基于 FISTA 算法的编码孔径光谱图像压缩与复原系统

孙 念[1,2],胡炳樑[1],王 爽[1],闫 鹏[1],孙 朗[1],王铮杰[1]

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所,光谱成像技术重点实验室,陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 在研究现有光谱图像压缩与复原的基础上,提出了一种新型的光谱压缩与复原方法,即基于编码孔径的光谱压缩复原系统;在光谱仪的光学系统中加入由数字微镜阵列(DMD)实现的编码模板,该编码模板为一个随机矩阵,可对目标的图谱数据立方体实现瞬时编码,目标的反射光经过该编码模板后三维图谱数据立方体被压缩成一个隐含有光谱信息的二维矩阵。在解码算法方面,首次提出了利用快速迭代收缩阈值算法(FISTA)实现从少量观测值中重构三维图谱数据立方体。该算法在每次迭代中估计一次梯度的同时还计算了一个额外的点。实验结果表明,该算法无论是在收敛速度,还是在复原重构效果上均有明显提高。

关键词: 编码孔径; 快速迭代收缩算法; DMD; 图谱压缩; 图谱复原

中图分类号: O433.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0238-05

Reconstruction of compressive spectral imaging system of a FISTA algorithm-based coded aperture

Sun Nian[1,2], Hu Bingliang[1], Wang Shuang[1], Sun Lang[1], Wang Zhengjie[1]

(1. Laboratory of Spectral Imaging Technique, Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi′an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A compression and reconstruction solution based on coded aperture was proposed. In this system, the 3D spatial-spectral information about a scene of interest was coded by a random binary element pattern which was achieved by Digital Micro-Mirror Device (DMD), and the processing was snapshot. As a result the 3D information was encoded into a 2D representation. In decoding, a Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm (FISTA) was proposed on the basis of the Two-Step Iterative Shrinkage-Thresholding (TwIST) algorithm. The method developed in this paper did not require more than one gradient evaluation at each iteration, but just an additional point was smartly chosen and easy to compute. The experiments show that the reconstruction performance is much better than TwIST and GPSR both in spatial dimension and spectral dimension.

Key words: coded aperture; fast iterative shrinkage-thresholding algorithm; DMD; spectral image compression; spectral image reconstruction

收稿日期: 2013-05-02; **修订日期:** 2013-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(40805013);国家重点基础研究发展计划(2009CB724005)

作者简介: 孙念(1987-),女,硕士生,主要是从事光谱成像方面的研究。 Email:sunnian1234@163.com

导师简介: 胡炳樑(1976-),男,博士生导师,主要从事高速信号处理、光谱压缩、光谱成像方面的研究。Email:hbl@opt.ac.cn

0 引　言

光谱成像技术已经被广泛应用于各个领域[1],成像光谱仪获得的数据是一个三维的数据立方体,它是在普通二维图像(空间维)的基础上加上了一维的光谱信息(光谱维),这样可以帮助用户获得目标物更详细的信息。现在大多数光谱成像系统主要是通过推扫来获得图像的空间和光谱信息,推扫的过程比较耗时,这样使得成像系统不适用于高速成像领域。

近年来,杜克大学研制的 CASSI(Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging)[2] 系统大大提高了光谱成像系统的速度。在 CASSI 系统中,目标光源经过编码模板编码后成像在 CCD 上,CCD 上得到的数据就是隐含光源光谱信息的二维数据,这样便实现了对目标图谱数据立方体的瞬时编码,通过压缩感知[3](compress sensing,CS)的相关算法能从该二维数据中复原出原始图像的图谱信息。CASSI 系统中编码模板是通过光掩膜实现的,那么当编码模板改变时就要重新制作光掩膜和校准系统,这样使得 CASSI 系统缺乏灵活性。针对此不足,文中提出了采用数字微镜阵列(DMD)[4]实现编码模板,DMD 的灵活性为测试和比较不同编码模板下的复原效果提供了很好的平台,同时大大节约了成本。在解码算法上,杜克大学应用的是两部迭代收缩算法[5](TwIST),文中在改进 TwIST 算法的基础上,将快速迭代收缩阈值算法[6](FISTA)应用到该系统中,实验结果表明,该算法复原的图像无论是在光谱维还是在空间维的效果都比 TwIST 算法好。

1 基于 DMD 编码孔径图谱压缩系统

编码孔径光谱压缩系统主要由分光系统,编码模板 DMD,合光系统以及数据采集系统组成,工作原理如图 1 所示,

光源经过前置光学系统成像于一次像面上,经过准直镜准直,通过分光光栅分光,分光后各个谱段的像素点被色散开,经过汇聚镜后,各谱段的图像分别在 DMD 上成像,在程序的控制下,DMD 的各微镜偏转,实现对目标的编码,编码后的图像经过合光系统成像在 CCD 靶面上,CCD 得到的图像数据是一个三维的,其中,二维空间维由 CCD 列单元获得(垂直于纸面方向),一维光谱维分别由 CCD 行单元(平行于纸面方向)和编码模板的解码获得。

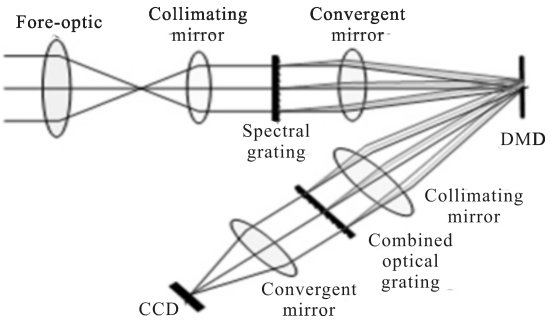

图 1 基于 DMD 的编码孔径光谱压缩系统原理图

Fig.1 Principle chart of coded aperture spectral compression system

2 编解码算法

2.1 编码

编码过程可以简单地理解为光源经过分光系统后通过 DMD 编码,编码后的光谱图像又通过合光系统成像在 CCD 靶面上,这个过程也就是人们常说的双色散过程,如图 2 所示。

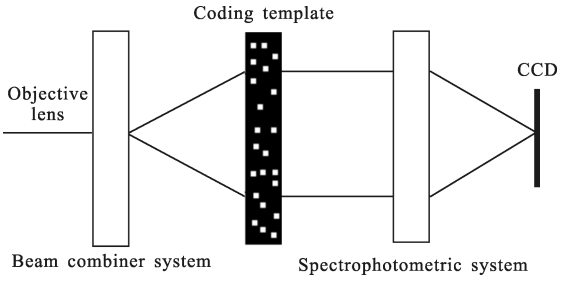

图 2 基于 DMD 的双色散编码示意图

Fig.2 Illustration of two-disperser coding based on DMD

从图中可以看出,编码模板是该系统的核心。由图像的压缩感知理论可知,图像的压缩传感重构主要是先用随机投影矩阵对原始图像进行随机采样[7],然后通过一定的重构算法可以重构出原始图像。所设计的系统也是基于该先验知识的,只是一般图像的压缩传感是二维的;而光谱图像的压缩感知是三维的,所以对光谱图像用随机矩阵采样后也能用相应的算法恢复[8]。因此在这个基础上提出了用随机矩阵作为该系统的编码模板。该实验所用的编码模板为一个 280×256 的随机矩阵,如图 3 所示。

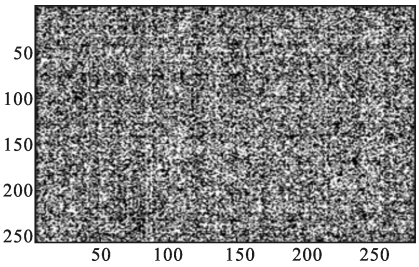

图 3 编码模板:280×256 的随机矩阵

Fig.3 Aperture code: a random 280×256 binary element pattern

2.2 解码算法

为了解决模糊图像的复原问题,参考文献[5]中提出了两步迭代收缩算法(two-step iterative shrinkage/threshold,TwIST),CASSI 系统正是应用该算法复原的光谱图像,应用 TwIST 算法也就等价于最小化目标函数:

$$\hat{f}_{\mathrm{TwIST}}(\gamma,\Phi)=\left[\operatorname{argmin}_f\left\{\frac{1}{2}\|g-\boldsymbol{H}f\|_2^2+\gamma\Phi(f)\right\}\right] \tag{1}$$

式中:f 为原始图像;$\boldsymbol{H}$ 为点扩展函数生成的卷积矩阵,也就是光谱定标获得的模板;$\Phi(f)$表示正则化函数,一般情况下选择 I_p 或者是全变差函数[9];g 为CCD 上得到的图像函数。TwIST 算法的更新过程如下:

$$x_1=\Gamma_\lambda(x_0) \tag{2}$$

$$x_k=(1-\alpha)\cdot x_{k-2}+(\alpha-\beta)\cdot x_{k-1}+\beta\cdot\Gamma_\lambda(x_{k-1}) \tag{3}$$

式中:$k\geqslant 2$,x_0 为初始值,$\Gamma_\lambda(x)$为降噪处理函数。$\alpha=\frac{2}{1+\sqrt{1-\rho^2}}$,$\beta=\frac{2\alpha}{\lambda_1+\lambda_N}$,其中 $\rho=\frac{\lambda_N-\lambda_1}{\lambda_1+\lambda_N}$,$\lambda_N=1$。

TwIST 的收敛速度经证明为 $O(1/k)$,参考文献[6]提出了一种新的梯度方法来解决光滑的凸优化问题,该算法的收敛速度经证明为 $O(1/k^2)$,在该算法的迭代中,除了计算一次梯度估计外,还额外计算了一个点,从而加快了收敛速度。文中成功地将该算法应用到三维光谱图像复原系统中,对于 FISTA,主要的迭代公式如下:

$$z_1=x_0,t_1=1 \tag{4}$$

$$x_k=H_{\frac{\gamma}{L}}\left(z_k-\frac{1}{L}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\Phi}z_k-y)\right) \tag{5}$$

$$t_{k+1}=\frac{1+\sqrt{1+4t_k^2}}{2} \tag{6}$$

$$z_{k+1}=x_k+\left(\frac{t_k-1}{t_{k+1}}\right)(x_k-x_{k-1}) \tag{7}$$

式中:$H_{\frac{\gamma}{L}}(x)$为操作算子,该算子的计算方法和TwIST 中 $\boldsymbol{\Psi}_\gamma^{\mathrm{T}}(x)$的处理方法一样,这个在很多文献中有叙述,这里碍于篇幅限制就不多加说明。

公式(6)为步长的更新公式,由公式(7)可知,中间的迭代值 z_{k+1} 是利用前两个估计值 x_k 和 x_{k-1} 求得,然后再利用 z_{k+1} 来更新 x_{k+1}。实验结果表明,通过计算额外的点 z_{k+1} 明显加快了收敛速度。

3 实 验

实验开始时用单色仪对系统进行定标,理论上需要对光谱仪所有波段谱线的位置进行定标;但在实际应用中,系统光谱响应范围为 540~690 nm,光谱分辨率为 5 nm,所以选择在 540~690 nm 范围内,每隔 5 nm 定标一次,这样分成了 31 个波段,用这些窄带光束谱定标,最后的定标结果为一个 280×256 的数据立方体,也就是公式(1)中的 $\boldsymbol{H}$ 矩阵。

实验用的是带有红,橙,黄,绿四种颜色的彩条布作为目标物体,彩条布的反射光通过色散系统之后打在 DMD 上编码,编码模板用的是 280×256 的随机矩阵(如图 3 所示),编码之后通过合光系统得到一个 280×256 的二维测量矩阵成像在 CCD 上,如图 4 所示。

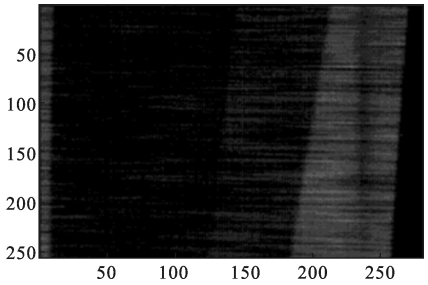

图 4 基于 DMD 的编码孔径光谱压缩系统的测量矩阵

Fig.4 Corresponding measurement matrix of DMD based code aperture spectral compress system

现在要从图 4 所示的二维矩阵中恢复出带有光谱信息的三维数据立方体,分别应用了 FISTA 算法,TwIST 算法,GPSR 算法从上面的测量矩阵复原原始图像,得到的结果如图 5 所示。

从图中可以看出,FISTA 算法的复原效果最好,TwIST 算法的复原效果比 GPSR 算法好,FISTA 算法复原的图像同质区域内亮度均衡,不同区域之间边界明显,而 TwIST 算法复原的图像边界比较模糊,GPSR 算法复原的图像含有较多的噪点。

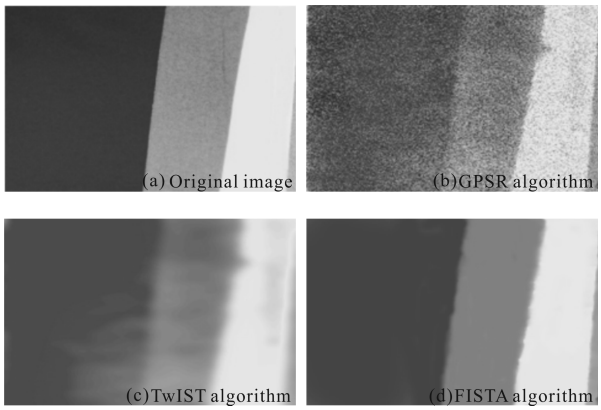

图 5 复原的图像

Fig.5 Reconstruction of the image

同时笔者对三种算法的收缩迭代时间进行了比较,由于算法处理的三维数据立方体,所以各算法的耗时均比处理二维图像的时间要长得多，比较的结果如表 1 所示。

表 1 三种算法的耗时比较

Tab.1 Time-consuming among three algorithms

Algorithm	Time/s
GPSR	421.609
TwIST	351.441
FISTA	295.071

从表 1 可以看出,FISTA 算法耗时最短,由此可以证明，在 TwIST 算法的基础上额外计算一个点来加快收敛速度是可行的，这样使得该系统更能适应高速成像系统。

为了进一步分析该算法的性能，对各算法复原的图像和原始图像在光谱维也进行了比较，在图像右下角的同质区域内选取点作为目标，绘制该点原始图像的光谱曲线和复原出来的图像的光谱曲线，为了方便比较,将光谱值进行归一化处理,仿真结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,FISTA 复原算法得到的光谱曲线与原始的光谱曲线最为接近,所以说 FISTA 不但收敛速度比 TwIST 和 GPSR 算法更快,而且空间维和光谱维的复原效果都比 TwIST 和 GPSR 算法好。

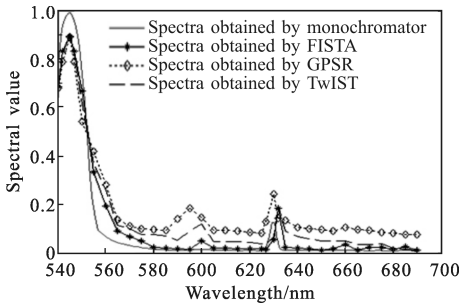

图 6 实验得到的光谱曲线

Fig.6 Curves obtained from experiment

4 结　论

文中阐述了基于 DMD 的编码孔径光谱图像压缩系统的基本原理,并完整地说明了应用该系统对光谱图像进行压缩和复原的实验方法。系统压缩的主要过程是通过 DMD 构成的随机编码矩阵对图像进行编码。相比于现有的 CASSI 系统,应用 DMD 作为编码模板使得整个系统更加灵活,具有自适应的特点。

在解码算法方面，首次将 FISTA 算法应用到复原三维数据立方体领域,在每次迭代中,除了一次梯度估计外,还计算了一个额外的点,从而加快了收敛速度。实验结果表明,相比于 TwIST 算法和 GPSR 算法,该算法不但收敛速度更快,而且复原效果无论是在空间维还是在光谱维都较前两种算法好。

参考文献:

[1] Shao Xi ujuan, Hu Bingliang, Yan Peng. Design of multi-spectral adaptive spectrometer based on Hadamard transform [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(5): 963-966. (in Chinese)

邵秀娟, 胡炳樑, 闫鹏. Hadamard 变换多谱段自适应光谱仪[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 963-966.

[2] Love S P. Programmable matched filter and Hadamard transform hyperspectral imagers based on micro-mirror arrays [C]//SPIE, 2009, 7210: 721007.

[3] Donoho D. Compressed sensing [J]. ***IEEE Trans Information Theory***, 2006, 52(4): 1289-1306.

[4] Jia Xin, Liao Zhijie, Xing Tingwen. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on digital-micromirror device [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(4): 692-696. (in Chinese)

贾辛, 廖志杰, 邢延文. 基于 DMD 的动态红外场景投影光

学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 692-696.

[5] Jose M bioucas-Dias, Mario A T Figueiredo. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration [J]. ***IEEE Transactions on Image Processing***, 2007, 16(12): 2992-3004.

[6] Amir Beck, Marc Teboulle. A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems [J]. ***Imaging Science***, 2009, 2(1): 183-202.

[7] Candes E, Romberg J. Sparsity and incoherence in compressive sampling[J]. ***Inverse Problem***, 2007, 23(3): 969-985.

[8] Xiao Longlong, Liu Kun, Han Dapeng. Focal plane coding method fo r high resolution infrared imaging [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(11): 2065-2070. (in Chinese) 肖龙龙, 刘昆, 韩大鹏. 焦平面编码高分辨率红外成像方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2065-2070.

[9] Lian Qiusheng, Gao Yanyan, Chen Shuzhen. Compressed sensing image reconstruction based on two-step iterative shrinkage an complex wavelet [J]. ***Chinese Journal of Scientific Instrument***, 2009, 30(7): 1426-1430. (in Chinese) 练秋生, 高艳艳, 陈淑珍. 基于两步迭代收缩法和复数小波的压缩传感图像重构[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1426-1430.