

## 空间编码复用散斑多信息融合关联成像(特邀)

时东锋<sup>1</sup>, 黄 见<sup>1,2</sup>, 苑克娥<sup>1</sup>, 王英俭<sup>1,2</sup>, 谢晨波<sup>1</sup>, 刘 东<sup>1</sup>, 朱文越<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 提出空间编码复用散斑技术来实现单个单像素探测器对多个物体信息的同时探测获取。使用空间编码复用散斑对多个物体信息进行照明, 使用单像素探测器对回波信号进行探测, 利用关联算法获取混叠多物体信息, 然后用空间编码信息对随机采样的多个物体信息进行解码, 最后采用压缩感知技术对完整的多个物体信息进行复原。使用该技术分别实现了对多空间、多光谱和多偏振信息的同时探测获取, 实验结果证实了该技术的有效性, 该技术可有效降低系统数据量, 提高关联成像系统的成像效能。

**关键词:** 关联成像; 空间编码复用; 压缩感知; 多光谱成像; 偏振成像

**中图分类号:** O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0502001

## Multi-information fused correlated imaging based on space-coded multiplexing speckles(Invited)

Shi Dongfeng<sup>1</sup>, Huang Jian<sup>1,2</sup>, Yuan Kee<sup>1</sup>, Wang Yingjian<sup>1,2</sup>, Xie Chenbo<sup>1</sup>, Liu Dong<sup>1</sup>, Zhu Wenyue<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** A technique of space-coded multiplexing speckle was proposed to simultaneously obtain multiple objects' information by a single-pixel detector. Space-coded multiplexing speckles were employed for objects illumination. The mixed light reflected from the objects was detected by a single-pixel detector. An iterative reconstruction method was used to restore the fused image. The spatial coding information was used to decode multiple objects' information. Next, clear images of the different information were recovered by compressed sensing (CS) algorithm. Multi-space, multi-spectral and multi-polarization information were simultaneously obtained through the proposed technique, respectively. The results clearly demonstrate that the proposed method is effective. This method can effectively reduce the amount of detected data and improve the imaging efficiency.

**Key words:** correlated imaging; space-coded multiplexing; compressed sensing; multispectral imaging; polarization imaging

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11404344, 41505019); 中国科学院国防创新基金(CXJJ-17S029);  
中国科学院光束控制重点实验室基金(2017LBC007)

作者简介: 时东锋(1987-), 男, 副研究员, 主要从事关联成像、偏振探测技术等方面的研究。Email: dfshi@aiofm.ac.cn

## 0 引言

在传统面阵探测成像系统发展的同时,一种基于单像素探测器的关联成像系统近年来受到了广大研究学者的关注<sup>[1-8]</sup>。关联成像系统使用随机散斑光照射物体,物体反射或者透射的光经单像素探测器获取强度信息,利用照明散斑与探测强度信息进行相关运算来获取物体图像信息。在红外以及太赫兹等面阵探测器受限工作波段内,这种成像方式具有广泛的应用前景。目前,在关联成像系统中,利用大量随机散斑光对物体进行照射,随机散斑实现了对物体信息的全采样。根据压缩感知理论,如果物体图像是稀疏的或者在某种变换下是稀疏的,则不必利用散斑对物体信息进行全采样,只需要对物体信息进行部分随机采样,也能实现对完整物体图像信息的精确复原<sup>[9]</sup>。根据此原理设计空间编码复用散斑,实现了对多物体信息(多空间、多光谱和多偏振)的融合关联成像<sup>[10-12]</sup>。

## 1 原理

此节先对压缩感知进行介绍,然后对提出的多信息融合关联成像原理进行介绍。

### 1.1 压缩感知

假设有一个含  $N$  个像素数的图像  $f$  需要测量,该图像可以用  $f=ya$  来表示,其中参数  $a$  包含很少量的非零元素, $y$  为稀疏表示算符<sup>[9]</sup>。对图像进行测量的结果为  $g$ ,则该过程可表示为:

$$g=Rf \quad (1)$$

式中: $R$  为测量矩阵。选择恰当的测量矩阵  $R$ ,就能够根据测量结果  $g$  反演出高精度的图像  $f$  信息。利用公式(1)建立最优化求解方程为:

$$\hat{f}=ya \quad \text{subject to} \quad \min \left\{ \|g-Rya\|_2^2 + \gamma T(a) \right\} \quad (2)$$

式中: $\gamma$  为正则化系数; $T$  表示正则化函数。图 1 给出了 Lena 图像在不同随机二值测量情况下的复原结果,其中,第一行为不同采样率下的随机采样图像,第二行为相应的压缩感知复原图像,图 1(a)、(b)和(c)列的采样率为 1%、5%和 10%。根据结果可以看出在对图像进行了随机二值测量之后,采用压缩感知算法可以复原出高精度的原始图像。

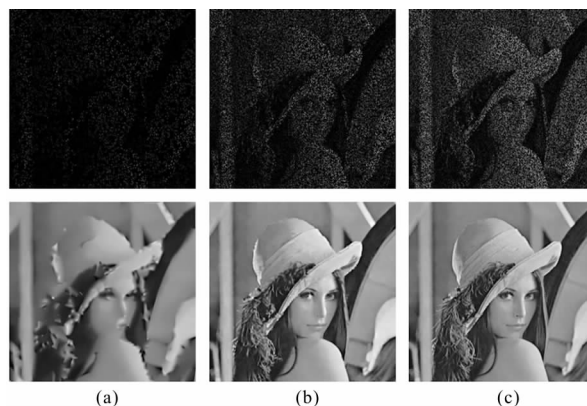


图 1 随机采样下的复原结果

Fig.1 Recovered results under random sampling

### 1.2 编码复用散斑多信息融合关联成像

压缩散斑的生成方法如图 2 所示,首先固定一个随机编码散斑矩阵,然后依次在随机编码散斑矩阵的基础上进行不同的稀疏二值采样来实现系列不同的压缩散斑。目前,在计算关联成像系统中广泛使用空间光调制器(如 DMD,SLM 等),由于这类器件可以实现对照明散斑的精确控制,这为该方法的实现提供了保证。

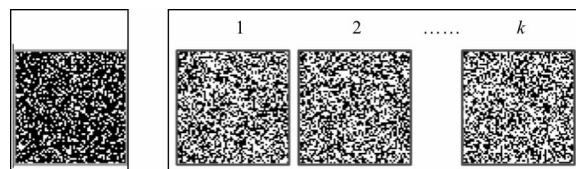


图 2 压缩散斑生成方法

Fig.2 Method for generating the compressed speckles

与传统关联成像系统利用散斑对物体图像进行全采样不同,文中方法利用压缩散斑对物体图像进行随机部分采样。图 3 给出了利用传统散斑和压缩散斑对物体进行  $k$  次照明的情况,其中图 3(a)表示采用传统散斑对物体进行  $k$  次照明,图 3(a)中间的 Sample scene 表示对物体进行散斑照明后的采样图像,Total sample scene 表示对采样图像累加平均后得到的图像信息。可以看出,采用传统散斑进行  $k$  次采样实现了对物体图像信息的全采样。采用压缩散斑对物体同样进行  $k$  次照明,结果如图 3(b)所示。可以看出,采用压缩散斑实现了对物体信息的部分随机采样。利用物体部分随机采样信息也可复原出高精度的原始信息,这为该方法提供了理论上的可行性支持。

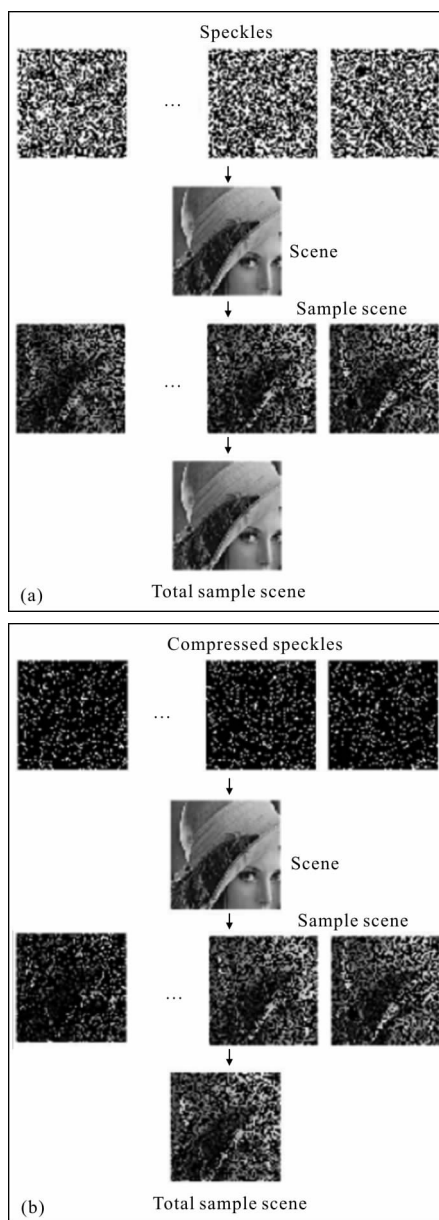


图 3 物体在传统和压缩散斑下的采样图示  
Fig.3 Object is sampled by the traditional and compressed speckles

当需要对多个物体信息  $f_1, f_2 \dots f_i$  进行融合关联成像时, 分别使用不同的随机编码散斑矩阵  $B_1, B_2, \dots B_i$  对物体信息进行随机压缩采样。假设随机编码散斑矩阵具有如下的性质:

$$B_{i1}B_{i2} = \begin{cases} 0 & i1 \neq i2 \\ B_{i1} & i1 = i2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\prod B_i = E \quad (4)$$

式中:  $\prod$  为矩阵累加;  $E$  是全 1 矩阵。使用稀疏采样矩阵与不同的编码散斑矩阵进行作用后产生压缩散斑矩

阵, 并对这些压缩散斑矩阵按照一定的排列方式加载到光调制系统中产生照明散斑。假设第  $j$  个稀疏采样矩阵为  $S_j$ , 则对多个物体信息进行照明的压缩散斑矩阵表示为:

$$\begin{aligned} C_{j1} &= B_1 S_j \\ C_{j2} &= B_2 S_j \\ &\vdots \\ C_{ji} &= B_i S_j \end{aligned} \quad (5)$$

完整的照明散斑  $C_j$  按照所需成像多信息进行排列, 利用计算机把产生的散斑矩阵加载到光调制系统中, 实现对多物体信息的同时照明。假设照明散斑与调制系统的加载矩阵一致, 则每个物体信息的照明采样过程可表示为:

$$\begin{aligned} g_1 &= \sum_{N \times N} B_1 S_j f_1 \\ g_2 &= \sum_{N \times N} B_2 S_j f_2 \\ &\vdots \\ g_i &= \sum_{N \times N} B_i S_j f_i \end{aligned} \quad (6)$$

系统中采用单个单像素探测器对总的光强进行探测, 因此其探测强度可表示为:

$$\sum_i g_i = \sum_{N \times N} B_1 S_j f_1 + \sum_{N \times N} B_2 S_j f_2 + \sum_{N \times N} B_i S_j f_i \quad (7)$$

对上式进一步简化为:

$$g_j = \sum_{N \times N} S_j f \quad (8)$$

式中:  $f = B_1 f_1 + B_2 f_2 + \dots + B_i f_i$  为混叠多物体信息, 其表示对不同物体信息进行随机采样并累加, 探测强度  $g_j = \sum_i g_i$ 。根据公式(8)可得出, 探测值正比于稀疏采样矩阵与混叠信息的点乘求和, 定义稀疏采样矩阵为空间编码复用散斑。利用公式(8)采用迭代算法或者压缩感知算法进行求解即可获取混叠多物体信息  $f$ 。

下面介绍由混叠多物体信息进行解复用来获取每个物体的信息。首先利用随机编码矩阵对混叠物体信息进行解码, 可获得每个物体的随机采样信息如下:

$$f_{ip} = B_j f = B_i (B_1 f_1 + B_2 f_2 + \dots + B_i f_i) = B_i f_i \quad (9)$$

最后, 利用物体的随机采样信息和随机编码矩阵代入公式(2)中, 采用压缩感知算法就可获得准确完整的多个物体信息。

## 2 实验及结果

### 2.1 多空间物体融合成像

利用该方法对多个空间排布物体进行融合成像,

算法流程如图 4 所示, 该图给出了四个按照  $2 \times 2$  空间分布的物体。按照公式(5)所示方法产生照明散斑矩阵, 同时按照物体排列方式对矩阵进行排列, 并加载到调制系统中, 然后对四个物体进行照明, 利用单个单像素探测器获取多个物体反射光强信息, 依次利用不同散斑进行照明, 并探测获取相应的反射光强信息。使用空间编码复用散斑  $S$  和探测光强信息  $G$  进行运算获取多物体混叠图像信息。最后, 由混叠图像信息进行相应的解复用就可以获取完整的四个物体信息。

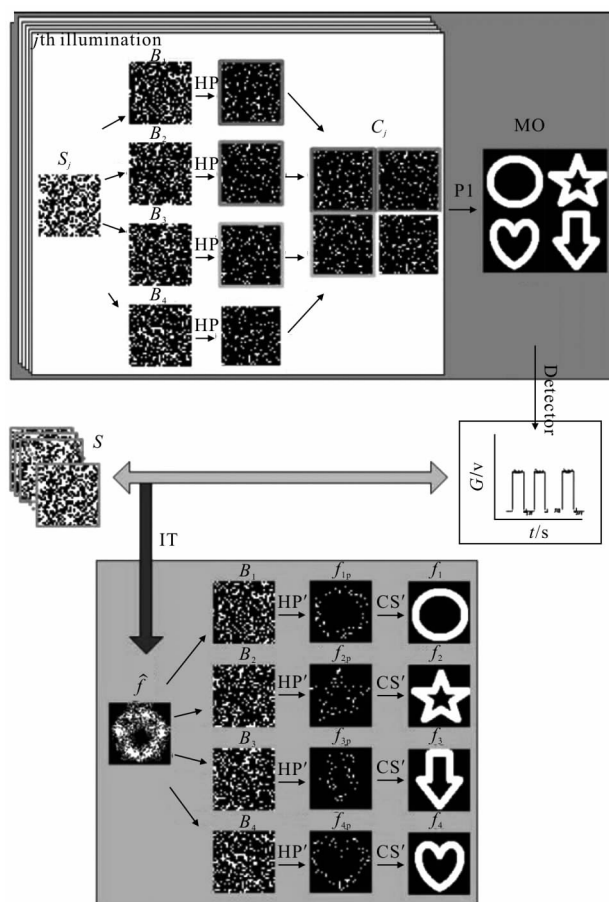


图 4 多空间物体融合成像算法流程图

Fig.4 Flowchart of multi-space object fusion imaging algorithm

搭建实验系统对所提方法进行实验验证, 系统如图 5(a)所示, 5(b)为按空间排列的四个物体, 图 5(c)为四个随机编码矩阵。系统中使用 532 nm 连续激光器, 光调制器 DMD 为 TI DLP 6500 系统, 单像素探测器为 Thorlabs PMT-PMM02 光电倍增管, 采集卡为 NI USB-6211。使用 DMD 中间 768×768 镜面且  $3 \times 3$  镜片合并为一个散斑像元, 即每个物体成

像的分辨率为  $128 \times 128$ 。图 6 给出了在不同采用率下的复原结果, 其中每个分图的第一列表示复原的混叠物体信息、第二列表示随机编码矩阵、第三列表示物体随机采样信息和第四列表示复原的四个物体图像。

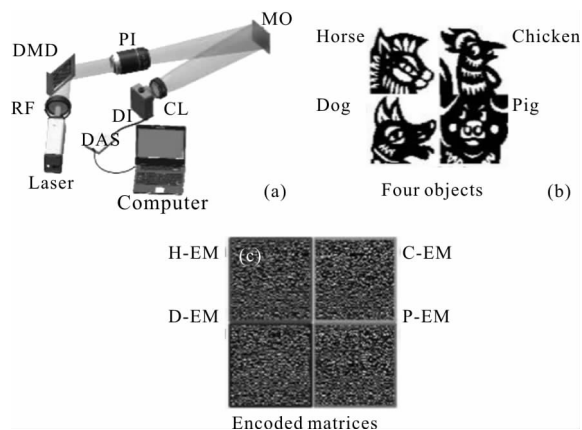
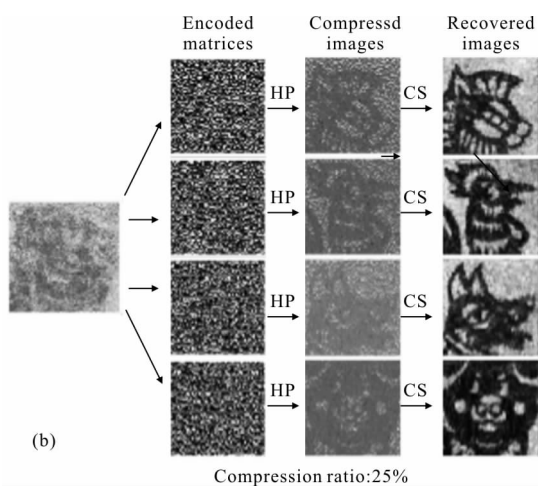
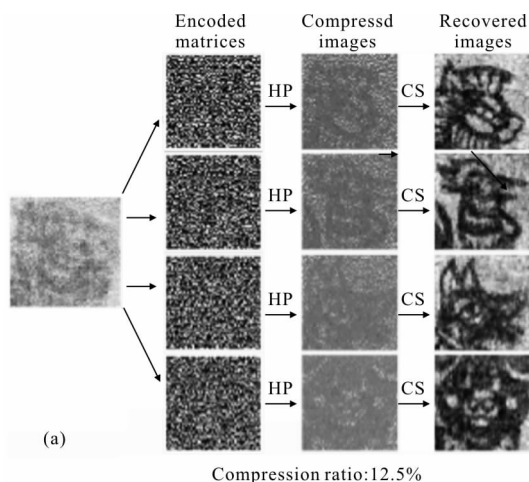


图 5 实验系统与成像物体

Fig.5 Experimental system and imaging objects



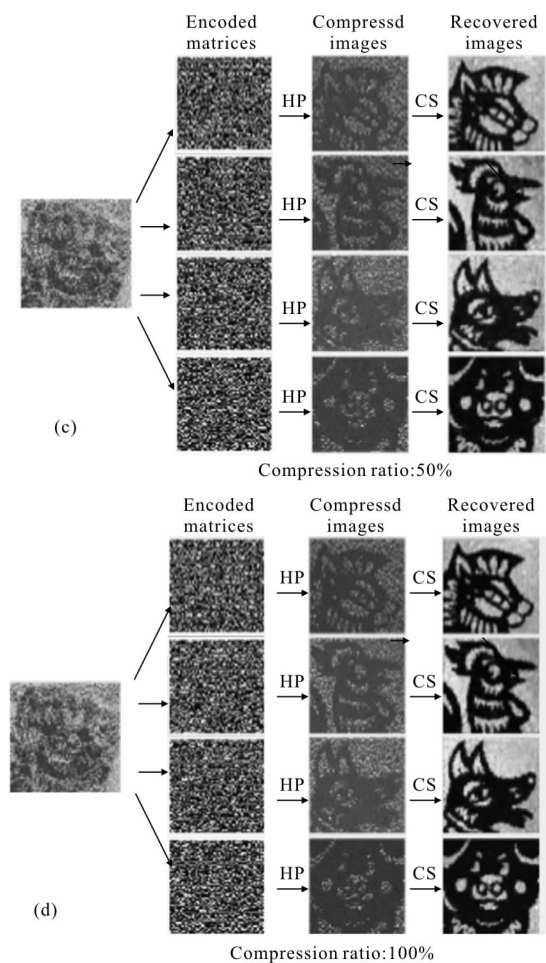


图 6 不同压缩采样率下的物体复原结果  
Fig.6 Multiple objects reconstructed under different compression sampling rates

### 2.2 物体多光谱融合成像

传统多光谱关联成像<sup>[3-6]</sup>,常采用多个探测器分别对每个谱段进行探测,然后再进行复原获取,或者使用时间复用方式,利用探测器和调制器的时间响应不同进行高速光谱调制探测,从而完成多光谱关联成像。而文中方法<sup>[11]</sup>直接利用单个单像素探测器进行多光谱关联成像,且不需要像时间复用那样需要高响应频率的探测器和高速光谱调制器。算法流程如图 7 所示,在对物体多光谱进行融合成像时,首先生成空间编码复用散斑  $S$ ,并生成相应谱段的随机编码矩阵  $E_R$ 、 $E_G$  和  $E_B$ ,然后按照公式(5)所示方法产生照明散斑,并按照相应谱段信息按照空间混叠形式加载到光调制系统中产生多光谱空间复用照明散斑,利用单像素探测器获取反射光强信息。依次使用不同多光谱空间复用散斑进行照明,并探测获取

相应的反射光强信息。利用空间编码复用散斑  $S$  和探测光强  $G$  进行运算获取物体多光谱混叠信息。然后,由混叠图像进行相应的解复用就可以获取完整的物体多个谱段信息,最后可得物体伪彩色图像。

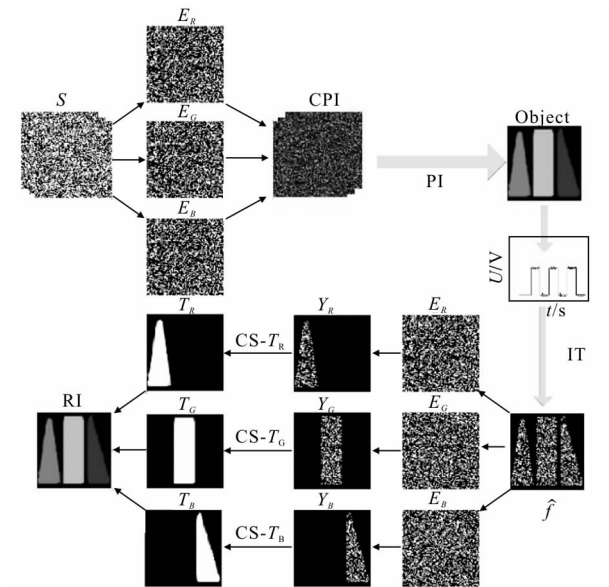


图 7 多光谱融合成像流程图

Fig.7 Procedure of the method for multispectral fused imaging

搭建实验系统对所提方法进行实验研究,图 8(a)为实验成像物体,图 8(b)、(c)和(d)为三个谱段的随机编码矩阵,实验系统构造如图 8(e)所示。选用能够对多个压缩光谱散斑进行空间混叠的 SONY 3-LCD VPL-CX131 作为照明系统,利用其产生多光谱空间

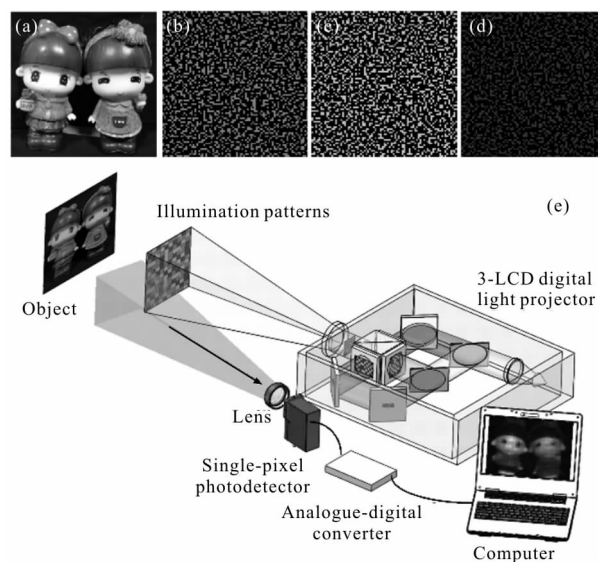


图 8 多光谱融合成像设置

Fig.8 Multispectral fused imaging setup

复用照明散斑并对物体进行照明。图 9 给出了在不同采样率下的复原结果,其中图 9(a)为 3 000 次采样下的复原结果,图 9(b)为 4 000 次采样下的复原结果,图 9(c)为 5 000 次采样下的复原结果,图 9(d)为 6 000 次采样下的复原结果。

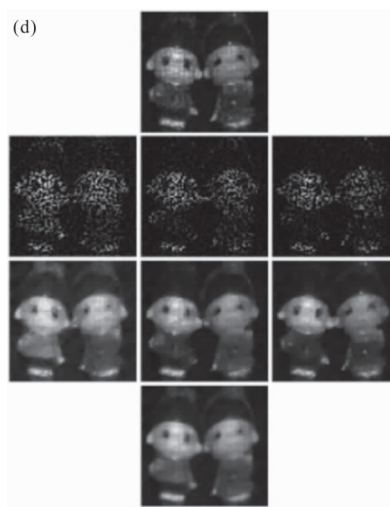
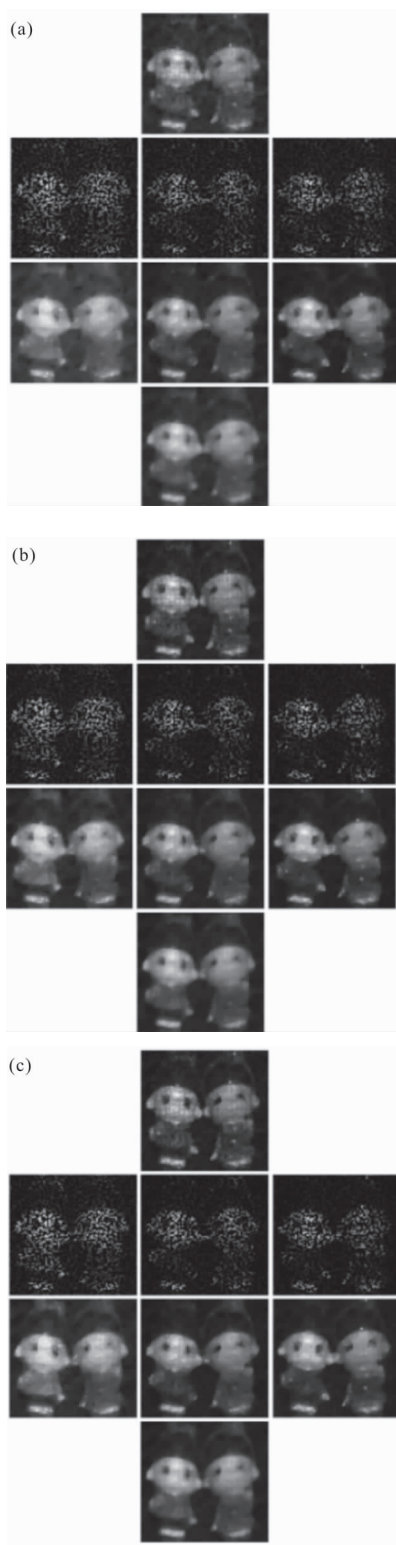


图 9 不同采样率下的实验结果

Fig.9 Experimental results under different sampling rates

### 2.3 物体多偏振融合成像

传统偏振关联成像<sup>[7-9,11]</sup>,常采用多个探测器分别对物体反射光每个偏振态探测,然后再进行复原得到物体偏振信息,或者利用分时探测方式,在不同时间对物体反射光不同偏振态探测来进行偏振关联成像。而该方法利用单个单像素探测器进行多偏振信息同时探测获取,且不会像分时探测那样导致实时性变差。利用该方法对物体多偏振信息进行融合成像,算法流程与多光谱类似。不同点在于此时系统按照相应偏振信息进行空间混叠,并加载到光学调制系统中产生多偏振空间复用照明散斑。图 10(a)给出了实验物体,包含一个铝材质(上)和一个塑料材质(下)的模型,图 10(b)

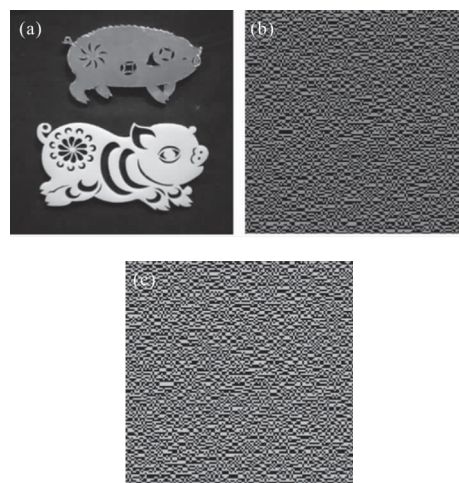


图 10 实验系统配置

Fig.10 Experimental configuration

和(c)分别给出了水平和垂直偏振方向的随机编码矩阵。实验中使用混叠了水平和垂直偏振态的空间复用散斑来获取物体两个偏振方向图像。图 11 给出了在不同采样率下复原出的物体两个偏振态混叠信息。图12 中第一和第三行表示不同采样率下水平和垂直偏振方向的随机采样图像，第二和第四行表示

不同采样率下水平和垂直偏振方向的完整复原图像。根据水平和垂直偏振信息获得的强度和偏振度图像如图13 所示，其中图 13 中第一行表示强度图像，第二行表示偏振度图像。

根据以上结果可以看出该方法可以有效地实现多个物体信息的融合成像。

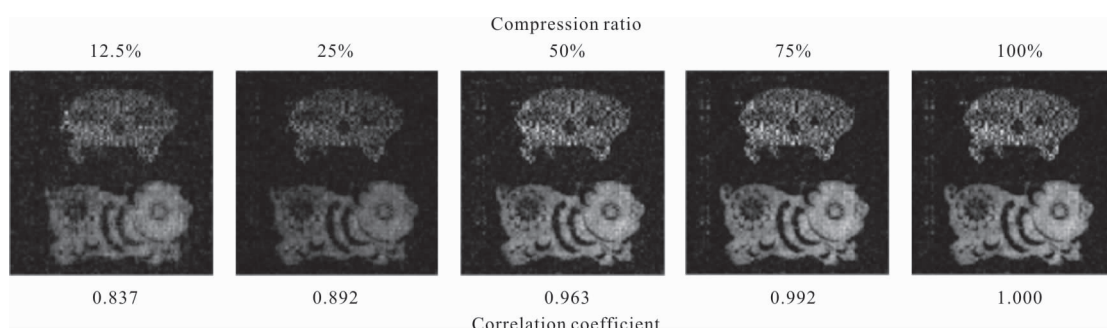


图 11 不同采样率下的水平和垂直偏振混叠信息

Fig.11 Horizontal and vertical polarization fused images under different sampling rates

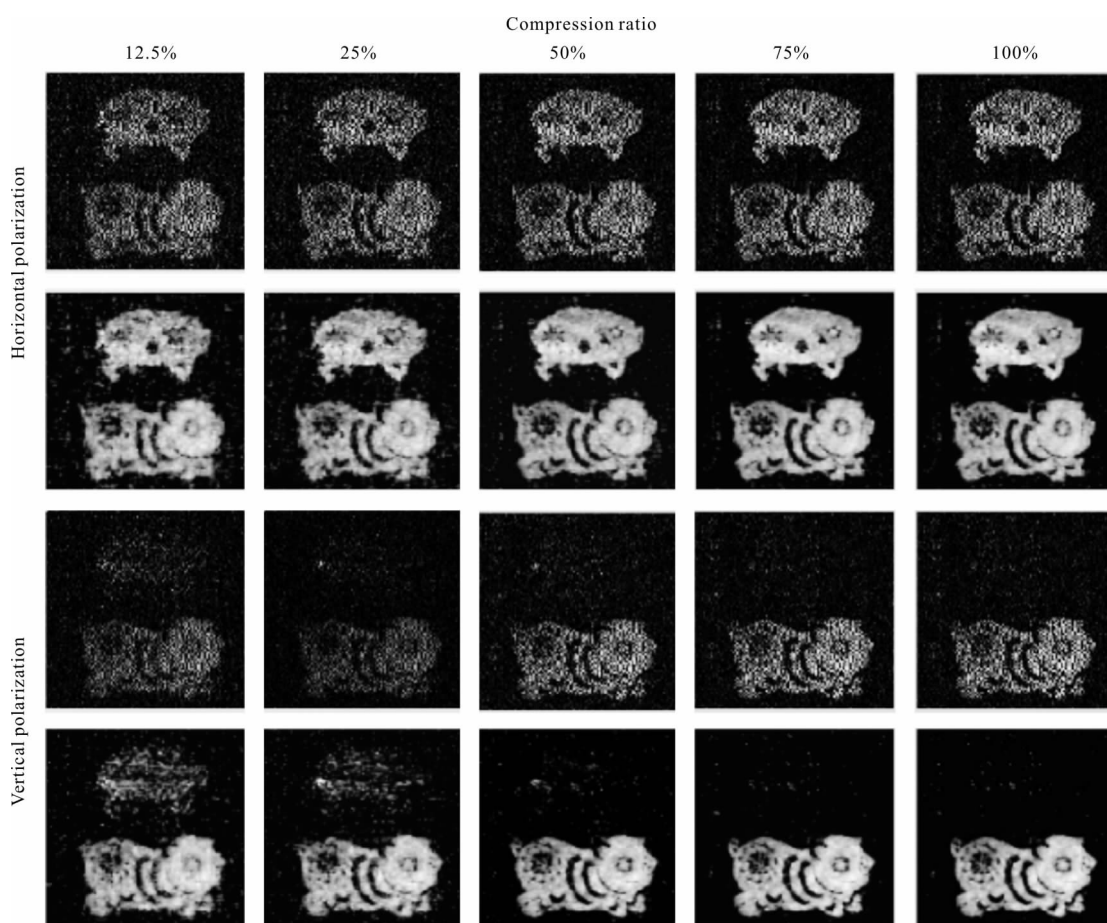


图 12 不同采样率下复原结果

Fig.12 Recovered results under different sampling rates

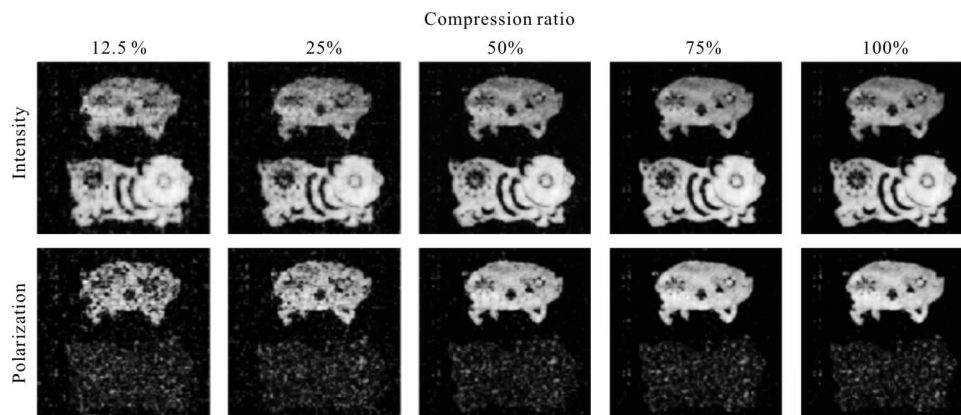


图 13 不同采样率下复原图像

Fig.13 Recovered images under different sampling ratios

### 3 结 论

自然界中绝大部分物体图像在某些变换下具有稀疏性，利用这一原理提出了采用压缩散斑对多个物体信息进行随机压缩采样，然后采用压缩感知算法对多个物体完整图像信息进行复原。据此提出基于编码复用散斑的多信息融合关联成像技术，分别实现了对多空间、多光谱和多偏振信息的同时融合关联成像。在传统关联成像系统中，通常采用多个单像素探测器或分时方式对多信息进行关联成像探测，而该方法只使用一个单像素探测器实现了对多信息的同时融合成像，可以减少系统数据量，提高系统实时性。在时间飞行三维关联成像和高分辨率关联成像等领域具有一定的使用价值。随机编码矩阵排布方式、复原算法优化、多信息数量与复原信息质量之间的关系等问题需要进一步深入研究。同时根据应用需求，继续拓展该技术使用在其他多信息获取领域，推动该技术的实际应用。

#### 参考文献：

[1] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. *Quantum Inf Process*, 2012, 11: 949–993.  
 [2] Stantchev R I, Sun B, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector [J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1600190.  
 [3] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, et al. Fast full-color

computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23068–23074.  
 [4] Wang Y, Suo J, Fan J, et al. Hyperspectral computational ghost imaging via temporal multiplexing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 28(3): 288–291.  
 [5] Bian L, Suo J, Situ G, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 24752.  
 [6] Welsh S S, Edgar M P, Jonathan P, et al. Multi-wavelength compressive computational ghost imaging[C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8618(4): 861801.  
 [7] Liu Y, Shi J, Zeng G. Single-photon-counting polarization ghost imaging [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(36): 10347–10351.  
 [8] Shi D, Hu S, Wang Y, et al. Polarimetric ghost imaging [J]. *Opt Lett*, 2014, 39: 1231–1234.  
 [9] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, et al. Near video-rate linear Stokes imaging with single-pixel detectors [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(2): 025705.  
 [10] Huang J, Shi D. Multispectral computational ghost imaging with multiplexed illumination [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(7): 075701.  
 [11] Shi D, Zhang J, Jian H, et al. Polarization-multiplexing ghost imaging [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2018, 102: 100–105.  
 [12] Shi D, Huang J, Wang Y, et al. Simultaneous fusion, imaging and encryption of multiple objects using a single-pixel detector [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13172.  
 [13] Shi D F, Wang F, Jian H, et al. Compressed polarimetric ghost imaging of different material's reflective objects [J]. *Optical Review*, 2015, 22(6): 882–887.