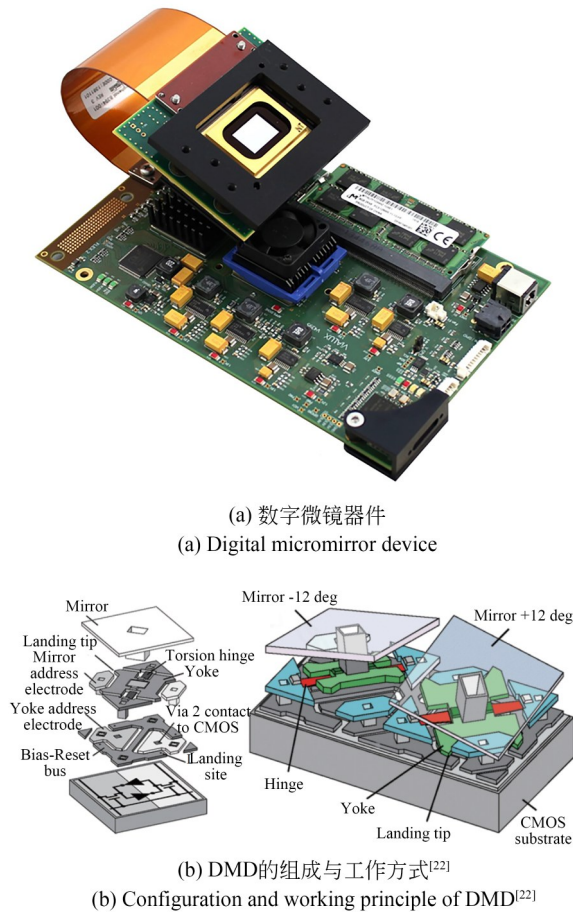


图1 数字微镜器件产品与结构
Fig. 1 Digital micromirror device products and structures

为满足差异化的市场需求,如今的 DMD 已经发展成为具备多种规格、包含多种版本的系列化产品。芯片尺寸从 0.16 英寸到 0.8 英寸不等,最小显示分辨率为 320×180 ,最大显示分辨率为 3840×2160 。微镜尺寸包含 5.4、7.6、10.8 和 $13.68 \mu\text{m}$ 多种规格。早期 DMD 多偏转 $\pm 10^\circ$,当

前大多版本的 DMD 的偏转角度为 $\pm 12^\circ$, $\pm 14.5^\circ$, $\pm 17^\circ$,偏转角度的提高有助于对比度的提高。同时,DMD 还具备方形和菱形^[23]两种不同的微镜排列方式,如图 2 所示。

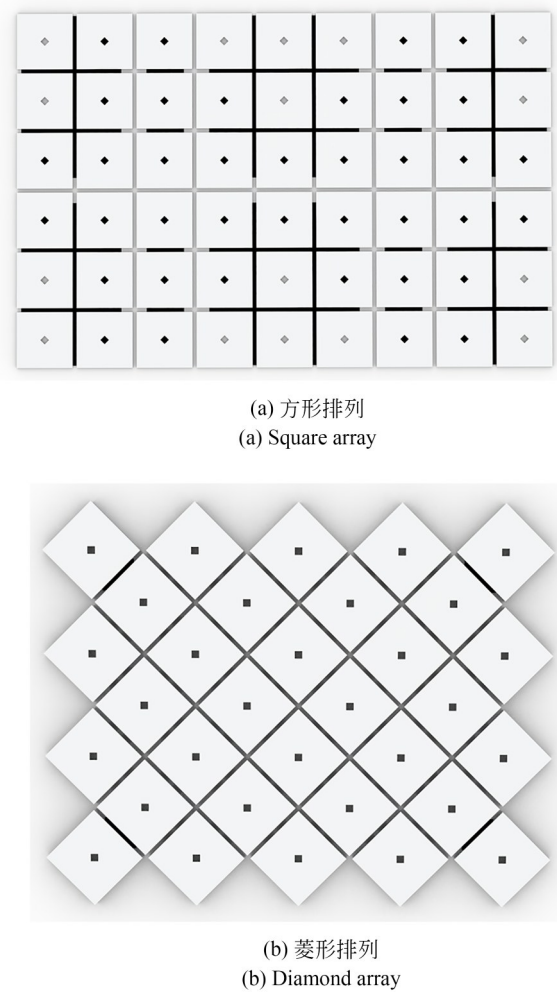


图2 DMD 的排列方式
Fig. 2 Arrangement modes of DMD

某些型号的 DMD 不仅具有可见光窗口,还具有紫外和近红外窗口^[24]。显示分辨率为 1024×768 的 DMD 具有多波长保护窗口,因此该款 DMD 成为最常用的器件。通过改变用于保护芯片的前窗的材料,可以针对不同的电磁光谱对 DMD 进行优化。多种型号和规格的 DMD,不仅可以满足传统意义上的投影与显示应用,还能够满足 3D 打印、3D 扫描、机器视觉、光谱和汽车电子等领域的应用^[20]。

2.1 基于DMD的编码孔径光谱成像

基于DMD的编码孔径光谱成像系统通过对孔径进行编码采集得到混叠光谱数据,之后再了解码,从而获得目标的三维数据立方体,实现光谱成像功能。按照“先编码后色散”还是“先色散后编码”,编码孔径光谱成像系统可以分为空间维编码光谱成像系统和光谱维编码光谱成像系统,它们可以有效提高系统光通量。

图3为基于DMD的空间维编码光谱成像系统的基本工作原理。DMD作为空间编码掩模版,目标经过DMD完成空间维调制,再经过色散元件,由探测器获得混叠光谱信息。最后,经过解码过程获得目标的三维数据立方体。

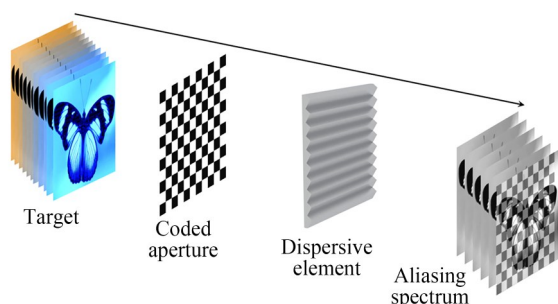


图3 基于DMD的空间维编码光谱成像系统的工作原理
Fig. 3 Working principle of spatially coded aperture imaging spectrometer based on DMD

基于DMD的空间维编码光谱成像的典型应用是压缩感知光谱成像。该技术利用空间和光谱信息在某一变换域的稀疏性,通过DMD的空间编码完成信息的稀疏采样。其求解原理如下:

$$\hat{x} = \arg \min_x \|y - \Phi x\|_2^2 + \tau \|x\|, \quad (1)$$

式中: τ 为正则化系数; Φ 为编码矩阵,编码矩阵可采用哈达玛矩阵、伯努利随机矩阵等,加载到DMD上完成空间维编码; y 为测量数据,测量数据的维度远小于目标数据维度; x 为目标数据,可在某一变换域稀疏表示: $x = \Psi s$, Ψ 为稀疏变换矩阵, s 为目标数据的稀疏表示。求解过程是严格的最优化问题,对欠定方程组进行迭代求解,获得目标数据的估计。常用的求解算法有梯度投影稀疏重建方法、两步迭代收缩阈值方法等。

基于DMD的空间维编码光谱成像系统的结构较为复杂。首先,编码模板的像素与探测器的

尺寸需要严格的比例匹配,这对光学系统的设计提出了很高的要求;其次,需要大面积的探测器以捕获所有的数据信息;此外,采集数据量小而重构的数据量大,对于图像重构算法也提出了很高的要求。

基于DMD的光谱维编码光谱成像系统(见图4)在结构上要先经过色散元件进行色散,一次色散后的混叠光谱展开在DMD表面,DMD进行光谱维度的编码,再经过相同的色散元件进行合光,最终在探测器表面得到编码后的光谱信息。经过反编码得到目标的三维数据立方体。根据有无狭缝结构,系统又可以分为有狭缝推扫式和无狭缝快照式。带狭缝的光谱编码成像系统相当于在传统的狭缝推扫光谱成像系统中应用编码孔径。

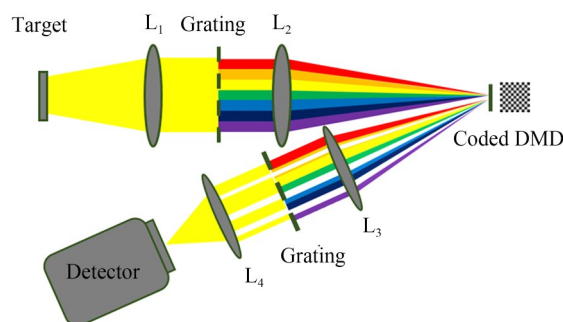


图4 基于DMD的光谱维编码光谱成像系统
Fig. 4 Spectrally coded aperture imaging spectrometer system based on DMD

基于DMD的光谱维编码光谱成像的典型应用是哈达玛变换光谱成像。哈达玛变换来源于称重测量原理,由 ± 1 组成的哈达玛 H 矩阵构成最佳天平称重矩阵,而由0,1组成的 S 矩阵构成最佳弹簧称重矩阵, S 矩阵在工程上的使用更为广泛。其求解原理可表示为:

$$\hat{x} = S^{-1}y = x + S^{-1}e, \quad (2)$$

式中: x 为目标数据, S 为组合测量矩阵, y 为测量数据,测量数据的维度与目标数据维度相同, e 为单次测量时的误差。这是对正定方程组进行求解。该技术主要利用多路复用测量原理,通过对多个待测目标的多次组合测量以提高信噪比和光通量,如使用 N 阶 S 矩阵进行测量,信噪比可达到单次测量的 $\sqrt{N}/2$ 倍,因此,该方法特别适

合信噪比低或弱光环境下的光谱成像。

与基于 DMD 的空间维编码光谱成像系统相比,基于 DMD 的光谱维编码光谱成像系统在光学系统上更加复杂,需要增加一组额外的合光元件,而且合光元件并不能实现完全合光。如果使用一对光栅进行分光与合光,那仅能完成光栅一个级次的合光。随着编码次数的增加,实时性变弱。不过,基于 DMD 的光谱维编码光谱成像系统的图像重构算法比较简单。

2.2 基于 DMD 的推扫式光谱成像

基于 DMD 的推扫式光谱成像方式可以分为两种:照明推扫和成像推扫。照明推扫是将 DMD 与照明系统集成成为 DLP(Digital Light Processing),如图 5(a)所示,依次按列照明目标。被照亮的目标区域将光反射进入后续物镜和分光系统中,最终探测器得到每一列的光谱数据立方体,通过数据处理可以获得目标的完整三维数据立方体。这种推扫方式多用于微观目标,如显微

光谱成像领域。

成像推扫的主要工作原理是将 DMD 放置在物镜 L_1 的像面处,目标经物镜一次成像在 DMD 微镜表面,如图 5(b)所示。DMD 逐列进行扫描,依次将目标图像反射到后续分光光路中,每一列图像经过分光光路色散,由探测器捕获到每一列的光谱数据。完成扫描后,将获得整个目标的光谱数据立方体。

推扫式光谱成像系统除了具有光学系统进行成像、准直和会聚等功能之外,往往需要分光元器件进行分光,分光元器件通常选用棱镜或者光栅。它们各有优缺点,棱镜的色散属于非线性色散,光谱分辨率较低,但光通量较大;而光栅的色散属于线性色散,光谱分辨率高,但是存在不同的衍射级次,导致光通量减少,同时不同级次之间的不同波长还存在重叠,因此限制了波段的有效范围,实际使用时应根据需要择优选取。

基于 DMD 的推扫式光谱成像系统的优势在于系统结构简单,不需要复杂的光谱标定和辐射标定过程,也不需要复杂的图像处理算法,空间分辨率和光谱分辨率都比较高。但基于 DMD 的推扫式光谱成像系统的缺点也比较明显,即按列扫描的方式导致系统单次曝光的光通量小。当目标光强较弱时,需要延长曝光时间以增强光信号,这可能会增加系统的采集时间。

3 发展进程

3.1 基于 DMD 的编码孔径光谱成像系统

由于 DMD 具有优良的空间光调制特性,1995 年佛罗里达大学化学系的 Wagner II 使用最早版本的数字微镜光调制器研制了一台基于 DMD 的可见光光谱仪^[25]。微镜阵列是一种天然的哈达玛变换掩膜版,随着 DMD 产品的逐渐成熟,DMD 开始应用于哈达玛变换光谱仪领域^[26-33]。DMD 不仅推动了哈达玛变换光谱仪的发展,也促进了编码孔径光谱成像技术的发展。

在 20 世纪末 21 世纪初期,已经有介绍 DMD 特性^[34]及其在成像和光谱方面潜在应用的相关报道^[35-37]。这些早期研究对基于 DMD 的光谱成像应用具有极其重要的作用,不仅介绍了 DMD 的相关特性,还进行了实验验证,为后续的研究奠定了基础。

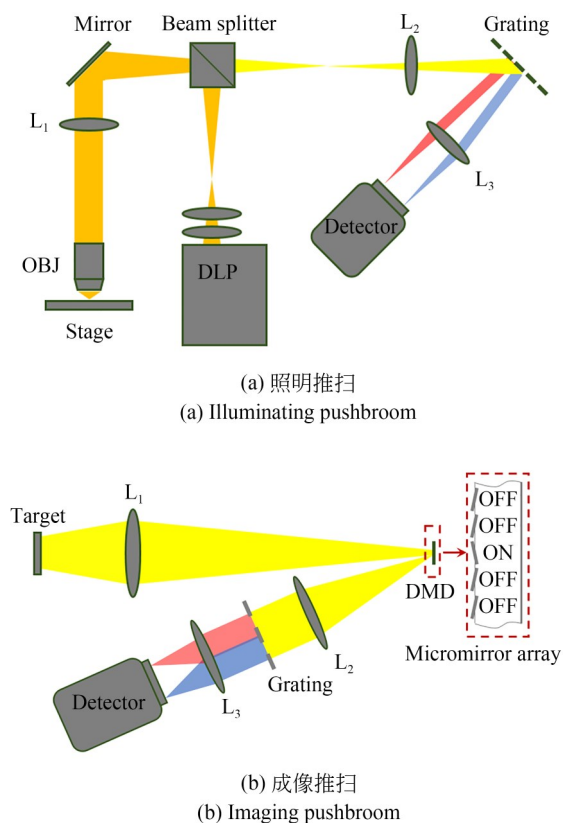


图 5 两种基于 DMD 的推扫式光谱成像系统

Fig. 5 Two different push-broom spectral imaging systems based on DMD

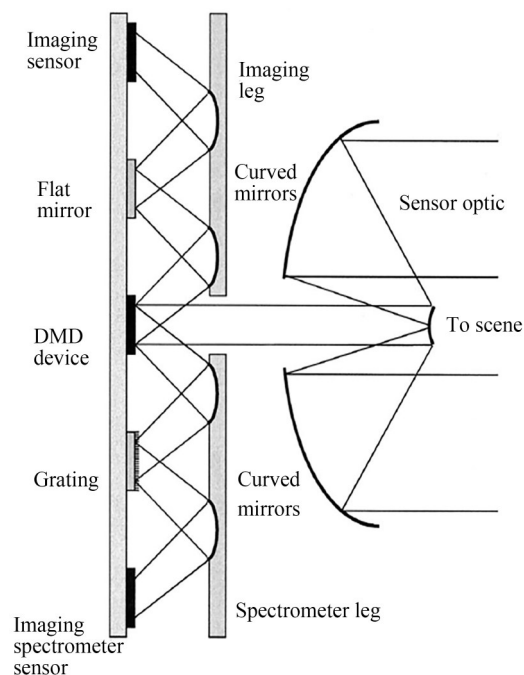
2001年,美国的Sandia国家实验室首次提出将DMD应用于光谱成像^[38],他们采用双Offner结构,将DMD放置在第一块光栅的色散平面上,完成光谱维哈达玛变换编码,经过第二块光栅的合光,最终在探测器上获得编码后的色散光谱维数据。2002年,他们又提出了一种新型简化版的色散光谱成像系统^[39],其结构与图5(b)推扫式光谱成像系统相似。

深耕哈达玛变换光谱成像领域数十年的堪萨斯州立大学的Hamaker团队,于2002年提出了一种基于DMD的新型光谱成像仪^[40],该光谱成像仪使用一个DMD和一个单像素探测器以消色散的模式工作在近红外波段。同年,乔治梅森大学的Christensen提出了一种主动眼技术^[41],这是一种用于高动态范围高光谱成像的自适应逐像素图像分割传感器架构,如图6(a)所示。该架构包含两个光学支路,一个支路用来获得光谱信息,一个支路用来获取空间信息。

2006年,美国Spectral Science的Goldstein等提出了天基自适应光谱成像仪^[42],该仪器采用曲面光栅和一个较大的球面反射镜优化了光学系统。2009年,他们以此为基础搭建了基于DMD的高光谱成像系统原型样机并进行了测试^[43]。2013年,他们更深入地完善了系统,搭建了红外波段的自适应光谱成像仪,并对系统进行更深入的测试,测试目标包含特定环境中的一些气体^[44]。2015年,他们的研究进一步向工程化和实用化迈进,搭建了一套便携式、远距离的光谱成像相机用于检测气体流出物和残留物^[45]。

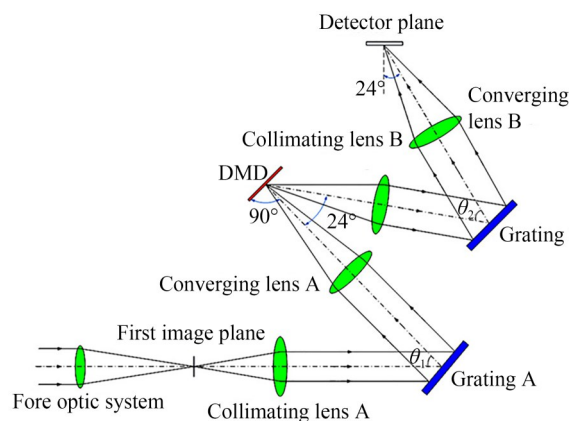
2010年,中国科学院西安光机所的孙鑫研究了基于DMD的天基哈达玛变换光谱成像探测技术^[46]。2012年,他更详细地介绍了多路复用和哈达玛变换光谱成像原理等^[47],并搭建了基于DMD技术的哈达玛变换光谱成像仪,如图6(b)所示。

2009年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的Love提出了一种基于DMD的可编程滤光器和哈达玛变换光谱成像仪^[48]。在后续的几年内,Graff和Love持续进行这方面的研究,相继提出了基于DMD的全帧可编程光谱滤波器^[49]、自适应光谱成像仪^[50]以及面向实时化学检测的光谱成像仪^[51],并首次提出了使用两个正交光栅或前置DMD消



(a) 主动眼式光谱成像仪^[41]

(a) Active-eye imaging spectrometer^[41]



(b) 天基哈达玛变换光谱成像仪^[47]

(b) Space-based Hadamard transform imaging spectrometer^[47]

图6 基于DMD的编码孔径光谱成像仪的光路结构

Fig. 6 Optical layout of coded aperture imaging spectrometer based on DMD

除DMD衍射效应的方法,如图7(a)所示。

2006年,Rice大学的Takhar等基于压缩传感原理,使用DMD构建了单像素压缩成像相机^[52]。2008年,他们针对该方向进行了更为深入的研究,详细探究了基于DMD的单像素压缩传感成像的原理^[53]及DMD在太赫兹成像领域的应用^[54]。2011年,美国特拉华大学的研究人员提出了一种基于DMD的压缩传感快照式光谱成像系

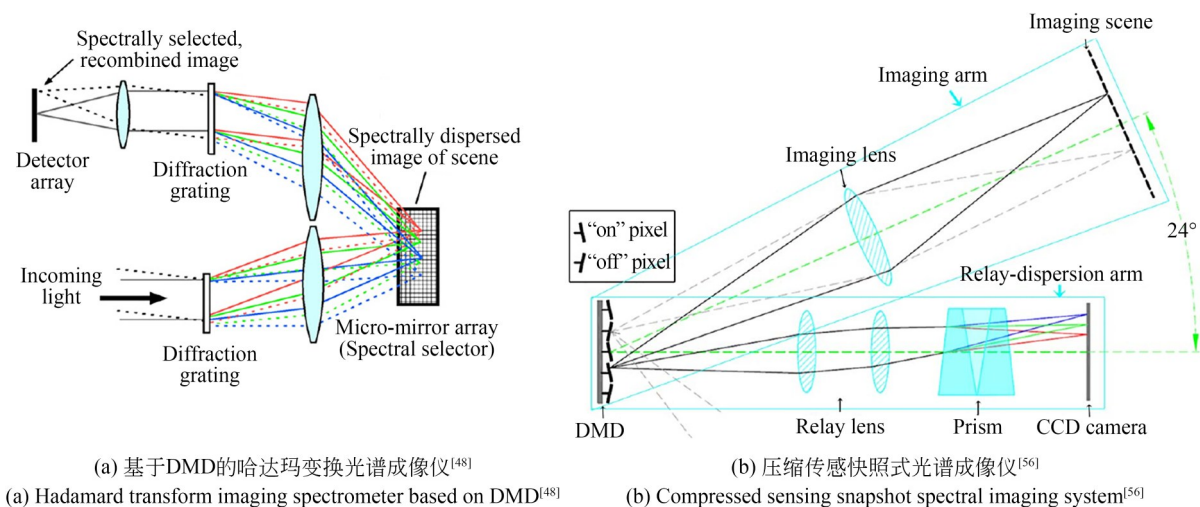


图 7 基于 DMD 的编码孔径光谱成像仪

Fig. 7 Aperture-coded spectrometers based on DMD system

统,如图 7(b)所示^[55-57],该系统将基于 DMD 的光谱成像技术与压缩传感原理结合起来,进一步提高了采集速度。2014 年,清华大学的林欣等提出了一种基于 DMD 的双编码压缩高光谱成像系统^[58],提升了压缩重构算法的质量。2020 年,北京理工大学的许昌等提出了一种双色自适应编码超分辨压缩光谱成像方法^[59],提高了高光谱成像仪的重构分辨率和精度。同年,K. Optronics 的 Zhou 等提出一种压缩编码的高光谱视频成像仪^[60],可以获得视频速率的高光谱成像数据。

2016 年,中国科学院上海技物所的张昊研究了基于 DMD 的编码孔径光谱成像仪的关键技术^[19],并搭建了基于 DMD 的编码孔径光谱成像仪样机。2018 年,中国科学院深圳先进技术研究院的马翠研究了基于 DMD 的编码光谱成像仪,并探究了哈达玛变换、傅里叶变换和压缩感知等多种编码方式^[61]。

经过数十年的蓬勃发展,基于 DMD 的编码孔径光谱成像技术日趋成熟,虽然具有更高的光通量和采集速度,但更依赖于编码和解码的算法。

3.2 基于 DMD 的推扫式光谱成像系统发展进程

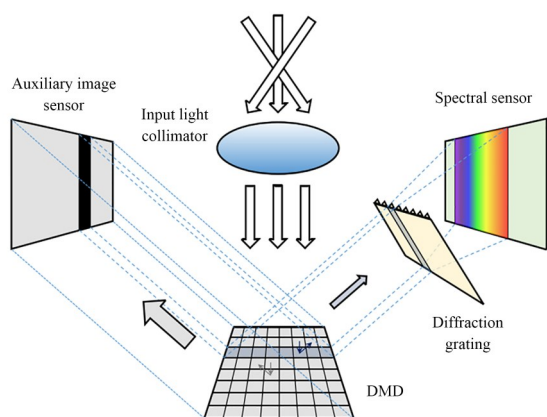
相较于基于 DMD 的编码孔径光谱成像系统,起步较晚的基于 DMD 的推扫式光谱成像系统则显得小众,但这并不阻碍推扫式光谱成像系统展现自身的优势。

2003 年,德国高技术研究所的 Wuttig 等提出了一种基于自研 MEMS 微镜的灵敏哈达玛变换光谱成像仪^[62]。这种微镜按列排布进行哈达玛变换推扫,获得光谱数据,不仅提高了信噪比,也提高了光通量。2007 年,欧洲联合实验室的 Bednarkiewicz 等提出了一种基于数字微镜的高光谱成像技术^[63],使用 DMD 顺序照亮样本的不同区域,通过光谱相机获得光谱成像数据,是一种照明推扫方式。

2016 年,澳大利亚的 Arablouei 等提出了一种基于 DMD 的推扫式光谱成像技术,如图 8(a)所示^[18],他们利用 DMD 的双通性,使用一个通路进行光谱成像,一个通路作为辅助支路进行辅助成像,实现了可见光波段快速、稳健的推扫式光谱成像。2017 年,Hsu 等利用基于 DMD 的 DLP 技术依次顺序照亮样本,实现样本表面的推扫式显微高光谱成像技术,也是一种照明推扫方式^[64]。

2019 年,本课题组提出一种基于 DMD 的高光谱成像系统,如图 8(b)所示^[65],该系统通过 DMD 按列偏转实现高光谱成像。2021 年,我们继续深入研究,提出了一种基于 DMD 的空间分辨率和光谱分辨率可调的显微高光谱成像系统,如图 8(c)所示^[66]。

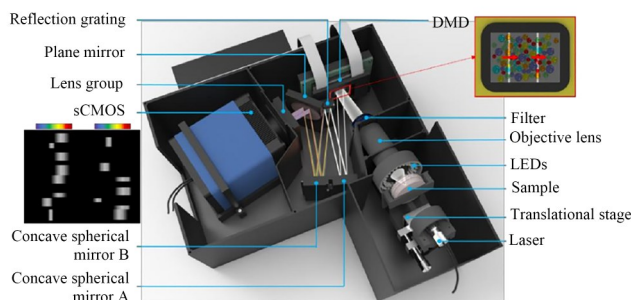
2020 年,新加坡国立大学的 Yi 等提出了一种基于 DMD 的推扫式哈达玛变换高光谱成像技术,如图 8(d)所示^[67]。与前述 Arablouei 等的工



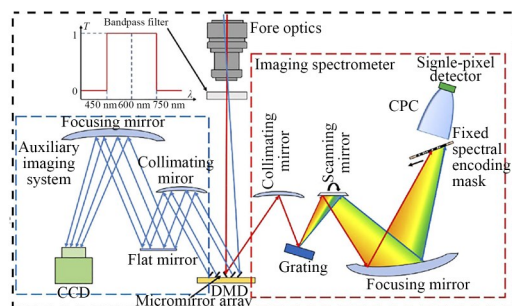
(a) 基于DMD的透射式双路推扫式光谱成像系统^[18]
(a) Transmissive dual-pass push-broom spectral imaging system based on DMD^[18]



(b) 基于DMD的高光谱成像系统^[65]
(b) Hyperspectral imaging system based on DMD^[65]



(c) 基于DMD的空间分辨率和光谱分辨率可调的显微高光谱成像系统^[66]
(c) Micro hyperspectral imaging system with tunable spatial and spectral resolution based on DMD^[66]



(d) 基于DMD的反射式双路推扫式光谱成像系统^[67]
(d) Reflective dual-pass push-broom spectral imaging system based on DMD^[67]

图8 基于DMD的推扫式光谱成像系统

Fig. 8 Push-broom spectral imaging systems based on DMD

作具有异曲同工之处^[18],但他们利用DMD的双通性质构建了两个支路,其中一个支路是辅助成像系统,可以提前观测正在成像的区域。

基于DMD的推扫式光谱成像系统由于通光孔径的限制,需要较长的采集时间,但高的空间分辨率及光谱分辨率是该系统的优势。

4 DMD引入的像差及解决方法

DMD在光谱成像系统中的使用会引入两类像差:衍射和像面倾斜。这两类像差都是由DMD本身的结构引入的。由于DMD微镜阵列已经达到微米尺度,所以会产生衍射现象,会对成像质量造成一定的影响。而像面倾斜主要是由于DMD的光轴与镜头的光轴不匹配以及DMD自身微镜的等效倾斜镜面造成的。这两类

像差会对编码孔径和推扫式光谱成像系统产生不良影响。

4.1 衍射像差及解决办法

DMD由数百万个排列整齐的微镜组成,这些微镜所构成的微观结构在光入射到DMD表面上时会产生衍射现象。对于不同的应用场景,衍射的作用有利有弊,但在光谱成像领域,DMD的衍射会降低像质,是有害的。

为消除或抑制DMD的衍射,构建DMD的衍射模型是必要的。关于DMD的衍射模型,已经有不少研究人员进行了这方面的研究^[68-75]。衍射模型的建立有助于在光学系统设计之前找到最佳的系统参数,包括波长、微镜间距、入射角和滤波器尺寸,以提高对比度和衍射效率。

总的来说,消除或抑制DMD衍射的方法主

要有两种^[48],第一种是使用与 DMD 刻线数相同刻线数的两个正交光栅来消除 DMD 的二维衍射效应;另一种方法是使用一个 DMD 消除另一个 DMD 的衍射效应。第二种方法目前已经实现,Liu 等在 2021 年使用两个 DMD 和 $4f$ 系统搭建了编码孔径的宽光场成像系统,如图 9(a)所示,其中一个 DMD 用来消除另一个 DMD 的色散^[76],获得了不错的效果。

两种消除 DMD 衍射效应的方法都是利用双光栅的汇合光谱特性^[77],但只能消除一个级次的衍射现象,其他级次的衍射依然会影响成像效果,因此还需要添加光阑来滤除其他级次的衍射。此外,通过算法和图像处理也可以解决该问题。

4.2 像面倾斜及解决办法

像面倾斜是由 DMD 的光轴与镜头的光轴不匹配以及 DMD 自身微镜的等效倾斜镜面造成的。这一问题的直接表现为矩形像变形为平行四边形像,同时由像面倾斜导致的部分离焦,导

致部分区域成像模糊的现象。

像面倾斜的解决方法需要从光学系统设计层面入手。2020 年,中国科学院西安光机所的武鑫在研究基于 DMD 的自适应分类光谱成像系统时^[78],针对 DMD 和光栅引起的严重色差问题,采用光线追迹方法对成像过程进行分析,通过焦距匹配法解决了光学系统中色散光无法完全复合的问题。2020 年,长春理工大学的王月旗针对基于 DMD 的编码孔径光谱成像光学系统,详细分析了 DMD 反射镜与普通反射镜的区别,以及 DMD 在光学系统中引入的像面倾斜,如图 9(b)所示,提出必须根据沙姆原理将探测器表面倾斜相应的角度减小像面倾斜的影响,从而保证 DMD 平面与探测器平面具有物象共轭关系^[79]。2021 年,长春理工大学的赵雨时提出了一种用双 DMD Offner 系统消除 DMD 像面倾斜的方法^[80],使用一个空间维 DMD 完美地补偿了光谱维编码中红外光谱成像系统引入 DMD 时像面倾斜的问题,如图 9(c)所示。2022 年,中国科学院西安光

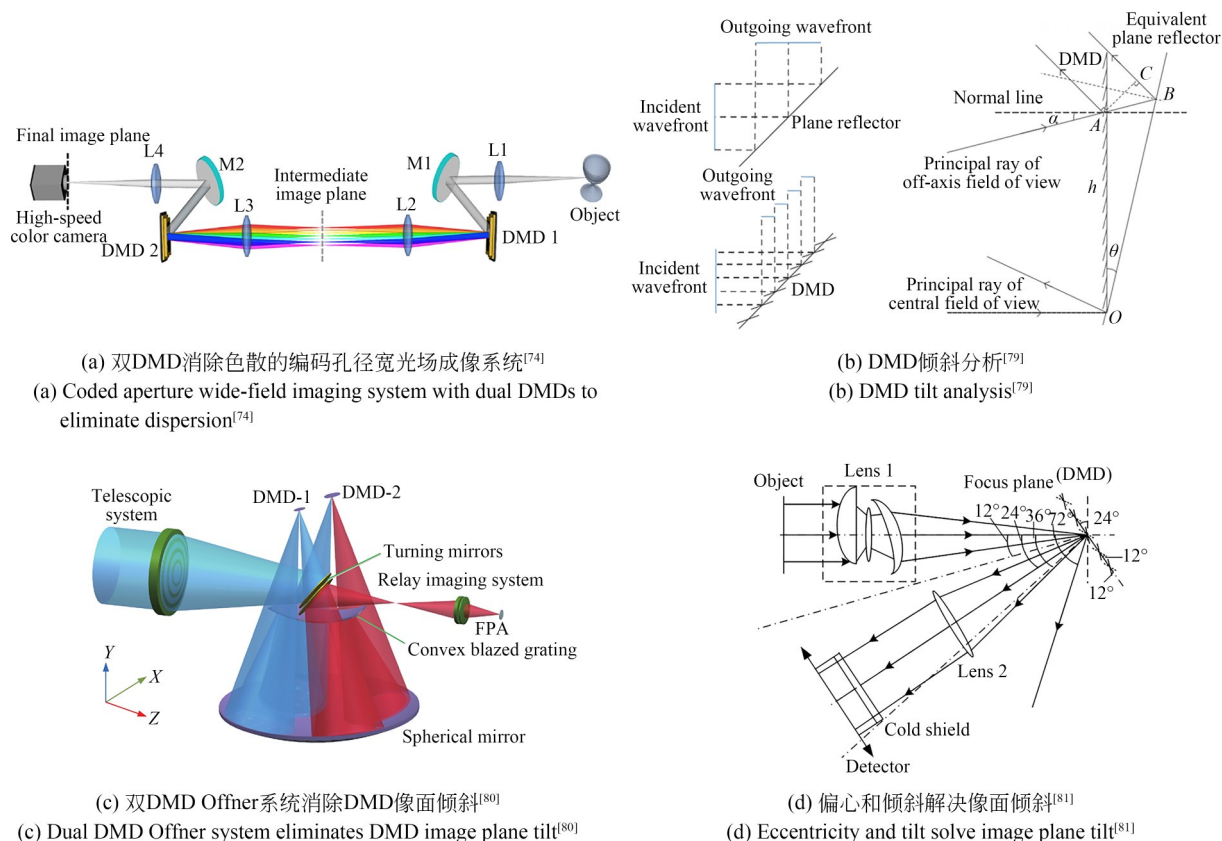


图9 DMD像差修正方法

Fig. 9 DMD aberration correction methods

机所的杨莹提出在光学系统设计时通过镜片的偏心和倾斜使成像像面与DMD表面匹配,如图9(d)所示,解决了在Hadamard编码红外光谱成像系统中DMD像面倾斜的问题^[81]。

总的来说,为解决DMD像面倾斜的问题,需要通过光学系统设计合理地解决该问题。

5 总结与展望

本文详细介绍了基于DMD的编码孔径和推扫式光谱成像技术的工作原理和发展进程,重点介绍了DMD在不同系统中扮演的主要角色。DMD作为一种反射式空间光调制器,其具备的像素级控光能力,既能够获得灵活的编码调制模板,也可以构建快速推扫模式,能够代替传统光谱成像领域中的机械式掩膜版和机械狭缝,推动光谱成像系统的发展。除此之外,本文还针对DMD自身结构带来的对光谱成像造成负面影响的两个关键性问题:衍射和像面倾斜,总结了这些问题的普适性解决办法,有助于研究人员在使用DMD的光谱成像领域乃至其他相关应用领域改善成像质量、提升光学系统性能。综上所述,基于DMD的光谱成像技术具有灵活可调制的特点,已经发展出多种面向不同应用场景的光谱成像系统。历经数十年,DMD在光谱成像及其他领域依然具有广阔的应用前景和发展潜力。

5.1 光学系统优化

由于DMD本身存在衍射和像面倾斜问题,这可能会严重影响光谱成像质量。虽然DMD作为一种成熟的微光机电系统已经得到了广泛的应用,但在诸如ZEMAX,Lighttools及Code V等光学设计软件中,难以对DMD的衍射效果和像面倾斜问题进行有效的模拟和分析,这不利于光学系统设计。如果能够在仿真过程中轻松地获得DMD的衍射和像面倾斜,通过采用合理的光学系统设计方案,在设计阶段就能解决衍射和像面倾斜问题,那么研究人员在系统构建和成像调试方面的效率将大大提高。

5.2 实时成像和数据处理

提高光谱成像系统的数据采集和处理效率以实现实时成像是一个重要的研究方向。基于DMD的推扫式光谱成像系统具备高的空间分辨率和光谱分辨率,但采集时间长且效率低。而基

于DMD的编码孔径光谱成像系统则具备高采集效率,但需要较长的图像后处理时间,空间分辨率和光谱分辨率较低。虽然采集效率和空间、光谱分辨率之间存在不可忽视的权衡关系,但在尽量短的时间内获得尽量高的空间和光谱分辨率是一个值得研究的问题。

为了提高推扫式光谱成像系统的采集效率,可以引入并行扫描等多路复用扫描方式。在基于DMD的编码孔径光谱成像中,增加编码次数获得多张编码图像可以提高系统的空间和光谱分辨率。此外,结合深度学习创建智能解码和图像重构算法,可以提升数据处理效率。同时,在光谱数据立方体中存在许多的冗余信息,通过对目标光谱的选择性处理和自适应成像来缩减数据量,也可以大大提高系统的采集和处理效率。

5.3 多模态成像

DMD具有高度的灵活性和可编程性,同时还具有双光路的特性,可以结合其他成像技术实现多模态成像。将基于DMD的光谱成像与光学相干成像相结合,可以实现同时获取目标结构和光谱信息的多模态成像。将DMD的光谱成像与偏振成像相结合,可以同时获得目标的偏振信息和光谱信息,为材料表征和生物医学等领域提供更全面的信息。此外,基于DMD的光谱成像还可与荧光成像、超分辨率成像等技术相结合,从不同角度提供更丰富的图像信息,进一步拓展多模态成像的应用领域。

5.4 小型化和集成化

随着微纳技术的进步,研究人员正致力于将DMD芯片进一步微型化,以适应便携设备和微型系统的需求。这意味着更小尺寸的DMD芯片可以在手机、智能眼镜和其他便携设备中嵌入,实现实时高速光谱成像。集成化是一个重要的发展方向。将DMD与其他相关技术,如微型镜头、微型分光元器件、微型图像传感器等进行集成,以实现更全面和多功能的光谱成像系统。这种集成化的方法可以提高系统的性能和效率,同时减少设备的体积和功耗。DMD技术的小型化和集成化还为微型系统的应用提供了更广阔的空间。如在医疗领域,DMD的小型化和集成化可以用于无创光谱成像,以帮助医生进行疾病诊断和监测。

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] GREEN R O, EASTWOOD M L, SARTURE C M, *et al.* Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65 (3): 227-248.
- [3] BASEDOW R W, CARMER D C, ANDERSON M E. HYDICE system: implementation and performance [C]. *SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics. Proc SPIE* 2480, *Imaging Spectrometry, Orlando, FL, USA*. 1995, 2480: 258-267.
- [4] FORD B K, DESCOUR M R, LYNCH R M. Large-image-format computed tomography imaging spectrometer for fluorescence microscopy [J]. *Optics Express*, 2001, 9(9): 444-453.
- [5] BEST F A, REVERCOMB H E, TOBIN D C, *et al.* Performance verification of the Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS) on-board blackbody calibration system [C]. *Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques, and Applications, SPIE Proceedings. Goa, India*. SPIE, 2006, 6405: 64050I.
- [6] DOUGLASS M. DMD reliability: a MEMS success story [C]. *SPIE Proceedings, Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS II. San Jose, CA*. SPIE, 2003, 498: 1-11.
- [7] 周子逸, 董贤子, 郑美玲. 数字微镜无掩模光刻技术进展及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59 (9): 0922030.
ZHOU Z Y, DONG X Z, ZHENG M L. Evolution and application of digital micromirror device based maskless photolithography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922030. (in Chinese)
- [8] 陆锦洪, 谢向生, 张培晴, 等. 基于数字微镜器件亚微米制备技术研究 [J]. *光子学报*, 2010, 39(4): 600-604.
LU J H, XIE X S, ZHANG P Q, *et al.* Submicron-sized optical fabrication with DMD based lithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(4): 600-604. (in Chinese)
- [9] MILLS B, FEINAEUGLE M, SONES C L, *et al.* Sub-micron-scale femtosecond laser ablation using a digital micromirror device [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(3): 035005.
- [10] CHENG J Y, GU C L, ZHANG D P, *et al.* High-speed femtosecond laser beam shaping based on binary holography using a digital micromirror device [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4875-4878.
- [11] REN Y X, LU R D, GONG L. Tailoring light with a digital micromirror device [J]. *Annalen Der Physik*, 2015, 527(7/8): 447-470.
- [12] SCHOLLES S, KARA R, PINNELL J, *et al.* Structured light with digital micromirror devices: a guide to best practice [J]. *Optical Engineering*, 2019, 59(4): 041202.
- [13] ZHU L, CAO Z Z, FU S N, *et al.* Double-light-path multiplexing enabled light shaping efficiency enhancement for digital micromirror device [C]. *Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC). Beijing. Washington, D. C.: Optica Publishing Group*, 2020.
- [14] GENG Q, GU C L, CHENG J Y, *et al.* Digital micromirror device-based two-photon microscopy for three-dimensional and random-access imaging [J]. *Optica*, 2017, 4(6): 674.
- [15] CHLIPALA M, KOZACKI T. Color reconstructions of real objects in DMD holographic display with LED illumination [C]. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019. Bordeaux. Washington, D. C.: OSA*, 2019.
- [16] 张一, 余卿, 张昆, 等. 基于数字微镜器件的并行彩色共聚焦测量系统 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 859-866.
ZHANG Y, YU Q, ZHANG K, *et al.* Parallel chromatic confocal measurement system based on digital micromirror device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 859-866. (in Chinese)
- [17] 余卿, 叶瑞芳, 范伟. 基于数字微镜器件实现共焦测量的结构光参数 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1272-1278.
YU Q, YE R F, FAN W. Parameters of structured lights of DMD used in confocal measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1272-1278. (in Chinese)
- [18] ARABLOUEI R, GOAN E, GENSEMER S, *et*

- al. Fast and robust pushbroom hyperspectral imaging via DMD-based scanning [C]. *SPIE Proceedings, Novel Optical Systems Design and Optimization XIX*. San Diego, California, USA. SPIE, 2016, 9948.
- [19] 张昊. 基于DMD的编码孔径成像光谱仪关键技术研究[D]. 上海:中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2016.
- ZHANG H. *Research on Key Technologies of Coded Aperture Imaging Spectrometer Based on DMD* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [20] TEXAS INSTRUMENTS. Application report DLPA022 [EB/OL]. (2010-07) [2022-08-15]. <https://www.ti.com/lit/an/dlpa022/dlpa022.pdf>.
- [21] BANSAL V, SAGGAU P. Digital micromirror devices: principles and applications in imaging[J]. *Cold Spring Harbor Protocols*, 2013, 2013(5): 404-411.
- [22] 姚雪峰, 高毅, 龙兵, 等. 数字微镜器件(DMD)杂散光特性测试方法及装置[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 339-347.
- YAO X F, GAO Y, LONG B, *et al.* Method and device for testing stray light characteristics of Digital Micro-mirror Device (DMD) [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 339-347. (in Chinese)
- [23] TEXAS INSTRUMENTS. DLP [EB/OL]. (2022-09-28) [2022-09-28]. <https://www.ti.com.cn/zh-cn/dlp-chip/overview.html>.
- [24] TEXAS INSTRUMENTS. Wavelength Transmissivity Considerations for DLP DMD Windows [EB/OL]. (2014-12-10) [2022-09-28]. <https://www.ti.com/cn/lit/pdf/ZHCA625C>.
- [25] WAGNER E P II, SMITH B W, MADDEN S, *et al.* Construction and evaluation of a visible spectrometer using digital micromirror spatial light modulation[J]. *Applied Spectroscopy*, 1995, 49(11): 1715-1719.
- [26] DEVERSE R A, HAMMAKER R M, FATELEY W G. Realization of the hadamard multiplex advantage using a programmable optical mask in a dispersive flat-field near-infrared spectrometer[J]. *Applied Spectroscopy*, 2000, 54(12): 1751-1758.
- [27] ROBERT M H, RICHARD A D, DANIEL J A, *et al.* *Handbook of vibrational spectroscopy* [M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2006: 1-8.
- [28] 郭媛君. 基于DMD的微小型近红外光谱仪光谱信息处理及其应用软件[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- GUO Y J. *Spectral Information Processing of Miniature Near Infrared Spectrometer Based on DMD and its Application Software* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [29] 莫祥霞. 基于DMD的微小型近红外光谱仪系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- MO X X. *Research on Miniature Near Infrared Spectrometer System Based on DMD* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [30] 党博石, 刘华, 王晓朵, 等. 新型阿达玛变换光谱仪[J]. *光子学报*, 2013, 42(8): 902-907.
- DANG B SH, LIU H, WANG X D, *et al.* A new kind of hadamard transform spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(8): 902-907. (in Chinese)
- [31] 王晓朵. 基于DMD的哈达玛变换近红外光谱仪的研究[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), 2016.
- WANG X D. *Study on Hadamard Transform Near Infrared Spectrometer Based on DMD* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [32] 许家林. 基于DMD的阿达玛变换近红外光谱仪关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- XU J L. *Research on Key Technologies of Hadamard Transform Near Infrared Spectrometer Based on DMD* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [33] 王莹, 刘华, 李金环, 等. 基于DMD的近红外光谱仪的研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 422-430.
- WANG Y, LIU H, LI J H, *et al.* Research on near-infrared spectrometer based on DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 422-430. (in Chinese)
- [34] KEARNEY K J, NINKOV Z. Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy [C]. *Optoelectronics and High-Power Lasers and Applications. Proc SPIE 3292, Spatial Light Modulators*, San Jose, CA, USA. 1998, 3292: 81-92.

- [35] DEVERSE R A, HAMMAKER R M, FATELEY W G. Hadamard transform Raman imagery with a digital micro-mirror array [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 1999, 19(2): 177-186.
- [36] FATELEY W G, HAMMAKER R M, DEVERSE R A. Modulations used to transmit information in spectrometry and imaging [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2000, 550/551: 117-122.
- [37] KEARNEY K, CORIO M A, NINKOV Z. Imaging spectroscopy with digital micromirrors [C]. *Proceeding of SPIE*, 2000, 3965: 11-21.
- [38] WEHLBURG C M, WEHLBURG J C, GENTRY S M, *et al.* Optimization and characterization of an imaging Hadamard spectrometer [C]. *Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. Proc SPIE 4381, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VII, Orlando, FL, USA*. 2001, 4381: 506-515.
- [39] SMITH M W, SMITH J L, TORRINGTON G K, *et al.* Theoretical description and numerical simulations of a simplified Hadamard transform imaging spectrometer [C]. *International Symposium on Optical Science and Technology. Proc SPIE 4816, Imaging Spectrometry VIII, Seattle, WA, USA*. 2002, 4816: 372-380.
- [40] FATELEY W, HAMMAKER R M, DEVERSE R A, *et al.* The other spectroscopy: demonstration of a new de-dispersion imaging spectrograph [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2002, 29 (1/2): 163-170.
- [41] CHRISTENSEN M P, EULISS G W, MCFADDEN M J, *et al.* ACTIVE-EYES: an adaptive pixel-by-pixel image-segmentation sensor architecture for high-dynamic-range hyperspectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(29): 6093.
- [42] VUJKOVIC-CVIJIN P, GOLDSTEIN N, FOX M J, *et al.* Adaptive spectral imager for space-based sensing [C]. *SPIE Proceedings, Infrared Technology and Applications XXXII. Orlando (Kissimmee), FL*. SPIE, 2006, 6206: 62060X.
- [43] GOLDSTEIN N, VUJKOVIC-CVIJIN P, FOX M, *et al.* DMD-based adaptive spectral imagers for hyperspectral imagery and direct detection of spectral signatures [C]. *SPIE Proceedings, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications. San Jose, CA*. SPIE, 2009, 7210: 721008.
- [44] GOLDSTEIN N, FOX M, ADLER-GOLDEN S, *et al.* Infrared adaptive spectral imagers for direct detection of spectral signatures and hyperspectral imagery [C]. *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications V, SPIE Proceedings. San Francisco, California, USA*. SPIE, 2013, 8618.
- [45] GOLDSTEIN N, PETER BST, GROT J, *et al.* Portable, stand-off spectral imaging camera for detection of effluents and residues [C]. *Next-Generation Spectroscopic Technologies VIII, SPIE Proceedings. Baltimore, Maryland, USA*. SPIE, 2015, 9482: 94820X.
- [46] 孙鑫. 可见光多通道目标探测技术研究 [D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2011.
- SUN X. *Research on Visible Multi-channel Target Detection Technology* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [47] SUN X, HU B L, LI L B. An engineering prototype of Hadamard transform spectral imager based on Digital Micro-mirror Device [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 210-217.
- [48] LOVE S P. Programmable matched filter and Hadamard transform hyperspectral imagers based on micromirror arrays [C]. *SPIE Proceedings, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications. San Jose, CA*. SPIE, 2009, 7210.
- [49] LOVE S P, GRAFF D L. Full-frame programmable spectral filters based on micromirror arrays [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(1): 011108.
- [50] GRAFF D L, LOVE S P. Adaptive hyperspectral imaging with a MEMS-based full-frame programmable spectral filter [C]. *SPIE Proceedings, Next-Generation Spectroscopic Technologies VII. Baltimore, Maryland, USA*. SPIE, 2014, 9101: 910111.
- [51] GRAFF D L, LOVE S P. Toward real-time spectral imaging for chemical detection with a digital micromirror device-based programmable spectral filter [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2013, 13(1): 011111.
- [52] TAKHAR D, LASKA J N, WAKIN M B, *et al.* A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression [C]. *Proc SPIE*

- 6065, *Computational Imaging IV*, 2006, 6065: 43-52.
- [53] DUARTE M F, DAVENPORT M A, TAKHAR D, *et al.* Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83-91.
- [54] LAM CHAN W, CHARAN K, TAKHAR D, *et al.* A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105.
- [55] WU Y H, MIRZA I O, ARCE G R, *et al.* Demonstration of a DMD-based compressive sensing (CS) spectral imaging system[C]. *CLEO: 2011 - Laser Applications to Photonic Applications*. Baltimore, Maryland. Washington, D. C.: OSA, 2011.
- [56] WU Y H, MIRZA I O, ARCE G R, *et al.* Development of a digital-micromirror-device-based multi-shot snapshot spectral imaging system [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2692-2694.
- [57] WU Y H, MIRZA I O, YE P, *et al.* Development of a DMD-based compressive sampling hyperspectral imaging (CS-HSI) system[C]. *SPIE Proceedings, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications III*. San Francisco, California. SPIE, 2011, 7932: 79320I.
- [58] LIN X, WETZSTEIN G, LIU Y B, *et al.* Dual-coded compressive hyperspectral imaging [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2044-2047.
- [59] XU C, XU T F, YAN G, *et al.* Super-resolution compressive spectral imaging via two-tone adaptive coding: publisher's note [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 892.
- [60] ZHOU J J, YANG Y, LI L, *et al.* Developing, integrating and validating a compressive hyperspectral video imager[C]. *Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XX-IX*. April 27-May 8, 2020. Online Only, USA. SPIE, 2020, 11423: 114230V.
- [61] 马翠. 基于数字微镜的编码成像光谱仪的研究 [D]. 深圳: 中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院), 2018.
- MA C. *Research on Coded Imaging Spectrometer Based on Digital Micromirror* [D]. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [62] WUTTIG A, RIESENBERG R. Sensitive Hadamard transform imaging spectrometer with a simple MEMS[C]. *SPIE Proceedings, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI*. Crete, Greece. SPIE, 2003, 4881.
- [63] BEDNARKIEWICZ A, WHELAN M P. Microscopic fluorescence lifetime and hyperspectral imaging with digital micromirror illuminator[C]. *Confocal, Multiphoton, and Nonlinear Microscopic Imaging III*. Munich, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2007, 6630.
- [64] HSU Y J, CHEN C C, HUANG C H, *et al.* Line-scanning hyperspectral imaging based on structured illumination optical sectioning [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(6): 3005-3016.
- [65] DONG X, XIAO X C, PAN Y N, *et al.* DMD-based hyperspectral imaging system with tunable spatial and spectral resolution [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16995-17006.
- [66] DONG X, TONG G, SONG X K, *et al.* DMD-based hyperspectral microscopy with flexible multi-line parallel scanning [J]. *Microsystems & Nanoeengineering*, 2021, 7: 68.
- [67] QI Y, HENG L Z, LI L, *et al.* Hadamard transform-based hyperspectral imaging using a single-pixel detector [J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16126.
- [68] BARNARD K J, BOREMAN G D, PAPE D R. Crosstalk model of a deformable-mirror-based infrared scene projector [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(1): 140-149.
- [69] MEURET Y, DE VISSCHERE P. Contrast-improving methods for digital micromirror device projectors [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(3): 840-845.
- [70] RENTZ DUPUIS J, MANSUR D J. Considerations for DMDs operating in the infrared [C]. *SPIE Proceedings, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications IV*. San Francisco, California, USA. SPIE, 2012.
- [71] 陈笑, 颜纷纷, 宋菲君, 等. DMD光栅的衍射特性及其在可调谐激光中的应用 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0705003.
- CHEN X, YAN F F, SONG F J, *et al.* Diffractive properties of DMD gratings and its new application in tunable fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0705003. (in Chinese)
- [72] XIONG Z, LIU H, LU Z W. Diffraction analysis

- of digital micromirror device at coherent illumination [C]. 2013 *CIOMP-OSA Summer Session on Optical Engineering, Design and Manufacturing*. Changchun. Washington, D. C.: OSA, 2013.
- [73] XIONG Z, LIU H, TAN X Q, *et al.* Diffraction analysis of digital micromirror device in maskless photolithography system [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(4): 043016.
- [74] HAN Q, ZHANG J Z, WANG J, *et al.* Diffraction analysis for DMD-based scene projectors in the long-wave infrared [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 8016-8021.
- [75] DONG X, SHI Y C, XIAO X C, *et al.* Non-paraxial diffraction analysis for developing DMD-based optical systems [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(18): 4758-4761.
- [76] LIU J D, ZAOUTER C, LIU X L, *et al.* Coded-aperture broadband light field imaging using digital micromirror devices [C]. *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XIII*. March 6-12, 2021. Online Only, USA. SPIE, 2021.
- [77] 张卫平, 何小荣. 光栅的汇合光谱特性与双光栅成像效应 [J]. *中国科学 G 辑*, 2006, 36(5): 556-560.
- ZHANG W P, HE X R. Confluence spectral characteristics of gratings and imaging effect of double gratings [J]. *Science in China (Series G)*, 2006, 36(5): 556-560. (in Chinese)
- [78] 武鑫. 基于 DMD 的自适应分类光谱成像技术光学系统设计研究 [D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- WU X. *Research on Optical System Design of Adaptive Classified Spectral Imaging Technology Based on DMD* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [79] 王月旗. 基于 DMD 的编码孔径光谱成像光学系统设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- WANG Y Q. *Design of Coded Aperture Spectral Imaging Optical System Based on DMD* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [80] 赵雨时, 贺文俊, 刘智颖, 等. 光谱维编码中红外光谱成像系统的光学设计 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 3788/IRLA20210700.
- ZHAO Y SH, HE W J, LIU ZH Y, *et al.* Optical design of infrared spectral imaging system in spectral dimension coding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 3788/IRLA20210700. (in Chinese)
- [81] 杨莹, 胡炳樑, 李立波, 等. Hadamard 编码红外光谱成像系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(6): 641-650.
- YANG Y, HU B L, LI L B, *et al.* Design of MWIR hadamard coded imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(6): 641-650. (in Chinese)

作者简介:



石颖超(1999—),男,河南汝州人,博士研究生,2021年于西北工业大学获得学士学位,主要从事多光谱、高光谱成像系统及应用方面的研究。E-mail: shi_yingchao@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者:



虞益挺(1980—),男,浙江宁波人,博士,教授,博士生导师,2003年、2006年、2010年于西北工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事微纳光学成像与传感技术的研究。E-mail: yyt@nwpu.edu.cn