

doi:10.3788/gzxb20134208.0897

谱线弯曲对计算光谱成像影响的分析与仿真

钱路路^{1,2}, 相里斌^{1,2}, 吕群波², 黄旻²

(1 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

(2 中国科学院光电研究院 计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 计算光谱成像技术相比较传统光谱成像技术具有高通量、快照成像等优点, 但由于色散元件的存在, 同样受到谱线弯曲的影响. 为了研究谱线弯曲对计算光谱成像系统信号采集、图谱混叠与重构结果的影响, 结合系统原理及重构算法, 分析计算了不同谱线偏移量下系统重构图像的相对峰值信噪比及复原光谱曲线的最大偏差. 实验结果表明, 谱线弯曲引起的探测器采样信号的光谱偏离会导致图谱混叠程度的变化, 与没有谱线弯曲的情况相比, 重构结果出现明显的偏差, 复原光谱曲线两侧趋于平滑. 对于光谱分辨率为 10 nm 的计算光谱成像系统, 为了高准确度的复原目标场景, 谱线弯曲引起的光谱偏移量应控制在半个像元以内.

关键词: 计算成像; 光谱成像; 色散元件; 谱线弯曲; 峰值信噪比

中图分类号: TP702; TP73

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0897-5

Analysis and Simulation of Effect of Spectral Line Bending on Computational Imaging Spectrometry

QIAN Lu-lu^{1,2}, XIANG-LI Bin^{1,2}, LÜ Qun-bo², HUANG Min²

(1 *Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(2 *Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

Abstract: Compared to conventional imaging spectrometry, computational imaging spectrometry has the advantages of high throughput snapshot imaging etc. But because of the presence of the dispersive element, computational imaging spectrometry suffers the effect of spectral line bending. To study the effect of spectral line bending on signal acquisition, spatial-spectral aliasing and reconstructed result in computational imaging spectrometry, combined with the principle of computational imaging spectrometry and reconstruction algorithm, the relative peak signal-to-noise ratio of the reconstructed image and the maximal error of the reconstructed spectral curve with different spectral offset were calculated and analyzed. The experimental result showed that spectral offset of the signal acquired by the detector will change the degree of spatial-spectral aliasing. The reconstructed results with spectral line bending exhibit distinct errors compared with no spectral line bending. And both sides of the reconstructed spectral curve tend to smooth. In order to reconstruct the object scene with high accuracy, spectral offset should be no more than half a pixel for computational imaging spectrometry with 10 nm resolution.

Key words: Computational imaging; Imaging spectrometry; Dispersive element; Spectral line bending; Peak Signal-to-Noise Ratio(PSNR)

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 61225024)和国家高技术研究发展计划(No. 2011AA7012022)资助

第一作者: 钱路路(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为计算成像和光谱成像. Email: qianlulu@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者): 相里斌(1967-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光谱成像技术和航空航天光学遥感等方面. Email: xiangli@aoe.ac.cn

收稿日期: 2012-02-26; 录用日期: 2012-04-22

0 引言

光谱成像技术是一种“谱像合一”的新型遥感探测技术,能够同时获取目标的空间信息和光谱信息,已在农业、海洋、生物医学、军事等领域得到广泛的应用^[1-4].按照光谱获得方式的区别,可分为色散型^[5]、傅里叶变换型^[6]和滤光片型^[7].随着技术的不断发展,近年来出现了一种新型的编码孔径光谱成像技术^[8-9],也称为计算光谱成像技术(Computational Imaging Spectrometry, CIS).该技术在传统色散型光谱成像技术的基础上,在光路中引入适当的编码模板对景物图谱数据立方体进行调制和压缩,并采用压缩感知理论对获取的二维图像进行三维图谱重构,实现景物空间信息和光谱信息的快照式(snapshot)感知成像,弥补了传统色散型光谱成像技术光通量低、逐行扫描成像时间长等缺陷,极大降低了原始数据量,减轻了数据存储和传输压力.

在色散型光谱成像仪中,直狭缝经过色散棱镜后,探测器接收到的单色像通常存在一定的弯曲,称为谱线弯曲,这使得空间视场穿轨方向上同一行中各像元的中心波长和光谱响应函数的峰值半宽彼此产生偏差,从而降低系统光谱灵敏度和信号采样准确度. Curtiss O. Davis 等^[10]在对 Ocean PHILLS 高光谱成像仪的设计和实验室光谱定标过程中,利用低压汞灯测量光谱弯曲,测得的谱线弯曲量小于一个像元尺寸.计算光谱成像系统与传统的色散型光谱成像仪一样,由于色散元件的存在,也将遭受谱线弯曲的影响.当存在谱线弯曲时,即使系统的定标准确度很高,探测器像元同一行之间仍会产生一定的光谱偏离,改变原有的图谱混叠形式,影响复原图谱的准确度.因此,测量和分析谱线弯曲对计算光谱成像系统的影响是非常有必要的.目前,对计算光谱成像技术的研究主要集中在原理和重构算法上,美国杜克大学 Brady 等^[11]搭建了计算光谱成像系统的原理样机,随后美国特拉华大学 Arguello 等^[12]对编码模板的优化设计开展了研究,但未见关于谱线弯曲对系统影响的研究.本文基于计算光谱成像技术的原理,分析谱线弯曲与图谱混叠的关系,并进行计算机仿真,比较不同谱线偏移量下的重构结果,定量分析不同谱线偏移量对复原图谱的影响,为仪器的设计提供参考.

1 计算光谱成像技术

由图 1 可以看出,入射光经前置镜后,到达编码模板,并完成特定的调制,调制后的信号经准直镜到

达色散元件进行分光,分光后的信号经成像镜后,被探测器接收,得到最终的压缩感知混叠图谱信息.

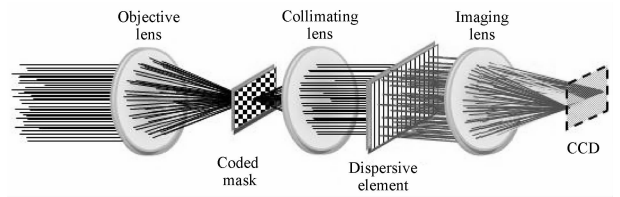


图 1 CIS 系统原理

Fig. 1 Schematic of CIS system

前置物镜将目标 $f_0(x_0, y_0, \lambda)$ 成像在编码模板上,假设物距为 L ,物镜焦距为 F ,则在编码模板前的光谱辐射分布为 $f_0\left(-\frac{F}{L}x_0, -\frac{F}{L}y_0, \lambda\right)$,令 $x = -\frac{F}{L}x_0, y = -\frac{F}{L}y_0$,编码模板前的光谱辐射分布可以写成 $f_0(x, y, \lambda)$,假设编码模板采用二维离散随机编码模板,透过率函数为 $t(x, y)$,经过编码模板后的光谱辐射分布为 $f_1(x, y, \lambda)$,则有

$$f_1(x, y, \lambda) = f_0(x, y, \lambda) \cdot t(x, y) \quad (1)$$

假定色散元件采用棱镜方式,其色散系数为 $\alpha(\lambda)$,中心波长为 λ_c ,沿 x 方向色散,调制后的三维光信号经色散元件分光,到达探测器像面上的光信号为

$$f_2(x, y, \lambda) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \delta(x' - (x + \alpha(\lambda)(\lambda - \lambda_c)), y' - y) \cdot f_1(x', y', \lambda) dx dy = f_0(x + \alpha(\lambda)(\lambda - \lambda_c), y, \lambda) \cdot t(x + \alpha(\lambda)(\lambda - \lambda_c), y) \quad (2)$$

x_1, x_2, y_1, y_2 分别为目标空间维的边界.由于探测器测量的是强度信号而非光谱密度,因此,探测器上每一点的测量值为该点的光谱密度函数在波长范围 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 的积分,即

$$g(x, y) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_2(x, y, \lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_0(x + \alpha(\lambda)(\lambda - \lambda_c), y, \lambda) \cdot t(x + \alpha(\lambda)(\lambda - \lambda_c), y) d\lambda \quad (3)$$

由式(3)可以看出,计算光谱成像技术也是一种“点到点”的成像技术,不同的是探测器上每个点获取的信号为不同波长、不同空间点信号的叠加. CIS 系统得到的是图谱混叠信息,已知的信息量少,需要重构的信息量多,该类重构问题需用压缩感知理论^[13]来解决,转化为某种条件下的最小二乘解.

2 谱线弯曲对系统采样的影响

谱线弯曲也称为“微笑畸变”,在谱段范围内,色散在波长上有一个偏移,且不同光谱通道的中心波长的偏离和光谱采样间隔的变化都是不同的^[14],会降低系统的性能和光谱分类结果.假设 (x, y) 点引入谱线弯曲量 $\sigma(y, \lambda)$,则式(3)将改写为

$$g(x, y) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_0(x + \alpha(\lambda)(\lambda - \lambda_c) + \sigma(y, \lambda), y, \lambda) \cdot t(x + \alpha(\lambda)(\lambda - \lambda_c) + \sigma(y, \lambda), y) d\lambda \quad (4)$$

为了便于理解,本文对图谱混叠和谱线弯曲进行离散化描述,如图2.从图中可以看出,探测器中

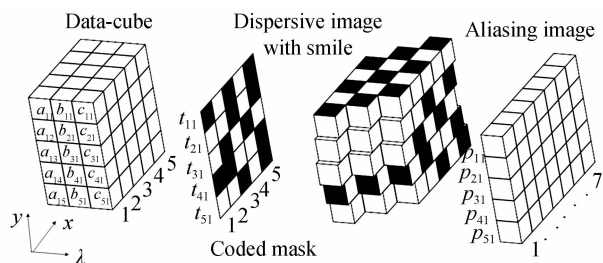


图2 谱线弯曲与图谱混叠离散化示意

Fig. 2 Discrete model of spectral line bending and spatial-spectral aliasing

任一点,都是空间稀疏采样信息沿光谱维展开和偏移后,在该点的混叠信息.对于 $5 \times 5 \times 3$ 的数据立方体,假设谱线最大偏移量为半个像元尺寸,内侧谱线偏移量为四分之一像元尺寸.考虑探测器上 $p_{14} \sim p_{54}$ 的测量值,可以建立一个线性方程组,如式(5).

$$\begin{cases} p_{14} = \frac{1}{2}a_{13}t_{13} + \frac{1}{2}a_{14}t_{14} + \frac{1}{2}b_{12}t_{12} + \frac{1}{2}b_{13}t_{13} + \frac{1}{2}c_{11}t_{11} + \frac{1}{2}c_{12}t_{12} \\ p_{24} = \frac{1}{4}a_{23}t_{23} + \frac{3}{4}a_{24}t_{24} + \frac{1}{4}b_{22}t_{22} + \frac{3}{4}b_{23}t_{23} + \frac{1}{4}c_{21}t_{21} + \frac{3}{4}c_{22}t_{22} \\ p_{34} = a_{34}t_{34} + b_{33}t_{33} + c_{32}t_{32} \\ p_{44} = \frac{1}{4}a_{43}t_{43} + \frac{3}{4}a_{44}t_{44} + \frac{1}{4}b_{42}t_{42} + \frac{3}{4}b_{43}t_{43} + \frac{1}{4}c_{41}t_{41} + \frac{3}{4}c_{42}t_{42} \\ p_{54} = \frac{1}{2}a_{53}t_{53} + \frac{1}{2}a_{54}t_{54} + \frac{1}{2}b_{52}t_{52} + \frac{1}{2}b_{53}t_{53} + \frac{1}{2}c_{51}t_{51} + \frac{1}{2}c_{52}t_{52} \end{cases} \quad (5)$$

而在理想的零谱线弯曲情况下,同样考虑探测器上 $p_{14} \sim p_{54}$ 的测量值,可以建立式(6)所示的线性方程组.

$$\begin{cases} p_{14} = a_{14}t_{14} + b_{13}t_{13} + c_{12}t_{12} \\ p_{24} = a_{24}t_{24} + b_{23}t_{23} + c_{22}t_{22} \\ p_{34} = a_{34}t_{34} + b_{33}t_{33} + c_{32}t_{32} \\ p_{44} = a_{44}t_{44} + b_{43}t_{43} + c_{42}t_{42} \\ p_{54} = a_{54}t_{54} + b_{53}t_{53} + c_{52}t_{52} \end{cases} \quad (6)$$

比较式(5)和(6)可以看出谱线弯曲致使探测器采样点变化的情况.谱线弯曲引起的光谱偏离使 y 方向上不同像元位置的中心波长彼此产生偏差,探测器采样沿 y 方向不再独立,每个像元的测量值会

引入相邻光谱切片的信息,改变了原有的图谱混叠信息,图谱混叠的程度也进一步加深,这也加重了数据立方体重构的难度,将对重构结果造成一定的影响.

3 谱线弯曲对系统影响的仿真实验

本文对 CIS 的成像过程实现了计算机仿真,对获取的数据采用两步迭代收缩阈值算法^[15](Two-step Iterative Shrinkage/Thresholding, TwIST)进行图谱重构.其中计算函数为二维离散随机编码模板,码元取值为 1 和 0(透光与不透光),大小为 256×256 ,码元尺寸为 $9 \times 9 \mu\text{m}^2$.光谱图像选用一高光谱图像数据^[16],目标由花瓣及其果实组成,光谱图像的空间大小为 256×256 ,波段数为 33,谱段范围为 $400 \sim 700 \text{ nm}$,如图 3 所示.探测器为 CCD 探测器,像元数为 256×288 ,像元尺寸为 $9 \times 9 \mu\text{m}^2$.为了分析谱线弯曲对系统的影响,首先对无谱线弯曲的理想情况进行仿真,然后与不同谱线弯曲量下重构结果进行比较.谱线弯曲形状^[17]用二次抛物曲线来模拟.

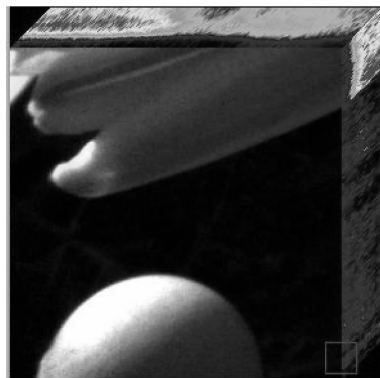


图3 仿真用数据源

Fig. 3 Source used in simulation

图 4 与图 5 为不同光谱偏离量下花瓣部分上同一点重构光谱信号的归一化曲线和差值曲线.由图 4 和图 5 可以看出,当存在谱线弯曲时,重构光谱各通道的幅值会发生变化,且随着弯曲量的增大,复原

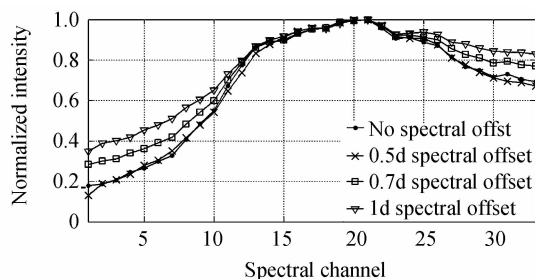


图4 不同光谱偏移量下,系统重构光谱密度信号的归一化曲线

Fig. 4 Normalized curve of the reconstructed spectral density signal without and with different spectral offset

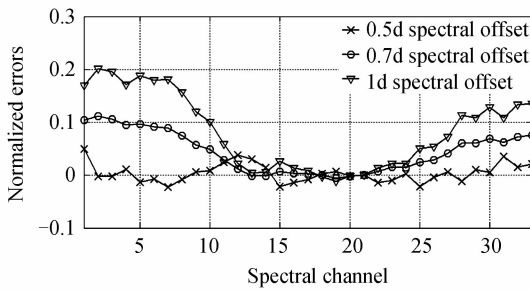


图5 不同谱线偏离量下,系统重构光谱信号与无谱线弯曲时系统重构光谱信号的归一化差值曲线

Fig. 5 Normalized error curve of the reconstructed spectral signal without and with different spectral offset

光谱虽然保留原有的光谱曲线形状,但通道两侧的误差加大,光谱曲线趋于平滑.这是由于谱线弯曲改变了光谱混叠的程度,引入了相邻切片的信息,迭代算法导致重构结果更趋于平滑化.

同时存在谱线弯曲时,重构图像的轮廓也会出现一定的程度的模糊.表1为不同谱线弯曲量下重构图像与无谱线弯曲下重构图像的相对峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)及不同谱线弯曲量下花瓣部分上同一点重构光谱信号曲线与无谱线弯曲下重构光谱信号曲线的归一化最大偏差.仿真实验还对不同谱线偏移量下数据立方体中其它点的复原光谱曲线进行对比,发现其归一化最大偏差基本与表1的结果相吻合.

表1 不同光谱偏移量时重构强度图的PSNR及重构光谱的归一化最大偏差

Table 1 PSNR of the reconstructed image and normalized maximal errors of the reconstructed spectra with different spectral offset

| Spectral offset | PSNR value/dB | Maximal error/(%) |
|-----------------|---------------|-------------------|
| 0.1d | 51.4 | 2.0 |
| 0.2d | 47.1 | 2.7 |
| 0.3d | 44.3 | 3.6 |
| 0.4d | 41.3 | 4.1 |
| 0.5d | 39.1 | 4.9 |
| 0.6d | 35.6 | 7.8 |
| 0.7d | 34.2 | 11.2 |
| 0.8d | 33.3 | 15.8 |
| 0.9d | 32.2 | 18.3 |
| 1d | 31.0 | 20.1 |

由表1可以看出,随着光谱偏移量的增大,重构图像的PSNR逐渐降低,当谱线偏移量从0.1d(d 为像元尺寸)增到1d,重构图像的PSNR已下降了约20 dB.另外,随着光谱偏移量的增大,重构光谱曲线的最大偏差也越大.说明在一定的光谱分辨率条件下,谱线弯曲程度越大对计算光谱成像系统信号采集的偏差影响越严重,重构的效果也就越差.综合考虑复原图像的PSNR和复原光谱曲线的偏离情况,并按照Robert O. Green^[18]给出的标准,当光

谱信号的相对偏差 $< 5\%$ 时,偏差对系统的影响可以忽略.当谱线偏移量为0.5d时,复原光谱的最大偏差为4.9%,能够达到上述标准,此时图像的峰值信噪比也可以接受.因此对于计算光谱成像系统,在10 nm的光谱分辨率下,为了较高准确度的复原目标数据立方体,谱线弯曲应控制在0.5d之内.

4 结论

与传统的色散型光谱成像仪一样,计算光谱成像系统若存在谱线弯曲,将给系统的信号采样带来影响,改变图谱混叠的过程,影响复原图谱的准确度.本文从计算光谱成像技术的原理入手,分析谱线弯曲影响下系统图谱混叠模型,采用计算机仿真的方法,对不同谱线弯曲情况进行仿真.研究结果表明,存在光谱偏离的重构结果与没有谱线弯曲的情况相比,随着光谱偏移量的增加,复原图像轮廓出现模糊,PSNR不断降低,重构光谱信号的偏差不断增大.在10nm的光谱分辨下,当最大谱线弯曲量在半个像元以内时,复原结果可以接受.对于谱线弯曲较为严重的色散元件,在计算光谱成像系统中,复原误差已不能忽略,就需要对采集的信号进一步的校正,以提高复原图谱的准确度.

本文研究能够加深理解谱线弯曲在计算光谱成像系统中的影响,指导系统的设计,合理选择光学结构及棱镜分光形式,优化色散元件的谱线弯曲,以达到所需的复原准确度.

参考文献

- [1] HUANG Min, ZHU Xiao, ZHU Qi-bin, *et al.* Morphological characteristics of maize seed extraction and identification based on the hyperspectral image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 868-873.
黄敏, 朱晓, 朱启兵, 等. 基于高光谱图像的玉米种子特征提取与识别[J]. *光子学报*, 2012, **41**(7): 868-873.
- [2] HOLLSTEIN A, FISCHER J. Effects of salinity, temperature and polarization on top of atmosphere and water leaving radiances for case 1 waters[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(33): 8022-8033.
- [3] UK K, BEREZIN V B, PAPAYAN G V, *et al.* Spectrometer for fluorescence-reflection biomedical research[J]. *Journal of Optical Technology*, 2013, **80**(1): 40-48.
- [4] YAO Bao-li, LEI Ming, XUE Bin, *et al.* Progress and applications of high-resolution and super-resolution optical imaging in space and biology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1607-1618.
姚保利, 雷铭, 薛斌, 等. 高分辨率和超分辨率光学成像技术在空间和生物中的应用[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1607-1618.
- [5] WANG Xin, DING Xue-zhuan, YANG Bo, *et al.* Optical design and spectral calculation of prism spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1334-1339.
王欣, 丁学专, 杨波, 等. 棱镜分光光谱仪的光学系统设计与光谱特性计算[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1334-1339.
- [6] JOHN OTTEN III L, BUTLER E W, RAFERT J B, *et al.*

- The design of an airborne Fourier transform visible hyperspectral imaging system for light aircraft environmental remote sensing[C]. *SPIE*, 1995, **2480**: 418-424.
- [7] WANG Xin-quan, HUANG Min, Gao Xiao-hui, *et al.* Portable multispectral imager based on LCTF [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 71-75.
王新全, 黄旻, 高晓惠, 等. 基于液晶可调谐滤光片的便携式多光谱成像仪[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 71-75.
- [8] BRADY D J, GEHM M E. Compressive imaging spectrometers using coded apertures[C]. *SPIE*, 2006, **6246**: 62460A1-9.
- [9] WAGADARIKAR A, JOHN R, WILLETT R, *et al.* Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(10): 44-51.
- [10] DAVIS C O, BOWLES J, LEATHERS R A, *et al.* Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(4): 210-221.
- [11] WAGADARIKAR A A, PITSIANIS N P, SUN Xiao-bai, *et al.* Spectral image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[C]. *SPIE*, 2008, **7076**: 707602-1-15.
- [12] ARGUELLO H, ARCE G R. Code aperture optimization for spectrally agile compressive imaging [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, **28**(11): 2400-2413.
- [13] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, **52**(4): 1289-1306.
- [14] NEVILLE R A, SUN L, STAENZ K. Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data [C]. *SPIE*, 2003, **5093**: 144-154.
- [15] BIOUCAS-DIAS J M, FIGUEIREDO M A T. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**: 2992-3004.
- [16] http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/david.foster/Hyperspectral_images_of_natural_scenes_04.html.
- [17] GEHM M E, MCCAIN S T, PITSIANIS N P, *et al.* Static two-dimensional aperture coding for multimodal multiplex spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(13): 2965-2974.
- [18] GREEN R O. Spectral calibration requirement for Earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum [J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(4): 683-690.