

文章编号: 1002-1582(2025)05-0579-07

基于DMD编码的双光栅光谱成像系统设计

阮晓霞, 刘王云*, 聂亮, 杨仕元, 王一淳
(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 针对传统编码光谱成像系统存在编码错误率高、像差矫正能力不足等问题, 提出基于数字微镜器件(DMD)编码双光栅光谱成像系统, 利用对称优化方法及双胶合补偿镜补偿编码DMD引起的残余像差。介绍系统的工作原理及DMD像差矫正, 设计出400~700nm波段光谱成像系统, 其前置系统焦距85mm、入瞳直径10mm、视场角4°, 双光路1:1光栅系统结合DMD同步实现分光、编码与合光功能。设计结果表明, 全视场全波段下MTF在奈奎斯特频率76.92lp/mm处均大于0.25, 点列图的光斑半径均小于艾里斑, 最大光谱分辨率优于1.56nm, 满足成像要求。搭建光路进行了光谱成像实验和光谱调制与重构实验, 证实了系统对目标场景的成像能力及光谱重构能力, 验证了所提方案的可行性。

关 键 词: 几何光学; 光学设计; DMD; 双光栅光谱成像; 离轴三反
中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A

Design of a dual-grating spectral imaging system based on DMD encoding

RUAN Xiaoxia, LIU Wangyun*, NIE Liang, YANG Shiyuan, WANG Yichun
(College of Photoelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: To address the issues of high coding error rates and insufficient aberration correction in traditional coded spectral imaging systems, a dual-grating spectral imaging system based on Digital Micromirror Device (DMD) coding is proposed. This system employs a symmetric optimization method and a doublet compensator to correct residual aberrations induced by the coded DMD. The working principle of the system and DMD-based aberration correction are introduced. A spectral imaging system for the 400-700nm wavelength range is designed, featuring a front-end system with a focal length of 85mm, an entrance pupil diameter of 10mm, and a field of view of 4°. The dual-path 1:1 grating system, combined with the DMD, simultaneously achieves light splitting, coding, and recombination. The design results demonstrate that the Modulation Transfer Function (MTF) exceeds 0.25 at the Nyquist frequency of 76.92lp/mm across the full field of view and spectral range, the spot radii in the spot diagram are all smaller than the Airy disk, and the maximum spectral resolution is better than 1.56nm, meeting the imaging requirements. An optical setup was constructed to conduct spectral imaging experiments and spectral modulation-reconstruction experiments, confirming the system's imaging capability for target scenes and its spectral reconstruction performance, thereby validating the feasibility of the proposed approach.

Keywords: geometrical optics; optical design; Digital Micromirror Device (DMD); dual-grating spectral imaging; off-axis three-mirror anastigmat

收稿日期: 2025-04-29; 收到修改稿日期: 2025-06-02

基金项目: 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(20JY029)

作者简介: 阮晓霞(1998—), 女, 硕士研究生, 从事成像光学系统设计方面研究。15829171288@163.com

刘王云(1975—), 女, 副教授, 从事光电信息处理技术、激光技术、量子光学与量子信息学研究。

* 通讯作者: 312229964@qq.com

0 引 言

光谱成像系统设计需要平衡光通量、空间分辨率、光谱分辨率和数据采集时间等多种因素^[1],传统的光谱成像系统只能同时优化其中的两个因素。编码孔径光谱成像系统,可突破空-时-谱分辨率不能兼得的矛盾,广泛应用于遥感、农业监测和医学成像等领域^[2,3]。

光谱成像技术是将二维空间成像与一维光谱信息相结合,实现“图谱合一”。早在1982年,德州仪器实验室^[4]就将数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)作为空间光调制器应用于投影领域。由于DMD对成像视场精细可控的调制,从而代替了传统的移动机械式模板和液晶空间光调制器,精细光谱信息提供远超传统RGB图像的分析识别能力。DMD凭借高通量特性、优异的信噪比及灵活的编码能力,特别适用弱光谱图像分析^[5,6]。

美国Sandia实验室首次提出将DMD应用于光谱成像领域^[7],随后Texas Instruments公司提出基于DMD的编码孔径高光谱成像系统^[8],推动了编码成像领域的革新。中科院西安光学精密机械研究所成功研制天基Hadamard光谱仪原理样机^[9]。Ma等^[10]设计出基于DMD凸光栅Offner结构的光谱可调谐系统,虽然具有较好的像差校正能力,但光谱分辨率相对较低。Liu等使用双DMD和4f系统搭建了宽光场系统,其中一个DMD用来消除另一个DMD的色散^[11],通过色散补偿机制提升系统的光谱成像质量。赵雨时也提出用双DMD Offner系统消除DMD的像面倾斜^[12],使用空间维DMD补偿光谱维DMD。

上述系统为提升成像质量和光谱分辨率,普遍采用双DMD结构,导致系统日趋复杂。保证光谱分辨率的前提下,针对上述问题,分析DMD的衍射特性及系统像差补偿,提出基于DMD编码的双光栅光谱成像系统的设计方法,并对系统进行优化,进而对其可行性进行初步实验验证。

1 双光栅成像系统的工作原理

基于DMD提出双光栅光谱成像系统,包含前置系统、分光/合光系统(准直镜组+光栅+会聚镜组)及编码DMD四部分(图1)。采取反射式结构缩短整体系统的长度^[13];分光方式有棱镜和光栅分光,相较于棱镜分光,光栅分光具有高光谱分辨率、高线性度和宽光谱等特点^[14-16]。

目标场景经过前置系统成像,该像作为系统

的物经过准直镜组A,平行出射到分光光栅色散,色散光线通过会聚镜组A聚焦在DMD上,形成目标场景的色散像面,DMD上连续位置的色散光谱可由物面的某一位置得到。通过控制DMD不同区域微镜单元的翻转状态,进而控制特定通道的选通,实现对光谱的调制编码。被选通的编码光线被DMD反射24°经准直镜组B后到达合光光栅,其中为保证色散光复合,两光栅的色散方向相反。从合光光栅反射的编码光线再经会聚镜组B聚焦在CCD上,形成目标场景图谱混叠的像,经哈达玛逆变换得到目标场景的光谱图像。该成像系统同时实现对目标场景的分光、编码和合光,双色散光谱成像系统是在光谱维度上进行编码的。

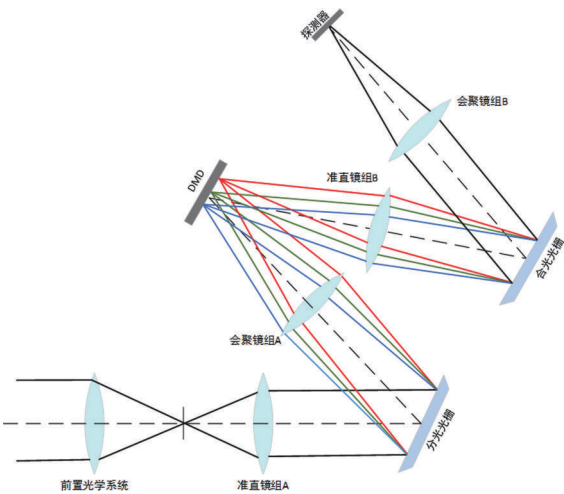


图 1 光谱成像系统光路示意图

系统的主要技术指标如表1。CCD采用德国PCO公司生产的pco.edge 4.2 CLHS FOL相机,像元尺寸为6.5μm,分辨率为2048×2048。DMD选用昊量光电有限公司的V-9601,微镜阵列为1920×1200,像元尺寸为10.8μm,微镜翻转角度为±12°。

表 1 系统主要技术指标

主要指标	相关参数
光谱范围/nm	400 ~ 700
最大光谱分辨率/nm	≥4
全视场/(°)	4
前置成像镜头焦距/mm	85
入瞳直径/mm	10
反射光栅	600nm,300线/mm

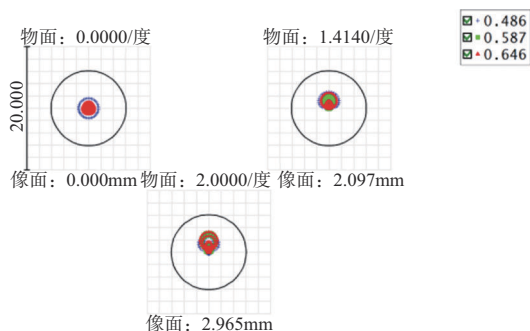
2 双光栅光谱成像子系统系统设计

双光栅光谱成像系统的光学设计主要包括前置系统、准直镜组及会聚镜组的设计。通过光学参数的协同优化,分别构建独立的子系统模块,再通过整体调校,提升成像系统的综合性能。

2.1 前置系统设计

为完成与后续子系统的光瞳匹配,前置系统设计为像方远心光路,并可减小对镜组的孔径要求,避免其他干扰光线进入。基于像方远心度和像面尺寸约束,采用点列图半径和MTF曲线评价系统成像质量。设计结果如图2所示。

图3(a)为前置系统全视场点列图分布,所有点斑半径均小于 $6.5\mu\text{m}$ 像元尺寸且位于艾里斑范围内。图3(b)为系统MTF曲线,可见系统在



(a) 点列图

76.92lp/mm 奈奎斯特频率下MTF均超过0.53。前置系统具备优良的成像质量。

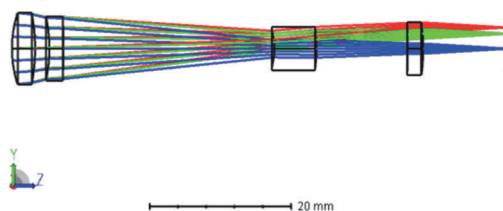
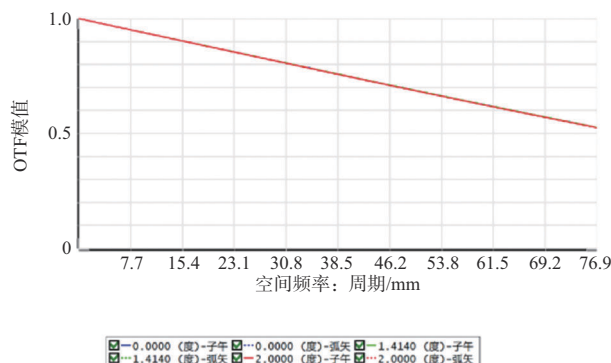


图2 前置系统光路图



(b) MTF曲线

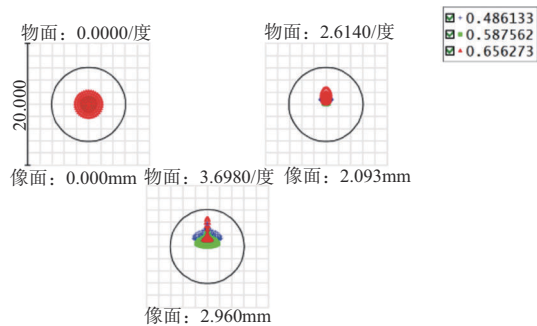
图3 前置系统的像质评价

2.2 准直镜组和会聚镜组设计

考虑到DMD的衍射特性和有效使用面积与探测器尺寸的匹配关系,分光系统与合光系统的大倍率设计为1。

由于对称系统矫正像差的优势,该系统采取对称式:(1)分光与合光光路沿DMD法线对称分布;(2)同一组准直镜组与会聚镜组关于光栅器件对称。准直镜组和会聚镜组采用外光阑对称设计,便于以光阑为轴进行翻转及光阑位置便于用光栅进行替换。其中,为了简化系统的设计和保证系统对称性,分光系统与合光系统共用一套准直镜组和会聚镜组,其都为远心光学系统。为避免系统间发生机械干涉和镜组间折转时发生碰撞,需有较长的工作距。会聚镜组设计结果如图4所示。

图5(a)、(b)分别为会聚镜组的点列图和MTF曲线,全视场点列图的点斑半径均小于艾里斑半径,



(a) 点列图

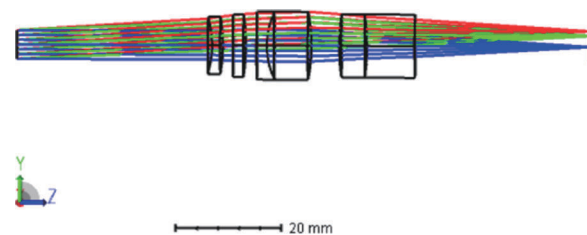
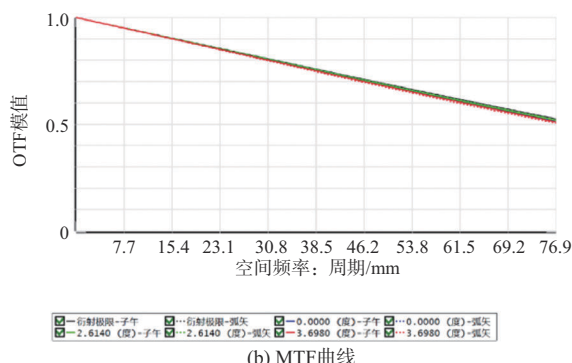


图4 会聚镜组光路图

3 双光栅光谱成像系统分析与设计

3.1 DMD的衍射特性

结合DMD的微观结构及工作原理,将其等效为二维矩形光栅^[17],如图6所示。将DMD分为三个区



(b) MTF曲线

图5 会聚镜组的像质评价

域, 区域II为微镜阵列结构, 沿界面法向方向分为多层结构, 根据严格耦合波理论 (Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA) [17], 求解其衍射特性。当光波以TE模入射时, 对于I区, 电场只有y方向分量

$$E_{(I,y)} = \exp[-ik_0 n_i (x \sin \theta + z \cos \theta)] + \sum_m R_m \exp[-i(k_{xm} x - k_{(I,zm)} z)] \quad (1)$$

式中, R_m 为 m 级对应衍射波电场振幅。

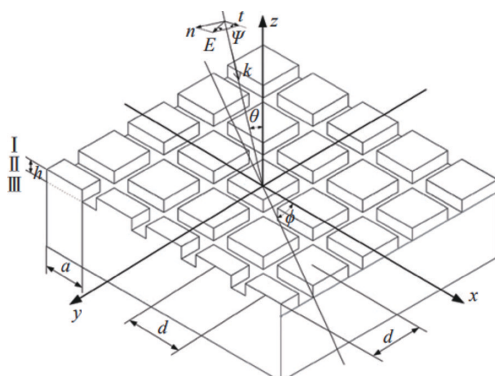


图 6 DMD 等效二维光栅示意图

对于II区中, 每层边界处满足

$$a_{(I,j-1)}^+ = a_{(I,j)}^-, a_{(I,j)}^+ = a_{(I,j+1)}^- \quad (2)$$

根据边界 $z=0$ 连续, 将电磁场分量用傅里叶级数展开, 推导得 DMD 反射光的衍射效率为

$$\eta_{Rm} = \text{Re} \left(\frac{k_{(I,zm)}}{k_0 n_i \cos \theta} \right) |R_m|^2 \quad (3)$$

在光谱成像系统中为降低 DMD 带来的衍射杂光影响, 将主光线正入射到 DMD 上。

DMD 由数百万个微反射镜组成, 其微镜分布的非连续性使得离轴视场中 DMD 的出射波前为阶梯状波前存在光程差, 使用等效平面反射镜替代 DMD 的倾斜微镜以计算 DMD 引入的光程差 [18]。DMD 看作相对于二次成像镜头光轴倾斜的场景, 为减小由 DMD 引起的物面倾斜效应所导致像面倾斜, 将 DMD 倾斜 45° 放置, 并且探测器需根据 Scheimpflug 原理倾斜相应的角度保持与 DMD 的物像共轭关系 [19]。

3.2 色差矫正

特定波长下, 不同光学玻璃具有不同的色散特性, 可通过正-负透镜组合彼此抵消。结合消色差理论中位置色差, 对于双胶合透镜, 其消色差满足

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} = 0 \quad (4)$$

通过上式实现 F 与 C 波长消色差, 但 D 波长与 F、C 波长的光聚焦位置不同, 需分别求光焦差, 光焦差为

$$\Delta\varphi_{dc} = P \frac{\varphi}{\nu} \quad (5)$$

D、F、C 波长的光经过双胶合透镜时, 光焦差为两部分之和。联立以上关系式得

$$\Delta\varphi_{dc} = \frac{P_1 - P_2}{\nu_1 - \nu_2} \varphi = \frac{\Delta P}{\Delta \nu} \varphi \quad (6)$$

双胶合透镜总光焦度一定时, 透镜材料的相对色散的差值越小, 且阿贝数的差值越大时, 双胶合透镜产生的光焦差越小 [20]。

3.3 整体光学系统设计结果

在前置系统、准直镜组及会聚镜组独立设计的基础上, 根据光瞳衔接原则将其拼接, 并进行整体优化设计。为了保证衍射光栅前后镜组的严格对称, 在 ZEMAX 光学设计中采用 “pickup” 功能。由于 DMD 的衍射效应和色差矫正, 在最后合光系统的成像镜组中加入双胶合镜进行补偿, 控制残余像差在允许范围内。系统整体的实体模型如图 7。

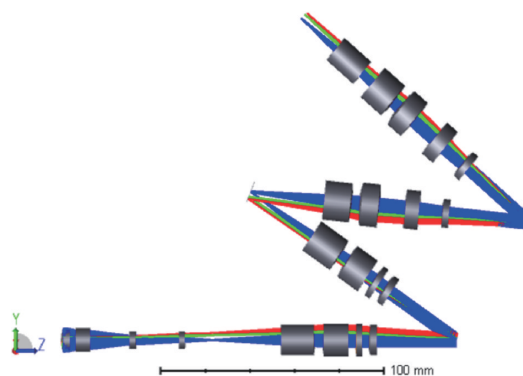


图 7 整体光学系统实体模型图

图 8 (a) 为系统的波前图。根据瑞利判据, 当光学系统的最大波像差不超过 $1/4$ 工作波长 (λ) 时, 可认为系统具有优良的成像质量。以 587nm 波长作为参考, 中心视场处的波前 PV 值为 0.14λ 、波前 RMS 值为 0.036λ , 该值低于 $1/4\lambda$ 的理论阈值。表明系统在中心视场区域满足衍射极限要求。

图 8 (b)、(c) 分别为系统的点列图和 MTF 曲线, 全视场的点斑均小于 $6.5\mu\text{m}$ 像元尺寸且位于艾里斑内, 在 76.92lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.24, 像面 MTF 衰减主要由离轴结构、光路不完全对称及 DMD 像差导致。由点列图和 MTF 曲线知, 设计的双光栅光谱成像系统成像质量良好, 像差在允许的范围内。

系统的光谱分辨率主要与色散方向及 DMD 的像元尺寸相关。由图 9 知, 分光后光谱在 DMD 平面展开宽度 $\ell \approx 1470\mu\text{m}$, DMD (像素 $10.8\mu\text{m}$) 作为衍射光栅时, 光栅常数为 $7.64\mu\text{m}$, 覆盖大约 192 列 DMD 像素。因此得出系统的最大光谱分辨率为

$$SR_{\text{MAX}} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{N} = 1.56\text{nm} \quad (7)$$

式中, N 为光谱展宽覆盖 DMD 像素的列数。相较

于文献[21]提出的哈达玛变换成像光谱仪，本系统在光谱分辨率和像差矫正性能两方面实现了重要突破，其中光谱分辨率提升至原系统的 1.71 倍，同时通过优化像差显著提高了光谱重构精度，使系统成像质量获得质的飞跃。

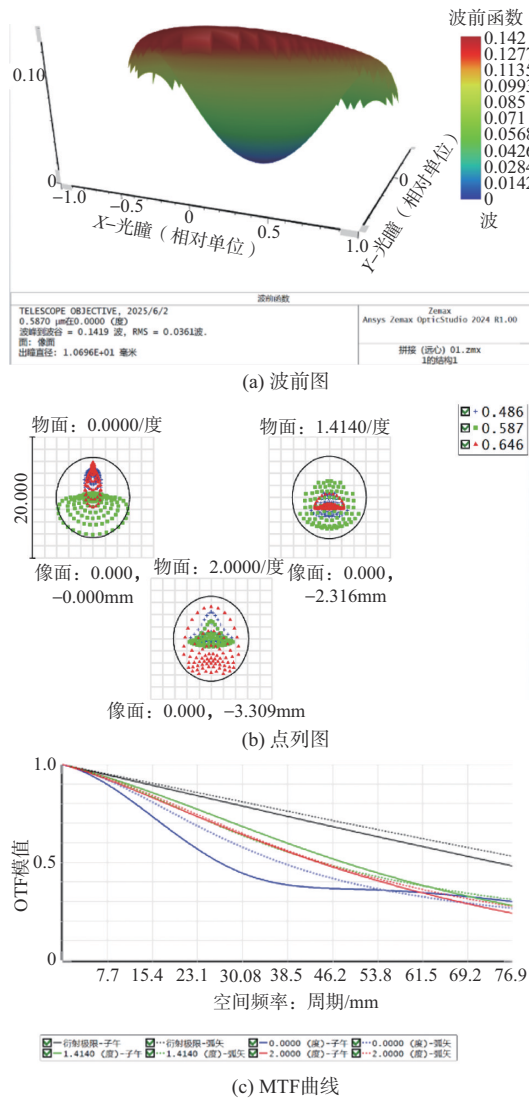


图 8 整体光学系统的像质评价

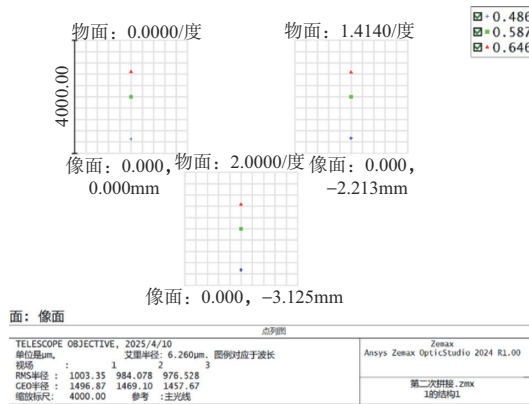


图 9 分光系统所有波长点列图

3.4 公差分析

对于设计的系统能否进行加工生产，公差分

析是必不可少的环节。对于各光学元件以及各表面灵敏度较高、对成像质量影响较大的公差项，在光学加工以及装调能力允许的情况下进行适当收紧，对成像质量影响较小的公差项进行适当放松^[22]。该系统有多个衍射原件，光路经过多次折转，公差分析时与常规系统不同，需要对衍射原件定位精度和光轴转角进行公差分析。

衍射原件公差分配如表 2 所示，采用衍射 MTF 均值作为评价指标，经 200 次蒙特卡洛模拟分析：90% 样本在 76.92lp/mm 频率下的 MTF 值优于 0.5522（表 3）。结合表 2 和表 3 可知，系统对于 DMD 定位精度和光轴转角更加敏感，装配中需特别注意 DMD。

表 2 衍射原件公差分配

公差种类	衍射光栅	DMD
倾斜/(°)	0.025	0.02
偏心/mm	0.03	0.02
空气间隔	0.05	0.05

表 3 衍射原件蒙特卡洛分析结果

百分比/%	数值
90%>	0.55228
80%>	0.55230
50%>	0.55233
20%>	0.55236
10%>	0.55237

系统采用模块化设计，但拼接后对整个系统对称优化，故无需对子系统单独公差分析。系统的公差分配如表 4 所示，对系统进行 200 次蒙特卡洛分析，并使用衍射 MTF 平均作为评价标准：90% 的样品在 76.92lp/mm 处 MTF 值高于 0.218（表 5），系统的设计满足要求。

表 4 系统公差分配结果

公差种类	公差值
曲率半径/光圈	1
中心厚度/mm	0.01
表面偏心/mm	0.03
表面倾斜/(°)	0.005
元件偏心/mm	0.03
元件倾斜/(°)	0.005
不规则度/光圈	0.1

表 5 蒙特卡洛概率分布

百分比/%	数值
90%>	0.21839
80%>	0.23099
50%>	0.28148
20%>	0.29751
10%>	0.30254

4 实验验证

4.1 实验搭建

为了进一步验证双光栅光谱成像系统的成像质量和光谱重构能力,搭建了简单的验证系统。采用含有十字叉丝的平行光管代替前置系统和准直镜组A,调节平行光管俯仰角度,使初始光轴与实验台平行。将DMD处于全“开”状态,调整各透镜组及分光光栅位置,再调节合光光栅的角度以达到合光效果,直到CCD上清晰出现十字叉丝像。

4.2 实验结果分析

在暗室环境中,固定调整整个系统,对目标场景十字叉丝进行单次拍照,获得混叠的光谱信息,如图10所示。经过双光栅光谱成像系统成像的十字叉丝光斑强度分布均匀且成像清晰,为后续DMD编码调制实验奠定了良好的基础。

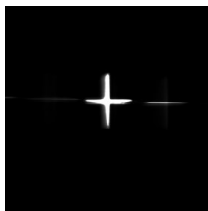


图10 十字叉丝成像图

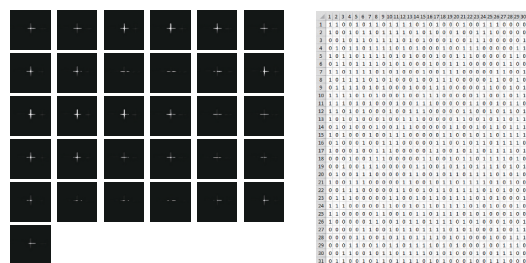
在成像实验基础上添加编码调制模块,即DMD不再呈现全“开”状态。为了在光谱重建性能、信噪比与计算效率之间实现最优平衡,采用31阶左移循环S编码矩阵作为DMD的调制模板。该系统波长范围在400~700nm,DMD上有31个光谱通道,所以光谱通道以9.7nm为步长依次为:400.0~409.7nm、409.7~419.4nm、...、691.0~700.0nm。

选择可以生成400~700nm内单色光的昊量光电彩色光源(型号: AUT-NIM-11),利用上位机生成对应相匹配的光谱信息曲线,便于最后的光谱比对。首先对DMD投影首行为[1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1]的31阶左移循环编码矩阵,因闪耀光栅的闪耀波长为550nm,故选用545nm单色光进行照射时,共切换31次编码图案,通过CCD拍摄31张编码图案,如图11(a)所示。

在31张编码图案上取同一点Q(1021, 829)采集灰度值,得到该点的编码通道元素,由于545nm属于第16通道,利用移位寄存器法,得到31阶编码矩阵如图11(b)所示,其中“0”表示通过、“1”表示不通过。

对整个系统的光谱曲线重构能力测试。通过上位机控制彩色光源生成拟合光谱曲线,如图12(a),

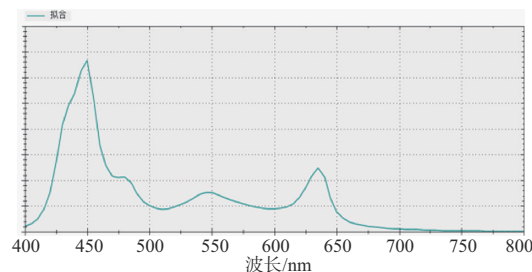
继而通过平行光管将携带有预设光谱特征的十字叉丝成像至CCD上,完成光谱信息的空间载入。将图11(b)的31阶编码矩阵投影到DMD上,与调制实验步骤一致拍摄31张编码图片,按照11(b)编码矩阵进行解码重构,得到31个波段的光谱切片图,之后提取每幅图相同的空间点绘制出该点的重构光谱曲线图,如图12(b)所示。对比图12(a)和12(b)可得到,拟合光谱曲线与重构光谱曲线都在450nm处达到峰值,并且曲线的大致走势相同,说明系统对光谱信息的重构能力。



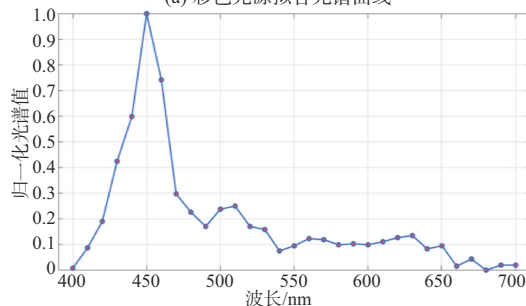
(a) 545nm编码图

(b) 31阶编码矩阵

图11 编码矩阵与光谱图像



(a) 彩色光源拟合光谱曲线



(b) 重构光谱曲线

图12 光谱信息比对

通过上述实验,证实了系统对目标场景的成像与编码重构能力,解决传统编码光谱成像系统编码错误率高,所导致光谱重构能力差的问题,验证了双光栅光谱成像系统的可行性。

5 结 论

基于DMD编码提出了一种双光栅的光谱成像系统设计方案,利用对称优化方法及双胶合补偿镜完全补偿了编码DMD引起的残余像差。系统在全波段全视场均满足:点列图半径小于 $6.5\mu\text{m}$ (1个像元尺寸)且光斑能量集中在艾里斑内,奈奎

斯特频率(76.92lp/mm)下MTF值优于0.25,光谱分辨率优于1.56nm。通过公差分析证明系统的像质衰减在可控范围内,满足加工需求。并进行了光谱成像实验和光谱调制与重构实验的验证,证实了系统对目标场景的成像能力和光谱重构能力,验证了双光栅光谱成像系统的可行性。提出的双光栅光谱成像系统,可准确识别目标,对未来编码光谱成像系统的发展和研制具有重要的理论意义和应用价值。后续仍需进一步对系统的尺寸结构进行优化,同时对光谱重构算法进行改进,提升光谱分辨精度和效率。

参考文献:

- [1] 付占方. 编码孔径光谱数据处理与复原[D]. 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.
Fu Zhanfang. Coded aperture spectral data processing and reconstruction[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2013.
- [2] 罗朝, 梁海峰, 蔡长龙, 等. 紧凑式多光谱成像系统设计和优化[J]. 光学技术, 2023, 49(02): 143—149.
Luo Cao, Liang Haifeng, Cai Changlong, et al. Design and optimization of compact multispectral imaging systems[J]. Optical Technique, 2023, 49(02): 143—149.
- [3] 李东睿, 刘金涛, 吴松华. 基于微透镜阵列的光谱成像系统设计及实现[J]. 光学学报, 2025, 45(04): 77—85.
Li Dongrui, Liu Jintao, Wu Songhua. Design and implementation of a microlens array-based spectral imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(04): 77—85.
- [4] 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.
- [5] Kearney K J, Ninkov Z. Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy[C]// Proc. SPIE, 1998, 3292: 81—92.
- [6] Douglass M R. DMD reliability: a MEMS success story[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4980: 1—11.
- [7] Wehlburg C M, Wehlburg J C, Gen-Try S M, et al. Optimization and characterization of an imaging Hadamard spectrometer [C]// Aero-space/Defense Sensing, Simulation, and Controls. Proc SPIE 4381, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VII, Orlando, FL, USA: IEEE, 2001, 4381: 506—515.
- [8] 石颖超, 张路明, 陈飞, 等. 数字微镜器件光谱成像技术进展[J]. 光学精密工程, 2023, 31(21): 3096—3110.
Shi Yingchao, Zhang Luming, Chen Fei, et al. Advances in digital micromirror device-based spectral imaging technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(21): 3096—3110.
- [9] 吴小丽, 杨晓燕, 余徽. 基于凸面光栅的Offner型编码孔径多光谱成像光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2019, 17(03): 77—82.
Wu Xiaoli, Yang Xiaoyan, Yu Hui. Design of Offner-type coded aperture multispectral imaging optical system based on convex grating[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2019, 17(03): 77—82.
- [10] Ma S D, Pan Q, Shen W M. Spectrum synthesis for a spectrally tunable light source based on a DMD-convex grating Offner configuration[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9684: 96840X.
- [11] Jingdan Liu, Charlotter Zaouter, Xianglei Liu, et al. Coded-aperture broadband light field imaging using digital micromirror devices[J]. Optica, 2021, 8(2): 139—142.
- [12] 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 Yushi, He Wenjun, Liu Zhiying, et al. Optical design of mid-infrared spectral imaging system with spectral dimension encoding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(12): 3788/IRLA20210700.
- [13] 桑海龙, 郑阳, 李延伟, 等. 超低杂散光同轴四反光学系统[J]. 光学技术, 2025, 51(02): 175—182.
Sang Hailong, Zheng Yang, Li Yanwei, et al. Ultra-low stray light coaxial four-mirror optical system[J]. Optical Technique, 2025, 51(02): 175—182.
- [14] 张晓龙, 范欣雨. 消像散 Czerny-Turner 光谱成像系统的设计[J]. 光学技术, 2020, 46(01): 33—40.
Zhang Xiaolong, Fan Xinyu. Design of anastigmatic Czerny-Turner spectral imaging system[J]. Optical Technique, 2020, 46(01): 33—40.
- [15] 张晓龙, 汪宝, 郭爽, 等. 基于双阿米西棱镜的光谱成像系统设计[J]. 光学技术, 2022, 48(06): 658—663.
Zhang Xiaolong, Wang Bao, Guo Shuang, et al. Design of spectral imaging system based on double Amici prisms[J]. Optical Technique, 2022, 48(06): 658—663.
- [16] 刘兵, 刘英, 李灿, 等. 轻小型可见/近红外实时成像光谱仪的光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(06): 329—336.
Liu Bing, Liu Ying, Li Can, et al. Optical system design of compact visible/near-infrared real-time imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(06): 329—336.
- [17] 袁夕尧, 胡源, 黄蕴涵, 等. DMD衍射效应及其产生的杂散光分析[J]. 应用光学, 2021, 42(04): 630—635.
Yuan Xiyao, Hu Yuan, Huang Yunhan, et al. Analysis of DMD diffraction effect and its generated stray light[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(04): 630—635.
- [18] 王月旗. 基于DMD的编码孔径光谱成像光学系统设计[D]. 长春理工大学, 2020.
Wang Yueqi. Optical system design for DMD-based coded aperture spectral imaging[D]. Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [19] D S Grewal, S P S Grewal. Clinical applications of Scheimpflug imaging[J]. Expert Review of Ophthalmology, 2009, 4(3): 243—258.
- [20] 王康生, 林峰, 谢忠鑫, 等. 用于多光谱相机的机器视觉系统设计[J]. 应用光学, 2025, 46(02): 233—241.
Wang Kangsheng, Lin Feng, Xie Zhongxin, et al. Machine vision system design for multispectral cameras[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(02): 233—241.
- [21] Sun Xin, Hu Bingliang, Li Libo, et al. An engineering prototype of Hadamard transform spectral imager based on Digital Micro-mirror Device[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 210—217.
- [22] 王雪峰. 大视场高分辨率深海探测变焦光学系统设计[D]. 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
Wang Xuefeng. Design of wide-field high-resolution zoom optical system for deep-sea exploration[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2022.