

# 基于 DMD 的高动态范围成像光学系统设计

吕伟振<sup>1,2</sup>, 刘伟奇<sup>1</sup>, 魏忠伦<sup>1</sup>, 康玉思<sup>1</sup>, 冯睿<sup>1</sup>, 杨建明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 空间一部, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为了解决光电成像设备对空间实际场景观测时提出的高动态范围要求, 设计了一种新型的像元级光强调制的高动态范围成像系统。系统由成像物镜、折叠反射镜、二次成像转置物镜组成, 采用 TI 公司的数字微镜阵列(DMD)作为光强调制器件, 通过光瞳匹配原则使两个系统完美衔接, 并利用二次成像系统实现 DMD 单元与图像传感器的像素一一对应, 设计结果显示: 在像面的 Nyquist 频率处, 全视场的 MTF $\geq 0.55$ , 弥散圆的直径小于 CMOS 图像传感器的像素尺寸, 并且畸变等像差也校正良好。该方法不仅可以提高图像传感器的可探测动态范围, 还能够实时地探测到强弱目标, 满足空间目标视景成像的要求。

**关键词:** 高动态范围; 数字微镜阵列; 像元级调制; 二次成像; 光学设计

**中图分类号:** O439; V476.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1167-05

## Design of high dynamic range imaging optical system based on DMD

Lv Weizhen<sup>1,2</sup>, Liu Weiqi<sup>1</sup>, Wei Zhonglun<sup>1</sup>, Kang Yusi<sup>1</sup>, Feng Rui<sup>1</sup>, Yang Jianming<sup>1,2</sup>

(1. The First Laboratory of Spatial Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to solve the high dynamic range requirement for photoelectric imaging device when it was used to observe the actual spatial scene, a newly high dynamic range imaging system whose light intensity was modulated in pixel level was designed. This system consisted of imaging lens, a fold mirror, secondary transpose imaging lens, using a DMD(Digital Micromirror Device) produced by TI Inc. as light intensity modulator, connecting the two systems perfectly through the principle of the pupil matching, and utilizing the secondary imaging system to realize one to one correspondence between DMD units and image sensor pixels. Full field of view of the MTF are higher than 0.55 at the Nyquist frequency of the image plane, and the RMS spot diameter is less than the pixel size of the CMOS image sensor in the focal plane, meanwhile such aberration of distortion is also corrected excellently. This method not only

收稿日期: 2013-08-10; 修订日期: 2013-09-21

基金项目: 国家 863 计划(2009AA032701)

作者简介: 吕伟振(1984-), 男, 博士生, 主要从事激光投影显示、空间光学设计与检测方面的研究。Email: lwz1011@163.com

导师简介: 刘伟奇(1958-), 男, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光显示技术、空间目标成像与瞄准技术方面的研究。

Email: liuwq@ciomp.ac.cn

enhances detected dynamic range of the image sensor, but also can detect bright and dark target simultaneously, meeting the requirements of spatial visual target imaging.

**Key words:** high dynamic range; digital micromirror device; pixel level modulation; secondary imaging; optical design

## 0 引言

近十几年来,光电成像系统的动态范围一直制约着空间探测领域中对空间目标视景成像的发展。在应用摄像机、光学瞄准镜等光电成像设备去探测高亮度目标时,尤其是视场内存在高亮物体或光电成像设备的光轴指向与太阳夹角很小时,受图像传感器动态范围的约束,会造成图像传感器的大面积饱和,形成日晕、Blooming 等现象而导致图像质量严重下降,航天员或地面数据判读人员无法获取到有效的信息以致设备失灵。在通常情况下,采用双图像传感器的方法并设定不同的积分时间去获取两幅亮暗图像或者利用高帧频的图像传感器并通过设定多帧不同积分的时间进行连续快速成像,经过“后期”图像融合的方式以实现高动态范围成像的能力。但上述方法或手段都是通过事后处理的方式去增强动态范围,仍不能满足实际空间探测的需求<sup>[1]</sup>。

为使光电成像设备能够实时地探测到高亮度目标的同时也能够实现对弱目标的观测,从而获取更为丰富、更为接近真实场景的图像,文中设计了一种新型的像元级光强调制的高动态范围成像光学系统。采用 TI 公司的数字微镜阵列(DMD)作为数字光强调制器件,并通过二次成像的方法来实现点对点的像元级光强调制,避免了后期处理和图像合成等冗余的处理方式,从而在光学系统结构上实现了高动态范围场景实时探测的能力。文中论述了利用数字微镜阵列(DMD)进行像元级光强调制的原理,并利用 CodeV 软件对高动态成像系统结构中二次成像转置光学系统进行详细的说明,给出了设计结果和成像质量分析<sup>[2-3]</sup>。

## 1 DMD 工作原理

DMD 作为实现高动态范围成像光学系统的关键部件,它由上百万个正方形微小反射镜片组成,每

个微反射镜片都能够朝 $\pm 12^\circ$ 两个方向进行偏转,从而使光线按既定的方向进行投射,并且以数万赫兹的频率进行摆动,通过这种快速的摆动以实现入射光强灰度的调制。如图 1 所示,每一个 DMD 单元都相当于一个“光开关”,当驱动信号处于[ON]状态时,微反射镜片会相对于平板状态时旋转至 $+12^\circ$ ,若驱动信号处于[OFF]状态,微反射镜片则会旋转至 $-12^\circ$ 。

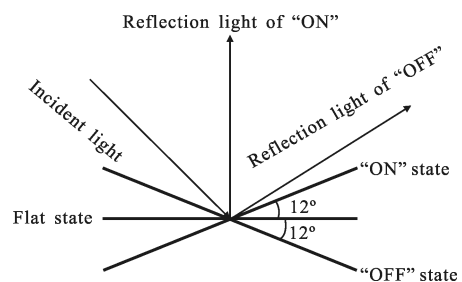


图 1 DMD 单元光开关示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical switch in DMD unit

由于 DMD 芯片具有很高的空间分辨率,高帧频、无死像元、均匀性好、响应速度快、体积小、成本低等良好特性,采用 DMD 作为反射光强调制器件可以产生逼真的高动态的景象。另外,光强灰度调制是利用微反射镜片的摆动次数实现,这也有利于原始图像场景的数据复原<sup>[4-7]</sup>。

根据 DMD 参数,最高摆动频率可达到 20 000 Hz,当 CCD 图像传感器的工作频率为 25 Hz 时,可以估算理论的动态成像范围为  $20\ 000/25=800$  倍(相当于 58 dB),当采用 CMOS 图像传感器时,成像动态范围可达到 145 dB,可以对场景中亮度或者辐射相差 1 700 万倍的目标进行成像与探测,而科学级探测器的可探测动态范围为 60~80 dB,大大提高了图像传感器的动态范围。

## 2 高动态成像系统结构

高动态成像光学系统主要由成像物镜、折叠反

射镜、二次成像转置物镜三个部分组成。如图 2 所示,远处的目标光线进入到一次成像物镜中并将高动态场景成像到 DMD 光强调制器上,当 DMD 单元上的微反射镜片处于“开”状态时,微反射镜将成像物镜上的光线反射到折叠反射镜上,折叠反射镜再将光线反射并改变光线传播方向使光线进入到二次成像转置物镜中,转置镜对进入的光线会聚到 CMOS 图像探测器上;相反,当 DMD 上的微反射镜片处于“关”状态时,微反射镜片会将成像物镜上的光线反射进入到非成像反射光吸收装置,非成像反射光吸收装置由平面反射镜、黑体球组成,平面反射镜将光线反射到黑体球内,经过多次反射逐次衰减最后被黑体吸收,从而消除了无效的反射光进入到二次成像系统中形成干扰<sup>[8-10]</sup>。

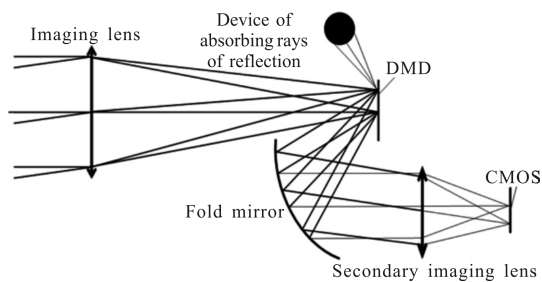


图 2 工作原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of working principle

另外,一次成像物镜采用像方远心光路系统。一方面,使一次成像物镜的出射光瞳与二次成像系统中的入射光瞳之间完美衔接;另一方面,系统像方主光线平行于光轴,在一定程度上增大了二次成像系统中入射光束与反射光束的夹角,从而实现两光束的完全分离,解决了入射光束与反射光束的分离问题。

根据一次成像物镜的要求,选择 DMD 的尺寸为 17.78 mm(0.7 inch),解析度为 1 024×768(4:3),其微镜间距为 13.68  $\mu\text{m}$ 。为了实现像元级的光强调制,必须保持 CMOS 图像传感器的解析度与 DMD 的解析度相匹配,从而使 CMOS 图像传感器的像素与 DMD 单元的每一个光开关满足一一对应关系,根据成像放大率的要求,选择 CMOS 图像传感器的对角线尺寸为 16.64 mm,其相应的像素大小为 13  $\mu\text{m}$ 。由 DMD 到 CMOS 的二次成像光学系统的其他技术指标如表 1 所示。

表 1 二次成像系统的各项技术指标

Tab.1 Various specifications of secondary imaging

Item	Value
$n\sin u$	0.072
Wavelength	Visible spectrum
Imaging magnification	0.936
Aspect ratio	4:3
Resolution	MTF $\geq$ 0.55@40 lp/mm
RMS spot diameter	$\leq$ 10 $\mu\text{m}$
Distortion	<0.1%

在高动态范围成像系统结构中,其设计关键是由 DMD 到 CMOS 传感器的二次转置成像光学系统,因此,在满足像素单元对 DMD 单元光开关之间匹配的同时也要保证系统的像质。

由 DMD 到 CMOS 传感器的二次转置成像光学系统设计步骤如下:由于系统要实现像素匹配,要求绝对畸变控制在一个像素以内,并且物像放大率接近 1:1,选用准对称性的转置物镜作为初始结构可以校正畸变等其他垂轴像差从而实现 DMD 单元与 CMOS 像素之间的完全对应。考虑到 DMD 为反射型光强调制器件,入射光线经一次成像系统后进入 DMD 中,必须在 DMD 和转置物镜前端中间的合适位置处插入一片球面反射镜,一方面保证相对于入射光线偏转 24°的反射光线能够全部进入到二次成像系统中,另一方面可以校正像面上离轴产生的各种像差。此外,为降低像面装调难度并缩短系统总长,在像面和转置物镜后端插入一块反射棱镜代替了倾斜的像面,从而使像面水平放置。

### 3 成像质量分析

通过控制系统的畸变等像差,并约束物像放大关系保持不变,经过软件不断优化调整,最后得到的光学系统结构如图 3 所示。在保证 DMD 所有单元发出的主光线偏转 24°情况下,综合考虑设计要求和像差特性,通过将球面反射镜加入高次项非球面系数和倾斜像面等设为变量进行优化,可以使像面上各点的成像质量让人满意,最后得到非球面反射镜的半径为 8 536.34 mm,非球面各项系数依次为

-1.196e-007、1.752e-009、-1.757e-011、9.490e-014，通过加入一斜角为 56.13°的直角反射棱镜使像面保持水平，最后得到系统的总长度为 296.7mm。

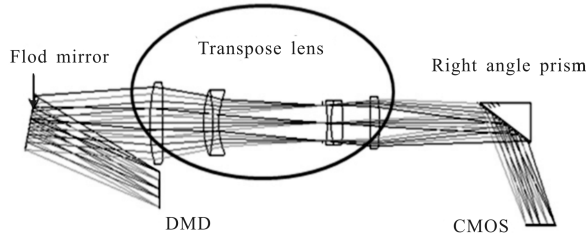


图 3 光学系统的最后结构

Fig.3 Final structure of optical system

为了保证高动态范围成像设备能够同时探测到强弱目标，光学系统的成像能力主要取决于二次成像系统的传递函数。图 4 给出了二次成像光学系统的调制传递曲线，对于离轴偏转成像系统，需要对视场内多个点进行采样以保证全视场的成像质量。设计时选取 0、0.5、±1 四个视场进行优化，在 CMOS 图像传感器的像元尺寸所对应的特征频率为 40 lp/mm 处，全视场的 MTF ≥ 0.55，满足成像质量要求。

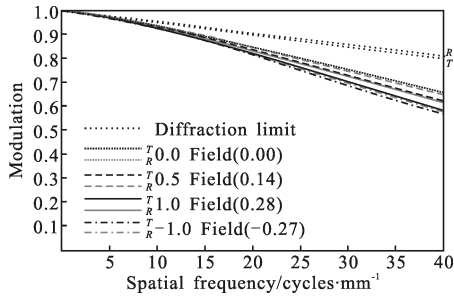
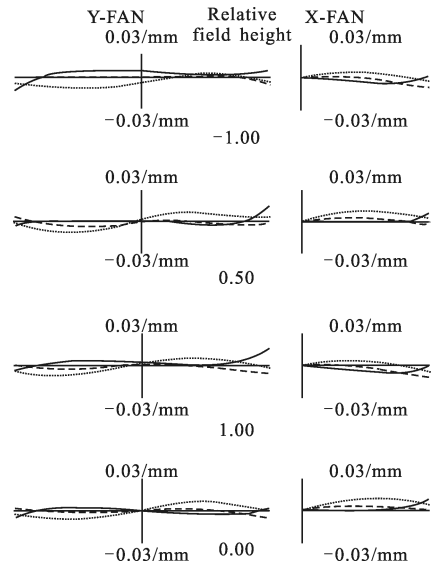


图 4 调制传递函数曲线

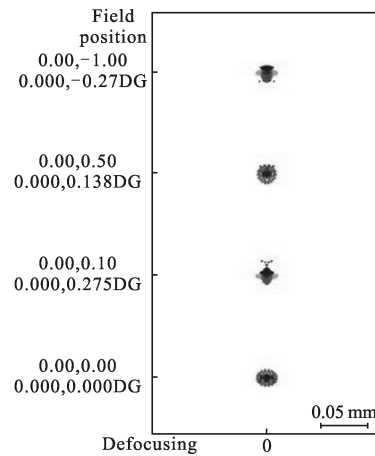
Fig.4 Curves of modulation transfer function

对于此光学系统而言，光线像差曲线和点列图能够全面反映像面的成像质量情况。在不同波长、不同视场下的光线像差曲线和点列图如图 5 所示，以中心波长 587 nm 为参考波长时，中心视场的垂轴像差为 16 nm，边缘视场的最大垂轴像差为 24 nm，同时在 CMOS 图像传感器的像面处 RMS 弥散斑直径最大为 9.86 nm，小于一个像元尺寸。同时，为了最大限度的实现像素匹配，对应 DMD 单元发出的锥角光线必须进入相应的图像处理器的像素内，不能出现错位，除了通过电子学途径来实现图像传感器上的畸变校正外，光学系统边缘视场的绝对畸变也应控制在一个像素范围内，通过优化非球面反射镜



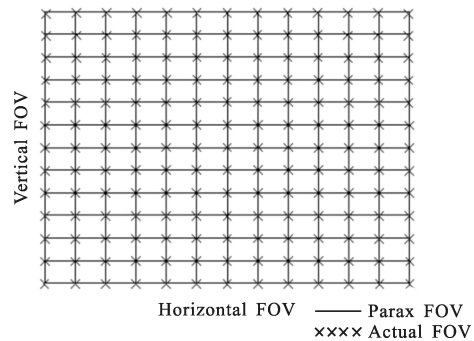
(a) 光线像差曲线

(a) Curves of aberration



(b) 点列图

(b) Spot diagram



(c) 畸变栅格

(c) Distortion grid

图 5 优化结果

Fig.5 Results of optimization

的各项参数,并保证系统物像放大关系,可以使系统畸变校正到一个像素以内,实现像素的完全匹配。从图中可以看出,在全视场处的最大相对畸变为0.02%,相应的绝对畸变小于1/4个像素,远远小于光学系统提出的技术指标。此外,折反射式二次成像系统结构和非成像反射光吸收装置消除了一般透射式调光成像光学系统带来的杂散光,在像面附近形成的鬼像最大能量仅为像面处能量的万分之四,不会影响成像质量。

## 4 结论

文中提出了一种新型的高动态成像光学系统结构,解决了以往必须通过后期图像融合处理的方式来改善图像动态范围的问题。航天员和地面数据判读人员在应用此光电成像设备时不仅能够快速识别明亮目标,并能够探测到弱目标,还可以实时地进行目标观测和诊断,在光学设计时采用二次成像的方法实现了像元级光强调制,从而使每一个像素单元都能够自主调整其动态范围,光学结构不仅简单易于装配,还能够正常摄取到高质量的图像,高亮处目标和阴暗的细节都能够完美地呈现出来,且对比明显、整体效果比较真实、自然,便于人眼观察和识别。这种高动态成像系统结构在航天观测、侦查等领域具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Chen Zhebo. Research of high dynamic range imaging technology [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)  
陈浙泊. 高动态范围成像技术的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2009.
- [2] Zhang Kai, Huang Yong, Sun Li, et al. Dynamic infrared scene simulation using grayscale modulation imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2283-2287. (in Chinese)  
张凯, 黄勇, 孙立, 等. 动态红外场景仿真的灰度调制成像技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2283-2287.
- [3] Dang Dongni, Ji Yiqun, Shen Weimin. Projection lens design of wide band dynamic infrared scene simulator with digital micromirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1017-1021. (in Chinese)  
党东妮, 季轶群, 沈为民. 宽波段 DMD 动态红外景象仿真器投影光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1017-1021.
- [4] Wang Zhijiang. Handbook of Practical Optical Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 325-356. (in Chinese)  
王之江. 实用光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 325-356.
- [5] Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 148-168. (in Chinese)  
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 148-168.
- [6] Zhou Wang. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on Digital Micro-Mirror Device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 3: 638-642. (in Chinese)  
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, 3: 638-642.
- [7] Li Zhuo, Qian Lixun, Li Ping, et al. Technologies of dynamic infrared scene projection and its new development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 377-383. (in Chinese)  
李卓, 钱丽勋, 李平, 等. 动态红外场景生成技术及其新进展 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 377-383.
- [8] Reynald Hoskinson, Boris Stoeber. High-dynamic range image projection using an auxiliary MEMS mirror array [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7361-7368.
- [9] Wang Yunping, Zhao Changming. Dynamic infrared scene simulation system based on the digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (12): 966-970. (in Chinese)  
王云萍, 赵长明. 基于 DMD 的动态红外景象仿真系统 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(12): 966-970.
- [10] Hu Dawei, Li Yanqiu, Liu Xiaolin. Optical design of hyper numerical-aperture Schwarzschild projection lithographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 3788-3795. (in Chinese)  
胡大伟, 李艳秋, 刘晓林. 超高数值孔径 Schwarzschild 投影光刻物镜的光学设计 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 3788-3795.