

多帧图像编码孔径光谱成像技术

刘世界^{1,2,3}, 张旭东^{1,3}, 张月^{1,3}, 李春来¹, 王建宇^{1,3*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 上海科技大学 信息学院, 上海 201210;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在双色散结构编码孔径光谱成像系统(DD-CASSI)的基础上,提出了利用多帧采样图方法(Multi Frame-DD-CASSI),以提高信息采样率,并提出新的数学模型,实现了对三维数据立方体的光谱维压缩编码,充分利用了光谱维数据的相关性,利用 32 帧采样图恢复数据,达到了 0.99 的光谱曲线相似度和 40 db 的图像峰值信噪比。

关键词:光谱成像;压缩感知;编码孔径光谱成像(CASSI);重构算法

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A

Multi-frame image coded aperture snapshot spectral image technology

LIU Shi-Jie^{1,2,3}, ZHANG Xu-Dong^{1,3}, ZHANG Yue^{1,3}, LI Chun-Lai¹, WANG Jian-Yu^{1,3*}

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083;

2. School of Information Science & Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

Abstract: Based on dual-disperser coded aperture snapshot spectral imaging (DD-CASSI) system, method using multiple sample image (Multi Frame-DD-CASSI) was put forward to increase the sampling rate. And a new math model was put forward to realize spectral compression in 3-D data cube. The system makes full use of spectra's correlation, and 0.99 spectral correlation fitting and 40db image peak signal noise were achieved with 32 frames of sample images.

Key words: spectral image, compressed sensing, coded aperture snapshot spectral imaging (CASSI), reconstruct algorithm

PACS: 42.30.va

引言

光谱成像技术是将光谱探测和成像有机结合的一种技术,能够在探测物体空间信息的同时将空间像元分光形成纳米级光谱分辨率的光谱信息,从而得到图谱合一的影像立方体上的任一像元目标的光谱曲线,传统光谱成像仪获取信息的方式是先感知全部信息,然后利用合适的方法进行数据压缩,这个过程无疑是浪费了大量的存储空间和时间^[1]. 基于压缩感知的成像技术是利用压缩感知理论采样和压缩同时进行的特点,对信息进行同时采样和压缩,将

数据压缩放在采样端,解决了大量数据存储和计算带来的空间和时间的浪费问题^[2].

压缩感知基本理论是由 Donoho 等人提出^[3-4], 该理论指出,对于一个可压缩的高维信号 $x \in \mathbf{R}^n$, 可以通过一个满足一定条件(RIP 性质)的矩阵 $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ($m < n$) 投影成低维空间信号 $y \in \mathbf{R}^m$, 进而将低维信号 y 作为观测信息,利用合适的方法求解线性方程($y = Ax$),反解出全部信号 x .

基于压缩感知理论的成像系统主要有 Rice 大学提出的单像素系统^[5]和 Duke 大学提出的 CASSI 光谱成像系统^[6-7]. 单像素系统是用具有一定编码形

收稿日期:2017-01-20,修回日期:2017-09-22

基金项目:中国科学院创新基金(CXJJ-16S054)

Foundation items: Chinese Academy of Sciences Innovation Fund (CXJJ-16S054)

作者简介(Biography): 刘世界(1989-),男,河南商丘人,硕士,主要研究领域为压缩感知、光谱成像技术. E-mail: liushjie163@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: wangjy@shb.ac.cn

Received date: 2017-01-20, revised date: 2017-09-22

式的微透镜阵列将空间信息映射到单个像元探测器,进而构造满足压缩感知理论的线性方程,利用合适方法完成对成像目标信息的重构,主要用于成单幅图像.2009年,Ting Sun等人基于单像素系统,增加了分光功能,将单点探测变成线列探测,增加了一维光谱信息,实现了光谱成像系统(CHSI)^[8].2013年,Yitzhak August等人又在此基础上提出对场景信息进行空间信息和光谱信息同时压缩测量(CHSISS)^[9].2007年,美国杜克大学DISP研究小组开展了基于编码孔径的光谱成像(CASSI)系统.CASSI系统是将三维数据立方体成像通过满足压缩感知理论要求(RIP)的探测矩阵将信号映射到二维探测器面阵上,形成光谱空间混叠信息,并最终通过重构算法重构出完整信息.该课题组还提出了具有双色散结构的CASSI系统(DD-CASSI),取得了比单色散结构的CASSI系统更高的空间分辨率,但同时也损失了光谱分辨率^[10].本文在基于编码孔径的快照式光谱成像(CASSI)系统的基础上,提出利用多帧DD-CASSI采样图,并结合提出的新数学模型,来提高光谱图像恢复信噪比.

1 光谱数据相关性分析

压缩感知理论要求待采样信号本身或者其在某变换域具有稀疏性,信号越稀疏越有利于信号的采集和恢复,光谱数据立方体在正交变换域(如傅里叶变换域、小波变换域等)具有很好的稀疏性,该稀疏性可以通过原始数据间的相关性来衡量,光谱数据的相关性通常分为空间相关性和谱间相关性,空间相关性是指高光谱图像每个谱段的图像的某一个像素与其相邻像素之间的相似性.谱间相关性是指高光谱图像的同一个空间位置的不同谱段的图像像素值之间的相似性.空间相关性和谱间相关性可以分别用像素间的自相关系数 R 和互相关系数 H 定量衡量^[11],如下式.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(f(i,j) - \bar{f})(f(i+1,j+1) - \bar{f})]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - \bar{f}]^2}, \quad (1)$$

$$H = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)g(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j)^2}}, \quad (2)$$

其中, f 是图像的灰度平均值, R 是图像 f 两个相邻元素之间的自相关系数, H 称为两个图像 f 和 g 的

互相关系数.

这里引进空-谱相关性的定义,其示意图如图1,该相关性用来衡量不同空间位置的不同谱段数据之间的相关性,其计算方法可以用联合相关(Co-Correlation)系数 C 衡量,其中 C 可计算为:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)g(i+1,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j)^2}}. \quad (3)$$

根据以上定义和数值计算方法,可以将数据相关性用图1形象地表示.

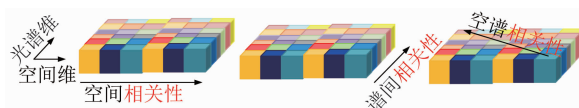


图1 光谱数据相关性示意图

Fig. 1 Schematic of spectral correlation

从以上推导中可以看出,单像素成像系统利用了成像目标的空间相关性,SD-CASSI系统是利用了其空-谱相关性.图2给出了测试数据的三种相关性,测试数据来自上海技术物理研究所PHI光谱成像仪,其光谱探测范围为450~1000 nm,光谱分辨率优于5 nm,选取具有城市建筑、道路和草坪等具有明显光谱特征和空间特征的部分,为了减少运算量,从153个波段中等间隔选取了77个作为测试数据.从图中可以看出,光谱数据的谱间相关性远远优于其他两种相关性,充分利用该特点,将得到更好的效果.

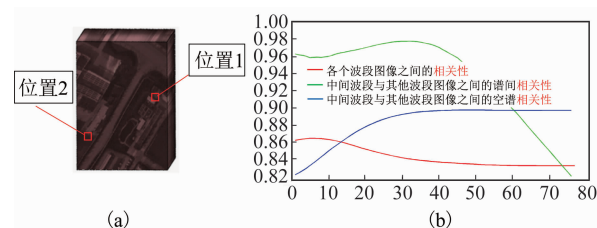


图2 测试光谱数据及其相关性比较 (a)测试用数据,(b)相关性比较

Fig. 2 Data for test and its comparison of correlation (a) Data for test, (b) Comparison of correlation

2 Multi frame-DD-CASSI 系统

2.1 DD-CASSI 系统

DD-CASSI系统示意图和数据流程图如图3所示,该系统是先将探测目标进行色散,然后对色散后

的信息进行编码,之后再进行一次色散以消除第一次色散,最终探测器上得到的就是经过编码后的光谱混叠信息。

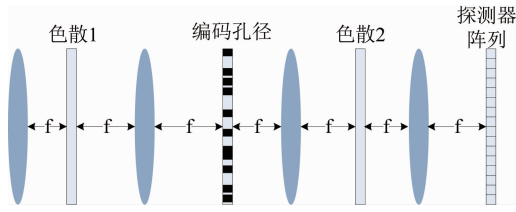


图3 DD-CASSI系统示意图
Fig.3 Schematic of the DD-CASSI system

该系统在进行重构时,是将光谱数据立方体 S_0 (i, j, k) 按光谱维展开成向量 S , 观测矩阵具有如图4的形式。同样取 $N \times L$ 大小的“行立方体”分析, 测量矩阵大小为 $N \times NL$, 为一个块对角矩阵, 其中块元素为由行编码形式确定的行矩阵。

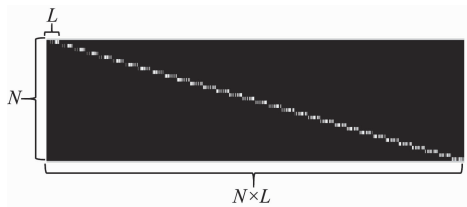


图4 DD-CASSI系统的观测矩阵示意图
Fig.4 Schematic of the DD-CASSI's measurement matrix

一次曝光的 CASSI 系统因为其极低的采样率导致重构结果丢失信息比较严重, 因此可以通过利用多帧采样图来提高信息采样率, 进而提高数据恢复精度。

从以上分析可以看出, 如果直接将整个数据看成整体, 测量矩阵存在的对角形式, 使得其并不是严格的高斯分布矩阵, 另外, 该模型将数据立方体看做整体, 对于 $256 \times 256 \times 77$ 的数据立方体, 构成的向量大小为 5046272, 进行系数变换时, 正交矩阵的大小约为 10^{13} 这种数学形式对于压缩感知模型的求解是很不利的。下面利用另一种方法, 推导出能更加满足压缩感知基本原理的数学模型, 进而应用到这里提出的多帧 DD-CASSI 系统中去。

2.2 Multi frame-DD-CASSI 系统模型建立

从 DD-CASSI 系统示意图中可以看出, 由于数据立方体是水平色散, 因此数据的编码在行与行之间是相互不影响的, 在进行数据分析的时候可以对单独的行进行分析, 为了分析简单, 假设有一个大小为 $1 \times 6 \times 3$ 的数据立方体, 如图5所示, 记数据立方

体为 \mathbf{C} (Cube), 编码模板矩阵为 \mathbf{T} (Transform), 探测器接收数据为 \mathbf{D} (Detector), c_{ij} 为 \mathbf{C} 的第 i 列, 第 j 个波段数据, t_i 为 \mathbf{T} 的第 i 个位置编码模板数据, d_i 为探测器 (\mathbf{D}) 上的第 i 个数据。

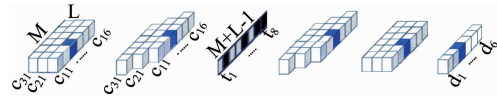


图5 DD-CASSI系统数据流程图简化图
Fig.5 Simplified schematic of SD-CASSI data flow

从以上转换关系可以得到

$$d_1 = t_1 \times c_{31} + t_2 \times c_{21} + t_3 \times c_{11} \quad (4)$$

即

$$d_1 = [t_1 \quad t_2 \quad t_3] \begin{bmatrix} c_{31} \\ c_{21} \\ c_{11} \end{bmatrix} \quad (5)$$

同理, 在探测器的 i 位置对应数据具有以上同样的形式, 即:

$$d_i = [t_i \quad t_{i+1} \quad t_{i+2}] \begin{bmatrix} c_{3,i} \\ c_{2,i} \\ c_{1,i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

从上式可以看出, 令 $y = d_i$, $\mathbf{A} = [t_i \quad t_{i+1}$

$$t_{i+2}], \mathbf{x} = \begin{bmatrix} c_{3,i} \\ c_{2,i} \\ c_{1,i} \end{bmatrix}, \text{就得到:}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (7)$$

向量 \mathbf{x} 是某空间位置的光谱信息, 以上模型建立得到的是对某一空间位置的一维光谱信息进行压缩, 此时 \mathbf{y} 只是一个数据, 对应于探测器上某一像元一次的探测数据。对于具有 L 个波段的光谱数据, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{L \times 1}$, $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{1 \times L}$, 这个过程类似于单像素相机的一次编码采样, 那么在该系统同样可以进行多次编码采样, 使得观测矩阵 \mathbf{A} “更高”, 以满足压缩感知测量次数的要求, 即利用 N 帧采样图作为采样数据, 就得到矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{N \times L}$, 即 $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$, 其中

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} d_{i1} \\ \dots \\ d_{iN} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} t_{i1} & t_{i1+1} & \dots & t_{i1+L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{iN} & t_{iN+1} & \dots & t_{iN+L} \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} c_{L,i} \\ \dots \\ c_{1,i} \end{bmatrix}$$

i_N 表示第 N 帧采样图像。

针对方程 $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ 的求解, 目前已经有很多方法^[13,15], 包括贪婪算法和凸优化算法等, 这里选取基本的贪婪算法-正交匹配追踪 (OMP)^[15] 对信息重构。

上述过程可以由图 6 所示,已经证明,高斯分布矩阵满足 RIP 性质,可以作为普适的测量矩阵^[3-4],所以选取其作为测量矩阵,每一次的测量矩阵都发生变化,即通过变换编码实现多次测量. 编码模板与数学模型的对应关系如图 7 所示.

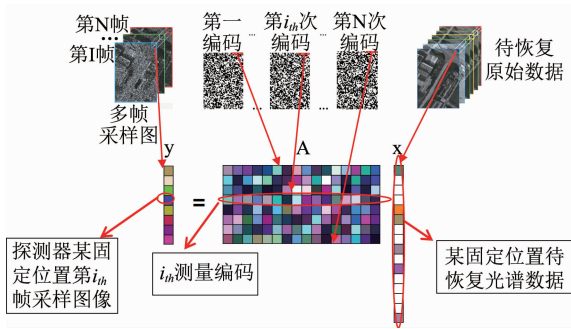


图 6 Multi Frame-DD-CASSI 系统压缩感知数学模型建立示意图

Fig. 6 Establishment schematic of multi-frame-DD-CASSI's compressed sensing mathematical model

从上面过程可以看出,该系统是对面视场进行同时编码曝光,最终将整个系统的探测数据进行变形,得到大量子问题,即:探测器上的每一个像元数据都对某固定空间位置光谱一维的单点探测,而单像素相机是对二维空间信息进行编码压缩,这是两者根本的区别. 该系统最大的优势是充分利用了光谱相关性,理论上,数据重构结果要远远大于对空间编码压缩的方法. 同时,相对于原数学模型(如图 6),该数学模型具有更加严格的压缩感知数学模型.

3 验证结果

利用以上建立数学模型,对真实数据进行了验证. 仿真用数据是从上海技术物理研究所设计的 PHI 采集的数据中提取 $256 \times 256 \times 77$ 光谱数据立方体,如图 2 所示,将该数据作为待采样和恢复的数据,即探测目标. 按照图 3 所示光路,该光谱成像仪通过对探测目标一次曝光,就完成了—次编码采样,于是可以通过变换编码模板上的编码样式完成多次编码采样,获得多帧采样图像. 按照 2.2 节推导的过程,就可以得到最终的数学模型. 同时,利用 DCT (离散余弦变换) 稀疏基^[12]作为待恢复数据的稀疏变换,用 OMP (正交匹配追踪) 重构算法^[13]进行恢复计算,分别选取屋顶(位置 1)和草坪(位置 2)的光谱曲线作为参考曲线,如图 2,得到如图 7 所示,显示了两个位置光谱曲线恢复的结果,从图中可以

看出,随着采样图帧数的增加,光谱曲线的恢复逐渐精确,其中 1 帧对应的就是单次曝光的 DD-CASSI 系统的恢复结果,当采用 64 帧采样图进行时,基本可以全部恢复光谱曲线信息.

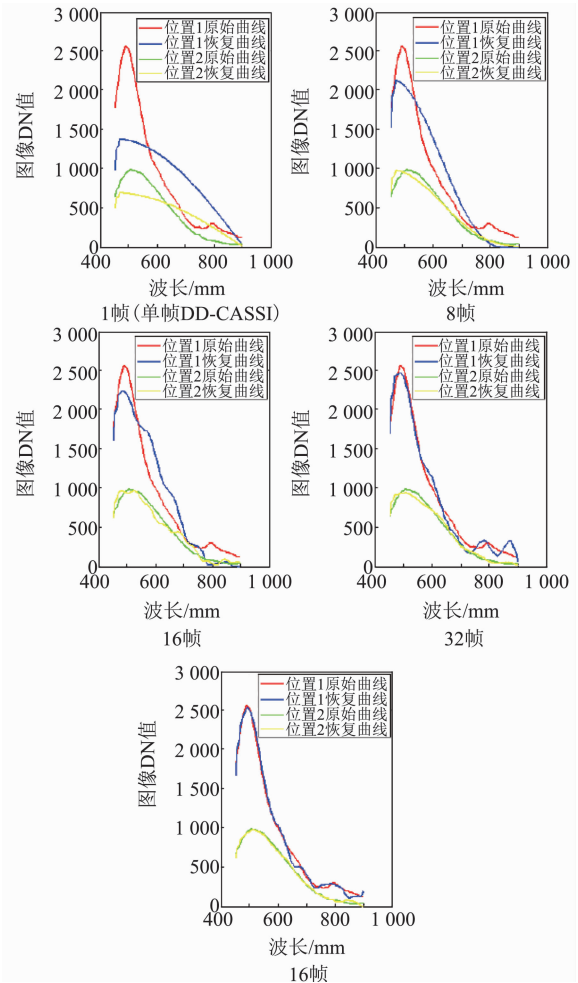


图 7 利用不同帧数恢复的光谱曲线

Fig. 7 Reconstructed spectral curve using different number frames

这里可以用原始曲线和恢复曲线之间的光谱相似度 SCF (Spectral Correlation Fitting) κ 来定量衡量恢复光谱曲线的准确度^[14],光谱相似度的计算式为:

$$\kappa = \frac{\sum_{k=1}^n (x_0(k) - \bar{x}_0)(x_i(k) - \bar{x}_i)}{\sqrt{(\sum_{k=1}^n (x_0(k) - \bar{x}_0)^2 \sum_{k=1}^n (x_i(k) - \bar{x}_i)^2)}} \quad (8)$$

其中 x_0 和 x_i 分别代表原始数据和恢复数据, \bar{x}_0 和 \bar{x}_i 分别代表两者的平均光谱. κ 越接近于 1,说明两者相似程度越高.

图 8 给出了两个系统在不同位置光谱曲线恢复

相似度的比较,可以看出利用多帧采样图恢复的曲线准确度远远高于由单帧 DD-CASSI 系统采样恢复出来的结果,一个陡峭的上升直接体现了这一点,当利用 32 帧采样图像时,恢复结果光谱曲线与原始光谱曲线相似度已经达到 0.99.

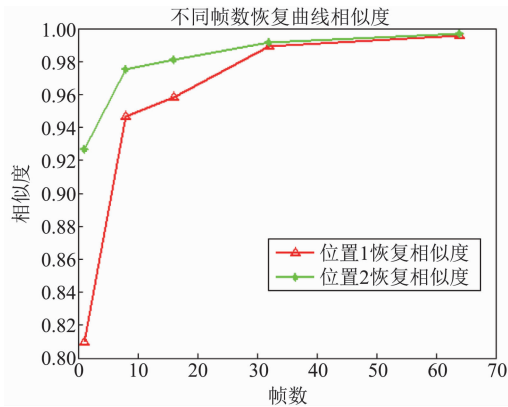


图8 不同采帧数恢复的光谱曲线准确度
Fig. 8 Spectral correlation fitting using different frames

值得一提的是,由于 Multi Frame-DD-CASSI 利用了光谱数据的谱间相关性,从第 1 部分的光谱数据相关性分析可以看出,该系统的恢复结果理论上要好于利用了空-谱相关性的 SD-CASSI 系统,同时该系统的结构决定了图像恢复的空间信息几乎没有丢失,这也是优于 SD-CASSI 的一个方面.图 9 显示了两种系统利用单帧和 32 帧恢复的合成彩色图像的结果,从图中可以看出,利用帧数较少时,SD-CASSI 空间信息丢失比较严重,而 DD-CASSI 几乎没有丢失,但光谱信息损失严重.图 10 是对恢复图像数据的峰值信噪比^[15]比较,可以看出,随着采样率的增加,恢复结果的峰值信噪比越来越高,并当利用 32 帧采样图进行恢复时,峰值信噪比已经达到 40 db,空间信息的恢复远远高于单帧的 25 db 左右,基本满足一般工程探测要求.同时可以看出,DD-CASSI 系统恢复的结果远远好于 SD-CASSI 系统.

4 结论

Multi Frame-DD-CASSI 系统具有两个分光部件,第一个部件将数据立方体色散开,第二个部件用于消除色散,这样在几乎不损失空间信息的前提下,完成了对数据的光谱维编码.相比于利用了空间相关性的单像素成像系统和利用了空-谱相关性的 SD-CASSI 系统,Multi Frame-DD-CASSI 系统充分利用了光谱数据间的谱间相关性,得到更高精确度的

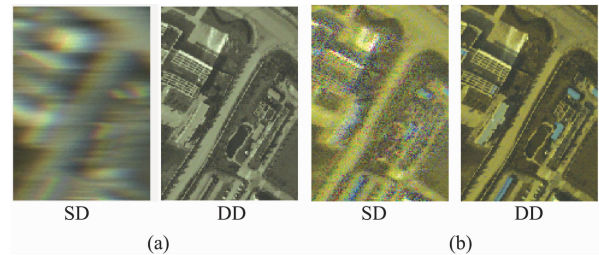


图9 两种系统恢复的彩色图像比较 (a)单帧恢复结果, (b)32 帧恢复结果

Fig. 9 Comparison of two systems' reconstructed color images (a) Reconstructed results using single frame, (b) reconstructed results using 32 frames

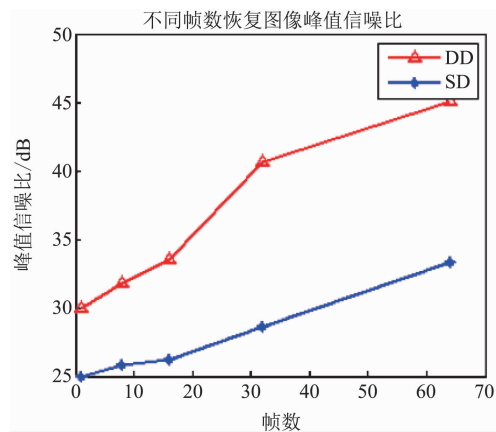


图10 利用不同帧数恢复图像的峰值信噪比比较
Fig. 10 Comparison of constructed image's PSNR using different frames

光谱数据立方体.从以上过程可以看出,该系统还可以用于视频等其他三维数据的压缩采样等领域.现实条件中也已经具备实际系统实现的可能性.该系统可通过可编程器件实现,如 DMD 变换帧频可以达到 10^2 的量级,在探测器采集数据频率和 DMD 变换频率匹配的情况下,通过不同编码可以完成多次测量.假设 DMD 变化的频率为 24 次/秒,探测器采集频率为 24 次/秒,这样一秒之内就可以获得 24 帧采样图像,对于 24 波段的数据立方体,就可以通过这种测量,实现 100% 采样率面视场曝光成像;对于 48 波段的数据立方体,就完成了 50% 采样率的探测,依次类推,通过合适的编码,就完成压缩感知理论中的压缩采样过程.

同时实际系统中也将面临诸多问题.主要问题有:

1) 光学配准.该系统具有两个严格对应起来的色散元件,对光学机械结构的配准具有很高的要求.

2) 光谱定标.该系统是面视场成像,需要准确的单色光面场定标.

3) DMD 等的编码实现, 以及与探测器帧频之间的对应问题。

4) 数据测量和恢复方面的矛盾. 以上过程中, 32 帧图像恢复曲线, 在对于精度要求不高的系统可以满足要求, 但光谱曲线更注重的是吸收峰等的细节的恢复, 而压缩感知理论决定了对于平滑性较好的数据恢复更精确。

这些问题也是未来研究的重点。

References

- [1] WANG Jian-Yu, SHU Rong, LIU Yin-Nian, *et al.* *Introduction to imaging spectroscopy* [M]. Beijing: Science Press, (王建宇, 舒嵘, 刘银年, 等. *成像光谱技术导论* [M]. 北京: 科学出版社), 2011: 19 - 27.
- [2] YAN Jing-Wen, LIU Lei, QU Xiao-Bo. *Compressed sensing and its application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (闫敬文, 刘蕾, 屈小波. *压缩感知及应用* [M]. 北京: 国防工业出版社), 2015: 5 - 17.
- [3] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, **52**(4): 1289 - 1306.
- [4] Candès E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2008, **25**(2): 21 - 30.
- [5] Duarte M, Davenport M, Takhar D, *et al.* Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2008, **25**(2): 83 - 91.
- [6] Wagadarikar A A, Pitsianis N P, Sun X, *et al.* Spectral image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7076**(707602): 1 - 15.

- [7] Gehm M E, John R, Brady D J, *et al.* Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J], *Optics Express*. 2007, **15**(21): 14013 - 14027.
- [8] Sun T, Kelly K. Compressive sensing hyperspectral imager [J]. *Computational Optical Sensing and Imaging, CTuA5*, 2009.
- [9] Yitzhak A, Chaim V, Yair R. Compressive hyperspectral imaging by random separable projections in both the spatial and the spectral domains [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(10): D46 - 54.
- [10] Gehm M E, John R, Brady D J, *et al.* Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J], *Optics Express*. 2007, **15**(21): 14013 - 14027.
- [11] JI Zhen-Xing. Research on hyperspectral image recovery algorithm based on compressed Sensing [D]. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (计振兴. 基于压缩感知的高光谱图像重建算法研究, 南京: 南京航空航天大学), 2012.
- [12] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing* [M], Ruan Qiu-Qi, Ruan Yu-Zhi, *et al.* Translate, Third edition, Beijing, Publishing House of Electronics Industry (Gonzalez R C, Woods R E. *数字图像处理*. 阮秋琦, 阮宇智, 译, 第三版, 北京: 电子工业出版社), 2013: 336 - 338.
- [13] Tropp J, Gilbert A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, **53**(12): 4655 - 4666.
- [14] LV Xu-Liang, JIA Qi, RONG Xian-Hui, *et al.* Application of degree of grey incidence on similarity of spectral curves [J], *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)* (吕绪良, 贾其, 荣先辉. 灰色关联度在光谱曲线相似度分析中的应用, *解放军理工大学学报 (自然科学版)*). 2011, **12**(5): 496 - 500.

(上接第 798 页)

干涉条纹平移引起的相位误差与波数是线性关系, 对残余相位进行分析可以校正零光程差位置的偏移量. 该方法已经应用于风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪的在轨数据预处理中, 并取得了很好的效果, 具有重要的应用价值。

References

- [1] 邹曜璞. 星载傅里叶光谱仪星上数据处理研究 [D]. 上海: 中科院上海技术物理研究所, 2016.
- [2] LI Bao-Sheng, LIU Yong, WANG An. Uniform Sampling Method of Optical Fiber Fourier Transform Spectrometer [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (李保生, 刘勇, 王安. 光纤傅里叶光谱仪干涉图均匀抽样方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 201 - 204.
- [3] 周世椿. 高级红外光电工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 309 - 317.

- [4] Griffiths P R, Haseth J A. *Fourier transform infrared spectrometry* [M]. New Jersey: A John Wiley & Sons, INC., 2007: 19 - 27.
- [5] Revercomb H E, Buijs H, Howell H B, *et al.* Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the high-resolution interferometer sounder [J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(5): 3210 - 3218.
- [6] JPSS Configuration management office. Joint polar satellite system (JPSS) operational algorithm description (OAD) document for cross-track infrared sounder (CrIS) sensor data record (SDR) software code 474: 474-00071 [C/OL]. 2012 (2012-11-9). http://npp.gsfc.nasa.gov/science/sciencedocuments/122012/474-00071_OAD-CrIS-SDR_B.pdf.
- [7] Han Y, Revercomb H, Crompton M, *et al.* Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, **118**(22): 12734 - 12748.