

文章编号: 2095-2163(2022)11-0168-04

中图分类号: O433.4

文献标志码: A

# 单光栅快照式光谱成像系统的设计

朱挥, 陈茜, 谢泉

(贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 相较于双光栅快照式光谱成像系统, 单光栅结构的成像系统因其仅包含一个分光原件, 所以在结构上更加简洁。本文搭建了一个单光栅快照式光谱成像系统, 系统中采用数字微镜器件作为编码器件。首先, 为了搭建成像系统实物, 分析了该成像系统的数学模型; 其次, 对系统中透射光栅的偏移量进行计算; 最后, 使用交替方向乘法对光谱成像系统采集到的图像进行多光谱重建。重建结果表明, 2种波长的激光光斑图像可以准确地分开, 且激光光谱位置较准确。

**关键词:** 数字微镜; 光谱成像; 单光栅

## Design of single-grating snapshot spectral imaging system

ZHU Hui, CHEN Qian, XIE Quan

(College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**【Abstract】** Compared with the dual-grating snapshot spectral imaging system, the imaging system with single-grating structure contains only one spectroscopic element, making the structure more compact. In this paper, a single grating snapshot spectral imaging system is built, in which a digital micro-mirror device is used as the encoding device. First, in order to build the physical imaging system, the mathematical model of the imaging system is analyzed. Then, the offset of the transmission grating in the system is calculated. Finally, multi-spectral reconstruction is conducted with images collected by the spectral imaging system via alternating direction multiplier method. The reconstruction results show that the laser spot images of the two wavelengths can be separated accurately, and the laser spectral position is more accurate.

**【Key words】** digital micro-mirror device; spectral imaging; single disperser

## 0 引言

传统的高光谱成像系统为了获取三维数据立方体, 即二维空间信息 $(x, y)$ 和一维光谱信息 $(\lambda)$ , 会沿着空间维或光谱维对目标场景进行扫描, 大大降低了采集效率<sup>[1]</sup>。为了实现更高速的信息采集速率, 提出了快照式光谱成像仪, 可以在一次测量中同时获取多个波段的光谱混叠图像<sup>[2]</sup>。相对于传统的RGB相机以及光谱仪, 快照式光谱成像仪获取目标场景的信息更加丰富, 在医学诊断、目标识别、环境监测以及天文学等领域有广泛的应用。目前, 典型的快照系统有编码孔径快照式光谱成像仪(CASSI)、计算层析成像光谱仪(CTIS)、图像映射光谱仪(IMS)。

数字微镜(Digital Micromirror Devices, DMD)作为编码成像光谱仪的重要器件, 在一定程度上推动了哈达玛变换光谱仪的发展。2001年, Wehlburg等人<sup>[3]</sup>将DMD器件引入哈达玛光谱成像, 验证该光

谱仪能实现无狭缝和图谱合一。次年, 该小组简化了成像光谱仪的结构, 并对新型的结构进行了理论分析和数值仿真<sup>[4]</sup>。2006年, Pajo等人<sup>[5]</sup>采用曲面光栅和球面镜代替双光路系统, 使仪器结构更加紧凑。2014年, Plove等人<sup>[6]</sup>对基于哈达玛变换的光谱成像系统进行简单修改, 用2个DMD共轭放置来减小衍射影响。2011~2017年, Arce团队在基于压缩感知理论的基础上, 提出一种新型光谱成像仪, 无需运动也能获取多次测量, 并在后续数年中进行一系列改进, 提高重建质量<sup>[7]</sup>。2020年, Meng等人<sup>[8]</sup>设计了一种采用光纤束将体内组织空间光谱数据带传送到外部压缩光谱成像仪的快照多光谱显微镜, 由于快照压缩成像的快照机制和深度学习的端到端重建, 该内镜可以实现极高的采集速度和接近实时的重建。

目前, DMD编码光谱成像系统在相关研究人员不断的研究和改进下, 结构及性能得到极大的提升。本文根据相关理论, 搭建了一套单光栅数字微镜编

基金项目: 贵州省自然科学基金项目。

作者简介: 朱挥(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 多光谱成像。

通讯作者: 陈茜 Email: chenzhangqianer@163.com

收稿日期: 2022-02-22

码成像系统,并对该系统中透射光栅器件产生的偏移量进行了标定。同时采用 2 个不同波段的激光 (405 nm、635 nm) 经过光纤耦合,使 2 个激光光斑在 DMD 上的同一位置成像,再经透射光栅分光偏移,光斑成像在探测器的不同空间位置。最后,通过交替方向乘子法 (Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM) 对探测器上的成像进行多光谱重建。

## 1 单光栅快照式光谱成像系统数学模型

单光栅结构的光谱成像系统 (Single-disperser Coded Aperture Snapshot Spectral Imagers, SD-CASSI) 是对目标场景的空间维进行编码的一种光学成像系统<sup>[9]</sup>。单光栅结构的快照式光谱成像仪原理如图 1 所示。首先,目标场景  $F_0$  通过成像镜成像后, DMD 产生编码图形  $T$ , 对成像镜所成的像进行编码。其次,中继镜头对编码后的场景中继得到  $F_1$ , 经过色散元件后进行分光偏移形成  $F_2$ 。最后,探测器将得到一个空间信息和光谱信息混叠在一起的图像  $F_3$ 。

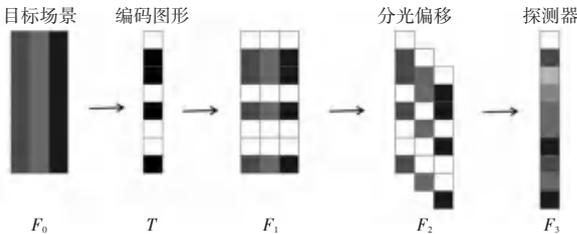


图 1 单光栅快照式光谱成像仪原理图

Fig. 1 Schematic of single-grating snapshot spectral imager

目标场景  $F_0(x, y, \lambda)$  是包含空间信息  $(x, y)$  以及光谱信息  $(\lambda)$  的三维数据立方体, 编码图形  $T(x, y)$  仅包含空间信息, 对目标场景调制过程可表示为:

$$F_1(x, y, \lambda) = T(x, y) F_0(x, y, \lambda) \quad (1)$$

光栅对调制后的目标场景在  $y$  方向分光, 通过色散元件后,  $F_2$  的光谱强度为:

$$F_2(x, y, \lambda) = F_1(x, y + \alpha(\lambda - \lambda_0), \lambda) = T(x, y + \alpha(\lambda - \lambda_0)) F_0(x, y + \alpha(\lambda - \lambda_0), \lambda) \quad (2)$$

其中,  $\alpha$  表示光栅色散率,  $\lambda_0$  为初始波长。

最终探测器上采集到的图像数学模型可表示为:

$$F_3(x, y) = \int F_2(x, y, \lambda) d\lambda = \int T(x, y + \alpha(\lambda - \lambda_0)) F_0(x, y + \alpha(\lambda - \lambda_0), \lambda) d\lambda \quad (3)$$

## 2 单光栅快照式光谱成像系统的设计

由于 DMD 反射角度小, 为了避免入射光路和反射光路互相遮挡干涉, 实验装置均选用较小尺寸的光学器件, 且两边光路需要尽量长的焦距。由此选取光学系统的主要器件有: 焦距为 75 mm 的紧凑型定焦镜头对目标场景进行成像 (尺寸为 30.5 mm × 65.5 mm); 中继镜将镜头所成的光学图像进行前向传送 (Relay lens, 30 mm,  $f/8$ , 尺寸为 30.1 mm × 15 mm)、光栅 (分光器件) (300 线/mm, 25 mm 方形, 17.5° 闪耀角), 根据器件选型和成像原理, 单光栅光谱成像系统结构如图 2 所示。

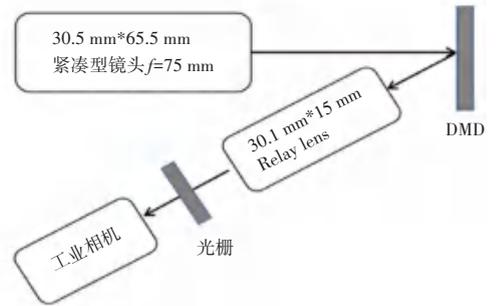


图 2 单光栅光谱成像系统结构

Fig. 2 Structure of single-grating spectral imaging system

## 3 成像系统的搭建

根据设计的系统结构, 搭建了一套单光栅成像系统装置, 如图 3 所示。图 3 中, 1 是光阑 (调节光斑大小), 2 是成像镜头, 3 是 DMD 的控制板, 4 是 DMD, 5 是中继镜头, 6 是透射光栅, 7 是相机 (探测器), DMD 产生的编码模板可根据实际需求进行调整, 箭头指向表示了光路的传播方向。

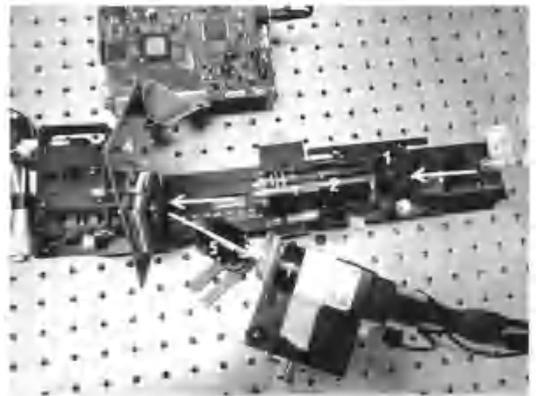


图 3 单光栅光谱成像系统装置

Fig. 3 Experimental device of single-grating spectral imaging system

## 4 实验测试

### 4.1 计算偏移量

首先采用2种颜色的激光波长分别为405 nm、635 nm作为测试对象,经光纤耦合成像在DMD上的同一空间位置,经DMD编码后再分光成像在探测器上,如图4所示。根据探测器上的位置变化可直接计算分光偏移量,测得探测器上2种激光光斑的中心距离为390个像素,根据两激光的波长和中心距离,可求得光栅的偏移量为: $390/(635-405)=1.7$  (pixel/nm),则每10 nm就间隔17个像素。从图4可以看出,随着波长增加,图形向左偏移。

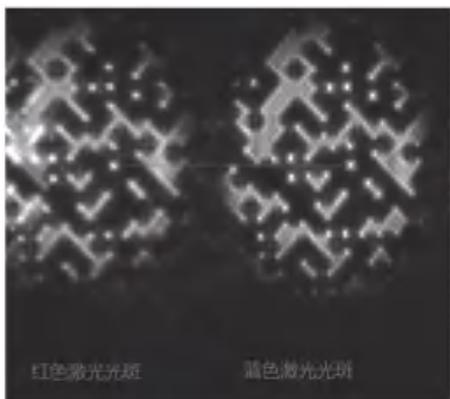
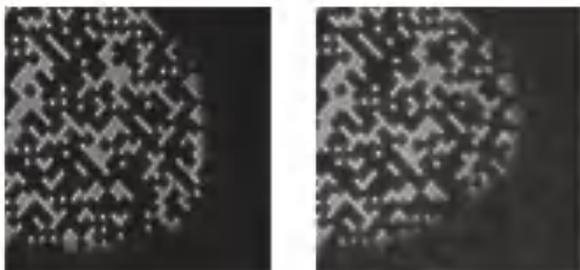


图4 探测器上2种激光的成像

Fig. 4 Imaging of two lasers on the detector

### 4.2 标定编码模板

由于激光的波段窄,单个激光的检测图像可以直接作为编码模板,没有波段混叠。但由于光栅和DMD衍射效应,不同衍射级次的图像略有混叠。分别选取蓝光和红光输入到成像系统中,得到2种编码图形如图5所示。图形大小为660 pixel×660 pixel,可以看到2种不同激光所成的像质量存在差异,蓝光相对更加清晰,红光因为有些不同级次图形混叠,所以较为模糊。因此实际采集图像时选择蓝光所形成的编码图形作为编码模板。



(a) 蓝光

(b) 红光

图5 两激光测量的编码图形

Fig. 5 Coding pattern of two laser measurements

### 4.3 采集图形并进行多光谱重建

405 nm和635 nm的激光未经编码调制而直接通过实验装置进行成像,如图6所示,从左到右2个光斑的波长分别为635 nm、405 nm。

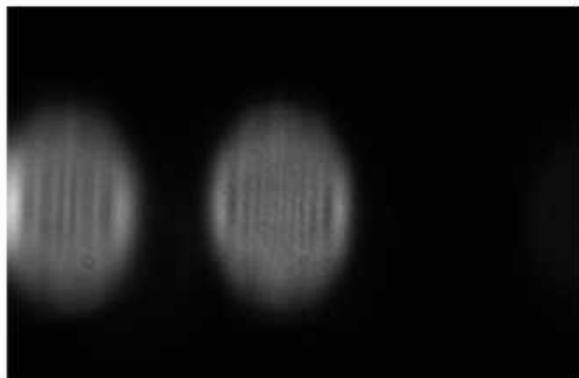


图6 原始未编码图像

Fig. 6 Original uncoded image

调节光阑,使得输入到成像装置中的光斑直径减小(相当于只用了编码图形的一部分),检测图像水平方向的偏移390 pixel,垂直方面的偏移较小可以忽略。两色激光经660 pixel×660 pixel的模板编码后、再经分光,此时大小变为1 050 pixel×660 pixel,即探测器上检测的图像范围大小为1 050 pixel×660 pixel,编码检测图像如图7所示。



图7 编码检测图像

Fig. 7 Coded detection image

采用传统迭代方法ADMM对图7进行多光谱重建,得到8个波段的重建结果,如图8所示。重建结果中可以明显看到,在635 nm与405 nm处光强度最大,说明2种波长的激光光斑图像可以准确地分开,且激光光谱位置较准确。

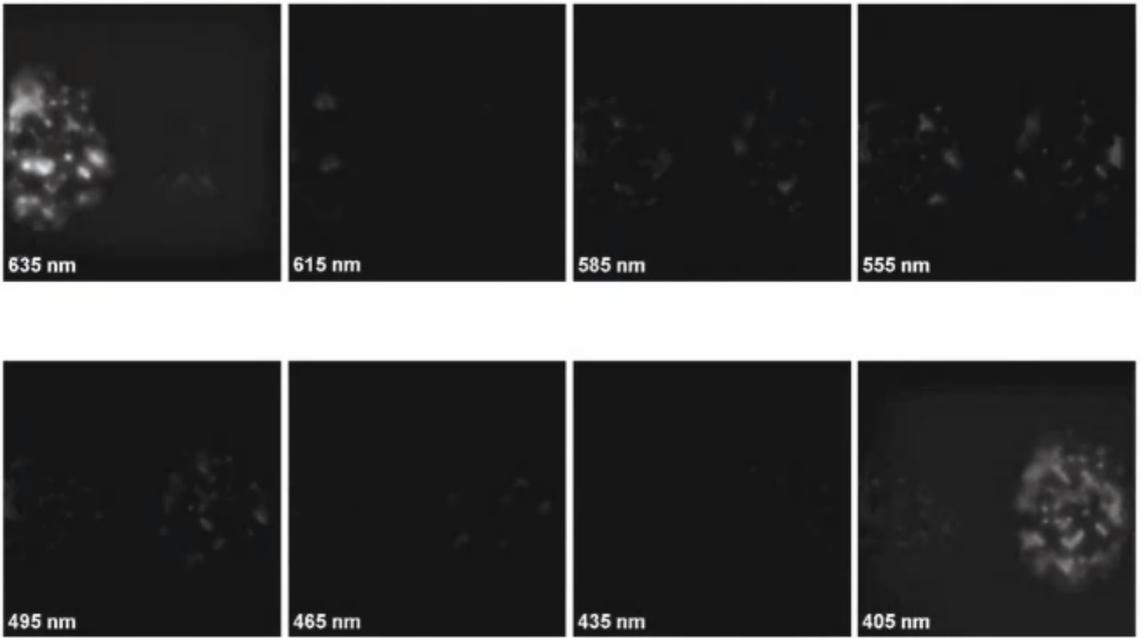


图 8 重建检测图像

Fig. 8 Reconstruction of detection images

## 5 结束语

本文搭建了单光栅数字微镜编码成像系统,系统中仅包含一个透射光栅,相较于双光栅系统更加简洁。数字微镜作为该成像系统的重要组件,编码模板的设计上更加简单灵活。使用 ADMM 重建算法对光学系统采集的图像进行重建,结果显示,采集到的两波段激光图像能够很好地被分开。

## 参考文献

- [1] BJORGAN A, RANDEBERG L L. Towards real-time medical diagnostics using hyperspectral imaging technology [C]// European Conference on Biomedical Optics. Munich, Germany: Optica Publishing Group, 2015: 953712.
- [2] 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.
- [3] WEHLBURG C M, WEHLBURG J C, GENTRY S M, et al. Optimization and characterization of an imaging Hadamard spectrometer[C]//Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VII. Orlando, USA: SPIE, 2001, 4381: 506-515.
- [4] SMITH M W, SMITH J L, TORRINGTON G K, et al. Theoretical description and numerical simulations of a simplified Hadamard transform imaging spectrometer[C]//Imaging Spectrometry VIII. Seattle, Washington: SPIE, 2002, 4816: 372-380.
- [5] PAJO V C, GOLDSTEIN N, FOX M J, et al. Adaptive spectral imager for space-based sensing [C]//Infrared Technology and Applications XXXII. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2006, 6206: 325-332.
- [6] PLOVE S, GRAFF D L. Full-frame programmable spectral filters based on micromirror arrays [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(1): 011108.
- [7] RUEDA H, ARGUELLO H, ARCE G R. DMD-based implementation of patterned optical filter arrays for compressive spectral imaging[J]. JOSA A, 2015, 32(1): 80-89.
- [8] MENG Z, QIAO M, MA J, et al. Snapshot multispectral endomicroscopy[J]. Optics Letters, 2020, 45(14): 3897-3900.
- [9] 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.