

# 对光学压缩光谱成像数据保真度的研究

陈宇恒<sup>1,2,3</sup> 季轶群<sup>1,2,3</sup> 周建康<sup>1,2,3</sup> 陈新华<sup>1,2,3</sup> 沈为民<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 苏州大学物理与光电·能源学部, 江苏 苏州 215006  
<sup>2</sup> 苏州大学江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006  
<sup>3</sup> 苏州大学教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

**摘要** 光学压缩光谱成像方法通过拍摄所得的压缩图像重建景物的三维数据立方体,具有降低数据采集量、能对景物实施凝视拍摄以及提高成像信噪比等优点。受压缩成像方法的限制,由单帧压缩图像重建数据的保真度有限,限制了压缩光谱成像的图像质量和应用发展。基于压缩感知理论,拓展空间编码光学压缩光谱成像物理模型,在变编码空间光调制作用下实施多帧拍摄,经由多帧压缩图像采用最优化算法高保真的重建数据立方体。以 AVIRIS 成像数据构建模拟场景,开展多帧拍摄空间编码光学压缩光谱成像仿真,采用全波段图像均方根误差定量评价重建数据保真度。实验结果表明,多帧拍摄成像重建数据的保真度提高,图像清晰度提升,光谱曲线的偏差减小。

**关键词** 成像系统;压缩感知;空间编码;数据重建;多帧拍摄;图像质量

**中图分类号** TH744 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s109001

## Research on the Data Fidelity of Optical Compressive Spectral Imaging

Chen Yuheng<sup>1,2,3</sup> Ji Yiqun<sup>1,2,3</sup> Zhou Jiankang<sup>1,2,3</sup>

Chen Xinhua<sup>1,2,3</sup> Shen Weimin<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

<sup>3</sup> Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** The optical compressive spectral imaging method reconstructs the spectral data cube of the shooting scenery from acquired compressive image data, which has the features such as reducing acquisition data amount, realizing snapshot imaging for certain field of view, increasing signal-to-noise ratio and so on. Due to the mechanism restriction of compressive imaging, the reconstructed spectral data from the single compressive image suffer from fidelity attenuation, which leads to the decrease of the image quality and application ability. Based on the compressive sensing theory, the spatial coding optical compressive spectral imaging system model is developed and multi-frame shooting under variable spatial light modulation conditions is carried out so that high-fidelity cubic data is reconstructed from a certain number of compressive images with the support of optimization method. The AVIRIS imaging data is used to simulate the scenery so that the multi-frame spatial coding optical compressive spectral imaging simulation is carried out and the whole-spectral-region root-mean-square-error is adopted to evaluate the data fidelity quantitatively. The experimental results indicate that with the multi-frame shooting method the data fidelity improves, the imaging quality increases and the spectral curve deviation drops.

**Key words** imaging systems; compressed sensing; spatial coding; data reconstruction; multi-frame shoot; image quality

**OCIS codes** 110.4234; 100.3190; 070.6120

**收稿日期**: 2013-10-20; **收到修改稿日期**: 2013-11-13

**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)、中国地质调查局工作项目(1212011120227)

**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

# 1 引 言

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,其无法对大范围景物实施瞬时拍摄的技术局限难以满足对动态目标、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<sup>[1-3]</sup>。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,同时有效提高了拍摄视场、信噪比等参数,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前景<sup>[4-5]</sup>。

成像数据的高保真度是基于目标光谱特性和空间特性实现其精确识别等应用需求的基本条件。光学压缩光谱成像尽管已展现出一定的应用能力,其成像性能距离实际应用需求和工程化要求仍有差距。当前,经由压缩图像重建的景物数据立方体较实际值存有偏差,保真度有限的图谱信息无法精确反映拍摄景物的光谱特性与几何特征,这一性能缺陷降低了光谱成像后续目标识别、组分判定等应用的可靠性,限制了光学压缩光谱成像技术应用能力的提升。基于上述现状,研究适用于光学压缩光谱成像数据保真度的评价方法,研究多帧拍摄方法对

数据保真度的提高效应,具有实用价值与现实意义。

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拍摄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数据立方体。本文拓展空间编码光学压缩光谱成像物理模型,研究多帧拍摄空间编码光学压缩光谱成像数据重建与保真度评价方法,基于 AVIRIS 成像数据构建模拟场景并开展仿真实验研究,综合采用计算统计指标和对重建图像及光谱曲线的目视判读方法,精确评价重建数据保真度的变化情况。

## 2 空间编码光学压缩光谱成像方法

### 2.1 成像原理及其系统模型拓展

空间编码光学压缩光谱成像方法是光学压缩光谱成像技术中具有代表性方法之一<sup>[2,6]</sup>,图 1 为成像系统原理示意图,其成像过程为:景物由物方镜头聚焦至空间编码调制器件的调制面上,经空间调制的光信号经准直镜准直,投射至色散器件,分光后的光信号由成像透镜聚焦至探测器焦平面上,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<sup>[6]</sup>为

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

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,  $T$  为调制器件等效调制函数,  $\omega$  为探测器噪声,  $\alpha$  为色散器件的线色散系数,  $\lambda$  为波

长值,  $\lambda_c$  为色散效应参考波长值,  $\Delta$  为焦平面像素尺寸,  $m$  为像素横坐标,  $n$  为像素纵坐标。

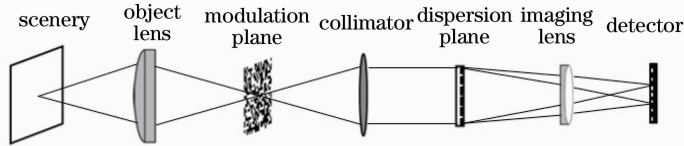


图 1 空间编码光学压缩光谱成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of spatial coding compressive spectral imaging system

(1)式描述了空间编码光学压缩光谱成像的理论模型,若将上述成像过程中光信号的正向传输效应记为  $H$ , (1)式可简化为

$$g = H \cdot f + \omega. \quad (2)$$

依据(2)式可改由信息变换角度描述成像过程,进而明晰成像过程中造成数据失真的原因。景物原始三

维数据立方体  $f$ , 经由光信号正向传输过程  $H$  及噪声  $\omega$  的累积, 变换为探测器接收的二维压缩图像数据  $g$ 。由压缩图像数据  $g$  重建三维数据立方体  $f$  的实质是在一定约束条件下求解逆问题。据采样定理, 在香农-奈奎斯特定律规定的采样率下采集图像, 经上述欠定问题求解而重建的成像数据必然存有失真。

为解决由压缩成像有限采样导致的数据失真问题,需提高采样率,为此增加压缩图像拍摄次数。具体的方法为在不同的空间光编码调制效应下实施多次拍摄,获得一定帧数的压缩图像,以此作为数据重构的输入,采用特定的最优化算法重建景物的原始数据立方体。上述多帧拍摄光学压缩光谱成像方法是单帧拍摄光学压缩光谱成像的拓展,其物理模型可在(2)式基础上拓展为<sup>[7]</sup>

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_N \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中各参数的含义与(2)式中一致, $N$ 为拍摄帧数。将(3)式与(2)式比较可知,原先的单映射问题被拓展为多映射问题。依据压缩传感理论,在映射条件彼此非相关的条件下,当采样数达到特定值时,能由压缩数据几无失真的重建原始数据<sup>[8]</sup>。

## 2.2 数据重建方法

依据(3)式,多帧拍摄空间编码光学压缩光谱成像数据重建问题为:在 $N$ 组系统正向传输模型 $H$ 、系统噪声 $\omega$ 与系统输出 $g$ 已知的条件下,求解系统

$$\Phi_{TV}(f) = \sum_k \sum_{i,j} \sqrt{[(f(i+1,j,k) - f(i,j,k))]^2 + [f(i,j+1,k) - f(i,j,k)]^2}, \quad (5)$$

式中下标 $i,j$ 均为空间坐标, $k$ 为光谱维通道编号。

## 2.3 数据保真度评价方法

目视观察成像所得各波段图像及特定空间位置的光谱曲线,将其与实际图像与光谱曲线作对比,能定性判别数据偏差。然而,仅凭目视判读的方法,不足以精确评价光学压缩光谱成像数据保真度这一重要性能。当前,对光谱成像数据保真度的客观评价方法主要分为两类,第一类方法侧重于空间信息的评价,这类方法通过图像计算仪器的空间分辨率、传递函数等成像指标,另一类方法着重于光谱信息保真度的评估,一般基于光谱曲线进行参数计算和误差分析。针对光谱成像“图谱合一”的特点,为定量评价光学压缩光谱成像数据保真度,采用全波段图像均方根误差(RMSE)这一客观统计参数,其计算式为

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^C \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{i,j,k} - \bar{f}_{i,j,k})^2}{k \cdot i \cdot j}}, \quad (6)$$

式中 $f$ 为重建图像特定空间位置特定波段的灰度值, $\bar{f}$ 为特定空间位置特定波段的理论灰度值, $M,N$

输入 $f$ 。在其诞生初期,光学压缩光谱成像技术选用Richardson-Lucy这类最大期望法求解数据重建所涉及的最优化问题<sup>[9]</sup>。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)等被应用于新型光学压缩光谱成像数据重建的主要方法<sup>[10]</sup>。

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定等优点<sup>[11]</sup>。此方法在包含 $l_1$ 项的目标函数中添加了全变差形式的正则化函数,以此控制解算结果的稀疏性。基于两步阈值迭代法,(3)式所示成像过程对应的数据重建最优化问题可被归纳为

$$\hat{f}_{\text{TwIST}}(\gamma, \Phi) = \arg \min_f \left\{ \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2 + \gamma \cdot \Phi_{TV}(f) \right\}, \quad (4)$$

式中 $\Phi$ 为正则化函数, $\gamma$ 为其调节因子,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解值的稀疏程度,选取全变差(TV)函数作为正则化函数,其表达式为

为二维空间范围极值, $C$ 为总波段数。由(6)式可知,这一参数的统计对象涵盖了完整的三维数据立方体,兼顾成像数据“空间保真度”及“光谱保真度”的统计。在实际成像中,全波段图像均方根误差的绝对值与成像数据量化位数(动态范围)相关并受其制约。为去除数据量化位数对统计参数量级的影响,在参数计算中采用经归一化后的像素灰度值,进而获得经归一化的全波段图像均方根误差,以此作为数据保真度的评价指标。

## 3 成像实验

为开展仿真成像实验,首先基于AVIRIS成像数据构建多光谱仿真成像场景。仿真场景选取了AVIRIS可见光波段特定空间范围的成像数据,场景参数如表1所示。为满足目视判别要求,选取第20波段图像及两个特定空间位置的光谱曲线作为判别依据,图2为仿真成像场景第20波段的原始图像,场景中两个特定空间位置用字符给予了标注,其中,A点对应的地物类型为河流,B点对应的地物类

型为田地,两处空间位置的原始光谱曲线将结合仿真成像的光谱曲线予以一并显示。

表 1 基于 AVIRIS 成像数据构建的仿真成像场景参数  
Table 1 Parameters of the simulating imaging scenery constructed with AVIRIS data

Parameter	Value
Spatial size	256 pixel×224 pixel
Band number	41
Band range	400~780 nm
Dynamic range	0~255
Target feature	river: A (60,55) field: B (59,194)

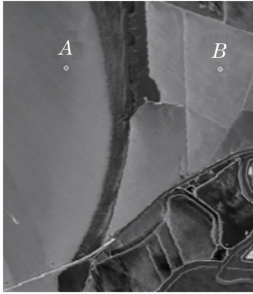


图 2 仿真成像场景原始图像(第 20 波段)

Fig. 2 Original image of simulating imaging scenery (the 20th band)

依据仿真成像场景空间尺寸,选用 256 阶 S 编码矩阵图案实施仿真成像所需的变编码空间光调制。图 3 为变编码调制矩阵的初始化形态,图案中

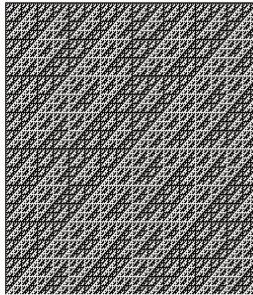


图 3 变编码调制矩阵初始化形态

Fig. 3 Initial form for the variable coding modulation matrix

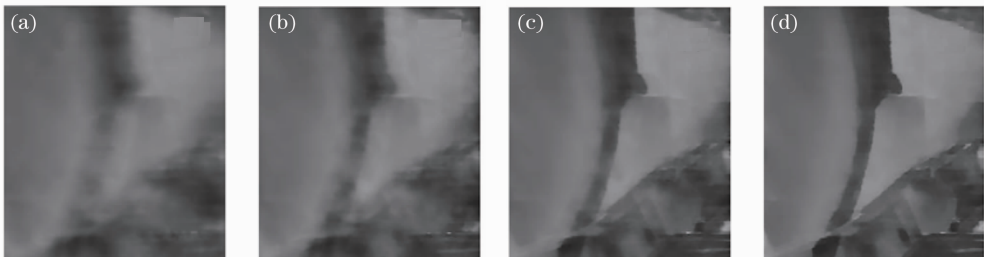


图 5 多帧拍摄条件下的谱图结果。(a) 帧数为 1; (b) 帧数为 5; (c) 帧数为 9; (d) 帧数为 13

Fig. 5 Spectral images under multi-shooting conditions. (a) 1-shooting; (b) 5-shooting; (c) 9-shooting; (d) 13-shooting

透光单元(白色单元)对应 S 编码矩阵中数值为 1 的单元,挡光单元(黑色单元)对应 S 编码矩阵中的 0 单元。在初始编码矩阵基础之上,将编码矩阵循环下移两行并右移一列,即可生成下一帧图像拍摄所需的新编码矩阵,以此类推生成多帧拍摄所需的所有调制编码矩阵。

仿真成像模拟不同拍摄帧数时的光学压缩光谱成像过程,分别获得相应数量的压缩图像,以此作为数据重建的输入,基于两步迭代阈值法的算法重建场景数据,计算重建数据全波段图像均方根差,同时调用第 20 波段图像及上述两处空间位置的光谱曲线,以此作为光谱成像数据保真度的综合判定依据。

#### 4 结果与讨论

图 4 为仿真成像实验重建数据全波段图像均方根误差与拍摄帧数的关系曲线。由图可知,随拍摄帧数的增加,均方误差呈递减趋势。单帧拍摄时,均方根误差为 14.75%,当拍摄帧数达到 15 幅时,均方根误差降至 7.39%。

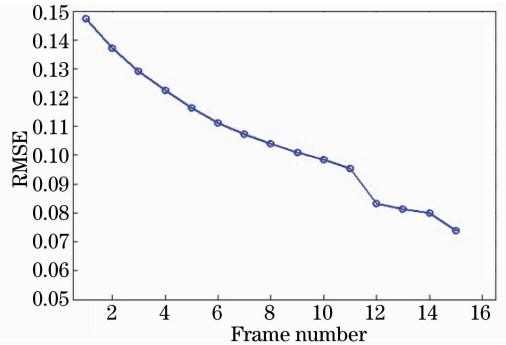


图 4 全波段图像均方根误差与拍摄帧数的关系  
Fig. 4 Relation between RMSE and frame number

图 5 为经仿真成像实验所得多帧拍摄条件下的重建图像,图 5(a)~(d)对应拍摄帧数分别为 1、5、9、13 时的结果。由图可知,单帧拍摄时,重建图像尚不能清晰反映场景中不同几何地物间的差别,当拍摄帧数达到 5 帧时,重建图像中不同地物呈现一

定的区分度,拍摄帧数进一步增加至 9 帧时,田地、河流等地物的边界得以区分,桥梁轮廓开始显现。由 13 帧压缩图像重建的图像已能清晰反映场景中所有地物边界。

图 6 为不同拍摄帧数下经仿真成像所得两种地

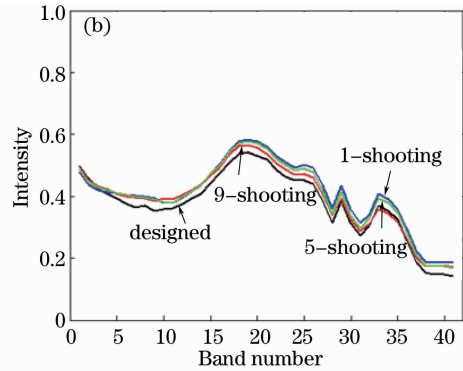
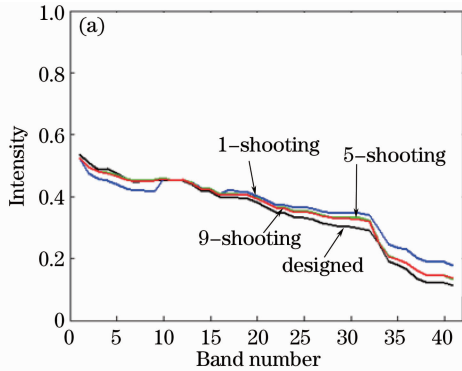


图 6 多帧拍摄条件下的光谱曲线结果。(a) 河流; (b) 田地

Fig. 6 Spectral curves under multi-shooting conditions. (a) River; (b) field

综合分析重建数据全波段图像均方根误差统计结果、特定谱段谱图和特定空间位置光谱曲线结果可知,多帧拍摄是提高空间编码光学压缩光谱成像数据保真度与成像质量的有效手段。

## 5 结 论

依据压缩成像机理,对空间编码光学压缩光谱成像模型进行拓展,研究了多帧拍摄空间编码光学压缩光谱成像的数据重建及其保真度评价方法,基于 AVIRIS 成像数据开展了仿真实验和成像质量评价分析。仿真成像结果表明,变编码空间光调制作下的多帧拍摄能有效提升数据保真度、改善光谱图像质量并降低光谱曲线偏差,是提高光学压缩光谱成像应用能力的有效技术途径。

### 参 考 文 献

- 1 M R Descour, C E Volin, E L Dereniak, *et al.*. Demonstration of a high-speed non-scanning imaging spectrometer[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(16): 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*

物(河流与田地)的光谱曲线,为便于对比,理论光谱曲线在此被予以一并显示。由图可知,当拍摄帧数逐步增加时,经成像所得光谱谱线较理论曲线的偏差逐渐减小。

- Express, 2007, 15(21): 14013-14027.
- 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 C F Cull, K Choi, D J Brady. Identification of fluorescent beads using a coded aperture snapshot spectral imager[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(10): B59-B70.
- 5 B K Ford, M R Descour, R 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 D Kittle, K Choi, A Wagadarikar, *et al.*. Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(38): 6824-6833.
- 8 D L Donoho. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- 9 W H Richardson. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *J Opt Soc Am*, 1972, 62(1): 55-59.
- 10 A A Wagadarikar, N P Pitsianis, X Sun. Spectral image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers [C]. *SPIE*, 2008, 7076: 707602.
- 11 J Bioucas-Dias, M Figueiredo. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding for image restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(12): 2992-3004.

栏目编辑:史敏