

基于压缩感知的单点探测计算成像技术研究

马彦鹏 王亚南 王义坤 葛明锋 王雨曦 齐洪兴 舒 嵘

(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)

摘要 在压缩感知理论的基础上,分析了单点探测计算成像系统的整体结构、相关观测矩阵的设计和图像重构算法,并针对相关算法进行了 Matlab 仿真。仿真实验结果表明,压缩感知用于单点探测计算成像可以在减少采样的同时还能清晰复原图像。在实验室内搭建了远距离对外成像系统样机,并在室内利用平行光源进行了成像实验。实验结果表明,该成像系统具有较好的空间分辨率。还对单点探测计算成像进行了更进一步的扩展,通过在成像系统后面搭建色散光路,建立起了计算成像光谱仪的系统结构,分析了压缩感知用于计算成像光谱仪的可行性,并对计算成像光谱仪进行了理论分析。

关键词 成像系统;压缩感知;单元探测;计算成像;数字微反射镜;编码孔径

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1211007

Study of Single-Pixel Detection Computational Imaging Technology Based on Compressive Sensing

Ma Yanpeng Wang Yanan Wang Yikun Ge Mingfeng Wang Yuxi
Qi Hongxing Shu Rong

(Key Laboratory of Space Active Electro-Optical Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Based on the theory of compressive sensing, the overall structure system of the single-pixel detection computational imaging, the design of the observation matrix and image reconstruction algorithm are analysed, and correlation algorithm is simulated by Matlab. Simulation results show that compressive sensing used to single-pixel detection computational imaging can reduce the sampling and can clearly reconstruct image. In addition, a long-range external imaging system prototype is built in the laboratory, and the imaging experiment is conducted in the indoors using parallel light source. The experimental results show that the imaging system has better spatial resolution. The single-pixel detection computational imaging is extended further by building dispersion optical path in the imaging system, the system structure of computational imaging spectrometer is established, the feasibility of which compressive sensing is used to the computational imaging spectrometer is analyzed, and the computational imaging spectrometer is analyzed in theory.

Key words imaging systems; compressive sensing; single-pixel detection; computational imaging; digital micromirror device; coded aperture

OCIS codes 110.0110; 110.1578; 110.3010; 110.4234

1 引 言

计算成像技术是近几年国内外提出的一门新兴的成像技术^[1-3],相比较于传统的成像系统,计算成

像使用特殊的空间光调制器作为编码孔径对景物目标进行编码,按照预先所设置编码孔径的数学形式调制、捕捉景物空间信息成像,再经由后续数据计算

收稿日期: 2013-05-10; 收到修改稿日期: 2013-08-15

基金项目: 国家 863 计划(2011AA120102)、上海技术物理研究所创新专项(Q-DX-38)

作者简介: 马彦鹏(1987—),男,博士研究生,主要从事计算成像光谱技术方面的研究。E-mail: ma.yanpeng@163.com

导师简介: 舒 嵘(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事成像光谱技术方面的研究。

E-mail: shurong@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

方法反演得到最终图像,能够获取图像的高空间分辨率,并保持图像的高信噪比。同时,探测器采用单元探测器,可以大大减少系统成本,未来将有望扩展到红外波段,尤其在红外国产化大面阵探测器技术缺乏的条件下,研究基于单元探测器的成像技术具有重要的意义。

当前随着信息技术的快速发展,人们对信息的需求量极速增加,图像的信息量增大,携带信息的信号带宽越来越宽,以奈奎斯特定律为基础的信号处理框架要求的采样速率和处理速度也越来越高,因而对宽带信号处理的困难日益加剧。另一方面,在图像信号的实际应用中,庞大的信息量给信号的传输、储存带来极大的挑战,传统的成像系统采集一幅图像需要先用很高的频率获取图像的采样值,再对数据进行压缩变换,特别是每个像素采样都拥有自己的图像传感器,但是许多传感器的采样数据最后被抛弃,显然这种高速采样再压缩的过程浪费了大量的采样资源。为了保证信息不丢失,采样频率至少为带宽的2倍,信号处理流程是先采样后处理,其中存在一个矛盾:一方面,探测器尽可能获取更多的测量数据;另一方面,数据压缩又想方设法丢弃更多的冗余数据。

近年来,Donoho等^[4-7]提出了一种采样与压缩同步进行的理论——压缩感知(CS)。CS理论通过挖掘信号信息的冗余性和稀疏性,在采样过程中,不是获取图像的全部像素采样,而是通过特定的算法,选择合适的观测矩阵,每次对信号进行全局采样,然后通过这些采样结合相关的恢复算法复原图像。与传统的“先采样、后压缩”不同,CS理论是“边采样、边压缩”的方式,将CS应用于成像系统可以显著节省传感器数量,这种“边采样、边压缩”的方式使得信号处理的技术负担从传感器转移到数据处理上^[8]。目前,压缩感知理论最引人注目的研究成果就是美国RICE大学利用CS理论开发的单像素相机^[9],与传统的CCD和CMOS相机使用数百万个像素传感器相比,该相机利用唯一的信号光子探测器对图像像素点进行较少部分采样,从这些较少采样像素恢复得到一幅图像。

本文在压缩感知理论的基础上,分析了单点探测计算成像系统的整体结构、相关观测矩阵的设计和图像重建算法,并针对相关算法进行了Matlab仿真。另外,还对单点探测计算成像进行了更进一步的扩展,通过在成像系统后面搭建色散光路,分析了压缩感知用于计算成像光谱仪的可行性,为未来将

压缩感知用于计算成像光谱仪做了相关的探索。

2 压缩感知理论

压缩感知(即压缩传感)理论是近年来信号处理领域诞生的一种新的信号处理理论,由Donoho等^[4-7]提出,自诞生之日起便在各个领域极大地吸引了相关研究人员的关注^[9-13]。

本文将压缩感知应用于计算成像中,设 x 为长度 N 的一维信号,稀疏度为 K (即含有 K 个非零值), A 为 $M \times N$ 的二维矩阵($M < N$), $y = \Phi_{\Omega} x$ 为长度 M 的一维测量值。压缩感知问题就是已知测量值 y 和测量矩阵 Φ_{Ω} 的基础上,求解欠定方程组 $y = \Phi_{\Omega} x$ 得到原信号。

需要求解如下最优化问题:

$$\hat{x} = \operatorname{argmin} \|x\|_0. \quad (1)$$

这个过程称之为重构,其中的 0 范数指的就是 0 元素的个数。Candès等^[5-7]指出,要精确重构 k 稀疏信号 x ,测量次数 M (即 y 的维数)必须满足 $M = O(k \lg N)$,并且矩阵 Φ_{Ω} 必须满足约束等距性条件。然而最小 0 范数是一个多项式复杂程度的非确定性(NP)问题,通常需要对该问题加以转换,如将 0 范数转化为 1 范数问题。

2.1 信号的稀疏表示

一般的自然信号 x 本身并不是稀疏的,需要在某种稀疏基上进行稀疏表示, $x = \Psi^* s$, Ψ^* 为稀疏基矩阵,在实际的稀疏表示过程中,经典的稀疏基选择有多种,比如离散余弦变换、离散小波变换和傅里叶变换等。本文的程序仿真采用离散余弦变换。

s 为信号 x 的稀疏表示,信号的稀疏性也是数据压缩的基础,自然图像大多满足稀疏性(或可压缩性)。可以将信号的稀疏表示,如图1所示。

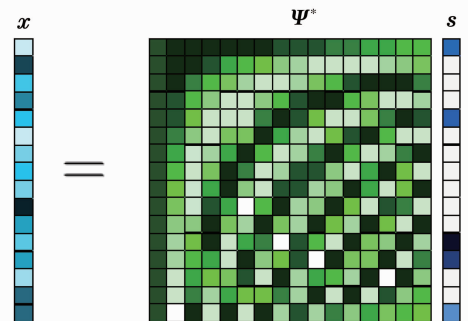


图1 信号的稀疏表示

Fig. 1 Sparse representation of signal

2.2 对信号进行测量

对信号 x 进行测量,传统信息论要求至少观测 N 个样本,而且采样频率必须大于信号频率的两倍。根据压缩感知理论,现只要观测 M 个样本,其中 M 远小于 N 。信号 x 的 $M(M \ll N)$ 个线性测量,由 y 重构 x ,方程是欠定方程组,有无穷多解,如果原始信号 x 是 K 稀疏的,并且 y 与 Φ_Ω 满足一定条件,就可通过适当的算法重建信号 x 。信号的观测过程如图 2 所示。

将信号的稀疏表示方程与测量方程联合,压缩感知方程变为 $y = \Phi_\Omega x = \Phi_\Omega \Psi^* s = \Theta s$,可以用如图 3 表示,原来的测量矩阵 Φ_Ω 变换为 $\Theta = \Phi_\Omega \Psi^*$ (称之为传感矩阵),解出 s 的逼近值 \hat{s} ,则原信号 x 的逼近值为 $\hat{x} = \Psi^* \hat{s}$ 。 Ψ^* 为稀疏变换矩阵(正交稀疏基变换矩阵), Φ_Ω 为观测矩阵。

综合以上,将压缩感知理论用于单点探测计算成像的整个过程如图 4 所示。

由此可以看出,基于压缩感知理论的单点探测计算成像与传统成像完全不同,传统成像要获取高分辨率的图像必须使探测器的像素大大提高,但不可能一直增大探测器的像素尺寸,尤其在红外波段以及更长的波段,这将更加困难。而计算成像则将技术难点转移到数据处理方面,以较少的代价实现高的技术指标。

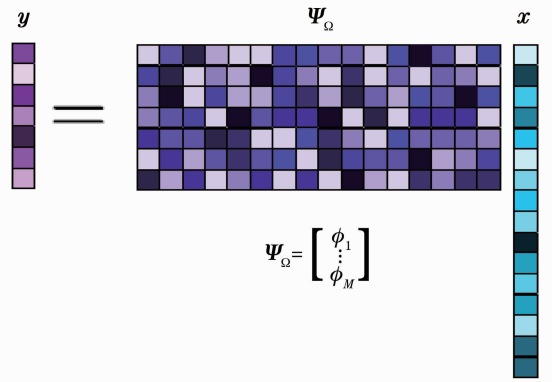


图 2 信号的观测方程

Fig. 2 Signal observation equation

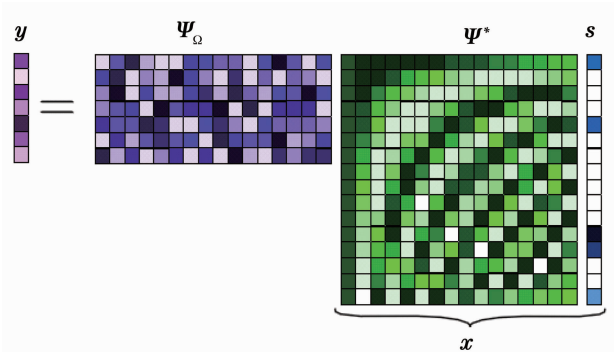


图 3 信号的压缩感知方程

Fig. 3 Signal compressive sensing equation

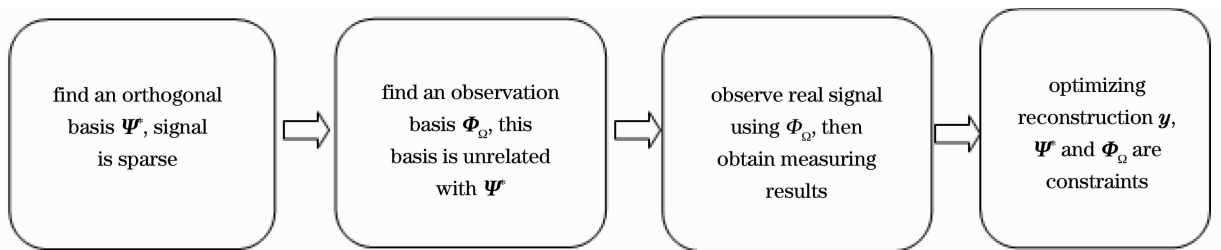


图 4 压缩感知过程

Fig. 4 Processing of compressive sensing

2.3 观测矩阵及其重构算法

目前,已经被证明的能够用于压缩感知的测量矩阵主要有随机矩阵和确定性矩阵。随机矩阵重建性能好,但硬件不易于实现。确定性测量矩阵因为其占用存储空间少,硬件实现容易,是未来测量矩阵的研究方向,但目前确定性矩阵的重建精度不如随机矩阵。本文前期已经采用确定性观测矩阵即阿达玛矩阵做了相关实验,并且取得了很理想的结果。图 5 为能用于压缩感知的一些观测矩阵。

压缩感知的重构算法主要分为两大类:1)贪婪算法,它是通过选择合适的原子并经过一系列的逐

步递增的方法实现信号矢量的逼近,此类算法主要包括匹配跟踪算法、正交匹配追踪算法、补空间匹配追踪算法等;2)凸优化算法,它是把 0 范数放宽到 1 范数通过线性规划求解的,此类算法主要包括梯度投影法、基追踪法、最小角度回归法等。凸优化算法比贪婪算法所求的解更加精确,但是需要更高的计算复杂度。此外,迭代阈值法也得到了广泛的应用,此类算法也较易实现,计算量适中,在贪婪算法和凸优化算法中都有应用。但是,迭代阈值法对于迭代初值和阈值的选取均较敏感,且不能保证求出的解是稀疏的。就目前主流的两种重建算法而

言,基于 1 范数最小的重建算法计算量巨大,对于大规模信号无法应用;贪婪算法虽然重建速度快,但是

在信号重建质量上还有待提高。

random measurement matrix	deterministic measurement matrix
Gaussian matrix	cyclic matrix
Fourier matrix	polynomial matrix
Bernoulli matrix	Hadamard matrix
uncorrelated measurement matrix	Toeplitz matrix
structured random matrix	chirp measurement matrix
⋮	⋮

图 5 压缩感知观测矩阵

Fig. 5 Observation matrixes of compressive sensing

3 相关算法的 Matlab 仿真

针对本文的计算成像系统,采用压缩感知理论在 Matlab 软件下对算法进行仿真,本文选取大小为 256 pixel×256 pixel 的中国科学院上海技术物理研究所图标作为测试图像进行算法仿真。观测矩阵采用高斯随机矩阵,信号的稀疏表示采用离散余弦变

换,重构算法采用正交匹配追踪算法,得到如图 6 所示结果。实验中首先将二维图像向量数据堆成一个一维列向量,采样测量则是由高斯随机矩阵乘以图像的一维列向量得到。由于仿真实验中对测试图像的部分采样和单元探测计算成像采样具有相似性,所以仿真结果具有很大的参考意义。

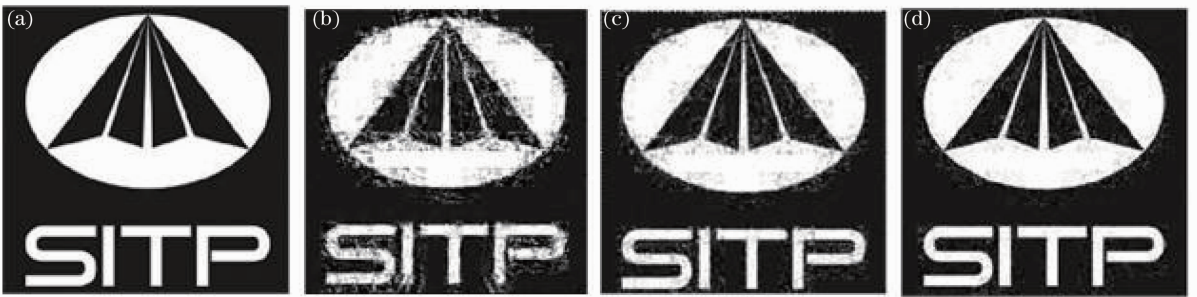


图 6 压缩感知相关算法仿真结果。(a)原始图像;(b)采样率为 0.3 时恢复的图像;(c)采样率为 0.5 时恢复的图像;(d)采样率为 0.7 时恢复的图像

Fig. 6 Algorithm simulation results of compressive sensing. (a) Original image; (b) reconstructed image which sampling rate is 0.3; (c) reconstructed image which sampling rate is 0.5; (d) reconstructed image which sampling rate is 0.7

由仿真结果可知,随着采用率的提高,重建的图像效果越好。尤其当采样率大于 0.5 以后,将会很好地复原图像。在实际应用中,将会根据具体的要求,选择合适的采样率。

4 单元探测计算成像系统分析

基于压缩感知理论,本文提出基于单点探测的计算成像系统,如图 7 所示,整个室内实验系统的原

理如下:系统最前端为 Newport 公司提供的大功率(250 W)溴钨灯平行光源,光源直接入射到具有一定透射率的物体来模拟远距离(100 m)实际物体的黑体辐射,这样便于和野外实验的衔接。物体后面是一个简单的透镜成像系统,将物体的像按一定比例呈在分辨率为 1024 pixel×768 pixel 的数字微反射镜(DMD)面上进行调制,DMD 是由美国德州仪器公司生产的一种数字微反射镜^[14],受 DMD 调制

反射后光束会经过透镜会聚到单元探测器。如果要实现多光谱成像,可在点探测器前加上一个高速滤波片轮,起到选择波长的作用。将探测器的光强度采样值和 DMD 调制分布数据结合起来,利用压缩感知理论通过特定的计算方法,即可实现单元探测器取代面阵探测器,可突破经典信息论奈奎斯特采

样定律的计算成像。

同时搭建远距离对外成像系统样机,如图 8 所示。

使用对外成像样机,利用平行光源模拟远距离对物体成像,观测矩阵采用哈达玛矩阵,图像重构算法采用快速哈达玛变换,得到如图 9 实验结果。

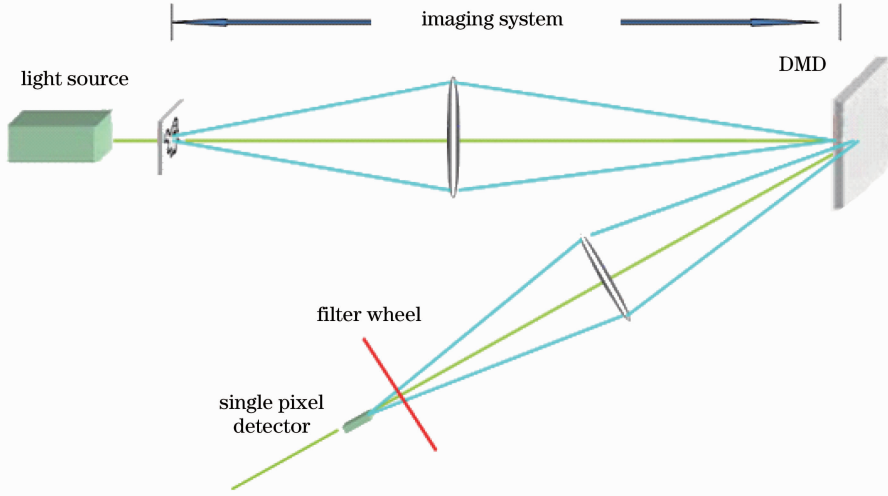
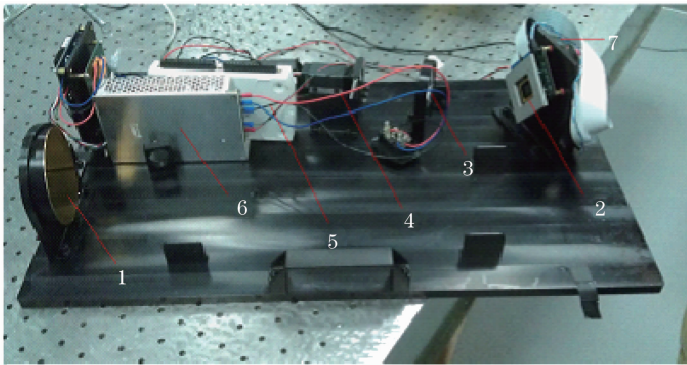


图 7 单点探测计算成像系统结构

Fig. 7 Single-pixel detection computational imaging system structure



- 1: off-axis parabolic mirror
- 2: DMD
- 3: aggregation mirror
- 4: PMT: photo multiplier tube
- 5: data acquisition system
- 6: power
- 7: DMD control circuit

图 8 远距离对外成像实验装置实物图

Fig. 8 Long-range external imaging experimental device

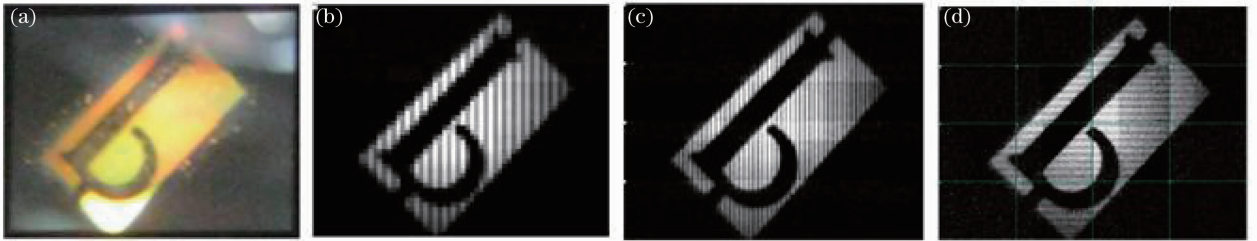


图 9 单点探测计算成像系统实验结果。(a)原始物体;(b) DMD 微镜像素 $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$ 合并时的成像结果;

(c) DMD 微镜像素 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 合并时的成像结果;(d) DMD 微镜像素 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 合并时的成像结果
Fig. 9 Experimental results of single-pixel detection computational imaging system. (a) Original object; (b) image reconstruction results at DMD $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$; (c) image reconstruction results at DMD $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$; (d) image reconstruction results at DMD $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$

由实验结果可知,对于 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 的数字微反射镜,微镜合并越多,成像分辨率越差,微镜合并越少,分辨率越高,但计算量将会大大增加。当微镜按 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 合并时,将图像分割成 16 块进行计算后,将计算结果重新拼成完整图像。

5 单元探测计算成像进一步向成像光谱技术扩展

通过在单点探测成像光路后面搭建色散光路,可以将单点计算成像技术扩展到面阵成像光谱技

术。为了得到光谱维的信息,探测器采用面阵探测器。三维图谱数据立方体的重建同样采用压缩感知理论。

相比较于传统的光谱成像系统,使用特殊通光板——编码孔径代替传统单一狭缝,按照预先所设置编码孔径的数学形式调制、捕捉景物空间信息和光谱信息联合成像,再经由后续数据计算方法反演得到最终三维光谱图像立方体,能够同时获取图谱图像的高空间分辨率和高光谱分辨率,并保持图谱图像的高信噪比。

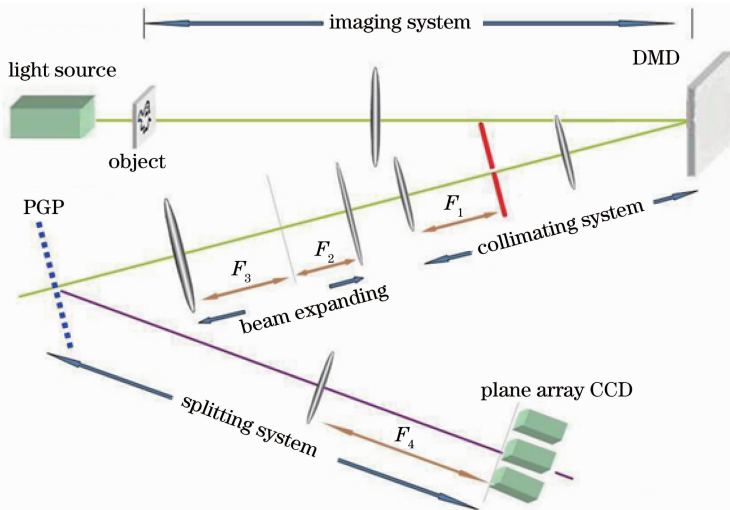


图 10 计算成像光谱技术系统结构

Fig. 10 Structure of computational imaging spectral system

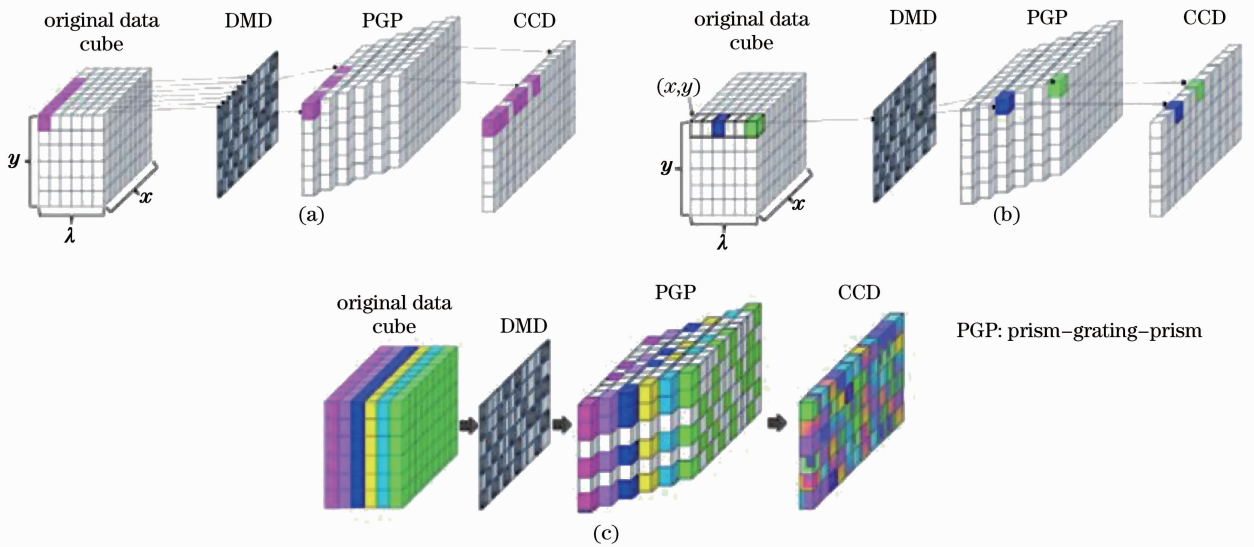


图 11 计算成像光谱技术系统原理分解结构。(a)三维数据立方体上同一波段不同空间位置成像过程;(b)同一空间位置不同波段成像过程;(c)不同空间位置不同波段成像过程

Fig. 11 Schematic structures of computational imaging spectrometer system. (a) Imaging process of the three-dimensional data cube on the same wave band and different spatial positions; (b) imaging process of the same spatial position and different wave bands; (c) imaging process of different spatial positions and the different wave bands

计算光谱成像技术的出现,突破了传统狭缝式光谱成像技术中高分辨率和高信噪比间的原理性制约关系,利用编码孔径模板代替传统狭缝,实现孔径的扩展,因此大大改善了“狭缝”光谱仪中点对线成像特点中信噪比降低的问题,实现了高光通量,提高了信噪比,同时,计算光谱成像技术可以通过单次或少数次曝光得到完整的三维图谱数,实现瞬间“快照”成像^[1]。从技术层面来说,计算光谱成像技术通过光谱成像与计算方法的结合,将传统光谱成像在应用中的技术难点转移到数据处理方面,以较少的代价实现高的技术指标^[15-16]。成像系统结构图在原来单点探测系统的基础上可变为图 10。

成像光谱系统的抽象成像过程如图 11 所示。

最终面阵探测器上每一像元探测到的光强信息包含不同波段、不同空间位置景物的光强信息。三维图谱数据立方体的重建过程即在 DMD 编码调制矩阵和重构算法结合面阵探测器找到合适的复原图谱。整个三维图谱的重构过程如图 12 所示。三维图谱数据立方体的重建过程参数如下:未知量个数为 $N \times N \times M$, 知道的方程数量为 $N \times (N + M - 1)$ 。

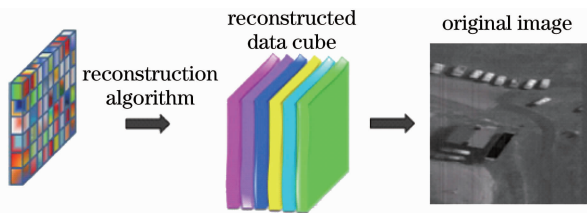


图 12 三维数据立方体图像的重构过程

Fig. 12 Three-dimensional data cube image reconstruction process

6 结 论

在压缩感知理论的基础上,分析了单点探测计算成像系统的整体结构、观测矩阵以及图像重建算法,并对相关算法进行了实验仿真,在实验室内搭建了成像系统,实验结果表明该算法重建图像具有较好的质量,并对单点探测计算成像技术向面阵成像光谱技术方向进行了探索扩展,并对其理论进行了分析。

综合来说,目前航空遥感光谱成像的分辨率限制了遥感光谱数据的应用价值。传统遥感光谱成像的空间分辨率取决于探测器的性能,高密度探测器的制作成本巨大,甚至由于受到加工工艺和制造材料的限制,提高探测器的集成密度达到瓶颈。尤其在中远红外波段,这一瓶颈问题变得尤为突出。本

文基于压缩感知理论,在单点探测计算成像的基础上,通过在成像系统后面搭建色散光路,利用 DMD 这一特殊编码孔径模板代替传统狭缝,实现孔径的扩展,因此大大改善了“狭缝”光谱仪中点对线成像特点中信噪比降低的问题。该方法在不提高传感器阵列密度,保持较高的光谱分辨率的前提下,大幅提升了光谱图像的空间分辨率。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 D J Brady, A Dogariu, M A Fiddy, *et al.*. Computational optical sensing and imaging: introduction to the feature issue [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(10): COSI1-COSI2.
- 3 M E Gehm, R John, D J Brady, *et al.*. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J]. *Opt Express*, 2007, 15(21): 14013-14027.
- 4 D L Donoho. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- 5 E J Candès, J Romberg, T Tao. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- 6 E J Candès. *Compressive sampling* [C]. Madrid: International Congress of Mathematics, 2006. 1433-1452.
- 7 E J Candès, M Wakin. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Process Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- 8 Gao Rui, Zhao Ruizhen, Hu Shaohai. Variable step size adaptive matching pursuit algorithm for image reconstruction based on compressive sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1639-1644.
- 9 高睿, 赵瑞珍, 胡绍海. 基于压缩感知的变步长自适应匹配追踪重建算法[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1639-1644.
- 9 M F Duarte, M A Davenport, D Takbar, *et al.*. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83-91.
- 10 Zhang Shuo, Wang Jie, Wang Jincheng, *et al.*. Simple calculation method for three-dimensional imaging based on compressive sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0111004.
- 11 张硕, 王杰, 王金成, 等. 基于压缩感知的三维物体成像的简单计算方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0111004.
- 11 R F Marcia, R M Willett. Compressive coded aperture superresolution image reconstruction [C]. *Proc IEEE ICASSP*, 2008.
- 12 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711002.
- 12 陆明海, 沈夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0711002.
- 13 Chen Jing, Wang Yongtian. Research of the compressive imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030002.
- 13 陈靖, 王涌天. 压缩成像技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030002.
- 14 TEXAS INSTRUMENTS. DMD 0. 7XGA 12° DDR DMD DiscoveryTM [OL]. <http://focus.ti.com/download/dlpdmd/25036868.pdf>. [2013-11-11].
- 15 D Kittle. *Compressive Spectral Imaging* [D]. Durham: Duke University, 2010.
- 16 Y Wu, I O Mirza, G R Arce, *et al.*. Development of a digital-micromirror-device-based multishot snapshot spectral imaging system [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2692-2694.

栏目编辑: 何卓铭