

doi:10.3788/gzxb20134208.0912

压缩采样光谱调制技术研究

孙朗, 胡炳樑, 王爽, 闫鹏, 冯玉涛, 孙念

(中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术实验室, 西安 710119)

摘 要: 为了避免光谱成像系统的时间损失, 提高系统光通量, 提出一种压缩采样光谱调制技术, 搭建了基于数字微镜器件的压缩采样多光谱成像系统. 该技术基于压缩采样理论, 采用编码孔径光学系统以低于奈奎斯特频率对光信息进行采样, 大幅度地减少了光谱数据量. 实验中根据探测器得到的隐含光谱信息的二维图像, 采用双收缩快速迭代算法重建 612 nm 激光和彩条布的数据立方体, 结果表明: 压缩采样多光谱成像系统不仅具有高光通量和高分辨率等特点, 并在获取谱信息的同时对其进行瞬时压缩, 压缩比可达 31 : 1.

关键词: 压缩采样光谱调制技术; 压缩采样; 编码孔径; 双收缩快速迭代算法

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0912-4

Compressive Sampling Spectral Modulated Technique

SUN Lang, HU Bing-liang, WANG Shuang, YAN Pen, FENG Yu-tao, SUN Nian

(Laboratory of Spectral Imaging Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: The compressive sampling spectral modulated technique is developed in order to avoid time penalty and promote throughput of spectral imaging system, and a digital-micromirror-device based compressive sampling multispectral imaging system is designed. In the technique based compressive sampling spectral information is sampled below Nyquist-criterion with coded aperture to reduce spectral data greatly. In the experiment, the cubic spatial/spectral data cubes of the 612 nm laser and colored striped fabric are reconstructed from 2-Dimension images obtained from detector that contain spectral information using double shrinkage fast iterative algorithm. The results indicate that a digital-micromirror-device based compressive sampling multispectral imaging system has images with high-throughput and high resolution, can compress the spectral simultaneously, and the compression ratio can reach 31 : 1.

Key words: Compressive sampling modulated technique; Compressive sampling; Coded aperture; Double shrinkage fast iterative algorithm

0 引言

成像光谱仪能够对同一地物在多个谱段同时成像. 其获得的多幅图像, 称之为三维数据立方体(二维空间信息和一维光谱信息). 因其广泛的实用范围和应用前景而成为一种重要的遥感器, 主要应用对环境监测、矿产勘察、农业或生态研究等领域^[1]

当前我国大多数成像光谱仪均为推扫成像系

统, 如上海技术物理所研制的推扫式超光谱成像仪(Push-broom Hyperspectral Imaging, PHI). 然而这些光谱成像系统采用狭缝实现单色化, 不利于微弱信号的分析, 并且在推扫过程中有时间损失, 影响高速物体成像效果. 为了提高成像系统的光通量和空间效率, 美国杜克大学计算机科学学院提出了一种新的光谱成像系统, 即编码孔径快照成像系统(Coded Aperture Snapshot Spectral Imager,

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41005109, 40805013)资助

第一作者: 孙朗(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数字信号处理. Email: sunlang8760@126.com

导师(通讯作者): 胡炳樑(1974-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为数字信号处理和光谱研究. Email: hbl@opt.ac.cn

收稿日期: 2013-02-27; 录用日期: 2013-05-16

CASSI^[2-5],它有效地避免了推扫成像系统的时间损失.基于此系统,本文提出了压缩采样空间光谱调制技术,并采用此技术搭建多光谱成像系统.

压缩采样光谱调制技术是一种新型的应用压缩采样(Compressed Sampling,CS)理论的空间光谱调制技术.本文采用双色散的编码孔径系统^[6]实现CS理论,将三维数据立方体投影到二维探测器上,得到二维图像;而后采用双收缩快速迭代算法(Double Shrinkage Fast Iterative Algorithm,DSFIA)复原原始数据立方体^[16].

本文提出的压缩采样调制技术,应用CS理论,用少量的信号复原原始信号,大大地减少了数据量.基于此技术搭建的光谱成像系统不仅具有其他调制型光谱系统高光通量和高分辨率分辨率等特点,并可压缩数据,使光谱成像仪能更广泛地应用于遥感数据探测.

1 压缩采样光谱调制技术

压缩采样调制技术采用CS理论,应用双色散编码孔径完成光谱数据的降维(三维数据立方体到二维探测器图像)^[7].CS要求原始信号必须是稀疏的或可压缩的,具有冗余性.而多光谱图像一般有两种冗余性:1)谱间冗余;2)空间冗余^[8].以上两种冗余性的存在,使对多光谱数据进行压缩采样具有了理论依据.本文利用双色散编码孔径实现谱信息的获取和压缩采样.

1.1 CS原理

图1是CS理论信号编解码流程图.CS理论表明,当信号具有稀疏性或可压缩性时,通过采集少量的信号投影值就可以实现信号的近似或准确重建^[9-12].

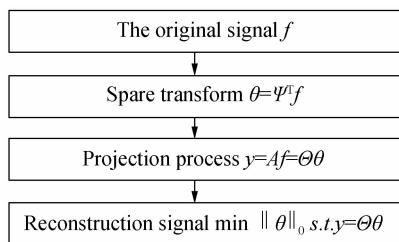


图1 CS理论信号编解码流程图

Fig. 1 The flow diagram of encoding and decoding of CS

对于稀疏信号 $f \in \mathbf{R}^N \times 1$,在某个正交基 Ψ 上可稀疏表示为 $\theta = \Psi^T f$,其中 θ 是其上的一组 k 稀疏的稀疏基^[9-12].而后找到一个与正交基 Ψ 不相关的并满足受限等距特性准则的 $M \times N$ 的投影矩阵 A ,通过投影矩阵 A 观测得到降维的 M 个观测量 y ,最后通过求解最优化问题来得到原始信号的精确重构或近似逼近^[9-12].求解时设目标函数为

$$F(f) = \frac{1}{2} \|y - Af\|_2^2 + \lambda \|\Psi^T f\|_1 \quad (1)$$

λ 是调整因子,使 $f(x)$ 最小化,得到最优解.

$$\tilde{f} = \arg \min_f \frac{1}{2} \|y - Af\|_2^2 + \lambda \|\Psi^T f\|_1 \quad (2)$$

1.2 双色散编码孔径理论

本文提出运用双色散编码孔径系统将三维数据立方体投影到二维探测器上,在光的传播过程中对其进行调制.它的成像原理如图2所示,在透镜1和透镜2组成的 $4f$ 系统的中间像面放置色散元件,目标经过该 $4f$ 系统,它的各单色像被成像到编码模板上^[6].而后再经过一个相反的 $4f$ 系统,抵消第一个 $4f$ 系统的作用,得到带有编码信息的二维强度信号^[6].二维探测器得到的光谱信息不再是均匀的,而是光谱与编码孔径信息互相叠加的结果^[6].

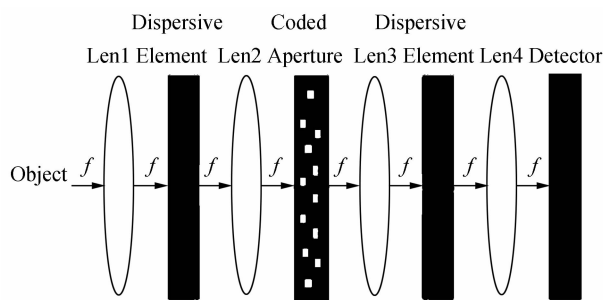


图2 双色散编码孔径成像系统

Fig. 2 A dual-dispersive (DD) coded aperture spectral imaging system

2 基于DMD的压缩采样多光谱成像系统

根据压缩采样调制技术,搭建基于数字微镜器件(Digital-Micromirror-Device, DMD)的压缩采样多光谱成像系统.该系统如图3所示,主要由前置镜、分光准直镜、分光光栅、DMD、合光准直镜、合光光栅、焦平面探测器组成.它包括两个光谱成像系统,其结构完全对称,可有效消除畸变.第一个光谱

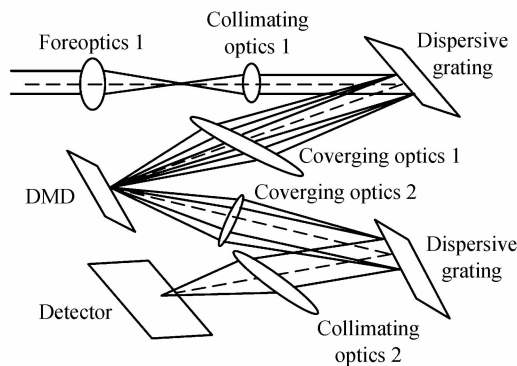


图3 基于DMD压缩感知光学系统

Fig. 3 Schematic diagram of a DMD-based compressive sampling multispectral imaging system

成像系统将入射光单色化,成像在 DMD 芯片微镜阵列面上,DMD 芯片通过微镜阵列的旋转,选择若干波段的光线反射到第二个光谱成像系统上,会聚在二维探测器上进行若干波段的线性叠加.从而实现多通道探测,提高信噪比.此成像系统的核心器件是 DMD^[13-15] 芯片,它可视为一个空间光调制器,通过各微镜的旋转角度精细地调制空间光.

系统方程可表述为

$$\begin{aligned} g(x, y, \lambda) &= \iint dx' dy' h_1(x', y', \lambda) \\ f(x', y', \lambda) T(x', y') h_2(x', y', \lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $f(x, y, \lambda)$ 表示目标的谱密度, $h_1(x, y, \lambda)$ 为第一个反射光栅的色散方程,它可表示为

$$h_1(x, y, \lambda) = \sigma(x' - [x + \omega(\lambda - \lambda_c)]) \sigma(y - y') \quad (4)$$

式中 ω 表示线性色散率, x, y 表示色散和非色散方向, λ_c 为中心波长^[6]. $T(x, y)$ 为编码孔径即 DMD 的模板, $h_2(x, y, \lambda)$ 为第二个反射光栅的色散方程,即

$$h_2(x, y, \lambda) = \sigma(x' - [x - \omega(\lambda - \lambda_c)]) \sigma(y - y') \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3),得到的系统特性方程为

$$\begin{aligned} g(x, y, \lambda) &= T(x - \omega(\lambda - \lambda_c), y) g_0(x, y, \lambda) = \\ &H(x, y, \lambda) f(x, y, \lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

$$H(x, y, \lambda) = T(x' - \omega(\lambda - \lambda_c), y) \quad (7)$$

根据 CS 理论,解方程式(8),就可完成数据立方体的重建.

$$\tilde{f} = \arg \min_f \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2 + \gamma \Phi(f) \quad (8)$$

3 图像重构

目前压缩采样重构算法主要有 3 类:贪婪追踪算法,组合算法和凸松弛法^[16-17].贪婪追踪算法一般针对低维的小尺度信号,其重构质量较好、速度快,对于高维的大尺度信号(如图像)则重构效果不理想;组合算法针对特殊信号,不具备通用性;凸松弛法在重构时所需要的观测次数相对较少,但传统的凸松弛算法往往计算复杂度较高^[16-17].而基于凸松弛算法的 DSFIA 通过阈值收缩和正则化参数收缩来提高图像重构质量和减少计算复杂度.

本文采用 DSFIA 重构数据立方体,解决数据立方体重构中的非线性,无约束的最小化问题.采用 DSFIA 算法重建数据立方体的目标函数为

$$\tilde{f}_{\text{DSFIA}} = \arg \min_f \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2 + \gamma \Phi(f) \quad (9)$$

DSFIA 主要是利用前两次迭代值、不断更新的参数 t 和不断收缩的正则化参数来获得新的迭代值^[16].令

$$f_{k+1} = f_k + (t_k - 1)/t_{k+1} (f_k - f_{k-1}) \quad (10)$$

式中 t 为加快收敛速度而引入的参数, t 为

$$t_{k+1} = (1 + \sqrt{1 + 4t_k^2})/2 \quad (11)$$

且迭代的终止条件是通过 f 相邻 2 次迭代值的相对误差来决定的,令其终止函数为

$$\epsilon(f_k, f_{k-1}) = \frac{\|f_k - f_{k-1}\|_2}{\|f_k\|_2} \quad (12)$$

设终止阈值为 ϵ_0 ,当 $\epsilon(f_k - f_{k-1}) < \epsilon_0$,则停止迭代.

4 实验

本实验室搭建了基于 DMD 的压缩采样多光谱成像系统,其结构剖图如图 4 所示.该系统光谱范围为 550~680 nm,光谱分辨率为 20 nm.并且该系统将采样与压缩相结合,对光进行空间调制,在光传播中实现光谱数据压缩.

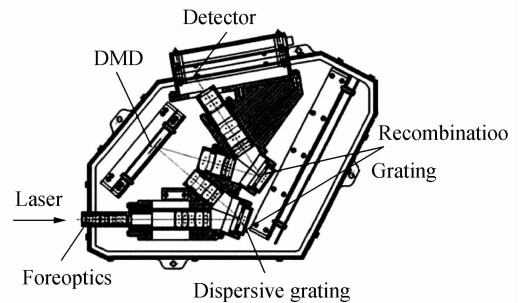


图 4 基于 DMD 的压缩采样多光谱成像系统结构剖图
Fig. 4 Layout of a DMD-based compressive sampling multispectral imaging system

首先采用 612 nm 激光作为入射光,探测器得到二维隐含谱信息的图像.易知,原数据立方体大小为 $640 \times 360 \times 31$,探测器获取的图像大小为 640×360 ,因此压缩比为 31 : 1.谱段数越多,压缩比越高.这里设实验中的迭代终止条件: $\epsilon_0 = 10^{-8}$,迭代次数为 50 次,式(9)中的正则函数的调整因子取 0.1.采用 DSFIA 算法重建 612 nm 激光的数据立方体.从中可清楚地观察到重建后的图像中 610 nm 和 615 nm 两幅图像的红光信息非常丰富,与实验中采用的 612 nm 激光非常接近,重建效果良好.图 5 为重建后的 612 nm 的光谱曲线,可清楚地看到在

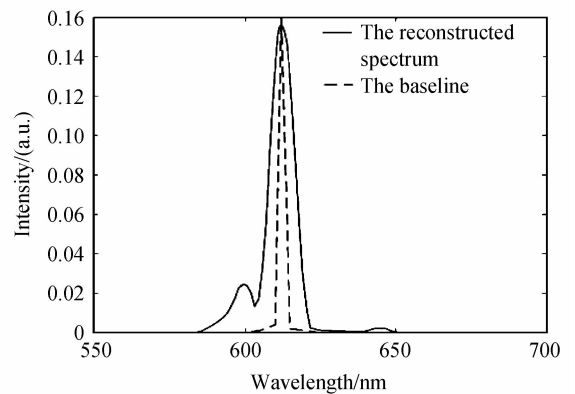


图 5 复原谱线与定标谱线对比
Fig. 5 Spectrum comparison between a baseline and the reconstructed spectrum

610 nm 附近的幅值相较于其他波段急剧增大,与 612 nm 真实谱线非常接近。

然后再取彩条布作为目标物,图 6 为原始重构后的彩条布的谱线图。上述实验结果表明,该光谱成像系统不仅成功的获取了光谱并且对光谱进行了有效的压缩。

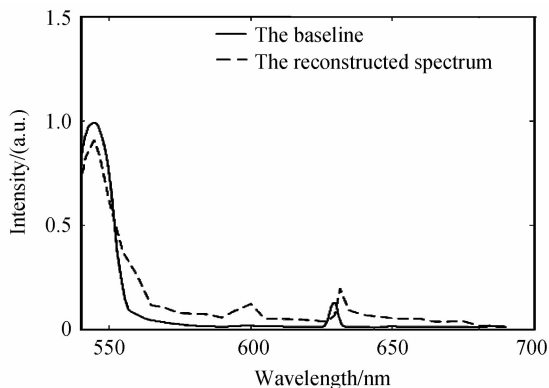


图 6 彩条布的谱线

Fig. 6 The reconstructed spectrum of colored striped fabric

5 结论

压缩采样空间调制技术的核心是基于编码孔径的光谱数据的压缩采样。应用该调制技术搭建的基于 DMD 的多光谱成像系统不仅具有调制光谱仪的高光通量和高空间分辨率等特点,并可在获取谱信息的同时,对其进行瞬时压缩。

压缩采样光谱调制技术提出应用狭缝阵列代替单一狭缝,提高光通量和分辨率。因此采用此调制技术的光谱成像系统可作为一种微弱信号的高精度光谱成像探测仪器,它将为分析化学、细胞生物学和临床医学提供一种新的灵敏准确的分析手段。

参考文献

- [1] XU Hong, WANG Xiang-jun. Applications of multispectral / hyperspectral imaging technologies in military[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 13-17.
许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(1): 13-17.
- [2] WAGADARIKAR A A, JOHN R, WILLETT R, et al. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(10): B44 - B51.
- [3] GEHM M, JOHN R, BRADY D J, WILLETT R, et al. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(21): 14013 - 14027.
- [4] KITTLE D, CHOI K, WAGADARIKAR A A, et al. Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(36): 6824-6833.
- [5] XIAO Long-long, LIU Kun, HAN Da-peng, et al. Application of compressed sensing in optical imaging [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(1): 71-77.
肖龙龙, 刘昆, 韩大鹏, 等. 压缩感知理论在光学成像中的应用[J]. *应用光学*, 2012, **33**(1): 71-77.
- [6] GONG Xing-zhi, CHENG Liang, YU Fei-hong. Research of one-dimensional spectrum compression based on coded aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1188-1192.
宫兴致, 程梁, 余飞鸿. 基于编码孔径的一维光谱压缩方法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1188-1192.
- [7] JI Zhen-xing, KONG Fan-qiang. Hyperspectral image compressed sensing based on linear filter between bands[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 82-86.
计振兴, 孔繁强. 基于谱间线性滤波的高光谱压缩图像感知[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 82-86.
- [8] PAN Bo, JIU Xin-yu. A wavelet-based approach for compression of multi spectral images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **35**(6): 447-450.
潘波, 金心宇. 一种基于小波的多光谱图像压缩方法[J]. *激光与红外工程*, 2005, **35**(6): 447-450.
- [9] DAI Hai-qiong, FU Chang-jun, JI Xiang-yang. Research on compressed sensing[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2011, **34**(3): 425-434.
戴琼海, 付长军, 季向阳. 压缩感知研究[J]. *计算机学报*, 2011, **34**(3): 425-434.
- [10] JIAO Li-cheng, YANG Shu-yuan, LIU Fang, et al. Development and prospect of compressive sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, **39**(7): 1651-1662.
焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 压缩感知回顾与展望[J]. *电子学报*, 2011, **39**(7): 1651-1662.
- [11] LIU Hai-ying, LI Yun-song, WU Cheng-ke, et al. Compressed hyperspectral image sensing based on interband prediction[J]. *Journal of Xidian University*, 2011, **38**(3): 37-42.
刘海英, 李云松, 吴成柯, 等. 一种高重构质量低复杂度的高光谱图像压缩感知[J]. *西安电子科技大学学报*, 2011, **38**(3): 37-42.
- [12] LUSTIG M, DONOHO D, PAULY J M. The application of compressed sensing for rapid MR imaging [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2007, **58**(6): 1182-1195.
- [13] WEI Tao, ZHU Jian-hua, CHEN Li-gong, et al. Digital holographic display based on digital micro mirror-device and quality enhancement of its reconstructed image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 952-956.
魏涛, 朱建华, 陈立功, 等. 基于 DMD 的全息显示及其再现像质增强[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 952-956.
- [14] GUO Xiao-wei, DU Jing-lei, LUO Bo-liang, et al. Imaging model for DMD-based gray-tone lithography system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1412-1416.
郭小伟, 杜惊雷, 罗铂靓, 等. 基于数字微射镜灰度光刻的成像模型[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1412-1416.
- [15] MO Xiang-xia, WEI Zhi-yu, ZHANG Zhi-hai, et al. Design and experiment of digital micro-mirror spectrometer optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1356-1360.
莫祥霞, 温志渝, 张智海, 等. 数字微镜近红外光谱仪光学系统设计及实验[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1356-1360.
- [16] DUAN Shi-fang, MA She-xiang. Double shrinkage fast iterative algorithm of image compressed sensing [J]. *Computer Engineering*, 2010, **38**(19): 226-232.
段世芳, 马社祥. 图像压缩感知的双收缩快速迭代算法[J]. *计算机工程*, 2010, **38**(19): 226-232.
- [17] PEI Wen-jiong, LI Shao-dong, YANG Jun. Performance study of signal reconstruction with four greedy algorithms in CS[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2012, **26**(5): 314-317.
裴文炯, 李少东, 杨军. 压缩感知中四种贪婪类算法重构信号性能研究[J]. *空军雷达学院学报*, 2012, **26**(5): 314-317.