

高分辨光学压缩光谱成像方法与实验研究

陈宇恒^{1,2,3,4} 周建康^{1,2,3,4} 陈新华^{1,2,3,4} 季轶群^{1,2,3,4} 沈为民^{1,2,3,4}

¹ 苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006
² 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006
³ 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006
⁴ 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 光学压缩光谱成像是融合了压缩感知原理的新型光谱成像技术,具有降低数据采集量、能对景物实施凝视拍摄、提高信噪比等优点。考虑到采样质量对最终成像质量的影响,在现有成像系统中均采用采样间隔与调制间隔匹配的方法,但此方法降低了系统的采样率,损耗了原始光谱分辨率。针对上述成像方法缺陷,克服采样间隔和调制间隔匹配的成像系统设计要,所设计实验装置使其光谱分辨率理论值提高至原先方法的 3 倍以上,并对最优化方法进行改进,在正则化函数中增加表征数据光谱维连续性的变差项,增强数据重建可控性及可靠性。实验结果表明,新方法下实验装置的光谱维通道数提升,各波段图像和特定位置光谱曲线能精确反映目标物的空间特性和光谱特性。

关键词 光谱成像;压缩感知;最优化方法;采样率;光谱分辨率

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0111005

Research on Principle and Experimentation of High-Resolution Optical Compressive Spectral Imaging

Chen Yuheng^{1,2,3,4} Zhou Jiankang^{1,2,3,4} Chen Xinhua^{1,2,3,4}

Ji Yiqun^{1,2,3,4} Shen Weimin^{1,2,3,4}

¹ Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University,
Suzhou, Jiangsu 215006, China

² Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province,
Suzhou, Jiangsu 215006, China

³ Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215006, China

⁴ Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China,
Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract Optical compressive spectral imaging method is a novel spectral imaging technique that draws in the inspiration of compressed sensing, which has the features such as reducing acquisition data amount, realizing snapshot imaging for certain scenery, increasing signal to noise ratio and so on. Considering the influence of the sampling quality on the ultimate imaging quality, matching the sampling interval with the modulation interval in the former reported imaging system, while the depressed sampling rate leads to the loss on the original spectral resolution. To overcome that technical defect, the demand for the matching between sampling interval and modulation interval is disposed and the spectral resolution of the designed experimental device increases more than threefold comparing with that of the previous method. Optimization method is improved and a variation term that represents the spectral-dimension continuousness of the data is added to the regularization function, which enhances the controllability and reliability for the data reconstruction. Result proves that the spectral channel number increases

收稿日期: 2013-08-09; **收到修改稿日期:** 2013-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61205188)、高等学校博士学科点专项科研基金(20113201110016)

作者简介: 陈宇恒(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事光谱成像、光电信息处理等方面的研究。

E-mail: yuhengchen@suda.edu.cn

to a great extent effectively, the average spectral resolution reaches 1 nm, and the spectral images and curves are able to perform the spatial and spectral character of the target accurately.

Key words spectral imaging; compressed sensing; optimization method; sampling rate; spectral resolution

OCIS codes 110.4234; 100.3190; 070.6120

1 引 言

光谱成像具有“图谱合一”的特点,它能同时获得景物的辐照信息和光谱信息。随着光谱成像空间分辨率、光谱分辨率等关键指标的提升,传统扫描式光谱成像面临的数据采集量(率)过大问题日益严峻,无法对大范围景物实施瞬时拍摄,所以难以满足对遥感动态目标、生物瞬态现象的光谱成像应用需求。自20世纪末起,多种新型光学压缩光谱成像方法应运而生^[1-3]。新型光学压缩光谱成像方法汲取了压缩感知的灵感,在成像过程中通过光学元件实现光谱数据的并行压缩,继而通过压缩图像重建景物的三维数据立方体。此类光谱成像方法降低了数据采集量,有效提高了拍摄视场、信噪比等性能参数,在目标探测、机器视觉、生物成像等方面展现出了一定的应用潜力^[4-5]。

作为新型光学压缩光谱成像的代表方法之一,空间编码光学压缩光谱成像采用空间光调制及色散器件等在成像过程中直接实现景物光谱数据的降维与压缩,继而依据采集的压缩图像重建景物的数据立方体^[2,6]。自诞生以来,提高此类光谱成像技术的性能指标,提升其应用能力,一直是相关研究的重点。2008年,Gehm等^[7]通过光学系统的优化设计在此类技术的显微成像应用中有效提高了光通量。2009年,Wagadarikar等^[8]将此类成像系统的帧频提升至30 frame/s,实现了实时成像。2012年,本课题组报道了通过改变调制编码调制方法提高重建数据保真度的研究成果^[9]。

光谱维通道数是决定光谱成像光谱维信息量并影响其目标识别能力的主要性能参数。在光学器件

和探测器的能量响应性能满足光谱范围要求的条件下,空间编码光学压缩光谱成像系统光谱维通道数的理论最大值,可由色散方向维空间光调制器的调制单元数和探测器的像元数决定^[6]。在国外已报道的成像系统中^[2,6,8],为降低调制单元尺寸不一致而导致的离散采样质量下降及相应的成像质量衰减,均采用像元合并的采样方法,以使焦平面采样间隔与调制编码单元尺寸匹配。然而,像元在色散方向的合并增大了采样间隔,降低了采样率,色散方向维成像像元数的下降直接导致了光谱维通道数的降低及光谱分辨率的下降。在空间编码光学压缩光谱成像原理和数据重建方法的研究基础上,本文在成像系统设计过程中消除采样、调制单元尺寸匹配的技术约束,采用增加采样率和优化数据重建算法的方法,在保证重建数据保真度的前提下,提高光谱维通道数及光谱分辨率等关键性能指标,为提升其光谱信息识别筛选能力提供了方法与实验研究基础。

2 空间编码光学压缩光谱成像方法

2.1 成像原理

图1为空间编码光学压缩光谱成像方法成像系统原理示意图,其成像过程为:1)景物由物镜聚焦至编码调制器件的调制面上;2)调制后的光信号经准直镜准直;3)投射至色散器件;4)分光后的光信号由聚焦镜头聚焦至探测器焦平面上;5)焦平面接收的是一维空间信号和一维光谱信号调制混叠后的二维压缩图像信号。基于上述成像链路,探测器采集的光信号可表示为^[6]

$$g_{mn} = \iint_{\lambda y x} f_0[x + \alpha(\lambda - \lambda_c), y; \lambda] \cdot T[x + \alpha(\lambda - \lambda_c), y] \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta} - m, \frac{y}{\Delta} - n\right) dx dy d\lambda + \omega_{mn}, \quad (1)$$

式中 g 为焦平面探测的压缩图像灰度值, f_0 为聚焦至调制面的光信号, T 为调制器件的等效调制函数, ω 为探测器噪声, α 为色散器件的线色散系数, λ 为波长值, λ_c 为色散效应参考波长值, Δ 为焦平面像元尺寸, m 为像元横坐标, n 为像元纵坐标。

空间光调制为一定数量矩形调制单元阵列共同

作用的离散过程,设调制单元尺寸为 Γ ,其上坐标 (n', m') 的调制单元调制率为 $t_{n'm'}$,则空间光调制器件的调制函数可表示为

$$T(x, y) = \sum_{m', n'} t_{n'm'} \text{rect}\left(\frac{x}{\Gamma} - m', \frac{y}{\Gamma} - n'\right), \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,焦平面采集的离散信号最终可表示为(3)式

$$g_{mn} = \sum_{m',n'} t_{m',n'} \iiint_{\lambda, y, x} \text{rect}\left[\frac{x + \alpha(\lambda - \lambda_c)}{\Gamma} - m', \frac{y}{\Gamma} - n'\right] \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta} - m, \frac{y}{\Delta} - n\right) f_0[x + \alpha(\lambda - \lambda_c), y; \lambda] dx dy d\lambda + \omega_{mn}, \quad (3)$$

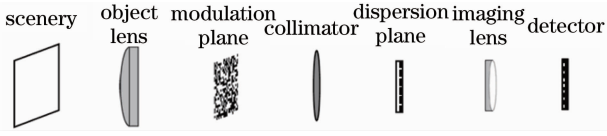


图1 空间编码光学压缩光谱成像原理示意图
Fig.1 Schematic of spatial coding compressive spectral imaging system

式中的两个矩形函数分别表征了成像系统中空间光调制器件和探测器的调制与采样过程。在先前报道中,为减小离散采样和调制单元尺寸不一致而造成的成像质量衰减,研究者在相关系统的设计中,均使调制间隔(Γ)与采样间隔(Δ)保持匹配。早期报道中,准直镜焦距与聚焦镜头焦距相同,调制编码单元经其构成的 $4f$ 系统后在焦平面上成等大像,在探测器像元尺寸已知的条件下,将编码掩模板调制单元的尺寸设置成探测器像元尺寸的整数倍,再使探测器实施相应倍率的像元联合,即可实现编码调制单元尺寸与实际探测像元尺寸的配准^[2,6]。随着空间光调制器在此类成像系统中的广泛使用,其调制单元尺寸通常不满足恰为所选探测器像元尺寸整数倍的要求。此情况下可随意选择空间光调制器,继而相应设定准直镜头焦距与聚焦镜头焦距的比率,通过改变 $4f$ 系统的成像放大率实现调制间隔与采样间隔的配准^[10]。在上述采样要求及系统设计条件下,探测器均采用像元合并的方式实施图像采集。像元在色散方向维的合并,使等效像元数量降低,继而减小了成像系统的光谱通道数。为此,克服调制间隔与采样间隔必须匹配的系统设计要求,基于增加采样率的方法,提高成像系统光谱维通道数及光谱分辨率,新方法下重建数据的保真度可通过改进的数据重建方法得以保证。

2.2 改进型数据重建方法

将 2.1 节所述成像过程中光信号的正向传输效应记为 φ , (3) 式可简化为

$$g = \varphi \cdot f + \omega. \quad (4)$$

据(4)式可知,空间编码光学压缩光谱成像数据重建问题为:在系统正向传输模型 φ 、系统噪声 ω 与系统输出 g 已知的条件下,求解系统输入 f 。若将矩阵 g 、 f 、 ω 全部表示为线性向量的形式, φ 可表征为二维矩阵,其行数小于列数,对应的线性方程欠定。

由此可知,经空间编码光学压缩光谱成像所得压缩图像重建景物三维数据立方体的问题实质,是求解欠定问题。当前,梯度投影稀疏重建法(GPSR)、两步阈值迭代法(TwIST)和嵌套估计法(NeAREst)等是被应用于新型光学压缩光谱成像数据重建的主要方法^[11]。其中,两步阈值迭代法通过构造正则化条件解决非约束条件下凸函数欠定问题,具有正则化函数构建简单、矩阵计算量小、对最优化变量尺寸无限制等优点^[12]。基于两步阈值迭代法,(4)式所示成像过程对应的数据重建最优化问题在先前报道中均被归纳为

$$\hat{f}(\gamma, \Phi) = \left[\arg \min_f \left\{ \frac{1}{2} \|g - \varphi \cdot f\|_2^2 + \Phi(f) \right\} \right], \quad (5)$$

式中,二阶范数项表征最优化解与真实值的逼近程度,正则化函数项表征最优化值的稀疏程度。现有报道所采用的正则化函数均为全变差(TV)函数^[6,11]

$$\Phi(f) = \gamma \cdot \sum_k \sum_{i,j} \sqrt{\Phi_1^2 + \Phi_2^2}, \quad (6)$$

式中 $\Phi_1 = f(i+1, j, k) - f(i, j, k)$, $\Phi_2 = f(i, j+1, k) - f(i, j, k)$, 该两项用以表征重建数据在二维空间方向的连续性, γ 为其权重因子。本文选用的成像方法提高了色散维方向的采样率及数据量,为保证重建数据质量,此处增加表征重建数据一维光谱方向连续性的变差项,相应地,数据重建问题可表示为

$$\hat{f}(\gamma, \Phi) = \left[\arg \min_f \left\{ \frac{1}{2} \|g - \varphi \cdot f\|_2^2 + \Phi(f) + \Theta(f) \right\} \right], \quad (7)$$

(7) 式中新增变差项的形式如下

$$\Theta(f) = \eta \cdot \sum_k \sum_{i,j} \sqrt{\Phi_3^2}, \quad (8)$$

式中 $\Phi_3 = f(i, j, k+1) - f(i, j, k)$, η 为其权重因子。完成上述最优化问题的拓展之后,重建数据光谱维的连续性亦可通过新增的变差项得以控制,正则化函数被赋予的实际物理意义更为完善,相应的调谐正则化函数中的两个权重因子(γ, η), 可更为灵活地优化数据重建问题,进而有效地保证数据保真度及质量。

3 成像装置的设计与实现

为开展成像实验,设计满足图 1 所示成像原理的空间编码光学压缩光谱成像装置。所选物镜焦距为 23 mm, F 数在 1.4~11 范围内连续可调(实际使用中设置为 2.3),该透镜各视场下的调制传递函数高于 0.6,能保证较高的成像质量。选用编码掩模板作为编码调制器件,先前的研究经验表明,调制单元尺寸在探测器像元尺寸的 2~3 倍范围内,利于兼顾重建图像的空间分辨率及数据保真度^[6],为此将投射型掩模板调制单元尺寸设计为探测器像元尺寸的 3 倍(18 μm)。参考所选物镜视场角,将编码掩模板调制单元个数设定为 32×32 。编码掩模板基于 32 阶二元化随机编码图案印制,图 2 为其实物照片。实验装置选取等边棱镜作为色散器件,其各边长度均为 45 mm,棱镜选用 MgF_2 优化镀膜设计,有效提高了其光能利用率。准直镜和聚焦镜头选取焦距为 16 mm 的透镜工业镜头,实验中将两透镜的 F 数设为 1.6,这在适当扩大系统焦深的同时保证了两透镜的通光口径与物镜通光口径吻合。探测器选用 6 μm 像元 CMOS 相机,其像元分辨率为 $752 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,能满足实验装置空间维像元数和光谱维通道数的指标要求,相机 8 位动态范围和连续可调的曝光时间满足实验装置对光通量的调节要求。设定实验装置的工作波段为 540~640 nm,为此在光路中增加中心波长 600 nm、半峰全宽为 80 nm 的滤光片。此外,构建在空间维和光谱维均具有稀疏特性的目标物。目标物为一平板(如图 3 所示),板上共印有 9 个通光圆孔,其中,中央圆孔的直径为 4 mm,边缘圆孔的直径为 3 mm。成像时,使用 10 mW 功率汞灯和 5 mW 功率氦氖激光器并加以扩束镜对目标物进行照明,为保证照明的均匀性,在光源和目标物之间另放置磨砂玻璃。综上,目标物的空间特性为多个稀疏圆孔,其光谱特性即为照明光源特性,在实验装置的工作波段内,为 632.8、546.1 nm 处两个单峰和 577.0 nm、579.1 nm 处的双峰。

依据上述实验装置设计与器件实现方法,搭建成像实验装置,实验装置如图 4 所示(未含目标物、照明光源和滤光片)。利用光学设计软件建立实验装置对应的成像系统,输入各器件相应参数,分别计算采样间隔与调制间隔匹配与非匹配条件下成像装置的光谱维通道数。图 5 显示了 540~640 nm 工作波段内的计算结果,去除采样间隔与调制间隔的匹配要求,采样率得以提高,此条件下实验装置的光谱维通道数为 100[图 5(a)]。若使探测器采样间隔与

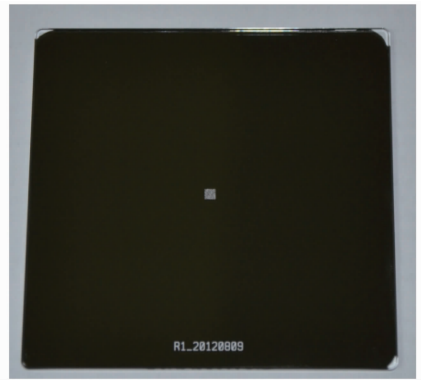


图 2 基于随机编码图案的编码掩模板
Fig. 2 Random pattern coding mask

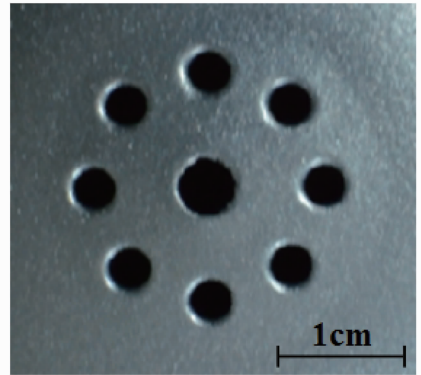


图 3 成像实验目标物

Fig. 3 Imaging experiment target

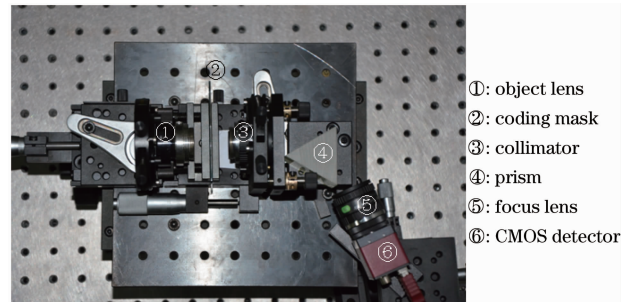


图 4 实验装置实物图

Fig. 4 Photograph of the experimental setup

掩模板调制单元尺寸实现匹配,需对探测器像元实施 3:1 的合并,此时光谱维通道数仅为 32[图 5(b)]。

4 实验结果与讨论

编码掩模板的调制编码矩阵是重建三维数据立方体所需的必要输入,编码掩模板的调制图案依据二元化随机编码矩阵印制,受材料及加工工艺限制,其上各单元的实际调制率难以与预设的理论值完全吻合,为此采集窄带照明条件下编码掩模板经 $4f$ 系统在焦平面上所成的图像,以此作为数据重建的输入,这可有效降低数据重建误差。用汞灯作为光

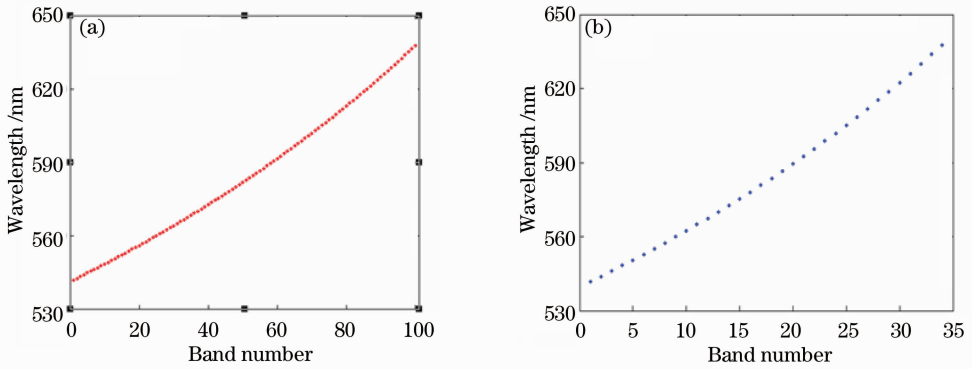


图 5 不同采样率下各波段中心波长理论值

Fig. 5 Central wavelength value of every band under different sampling rate

源,在探测器前放置中心波长 550 nm、半峰全宽为 10 nm 的窄带滤光片,获得汞灯在 546.1 nm 处的窄带照明,设定 CMOS 探测器的积分时间为 20 ms,采集图 6 所示的编码图案图像,图像尺寸为 98 pixel×98 pixel。



图 6 窄带照明下的调制编码图案图像

Fig. 6 Image of the modulation coding pattern under narrow-band illumination

图 7 为目标物经实验装置所成宽带照明条件下的压缩图像,图像尺寸为 98 pixel×197 pixel。据图可知,编码调制图案清晰地存在于目标物的各个透光圆孔内,目标各波段的图像在色散方向呈现水平分布且彼此具有一定的重叠。由图像尺寸推算可得,此压缩图像为目标物 100 个波段多光谱图像的

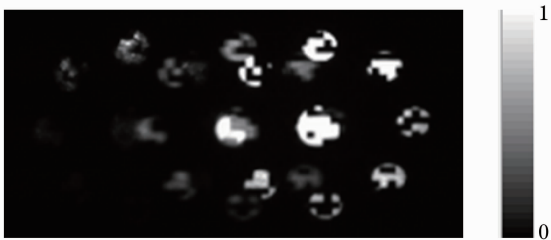


图 7 目标物多光谱光学压缩图像

Fig. 7 Multi-spectroptical compressive image of the target

叠加结果。

将图 6、图 7 对应的图像数据扣除探测器背景噪声,输入至基于本文 2.2 节所述数据重建方法的原理编写的数据重建模块,可完成目标物三维数据立方体的重建。经统计,重建尺寸为 98×98×100 的三维数据立方体,平均耗时 98.5 s。图 8 显示了从重建数据中提取的三个波段的图像,其中,第 7 波段图像[图 8(a)]及第 44 波段图像[图 8(b)]中的圆孔轮廓较为清晰,由于处于边缘视场且照明条件受限,第 92 波段图像[图 8(c)]中圆孔图形的清晰度有所下降。由于单帧成像的信号采样数未及压缩感知对理想重建的采样要求,重建数据具有一定程度的失真,这在图像中表现为一定的“鬼影”^[6,8,10],通过后续开展多帧拍摄实验,有望改善成像缺陷。

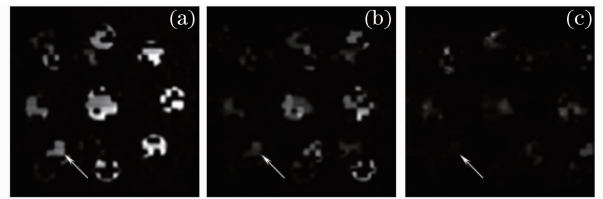


图 8 目标物特定波段重建图像

Fig. 8 Reconstructed spectral images for the target

图 9 显示了空间坐标(80,30)位置(图 8 箭头所指位置)的光谱曲线,图例横坐标为波长值,纵坐标为经归一化后的光信号强度。观察曲线可知,第 7 波段对应汞灯 546.1 nm 的单峰,第 44 波段位于汞灯 577.0 nm、579.1 nm 双峰内,第 92 波段对应氦氖激光器 632.8 nm 处的单峰。汞灯 546.1 nm 的单峰处的发光强度最高,光谱曲线在此出现最高位置。由于压缩成像数据重建的偏差难以避免,汞灯双峰中的低值点未能得到理想复原,这使重建曲线在此区间表现为一个具有一定宽度的峰脊。氦氖激光器的功率较汞灯低,故光谱曲线在 632.8 nm 波

段处的峰高最低。这一波段的图像接近压缩图像的边缘,图像质量有所衰减,这使重建数据保真度下降,故而此峰的锐度不及图中最左侧峰。综上,在实验装置设计的 540~640 nm 工作波段,多个照明光源的光谱特性在经重建的光谱曲线中均得到有效反映。

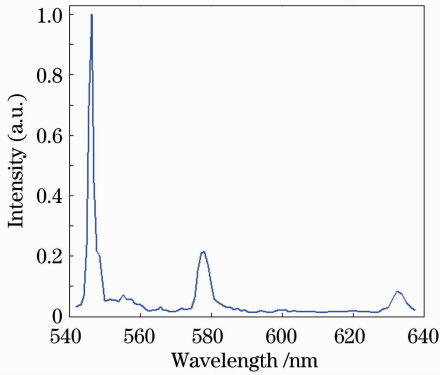


图 9 目标物特定空间位置的光谱曲线

Fig. 9 Spectral curves for certain position of the target

5 结 论

在空间编码光学压缩光谱成像原理和数据重建方法的研究基础上,克服现有成像方法中由于调制间隔和采样间隔匹配对光谱分辨率的损耗,采用增强采样率和优化数据重建算法的方法有效提高了成像系统的空间维通道数和光谱分辨率。设计了空间编码光学压缩光谱成像实验装置,使其光谱维通道数增至原先方法的 3 倍以上。采用搭建的实验装置对预设目标物进行成像实验,利用优化的两步阈值迭代算法经由压缩图像数据重建目标物三维数据立方体,重建数据保真度良好,各波段图像与光谱曲线能精确反映目标物的几何和光谱特性。

参 考 文 献

- 1 M R Descour, C E Volin, E L Dereniak, *et al.*. Demonstration of a high-speed nonscanning imaging spectrometer [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(6): 1271–1273.
- 2 M E Gehm, R John, D J Brady, *et al.*. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J]. *Opt Express*, 2007, 15(21): 1198–1202.
- 3 Liang Gao, Robert T Kester, Tomasz S Tkaczyk. Compact image slicing spectrometer (ISS) for hyperspectral fluorescence microscopy [J]. *Opt Express*, 2009, 17(15): 12293–12308.
- 4 Christy F Cull, Kerkil Choi, David J Brady. Identification of fluorescent beads using a coded aperture snapshot spectral imager [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(10): B59–B70.
- 5 Bridget K Ford, Michael R Descour, Ronald M Lynch. Large-image-format computed tomography imaging spectrometer for fluorescence microscopy [J]. *Opt Express*, 2001, 9(9): 444–453.
- 6 A Wagadarikar, R John, R Willett, *et al.*. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(10): B44–B51.
- 7 M E Gehm, M S Kim, C Fernandez, *et al.*. High-throughput, multiplexed pushbroom hyperspectral microscopy [J]. *Opt Express*, 2008, 16(15): 11032–11043.
- 8 Ashwin A Wagadarikar, Nikos P Pitsianis, Xiaobai Sun, *et al.*. Video rate spectral imaging using a coded aperture snapshot spectral imager [J]. *Opt Express*, 2009, 17(8): 6368–6388.
- 9 Chen Yuheng, Chen Xinhua, Zhou Jiankang, *et al.*. Spatial coding modulation effect of compressive spectral imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1015001.
陈宇恒, 陈新华, 周建康, 等. 压缩光谱成像空间编码调制效应的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1015001.
- 10 Yuehao Wu, Iftekhar O Mirza, Gonzalo R Arce, *et al.*. Development of a digital-micromirror-device-based multishot snapshot spectral imaging system [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2692–2694.
- 11 Ashwin A Wagadarikar, Nikos P Pitsianis, Xiaobai Sun. Spectral image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers [C]. *SPIE*, 2008, 7076: 707602.
- 12 J Bioucas-Dias, M Figueiredo. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding for image restoration [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2007, 16(12): 2992–3004.

栏目编辑: 李志兰