

· 光学设计 ·

## 反射式压缩编码孔径超分辨率成像技术研究

毕祥丽

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

**摘要:** 将压缩感知理论引入超分辨率成像, 得益于绝大多数图像普遍具有稀疏性, 提出了一套基于4f系统的全相位反射式压缩编码孔径光学成像系统, 采用反射式空间光调制器进行光学系统成像实验, 通过MATLAB程序对该系统进行仿真, 对采集到的单幅低分辨率图像进行解码重建得到高分辨率的。实验结果表明, 只有在保证CCD相机与空间光调制器像元尺寸完全匹配的情况下才能得到最佳的重建效果。

**关键词:** 压缩感知; 压缩编码孔径成像; 4-f光学系统; 稀疏重建

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-03-0009-04

## Research on Imaging Technology for Reflective Compressive Coded Aperture Super-resolution

BI Xiang-li

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Compressive sensing theory is led to super-resolution imaging technology for the general sparsity of most images, and an optical imaging system with all phase reflective compressive coded aperture is proposed based on 4f optical system. Reflective space optical modulator is used to perform optical system imaging experiments and the system is simulated through MATLAB program, the images with high resolution is obtained through decoding and reconstructing the collected single frame image with low resolution. Experimental results show that the best reconstruction effect can be obtained at the condition of ensuring CCD camera matching to spatial optical modulator pixel size completely.

**Key words:** compressive sensing; compressive coded aperture imaging; 4-f optical system; sparse reconstruction

传统的光学成像方法是直接将光学成像系统和CCD相连接实现成像过程, 其采样频率符合奈奎斯特采样定理的要求, 即只有当采样速率达到信号带宽的两倍以上时, 才能由采样信号精确重建原始信号, 因此, 传统成像系统采样频率高, 采集数据量大, 数据传输速度较慢。为了提高成像系统分辨率, 需要采用分辨率更高的CCD, 这又造成成本的大幅增加。同时, 目前的成像探测技术受到焦平面探测器工作条件和加工工艺限制, 很难通过减小像

元尺寸或增加阵元数量的方式实现高分辨率成像。

为了满足现代战争对来袭威胁进行快速、高分辨率、远距离探测和实时感知的要求, 需要进一步提高光学成像探测系统的分辨率、缩短数据获取的时间、减少数据的存储空间、提高数据的传输速度, 即希望以低的采样频率实现超分辨率的成像效果, 同时减少数据存储压力和提高数据传输速度。压缩感知技术提供了一种新的提高光学成像探测分辨率的方法, 能够很好地弥补传统成像系统的缺

收稿日期: 2016-05-31

作者简介: 毕祥丽(1977-), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事激光技术、光电信息探测与数字信号处理方面的研究工作。

陷。近年随着压缩感知理论的发展,将其与光学成像相结合促成了光学压缩编码超分辨率成像的诞生,使得通过对场景少量的观测而重构出高分辨率图像成为可能。

与压缩感知成像技术相关的研究很多,从最早的Rice大学研究开发的单像素摄像机(single-pixel camera)开始<sup>[1]</sup>,陆续出现了Stern等的单次曝光压缩成像(single exposure compressive imaging)<sup>[2]</sup>,压缩编码孔径成像(compressive coded aperture imaging)<sup>[3]</sup>和压缩雷达成像(compressive radar imaging)<sup>[4]</sup>,多光谱成像(multi-spectral imaging)<sup>[5]</sup>、压缩全息(compressive holography)<sup>[6]</sup>,压缩传感理论在MRI成像<sup>[7]</sup>、CT成像<sup>[8]</sup>、天文成像<sup>[9]</sup>以及遥感成像<sup>[10]</sup>方面的应用等。

将压缩感知理论引入超分辨率成像,得益于绝大多数图像普遍具有稀疏性,提出了一套基于4f系统的全相位反射式压缩编码孔径光学成像系统,通过开发MATLAB程序对该系统进行仿真,采用反射式空间光调制器进行光学系统成像实验,对采集到的单幅低分辨率图像进行解码重建得到高分辨率的图像。

## 1 压缩编码孔径成像系统原理

### 1.1 压缩感知原理

压缩编码孔径成像技术的灵感来源于压缩感知这个新兴的领域<sup>[1]</sup>。压缩感知理论(compressive sensing, CS)是由美国斯坦福大学的D Donoho(美国科学院院士)和加州大学的华裔科学家T Tao(陶哲轩)等人于2006年提出的一种新颖的信息获取指导理论。这是一种利用稀疏的或可压缩的信号进行信号重建的技术,利用远少于传统Nyquist采样定理所要求的采样数即可高概率精确地重建原始信号。

压缩感知理论指出,若信号在某个变换域具有稀疏表示,使用感知矩阵(与变换域不相关且维数比信号维数低很多)将信号投影到一个低维空间上即得到观测值(包含了足够的用于重构信号的采样值),最后通过求解最优化问题从观测值中高概率重构出原始信号。由此可知,压缩感知理论主要包含信号的稀疏表示、感知(观测)矩阵的设计、重构算法设计三个部分。压缩感知测量过程如图1所示。从测量值中恢复原始信号 $x$ 的重构如图2所示。

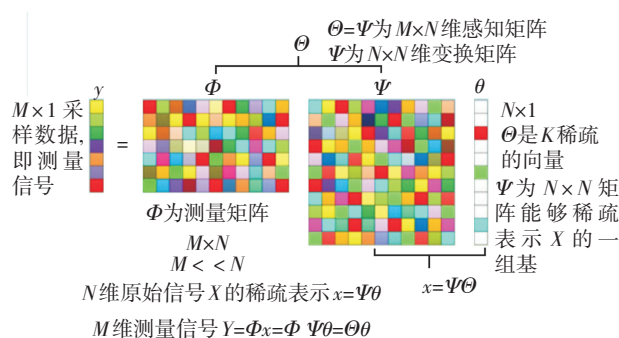


图1 压缩感知的线性测量过程

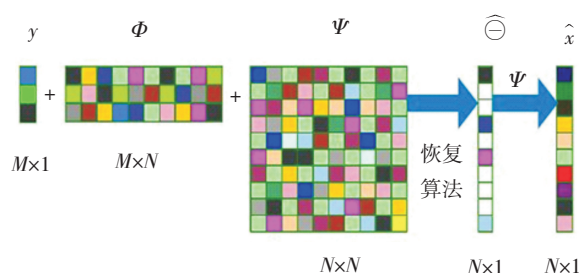


图2 压缩感知原始信号的重构

### 1.2 压缩编码孔径成像技术原理

压缩编码孔径成像(compressive coded aperture, CCA)是由Roummel F Marcia和Rebecca M Willett提出的一种成像机制<sup>[5]</sup>,当一幅图像在变换基下可稀疏表示时,可通过低分辨率观测值重构出高分辨率静态图像。压缩编码孔径成像过程如图3所示。第一步是编码过程,光线透过编码板每个小孔后在探测器上都形成投影图像,这些投影图像叠加在一起,在二维平面上形成退化的二维分布信号,即编码图像;第二步是解码过程,对探测器采集到的图像数据进行滤波和重建,复原出原始目标图像。

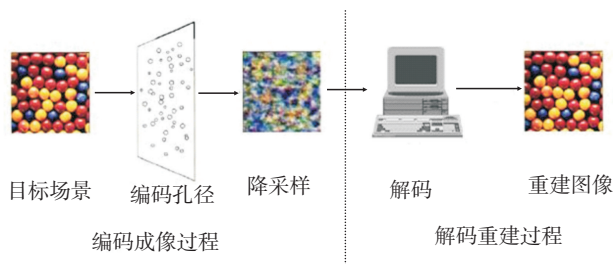


图3 压缩编码孔径成像过程示意图

压缩编码孔径模板如图4所示。

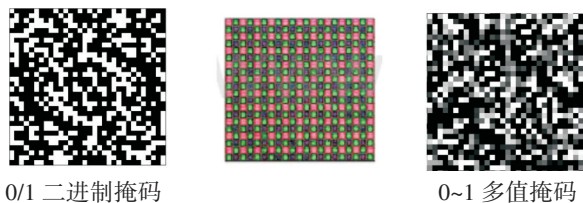


图4 压缩编码孔径模板

### 1.3 4f光学成像系统原理

4f成像系统原理实验光路如图5所示。 $L_1$ 、 $L_2$ 分别为第一、第二傅里叶变换透镜; $f$ 为傅里叶透镜焦距; $P_1$ 为系统的物面; $P_2$ 为频谱面; $P_3$ 为系统的像面。在4f系统中,各面与相邻傅里叶变换透镜间距均为 $f$ ,从物面到像面刚好经过4个 $f$ 的距离,故称之为4f系统。

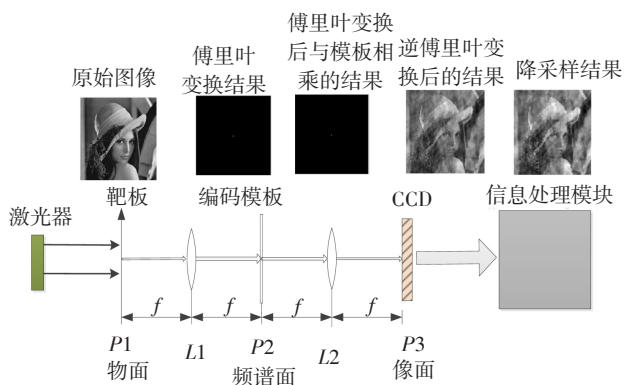


图5 4f傅里叶光学成像实验光路原理图

原始图像在第一个透镜 $L_1$ 的前焦点处,经过该透镜对原始图像做傅里叶变换,在 $L_1$ 的后焦点处可得到傅里叶变换后的原始图像的频谱信息; $L_1$ 的后焦点和第二个透镜 $L_2$ 的前焦点重合,编码模板置于此,经过压缩编码模板作用后,在 $L_2$ 的前焦点处得到的是原始图像做傅里叶变换后与编码模板相乘后的原始图像信息;像点位于 $L_2$ 的后焦点,CCD相机置于此,对得到的原始图像信息做傅里叶逆变换,在 $L_2$ 的后焦点上得到做傅里叶逆变换后的结果,故CCD相机采集到的是原始图像的压缩编码图像,最后送到信息处理模块可解码重建得到超分辨率图像。

## 2 反射式压缩编码孔径成像系统设计

基于上述理论分析,提出一种新型的基于4f系

统的全相位反射式压缩编码孔径超分辨率成像系统,其组成如图6所示。

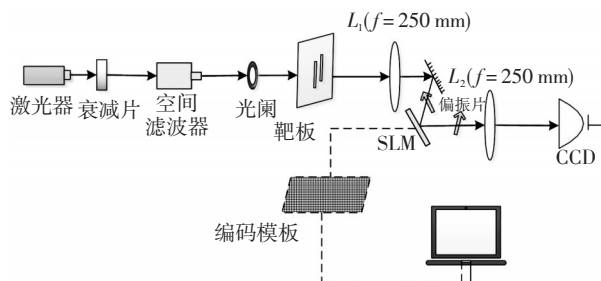


图6 反射式压缩编码孔径成像系统结构图

图6中,激光器发出相干光,经空间滤波器(滤除杂散光)和准直透镜 $L$ 后的光束为平行准直光束入射到物面 $P_1$ 得到原始图像,通过傅里叶透镜 $L_1$ 对原始图像做傅里叶变换,在 $L_1$ 的后焦点处可得到傅里叶变换后的原始图像的频谱信息;空间光调制器置于 $L_1$ 的后焦点与 $L_2$ 的前焦点重合处,其上加载0到 $2\pi$ 范围内随机产生的一幅与待重建目标图像尺寸相等的相位型编码模板,对原始图像的频谱信息进行压缩编码,在频谱面 $P_2$ 处得到的是随机相位模板与原始图像的频谱信息在频域内相乘结果,即压缩编码之后的原始图像信息,完成压缩编码降采样过程;通过傅里叶透镜 $L_2$ 对经过压缩编码后的原始图像信息做傅里叶逆变换,在 $L_2$ 的后焦点上得到做傅里叶逆变换后的结果,故在像面 $P_3$ 处,CCD相机采集到的是原始图像的压缩编码降采样图像;由此,通过4f系统和相位编码模板对原始图像的频谱进行空间滤波和压缩编码降采样,以实现信号的多分辨率分析,最后通过计算机使用全变分方法将CCD相机采集到的低分辨率的压缩编码图像恢复重建为超分辨率图像。

## 3 反射式压缩编码孔径成像系统实验

采用反射式空间光调制器及反射镜进行实验,实验系统的实拍图如图7所示。

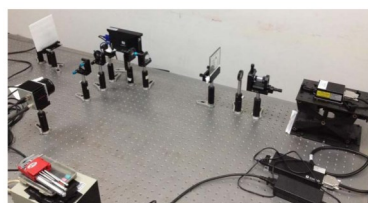


图7 反射式压缩编码孔径成像系统实拍图

搭建好实验光路并调节至工作状态,用 CCD 相机采集实验图像,在空间光调制器上加载模板,CCD 相机采集图像如图 8。

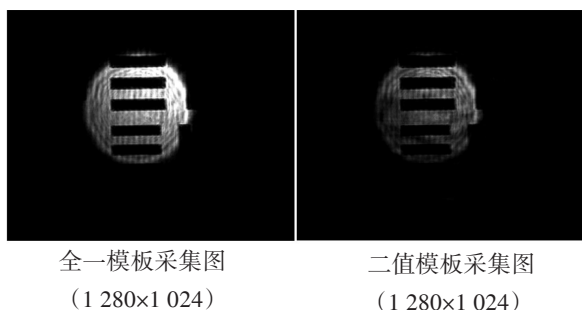


图 8 反射式光路 CCD 采集图像

根据采集图像,采用 ADM 算法复原结果如图 9。

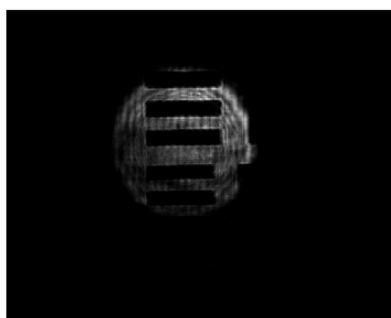


图 9 二值模板重建结果图(1 280x1024)

由重建图可知,解码效果并不明显,考虑到可能是因为空间光调制器像元尺寸与 CCD 相机像元尺寸不对应所致。空间光调制器像元尺寸为  $12.3 \mu\text{m}$ , CCD 相机像元尺寸为  $4.4 \mu\text{m}$ ,两者尺寸比近似为 3:5,因此可粗略地认为 9 个空间光调制器像元对应 25 个 CCD 像元,通过对模板和 CCD 采集图像进行像素融合可得到相应匹配关系。由于 CCD 相机为正方形,因此制作了如图 10 所示模板保证两者像素匹配。

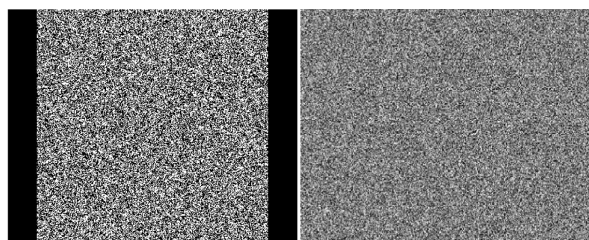


图 10 新二值模板图

仿真实验重建效果如图 11 所示。

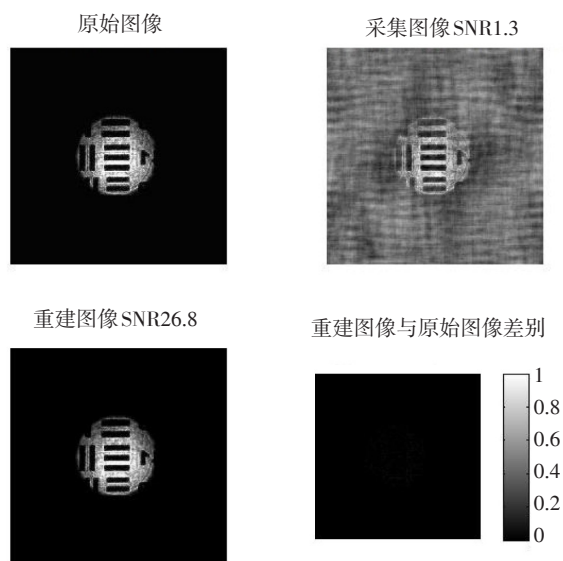


图 11 仿真重建效果对比图

由实验重建结果可知,采用 ADM 重建算法只有在保证 CCD 相机与空间光调制器像元尺寸完全匹配的情况下才能得到最佳的重建效果。

## 4 结 论

提出了一套基于 4f 系统的全相位反射式压缩编码孔径光学成像系统,采用反射式空间光调制器进行光学系统成像实验,通过 MATLAB 程序对该系统进行仿真,对采集到的单幅低分辨率图像进行解码重建。实验结果表明,只有在保证 CCD 相机与空间光调制器像元尺寸完全匹配的情况下才能得到最佳的重建效果。

压缩编码孔径成像是近年来基于压缩感知理论新兴的一种成像技术,它在可见光成像方面的应用研究相对较多,但其特别适合于探测器制造困难的波段探测,如红外成像、甚至太赫兹成像等,因此压缩编码孔径成像技术在红外成像探测系统的应用具有巨大潜力。

## 参考文献

- [1] Takhar D, Laska J N, Wakin M B, et al. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression[J]. Proc. of Computational Imaging IV at SPIE Electronic Imaging, 2006.

(下转第 36 页)

- Communications, 2007, 277: 390-396.
- [8] Vysotsky D V, Elkin N N, Napartovich A P. Selection of optical modes in multichannel fibre lasers[J]. Quantum Electronics, 2006, 36: 73-75.
- [9] Talbo H F. Facts relating to optical science[J]. Phiios Mag, 1836, 9: 40-41.
- [10] Leger J R. Lateral mode control of an AlGaAs laser array in a Talbot cavity[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55: 334-336.
- [11] Zhu X, Scholzgen A, Li H. Single-transverse-mode output from a fiber laser based on multimode interference[J]. Opt Lett, 2008, 33: 908-910.

(上接第12页)

- [2] Stern A, Javidi B. Random projections imaging with extended space-bandwidth product[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(3):315-320.
- [3] Marcia R F, Willett R M. Compressive coded aperture super-resolution image reconstruction[J]. Proc. of IEEE, 2008.
- [4] Pitsianis N P, Brady D J, Sun X. Sensor-layer image compression based on the quantized cosine transform[J]. SPIE Visual Information Processing, 2005.
- [5] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging[J]. IEEE Radar Conference, 2007:128-133
- [6] David Brady, Kerkil Choi, Daniel Marks, et al. Compressive holography[J]. Optics Express, 2009, 17:13040-13049.
- [7] Lustig M, Donoho D, Pauly JM. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging[J]. Magn. Reson. Med., 2007, 58(6):1182-1195.
- [8] Lu Y, Zhang X, Douraghy A, et al. Source reconstruction for spectrally-resolved bioluminescence tomography with sparse a priori information[J]. Opt. Express, 2009, 17(10): 8062-8080.
- [9] Bobin J, Starck J-L, Ottensamer R. Compressed sensing in astronomy[J]. IEEE, 2008, 2(5):718-726.
- [10] Albert C, Fannjiang, Thomas Strohmer, et al. Compressed remote sensing of sparse objects[J]. Imaging Sciences, 2005, 3(3):595-618.

(上接第27页)

### 参考文献

- [1] Woods A J, Penrose J D. The development of a compact underwater stereoscopic video camera[J]. SPIE, 1997, 3012:92-95.
- [2] Trimble G M. Area reconnaissance, object relocation and classification using cooperating autonomous underwater vehicles[J]. SPIE, 1999, 3711:195-202.
- [3] Kubota S, Shimada H. High-speed photography of underwater sympathetic detonation of explosives[J]. SPIE, 2001, 4183:760-770.
- [4] Evans C, Doshir. Tale of two underwater lenses[J]. SPIE, 1991, 1537:203-214.
- [5] 孙传东,陈良益,高立民,等.水的光学特性及其对水下成像的影响[J].应用光学,2000,21(4):39-46.
- [6] 王耀祥,田维坚,黄琨,等.光锥与CCD耦合效率的理论分析[J].光子学报,2004,33(3):318-320.
- [7] 王志社,陈树越,曾光宇,等.便携式数字X射线光锥耦合CCD成像系统研究[J].传感器与微系统,2007,26(9):26-28.
- [8] 郭远华,侯晓荣.针对椒盐噪声的开关模糊滤波器[J].计算机应用,2012,32(5):1293-1295,1334.
- [9] 黄光亚,曾水玲,张书真,等.基于三维轴距的图像去噪算法[J].电子与信息学报,2015,37(3):552-559.
- [10] 王贵君,杨永强.基于高概率椒盐噪声的模糊滤波器在图像恢复中的算法设计[J].电子学报,2015(1):24-29.