

# 数字微镜器件在光电设备中的应用

徐正平

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 鉴于数字微镜器件(DMD)良好的空间光调制性能,对其在光电设备中的应用及关键技术进行了深入研究。在分析DMD在数字投影系统中所能实现的最大帧频与系统结构形式、灰度级及DMD类型的关系基础上,给出了多DMD串联实现高灰度级的方案。探讨了利用DMD空间调制特性增强系统性能的具体实现方式,包括高动态范围成像、像素内目标特征检测、探测器像元几何超分辨、压缩感知及成像光谱仪等,并给出了应用过程中涉及的关键技术,如高动态范围成像中各像元曝光时间的确定、DMD微镜与探测器像元之间的几何配准、运动平台条件下探测器和目标之间相对运动以及DMD微镜填充率对系统性能的影响。各微镜角度可灵活控制、存储单元更新频率更高的DMD应用于可编程成像系统将是未来的发展方向。

**关键词** 成像系统;光电设备;数字微镜器件;空间调制;频谱调制

中图分类号 TN141 文献标识码 A doi: 10.3788.LOP51.051103

## Application of Digital Micromirror Device in Photoelectric Equipment

Xu Zhengping

*Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** Considering the super spatial-light-modulation feature, the application and related technologies of digital micromirror device (DMD) in photoelectric equipments are analyzed in detail. Based on analyzing the relationship between maximum frame frequency that could be realized, systemic architecture, gray-scale level and the type of DMD, the project with several DMDs in series to achieve high gray-scale level is given. The realizations of DMD's spatial modulation feature used to enhance system performance are discussed. DMD can be used for high dynamic range imaging, intra-pixel target feature detection, superresolution of detector pixel, compressive sensing and imaging spectrometer. Also, the key technologies in the application are given, including time of exposure determination for every pixel in high dynamic range imaging, geometrical alignment between micromirror in DMD and detector pixel, relative motion between target and detector on motorial platform and the effect of DMD micromirror fill factor on system performance. The programming imaging system with DMD, which allows greater control over the orientations of individual mirrors and has higher updating frequency of memory, is regarded as the new trend.

**Key words** imaging systems; photoelectric equipment; digital micromirror device; spatial modulation; spectral modulation

**OCIS codes** 110.1758; 110.3010; 110.4234; 120.0280

## 1 引言

数字微镜器件(DMD)原型是20世纪70年代由美国TI公司发明的,当时称之为可变形镜器件,到20世纪80年代发展为DMD<sup>[1]</sup>。DMD中各微镜可单个寻址,由其对应的CMOS存储单元中的数据决定其状态:“开态”和“关态”。根据系统设计,可使微镜处于“开态”时,入射光线进入后续光学系统;微镜处于“关态”

收稿日期: 2013-11-26; 收到修改稿日期: 2013-12-24; 网络出版日期: 2014-04-15

基金项目: 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放基金(Y2HC1SR12B)、吉林省科技发展计划项目(20140520114JH)

作者简介: 徐正平(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事计算成像及航空传感器电子学设计等方面的研究。

E-mail: xuzp090@163.com

时,入射光线被吸收装置吸收,从而实现对光线的辐射调制或空间调制。相比于LCD,DMD效率、速度、精度及频带宽度等性能指标大大提升,其最初主要应用于数字投影系统,因其良好的光辐射和空间调制性能而在成像系统中获得了广泛应用,包括高动态范围成像、像素内目标特征检测、几何超分辨率成像、压缩感知及成像光谱仪等,本文对其在各个领域的应用及需要解决的关键技术进行了详细说明。

## 2 DMD在光电设备中的应用

### 2.1 数字投影系统

数字投影系统主要包括视频显示系统、平视显示器及目标场景模拟器<sup>[2-4]</sup>等,其工作原理相同,以彩色视频显示系统为例进行详细说明。根据实现方式分类,彩色视频显示系统可分为单DMD投影系统<sup>[5]</sup>、双DMD投影系统及三DMD投影系统。单DMD投影系统可采用色轮或时分复用等方法实现。单DMD彩色投影系统中,在一个视频帧周期内,R、G、B光只有三分之一时间照射在DMD上,光能利用率低。三DMD投影系统中包含三个DMD,每个DMD对应一颜色分量,光能利用率更高。而双DMD投影系统则融合了单DMD投影系统色轮和三DMD棱镜分光的概念,相比于单DMD投影系统,光能利用率更高,且色彩更加逼真。考虑到存储单元数据加载、微镜翻转以及保持稳定性,在采用脉宽调制(PWM)进行灰度控制时,上述动作必须在最小的“位时间”范围内完成。采用XGA DMD和1080p DMD时,系统能够实现的最大帧频 $f_{\max}$ 和灰度级位数 $N$ 需满足以下关系式<sup>[6]</sup>:

$$\frac{1}{m \cdot f \cdot 2^N} > 43.22 \times 10^{-6} \quad (\text{XGA DMD}), \quad (1)$$

$$\frac{1}{m \cdot f \cdot 2^N} > 55.7 \times 10^{-6} \quad (\text{1080p DMD}), \quad (2)$$

(1)式、(2)式中, $m$ 是与系统方案相关的常数,在单DMD、双DMD和三DMD投影系统中, $m$ 取值分别为3、2和1。

三DMD彩色投影系统灰度级与视频最大帧频关系曲线如图1所示。

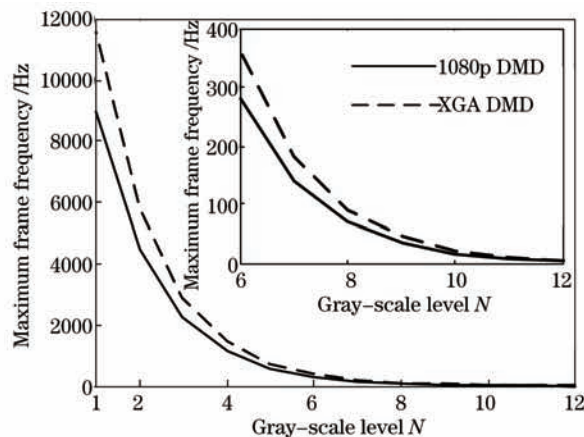


图1 三DMD彩色投影系统灰度级与视频最大帧频关系曲线

Fig.1 Relationship between gray-scale level and maximum frame frequency of three DMDs color projection system

由图1可知:受数据传输速度和DMD像元数目的限制,系统所能实现的最大帧频与灰度级相互制约,实际应用过程中需根据系统要求选择方案及技术指标。

为在现有技术方案的基础上提高视频灰度等级,相关研究人员采用多个DMD形成串联光开关<sup>[7]</sup>,以红外目标模拟器为例,其系统方案原理框图如图2所示。

图2中,灰度轮被划分为多个透射率等级,以6级为例,其透射率分别为1/2、1/4、1/8、1/16、1/32及1/64。该方案为系统形成3种可选光通道:低温光通道、高温光通道及受调制高温光通道。双DMD中微镜状态组合决定选择何种光通道:当DMD2中微镜处于“关态”时,选择低温光通道;当DMD1、DMD2中微镜均处于“开态”时,选择高温光通道;当DMD2中微镜处于“开态”、DMD1中微镜处于“关态”时,选择受调制高温光通道。设高温黑体辐射亮度为 $L$ 、低温黑体辐射亮度为0,DMD1、DMD2的调制灰度级均为8位256级,将帧

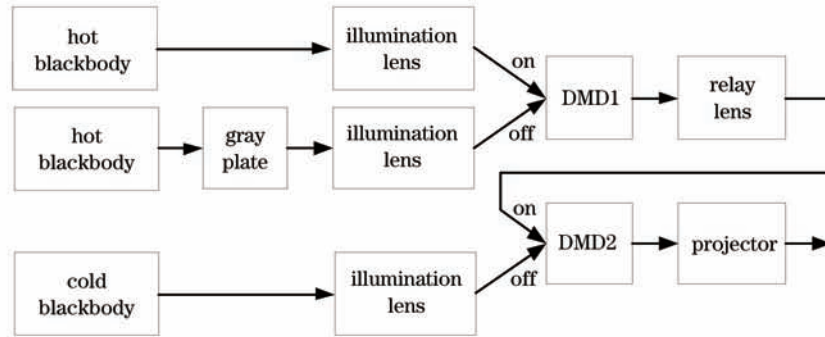


图2 多DMD串联光开关方案原理框图

Fig.2 Principle block diagram of projection with several DMDs in series

周期均分为255个调制周期。 $b_5 \sim b_0$ 分别为灰度轮处于透射率为1/2、1/4、1/8、1/16、1/32及1/64时,选通受调制高温光通道的调制周期数,取值只能为0或1。 $A$ 为选通高温光通道的调制周期数,最大值为255,最终出射的辐亮度 $L_n$ 可以表示为

$$L_n = \frac{1}{2^8} \left[ A \cdot L + \sum_{j=0}^5 \left( b_j \cdot \frac{L}{2^{6-j}} \right) \right] = \frac{1}{2^8} \left[ \sum_{i=0}^7 (a_i \cdot 2^i \cdot L) + \sum_{j=0}^5 \left( b_j \cdot \frac{L}{2^{6-j}} \right) \right]. \quad (3)$$

对(3)式进行整理,结果如下:

$$L_n = \frac{L}{2^{14}} \left[ \sum_{i=6}^{13} (a_{i-6} \cdot 2^i) + \sum_{j=0}^5 (b_j \cdot 2^j) \right], \quad (4)$$

定义 $b_j = a_{j-6}$  ( $j=6 \sim 13$ ), (4)式可以变换为

$$L_n = \frac{L}{2^{14}} \sum_{j=0}^{13} (b_j \cdot 2^j), \quad (5)$$

由(5)式可知,系统可以实现14位的动态范围。但受255个总调制周期数限制, $A$ 与 $b_5 \sim b_0$ 之和不能大于255,因此,某些灰度级是无法实现的。因此,利用该方法,能够近似实现14位灰度级,但系统的电子学处理比较复杂,需根据需要,实时判断当前灰度轮位置,在合适时候将光通道切换至受调制高温光通道。

## 2.2 高动态范围成像

实现高动态范围成像(HDRI)<sup>[8-11]</sup>的方法主要有以下几种:1)获取同一场景多幅不同曝光时间的图像,经算法融合获取高动态范围成像;2)同一图像中各像素曝光时间不同,如Nayar等在探测器前增加掩模板,模板内各元素具有不同的透射率;Mannami等和Adeyemi等分别采用液晶和DMD作为空间光调制元件,对目标进行空间调制。目前高动态范围相机已有商用产品,如ViperFilmStream, SMal, Pixim和SpheronVR以及Fujifilm公司生产出“定点-曝光”模式相机。Pixim公司<sup>[12]</sup>采用各像素曝光时间单独控制获取的图片如图3所示。

在利用DMD进行空间调制时,首先获取目标场景的预测图像,依据预测图像对目标区域按照平均灰度



图3 Pixim公司各像素点曝光时间不同以实现HDRI。(a)常规图像;(b)HDRI

Fig.3 HDRI from Pixim corporation with pixels with different exposal time. (a) Conventional image; (b) HDRI

进行分区,根据各区场景亮度确定调制图像,以确定探测器各个像素点的曝光时间。若DMD空间调制图像为8位、探测器输出数据为8位,则整个成像系统的动态范围为16位。在图像文件中,除保存各图像的灰度值外,还需保存其对应的曝光时间当量。

采用DMD进行空间调制的关键问题是DMD中各微镜和探测器像元的几何对准问题。可采用均匀光照射DMD,并采用二值网格校正图案作为DMD输入,探测器采集图像,比较探测器输出图像各像元之间像素值以及与校正图像之间的关系以判断配准精度,图例<sup>[13]</sup>如图4所示。

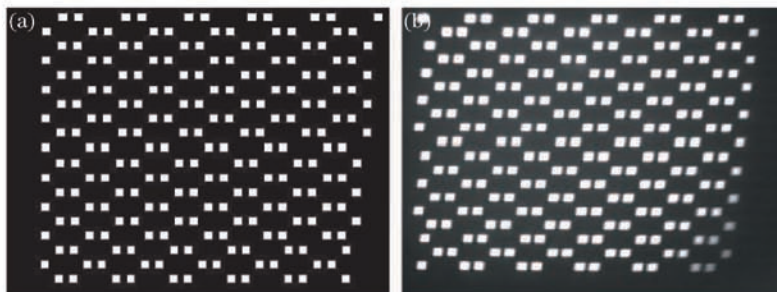


图4 DMD微镜与探测器像元几何对准图例。(a) DMD输入图像;(b)探测器采集图像

Fig.4 Example of geometrical alignment between mirror in DMD and pixel in detector. (a) Input image to DMD; (b) image sampled from detector

图4(a)为给DMD施加的调制图像,图4(b)为在该调制图像作用下探测器所采集到的图像。如图4(b)所示,探测器采集图像存在变形,主要原因是相对于探测器成像光学系统光轴,DMD所处像面存在一定角度。为使DMD所处像面的图像在探测器上形成聚焦图像,需将探测器倾斜一定角度。该图像变形可通过校准来消除。

### 2.3 像素内目标特征检测

在常规图像处理中,目标的特征检测算法均是基于像素级,而基于DMD空间光调制可实现像素内的目标特征检测<sup>[13]</sup>。以Sobel算子为例,由于调制图像不能为负值,对Sobel算子进行变换,形式如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A - B, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} = C - D. \quad (7)$$

分别以矩阵A、B、C、D为基础生成四幅调制图像,同时设计光学系统保证DMD中3×3个微镜对应探测器一个像元,以矩阵A、B为例,两者关系示意图如图5所示。

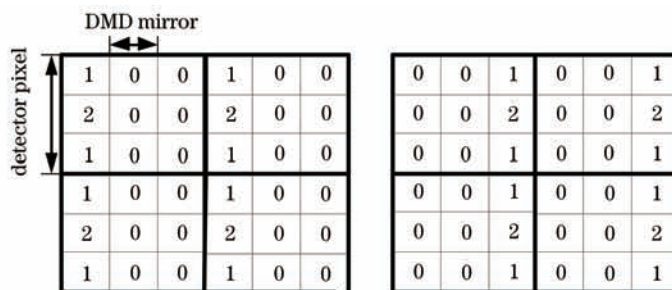


图5 实现像素内Sobel算子时DMD微镜与探测器像元关系图

Fig.5 Relationship between mirror in DMD and pixel in detector when realizing intra-pixel Sobel operator

由图5可知,DMD中微镜的空间分辨率为探测器像元空间分辨率的3倍。将矩阵A、B、C、D生成的空间调制模板顺次应用于成像系统,得到目标的4幅图像。取A与B、C与D对应生成的两幅图像差值即得到目标图像经水平、垂直Sobel变换后的结果,最终可得到目标边缘信息,如图6所示。

可以看出:Sobel算子对应的空间调制模板作用在探测器一个像元内,从而实现像素内目标特征提取。光学调制可实现光学域的乘法运算,后续处理只需进行简单的加法运算,利用该方法同样可以实现目标识别。

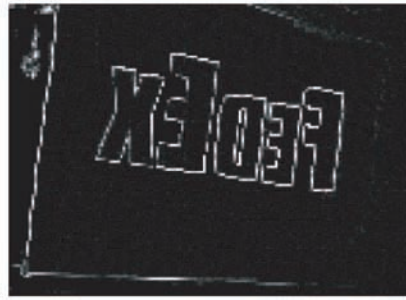


图6 像素内目标特征检测结果

Fig.6 Result of intra-pixel target feature detection

## 2.4 几何超分辨成像

为解决探测器几何超分辨问题,相关研究人员提出了异形像元<sup>[14-15]</sup>,实验验证该方法可有效提高探测器像元分辨率,但因其涉及半导体材料、半导体工艺等,成本高、灵活性不强,当需要改变像元形状时,又需重新制造,增加了设备研制周期和费用。利用DMD的空间调制特性,可在系统焦平面上产生等效异形像元,改变DMD空间调制编码可实现不同的等效异形像元,便于工程实施。

以2倍超分辨为例进行说明。与像素内目标特征检测实现方法类似,设计光学系统,保证DMD中 $2 \times 2$ 个微镜对应探测器的一个像元,空间调制模板及对应的等效异形像元如图7所示。

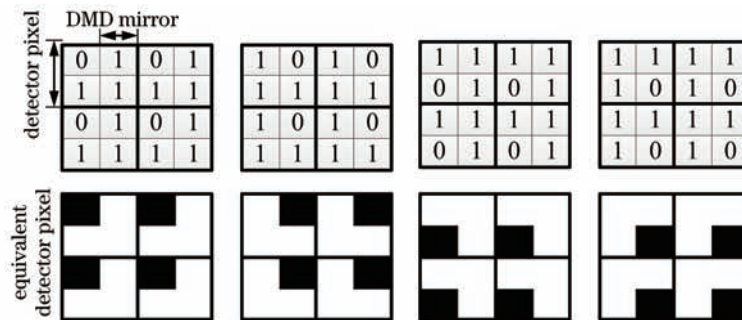


图7 探测器几何超分辨DMD微镜与探测器像元关系及对应等效异形像元

Fig.7 Relationship between mirror in DMD and pixel in detector and corresponding equivalent novel pixel for geometrical superresolution

将图7所示编码模板依次送入DMD,可得到同一场景在不同空间编码下的图像。将探测器像元划分为4个子像元,探测器像元灰度值可用4个子像元灰度值表示。由于已获取同一场景四幅图像,各子像元灰度值可通过四次获取的像元灰度值求解得到。利用该方法得到的仿真图像如图8所示。

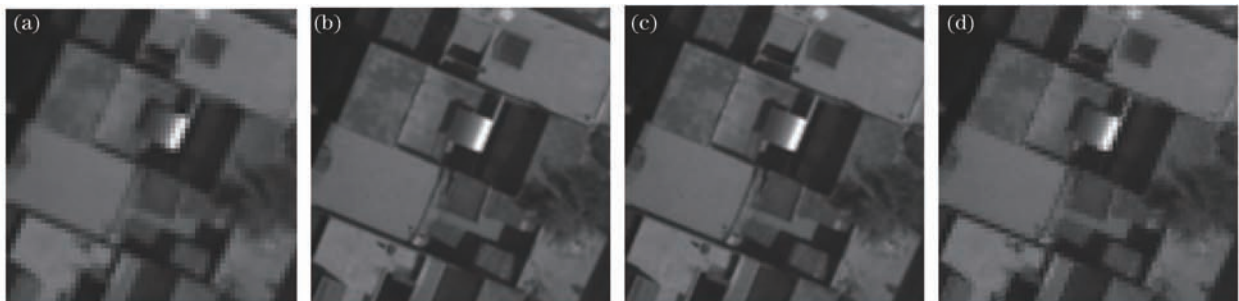


图8 可编程等效异形像元几何超分辨仿真结果。(a)低分辨率;(b)高分辨率;(c)无相对运动;(d)相对运动量1/5像元

Fig.8 Simulation result of programmable equivalent novel pixel for geometrical superresolution. (a) Low resolution; (b) high resolution; (c) no relative motion; (d) 1/5 pixel relative motion

从图8可以看出:在成像过程中,探测器和目标之间无相对运动时的重建图像与目标图像质量相差无几,当探测器和目标之间相对运动量为1/5像元尺寸时,所得的重建图像质量明显下降。因此,在机载环境下应用该方法需保证系统的视轴稳定精度。当然,也可采用棱镜分光的方法,入射光同时照射在4个DMD上,每个DMD对应一个探测器,各DMD空间编码模板不同,可实现一次曝光获取目标的四幅图像。该方案

的主要缺点是光学系统结构复杂,所需 DMD 和探测器数量过多。

将 DMD 放置在  $4f$  光学系统的傅里叶平面,对目标频谱进行编码<sup>[16]</sup>,探测器获取目标图像。对探测器获取的目标图像进行傅里叶变换,将编码模板和目标图像傅里叶变换结果相乘,在输入信号限带的情况下,即可消除目标采样图像频谱混叠效应,从而实现超分辨成像。或者将 DMD 放置在光瞳面,通过编码产生不同的点扩展函数(PSF)<sup>[17]</sup>,从而获取同一目标的不同图像,各图像之间是相互重叠的,通过校准获取各 PSF 参数,同样能够实现探测器像元的几何超分辨。另外,DMD 也在光学显微镜系统中获得了成功应用<sup>[18]</sup>。

2.5 压缩感知成像

压缩感知<sup>[19-23]</sup>是在一定条件下,可用远低于 Nyquist 采样理论要求的采样次数进行目标采样,同样能够恢复出目标的原始信号,其核心内容是目标信号的稀疏性和测量的非相干性。主要应用在以下几种场合:太赫兹、毫米波等领域,没有相应的商用相机;红外探测器像元尺寸较大,传统成像方式获取目标图像的分辨率较低;在磁共振成像(MRI)中,压缩感知成像可以提高系统成像速度。在实际使用时,为满足测量的非相干性,通常可采用类噪声的随机信号作为测量基,即通过 DMD 实现空间强度二值随机分布的光场。

假定目标信号为长度为  $N$  的一维离散稀疏信号  $X=(x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ ,其可以表示为

$$X = \sum_{i=1}^N s_i \cdot \varphi_i = \psi \cdot S, \tag{8}$$

式中  $\psi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$  为表达基,  $\varphi_i$  为  $N \times 1$  的正交基向量; $S$  为  $N \times 1$  的正交基向量的加权系数。依据压缩感知原理,要实现目标信号  $X$  的重构,首先对其进行  $M(M < N)$  次线性测量,测量表达式如下:

$$Y = \Phi X = \Phi \psi S, \tag{9}$$

式中  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$  为目标信号测量值;  $\Phi$  为  $M \times N$  的测量基。

为求解目标信号  $X$ ,需首先求解  $S$ ,然后由  $S$  与表达基重构目标信号,因此系统求解问题转化为解  $S$  的最小  $l_1$  范数问题,即:

$$\hat{S} = \arg \min (\|S\|_{l_1}) \quad S \cdot t \quad Y = \Phi \psi S. \tag{10}$$

基于 DMD 的压缩感知成像系统<sup>[24]</sup>原理框图如图 9 所示。

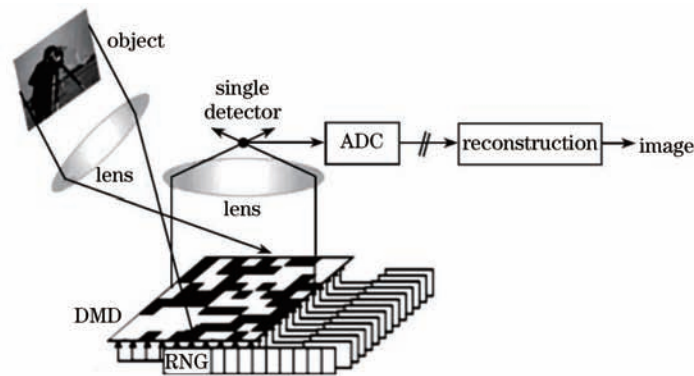


图 9 基于 DMD 的压缩感知成像系统原理框图

Fig.9 Principle block diagram of compressive sensing imaging system based on DMD

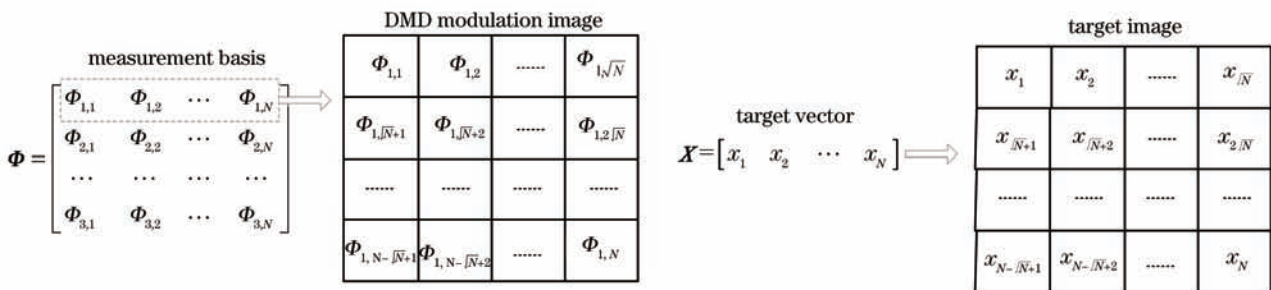


图 10 调制图像和目标图像反演方法示例

Fig.10 Sample of deriving method for modulation image and target image

利用图9所示系统进行压缩感知成像时,首先选择测量基 $\Phi(\Phi \in R_{M \times N})$ ,测量基的每一行可以反演出一幅 $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ 的DMD调制图像,在每幅调制图像作用下采集一次单点探测器输出数据。选择合适的表达基 $\psi$ ,结合测量基、测量值 $Y$ 求解加权系数向量 $S$ ,通过(8)式得到目标向量,最终反演成 $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ 的目标图像。调制图像和目标图像反演方法示例如图10所示。

实验测试发现,在测量率为20%~30%时就能较好地恢复出目标原始图像,如图11所示。

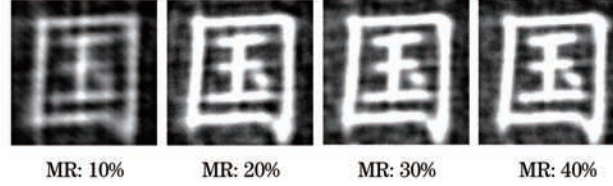


图11 不同测量率下的重构图像

Fig.11 Reconstructed image of different measurement rates

## 2.6 成像光谱仪

DMD应用于成像光谱仪<sup>[25-26]</sup>,依据其在光路中的位置,可分为光谱编码和空间编码,两种结构各有优势,以下给予详细说明。

基于DMD光谱编码成像光谱仪<sup>[27-29]</sup>示意图如图12所示。目标图像首先进入衍射光栅,经衍射光栅后的频谱混叠图像照射在DMD上,由DMD进行频谱选择后进入第二个衍射光栅,最终到达面阵探测器。两级衍射光栅作用的最终结果是将目标二维空间图像1:1投影在面阵探测器上,类似于面阵遥感器,因此,探测器输出的即为目标的二维空间信息。在该系统中,DMD对各像元频谱进行编码。以 $n$ 阶哈达玛变换光谱仪为例,将每个像元对应的 $n$ 阶哈达玛变换各行向量作为调制图像,施加在第一个衍射光栅衍射方向对应DMD各行微镜阵列上。在每幅调制图像作用下,采集探测器输出图像,通过改变 $n$ 次调制图像即可完成系统测量。为获取目标的频谱信息,只需对各个像元进行哈达玛反变换即可,相比于空间编码成像光谱仪,其解码算法更为简单。

基于DMD空间编码成像光谱仪<sup>[30]</sup>原理示意图如图13所示。

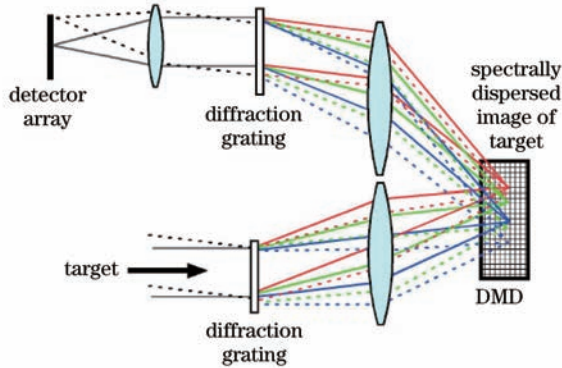


图12 DMD光谱编码成像光谱仪原理示意图

Fig.12 Principle block diagram of spectral encoding imaging spectrograph with DMD

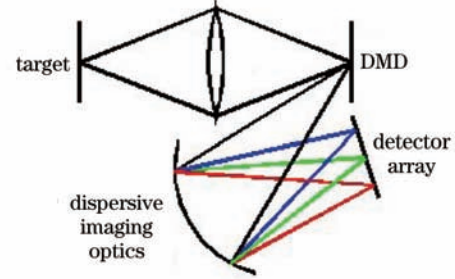


图13 DMD空间编码成像光谱仪原理示意图

Fig.13 Principle block diagram of spatial encoding imaging spectrograph with DMD

目标图像首先到达DMD,DMD在一个方向上对二维目标图像进行空间编码,空间编码后图像经色散成像系统照射在面阵探测器上,其中,色散方向与空间编码方向平行。DMD空间编码成像光谱仪的难点是其解码算法。为便于算法描述,以目标图像中的一行为例,如图14所示。

图14中, $I_i$ 为DMD中第 $i$ 个微镜,对应目标第 $i$ 个像元; $I_{i,j}$ 为第 $i$ 个像元中的 $\lambda_j$ 频谱分量; $R_{k'}$ 为探测器第 $k'$ 个像元输出值; $S_{h,k}$ 为 $S$ 矩阵中第 $h$ 行第 $k$ 个元素,其对应DMD中第 $k$ 个元素的第 $h$ 编码值。在 $S$ 矩阵中第 $h$ 行作用于探测器输出时,探测器输出 $R_{h,k'}$ 可以表示为

$$R_{h,k'} = \sum_k (S_{h,k} \cdot I_{k,k'}) \quad (11)$$

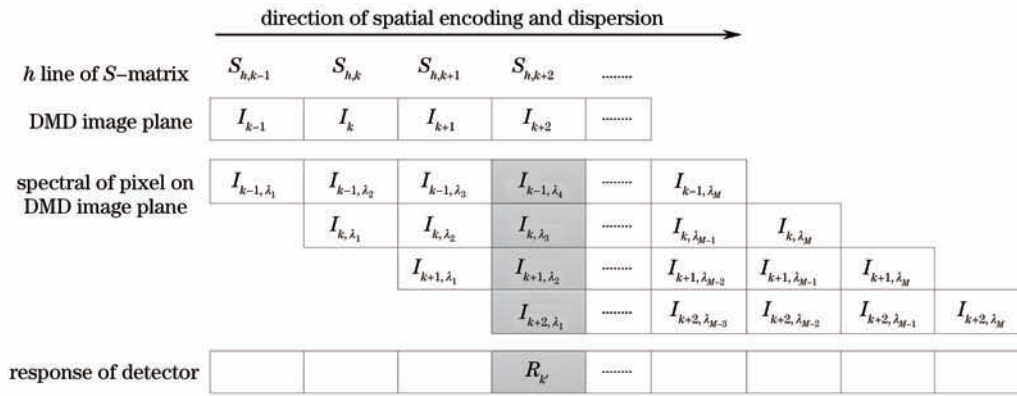


图 14 空间编码成像光谱仪编码示意图

Fig.14 Sketch map of encoding in spatial encoding imaging spectrograph

式中  $I_{k,k'}$  为 DMD 中第  $k$  个像元对探测器中第  $k'$  个像元的贡献值,如图 14 中灰色区域所示,  $I_{k-1,\lambda_4}$ 、 $I_{k,\lambda_3}$ 、 $I_{k+2,\lambda_2}$ 、 $I_{k+2,\lambda_1}$  分别对应  $I_{k-1,k'}$ 、 $I_{k,k'}$ 、 $I_{k+1,k'}$ 、 $I_{k+2,k'}$ 。所对应的解码公式为

$$\hat{I}_{j,j'} = \sum_j (S_{j,h}^{-1} \cdot R_{h,j'}), \quad (12)$$

式中  $\hat{I}_{j,j'}$  为 DMD 中第  $j$  个像元对探测器中第  $j'$  个像元贡献值的解码值,其对应 DMD 中第  $j$  个像元的某一频谱分量;  $S_{j,h}^{-1}$  为  $S$  逆矩阵中对应的 DMD 中第  $j$  个元素的第  $h$  编码值。将(11)式代入(12)式可得:

$$\hat{I}_{j,j'} = \sum_h \left[ S_{j,h}^{-1} \cdot \sum_k (S_{h,k} \cdot I_{k,j'}) \right] = \sum_k \left[ \sum_h (S_{j,h}^{-1} \cdot S_{h,k}) \cdot I_{k,j'} \right] = \sum_k (\delta_{j,k} \cdot I_{k,j'}) = I_{j,j'}. \quad (13)$$

可以看出,经解码(12)式,可准确求出 DMD 各像元对应各频谱对应强度值,将各像元对应各频谱值累加,即可获取目标二维图像信息。

### 3 DMD 在光电设备应用中的关键技术分析

通过上述分析,DMD 在各系统中应用所需的关键技术如下:

- 1)在高分辨率数字投影系统中,采用辅助手段克服微镜对应 CMOS 存储区加载时间的限制是实现高分辨率的关键;
- 2)在高动态范围成像中,需快速检测各像素对应目标场景亮度并判断其对应曝光时间;
- 3)在利用 DMD 进行空间编码或频谱编码时,DMD 中各微镜与探测器像元之间的几何配准精度与系统性能息息相关,同时需考虑运动平台条件下,系统工作过程中探测器和目标之间的相对运动;
- 4)利用 DMD 实现等效异形像元超分辨及像素内目标特征检测时,需考虑 DMD 各微镜填充率对系统性能的影响,并探寻相应的解决方法。

### 4 结 论

随着应用需求的增加,光电设备系统性能要求越来越高,如较高的动态范围、高时间分辨率、高空间分辨率及高光谱分辨率。利用 DMD 的光调制特性对目标图像进行空间编码或频谱编码可以提高系统的性能指标。但目前 DMD 中微镜偏转角度固定(如  $\pm 12^\circ$ ),且对微镜对应的 CMOS 存储空间更新必须以行为单位,不能单独更新,限制了系统的更新频率。随着技术的不断发展,将微镜偏转角度可灵活控制、存储单元更新频率更高的 DMD 应用于可编程成像系统,在系统工作过程中根据任务需要,通过 DMD 改变系统工作模式,实现系统各性能的自由切换,将是未来光电设备的一个发展方向。

### 参 考 文 献

- 1 D Dudley, W Duncan, J Slaughter. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [C]. SPIE, 2003, 4985: 14-25.
- 2 Dong Jianing, Mu Da, Xu Chunyun, et al.. Projection optical system design of infrared scene simulator based on DMD



- [J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2012, 49(12): 122202.
- 董家宁, 牟 达, 徐春云, 等. 基于 DMD 的红外景象模拟投影光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 122202.
- 3 Li Dan, Xue Yunyun, Cao Wen, *et al.*. Optimization of DMD illumination system with microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122002.
- 李 丹, 薛芸芸, 曹 雯, 等. 基于微透镜阵列的 DMD 芯片投影系统照明优化[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122002.
- 4 Yin Zhiyong, Wang Xuefeng, Jia Wenwu, *et al.*. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0702007.
- 殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702007.
- 5 Xu Zhengping, Shen Honghai, Huang Houtian, *et al.*. Color control of video displaying system based on single DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1848-1852.
- 徐正平, 沈宏海, 黄厚田, 等. 单 DMD 彩色视频显示系统的颜色控制[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1848-1852.
- 6 Xu Zhengping, Wang Dejiang, Huang Houtian, *et al.*. Analysis on performance of video displaying system based on DMD [J]. *Chinese J Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 255-260.
- 徐正平, 王德江, 黄厚田, 等. 数字微镜器件视频显示性能分析[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(2): 255-260.
- 7 Yao Yuan, Wang Dejiang, Xu Zhengping, *et al.*. Design of target simulator based on DMD for infrared imaging guided system [J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2013, 50(7): 072302.
- 姚 园, 王德江, 徐正平, 等. 基于 DMD 的红外成像制导目标模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 072302.
- 8 Zhou Wang. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 638-642.
- 周 望. 基于数字微镜器件技术提高面阵 CCD 相机动态范围的研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 638-642.
- 9 A A Adeyemi, N Barakat, T E Darcie. Applications of digital micro-mirror devices to digital optical microscope dynamic range enhancement [J]. *Opt Express*, 2009, 17(3): 1831-1843.
- 10 M Abolbashari, F Magalhães, F M M Araújo, *et al.*. High dynamic range compressive imaging: a programmable imaging system [J]. *Opt Eng*, 2012, 51(7): 071407.
- 11 S K Nayar, T Mitsunaga. High dynamic range imaging: spatially varying pixel exposures [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000, 1: 472-479.
- 12 Applications [OL]. [2013-11-20]. <http://www.pixim.com/applications>.
- 13 S K Nayar, V Branzoi, T E Boult. Programmable imaging using a digital micromirror array [C]. *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004, 1: 1-436.
- 14 Liu Yanyan, Zhang Xin, Xu Zhengping, *et al.*. Enhancing spatial-resolution with detectors of special-shaped pixels [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 2620-2627.
- 刘妍妍, 张 新, 徐正平, 等. 利用异形像元探测器提高空间分辨率[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2620-2627.
- 15 Liu Yanyan, Zhang Xin, Xu Zhengping, *et al.*. Application of special-shaped-pixel detectors in super resolution reconstruction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 971-976.
- 刘妍妍, 张 新, 徐正平, 等. 赋形像元探测器在超分辨重建中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 971-976.
- 16 A Zlotnik, Y Kapellner, Z Afik, *et al.*. Geometric superresolution and field-of-view extension achieved using digital mirror devices [J]. *J Micro/Nanolith MEMS MOEMS*, 2013, 12(3): 033001.
- 17 M Sohail, A A Mudassar. Geometric superresolution using an optical rectangular mask [J]. *Opt Eng*, 2012, 51(1): 013203.
- 18 Dan Dan, Lei Ming, Yao Baoli, *et al.*. DMD-based LED-illumination super-resolution and optical sectioning microscopy [J]. *Sci Rep* 2013, 3.
- 19 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711002.
- 陆明海, 沈 夏, 韩什生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0711002.
- 20 Zhang Shuo, Wang Jie, Wang Jincheng, *et al.*. Simple calculation method for three-dimensional imaging based on compressed sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0111004.
- 张 硕, 王 杰, 王金成, 等. 基于压缩感知的三维物体成像的简单计算方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0111004.
- 21 J Romberg. Imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 14-20.
- 22 Y Bromberg, O Katz, Y Silberberg. Ghost imaging with a single detector [J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(5): 3840-3844.
- 23 D Takhar, J N Laska, M Wakin, *et al.*. A new compressive imaging camera architecture using optical domain

- compressive [C]. SPIE, 2006, 6065: 606509.
- 24 Chen Tao, Li Zhengwei, Wang Jianli, *et al.*. Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2523-2530.  
陈涛, 李正伟, 王建立, 等. 应用压缩感知理论的单像素相机成像系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2523-2530.
- 25 Li Kai, Shi Lei, Zeng Libo, *et al.*. A NIR-Hadamard transform spectrometer controlled by digital micromirror [J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech: Natural Science Edition*, 2012, 40(10): 30-33.  
李凯, 石磊, 曾立波, 等. 一种数字微镜控制的近红外阿达玛变换光谱仪[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 30-33.
- 26 Y Wu, I O Mirza, P Ye, *et al.*. Development of a DMD-based compressive sampling hyperspectral imaging (CS-HSI) system [C]. SPIE, 2011, 7932: 793201.
- 27 C M Wehlburg, J C Wehlburg, S M Gentry, *et al.*. Optimization and characterization of an imaging hadamard spectrometer [C]. SPIE, 2001, 4381: 506-515.
- 28 S P Love, D L Programmable matched filter and Hadamard transform hyperspectral imagers based on micro-mirror arrays [C]. SPIE, 2009, 7210: 721007.
- 29 S P Love, D L Graff. Full-frame programmable spectral filters based on micro-mirror arrays [C]. SPIE, 2013, 8618: 86180C.
- 30 M W Smith, J L Smith, G K Torrington, *et al.*. Theoretical description and numerical simulations of a simplified hadamard transform imaging spectrometer [C]. SPIE, 2002, 4816: 372-380.