

引用格式: LI Mei-xuan, WANG Xue, WANG Hong, *et al.* Compressed Multi-spectral Ghost Imaging Using Push-broom Based on Superposing Detected Signals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7):0711002  
李美萱,王雪,王红,等. 基于探测信号叠加的推扫式压缩多光谱关联成像[J]. 光子学报, 2020, 49(7):0711002

# 基于探测信号叠加的推扫式压缩多光谱关联成像

李美萱<sup>1,2</sup>, 王雪<sup>3</sup>, 王红<sup>3</sup>, 刘小涵<sup>1,2</sup>, 刘明<sup>1,2</sup>, 宋立军<sup>1,2</sup>

(1 吉林工程技术师范学院 量子信息技术交叉学科研究院, 长春 130052)

(2 吉林省量子信息技术工程实验室, 长春 130052)

(3 长春大学 理学院, 长春 130022)

**摘要:** 针对推扫模式下多光谱关联成像重构图像模糊、信噪比低问题, 提出了一种利用探测信号叠加提高重构图像信噪比的多光谱关联成像方案. 该方案基于稀疏约束关联成像光谱相机实验系统, 通过单次曝光获得一帧探测信号, 对前后帧连续探测信号进行错位叠加, 计算出系统总探测矩阵, 结合标定测量矩阵, 采用压缩感知算法得到待测目标物体重构图像. 数值模拟和实验结果表明: 适当延迟曝光时间可以提高系统重构图像质量; 相同曝光时间条件下, 利用探测信号错位叠加的推扫 10 帧重构图像信噪比明显高于单帧多光谱重构图像.

**关键词:** 多光谱; 关联成像; 推扫模式; 单次曝光; 信噪比

中图分类号: O433.4; O431.2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204907.0711002

## Compressed Multi-spectral Ghost Imaging Using Push-broom Based on Superposing Detected Signals

LI Mei-xuan<sup>1,2</sup>, WANG Xue<sup>3</sup>, WANG Hong<sup>3</sup>, LIU Xiao-han<sup>1,2</sup>, LIU Ming<sup>1,2</sup>, SONG Li-jun<sup>1,2</sup>

(1 Institute for Interdisciplinary Quantum Information Technology, Jilin Engineering Normal University, Changchun 130052, China)

(2 Jilin Engineering Laboratory for Quantum Information Technology, Changchun 130052, China)

(3 School of Science, Changchun University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A multi-spectral ghost imaging scheme was proposed to address the issues of image blurring and degraded signal-to-noise ratio occurring under the push-broom mode by superposing the detected signals. Taking the multi-spectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints as the imaging system, in this scheme, adjacent frames of detected signals are shifted superposed, then the corresponding equivalent detection matrix is derived combining with the calibrated measurement matrix, and the image is reconstructed via compressed sensing algorithms. Simulation and experimental results show that: properly increasing the exposure time helps to improve the reconstruction quality; under the same exposure time, images reconstructed from the shift-superposed signals obviously have enhanced SNR than those from the original signals acquired via a single frame.

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.11947060), 国家自然科学基金青年基金(No.61703056), 吉林省产业创新专项基金(No.2019C025)

**第一作者:** 李美萱(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为多光谱关联成像技术与应用、微结构光学元件与薄膜波导术、光纤通信技术等. Email: limx@jlenu.edu.cn

**通讯作者:** 宋立军(1971-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为关联成像技术与应用、量子密码技术与应用和量子信息理论. Email: ccdxslj@126.com

**收稿日期:** 2020-03-06; **录用日期:** 2020-04-22

<http://www.photon.ac.cn>

**Key words:** Multi-spectral; Ghost imaging; Push-broom mode; Single-shot; Signal-to-noise ratio  
**OCIS Codes:** 110.1758; 110.2990; 110.3000

## 0 引言

强度关联成像,又称为鬼成像或量子成像<sup>[1-2]</sup>,是一种全新的成像体制,具有非局域性、抗干扰能力强和超分辨等优点,在遥感成像、显微成像、医学成像和超分辨成像等领域都具有巨大的应用潜力,目前已经成为研究热点<sup>[3-4]</sup>.

压缩感知理论首先在数学领域提出来<sup>[5]</sup>,随后压缩成像作为压缩感知的一个研究方向迅速引起广大研究者的兴趣.由于多光谱成像数据是三维的,系统一次只能探测多个谱段内一个空间维度上的数据,一般需要扫描获得二维空间上的图像.将压缩感知理论与多光谱成像技术结合,可以将三维数据压缩至二维数据进行探测.2008年,BRADY D J等<sup>[6]</sup>将压缩感知应用于多光谱成像,提出一种基于幅度掩模板的准单次曝光多光谱成像系统.2015~2017年,ARCE G R课题组提出了另外一种压缩感知多光谱成像方案,并对多光谱压缩成像领域的测量矩阵设计和旋转极坐标下编码孔径的压缩感知多光谱成像等工作进行了研究<sup>[7-9]</sup>.2014年,吴建荣等<sup>[10]</sup>提出一种基于相位调制的单次曝光压缩感知成像方案.2018年,该课题组利用系留气球装载多光谱关联成像原理样机,对试验目标和自然景物进行了单次曝光多光谱关联成像实验研究<sup>[11]</sup>.

当单次曝光多光谱关联成像系统应用于机载或星载平台时,工作模式为推扫模式,前后帧图像会产生重叠区域,利用这部分重叠区域可以将连续多帧光谱图像进行对准叠加来提高重构图像的信噪比.对多帧探测信号进行叠加主要用两种方法,文献[10]采用先将多个连续探测信号分别进行独立计算得到不同帧的待测目标物体信号,再将待测目标物体信号对准后叠加获得多光谱重构图像.本文提出一种新的对准叠加方法,首先利用探测器获得帧探测信号,然后直接将探测信号进行错位叠加得到系统总的探测矩阵,最后结合压缩感知算法重构出多光谱图像.从计算量上本文提出的方法比文献[10]更占优势,即通过一次重构运算可以得到目标物体图像.与单帧重构图像相比,信噪比具有明显提高.

## 1 理论分析

基于稀疏约束关联成像光谱相机(Ghost Imaging via Sparsity Constraints, GISC)系统光路图如图1所示.成像系统由前置成像模块A、调制探测模块B、中继成像模块C和图像重构模块D四部分构成.目标物体Object置于焦距为 $f_1$ 的透镜Lens 1焦平面上,经焦距为 $f_2$ 的前置成像透镜Lens 2成像到视场光阑Aperture所在的前置成像面上,在前置成像面上获得一幅宽波段图像.调制模块中的空间相位调制器(Spatial Phase Modulator, SPM)将前置成像面上宽波段图像上每个点发出的光场进行随机相位调制,经调制后形成一幅散斑图样.中继成像透镜Lens 3将调制后的散斑图放大成像于面阵光电探测器Detector上.通过对散斑场的单次曝光探测,结合事先标定的测量矩阵和压缩感知等重构算法,利用计算机Computer重构出目标的三维光谱图像Image.

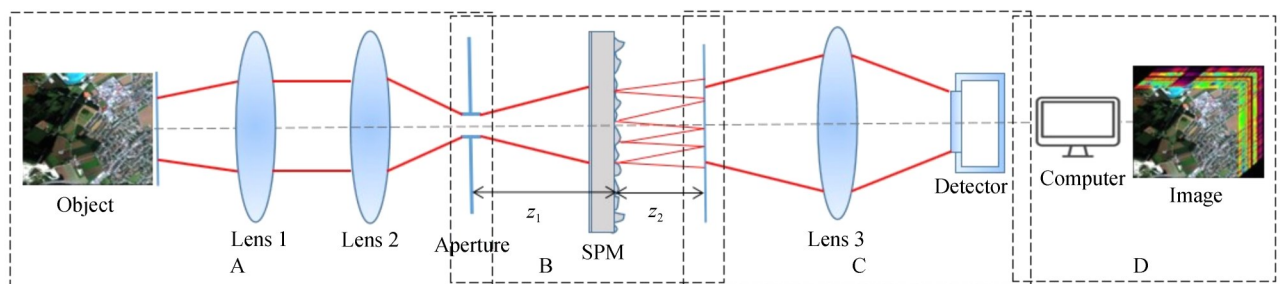


图1 基于稀疏约束关联成像光谱相机系统光路图  
 Fig.1 Schematic diagram of GISC spectral camera

令矩阵  $X = [X_1^{\lambda_1}, \dots, X_N^{\lambda_1}, \dots, X_1^{\lambda_s}, \dots, X_N^{\lambda_s}, \dots, X_1^{\lambda_L}, \dots, X_N^{\lambda_L}]^T$  表示待测目标物体多光谱图像,其中  $L$  为图像的谱段数,  $s = (1, \dots, L)$ ,  $X_N^{\lambda_s} (N = 1, \dots, N)$  表示第  $s$  个谱段图像中第  $N$  列像素灰度的列向量.不同谱

段图像对应于不同的测量矩阵,  $A_{i,j}^{\lambda_s}$  表示成像系统标定时用  $\lambda_s$  的点光源在物面上第  $j$  列像素上移动时, 探测面 CCD 第  $i$  个像元得到的光强度值, 总的测量矩阵  $A = (A^{\lambda_1}, A^{\lambda_2}, \dots, A^{\lambda_L}) \in R^{M \times (N \times L)}$ . 令矩阵  $Y = [Y_1, \dots, Y_M]^T$  表示成像时探测面上的探测信号强度分布, 其中  $M$  是探测面 CCD 的像元数. 多光谱关联成像探测过程可以用公式  $Y = AX$  描述, 其中  $Y \in R^M$  为探测结果值矩阵,  $X \in R^{N \times L}$  为目标物体多光谱图像矩阵, 成像系统的输入输出关系可以表示为

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1,1}^{\lambda_1} & \cdots & A_{1,N}^{\lambda_1} & A_{1,1}^{\lambda_2} & \cdots & A_{1,N}^{\lambda_2} & \cdots & A_{1,1}^{\lambda_L} & \cdots & A_{1,N}^{\lambda_L} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{M,1}^{\lambda_1} & \cdots & A_{M,N}^{\lambda_1} & A_{M,1}^{\lambda_2} & \cdots & A_{M,N}^{\lambda_2} & \cdots & A_{M,1}^{\lambda_L} & \cdots & A_{M,N}^{\lambda_L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1^{\lambda_1} \\ \vdots \\ X_N^{\lambda_1} \\ \vdots \\ X_1^{\lambda_2} \\ \vdots \\ X_N^{\lambda_2} \\ \vdots \\ X_1^{\lambda_L} \\ \vdots \\ X_N^{\lambda_L} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

矩阵  $(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_N)^T$  表示探测信号噪声, 根据上面的探测模型, 多光谱图像的重构可以通过求解优化问题实现

$$\min_x \|Y - AX\|_2^2 + \mu_1 \|\nabla_{i,j} X\|_1 + \mu_2 \|X\|_* \text{ s.t. } x \geq 0 \quad (2)$$

式中,  $\|\nabla_{i,j} X\|_1$  称为梯度范数, 其相当于提取图像的分段边缘, 使变换后的图像更加稀疏;  $\|X\|_*$  表示矩阵核范数, 表明多光谱图像矩阵的低秩性;  $\mu_1, \mu_2 \geq 0$  为各约束项的权重系数. 本文采用 TV-RANK 压缩感知算法进行图像重构<sup>[12]</sup>.

原理样机成像系统由一个基于稀疏约束关联成像光谱相机和一个监视相机组成, 搭载到位于地面三脚架上的全景云台上实现推扫工作模式, 如图 2(a) 所示. 监视相机主要用于完成对待测目标物体的对准, 光谱相机完成目标光谱图像信号的接收、调制、探测. 相机的曝光次数设为  $t_k$ , 单次曝光可重构  $p \times q$  个像元的 10 个谱段图像, 后一帧图像的视场相对于前一帧图像移动  $d$  列像素, 前后帧图像存在  $q - d$  行重叠区域, 如图 2(b) 所示.

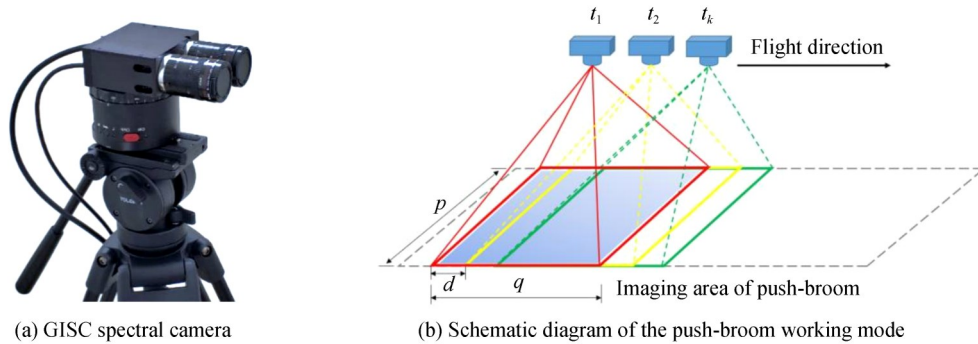


图 2 基于稀疏约束关联成像光谱相机及推扫模式示意图  
Fig.2 Schematic diagram of GISC spectral camera and its push-broom working mode

假设初始探测(设定为第 0 次探测)时探测面上第  $j$  列( $j = 1, 2, \dots, n$ )像元的输出信号为

$$Y_j^{(0)} = \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^q A_{j,l}^{\lambda_s} X_l^{\lambda_s} + \epsilon_j^{(0)} \quad (3)$$

因后一帧图像相对于前一帧图像向前移动  $d$  列像素, 第 1 次探测时探测面上第  $j$  列像元的输出信号为

$$Y_j^{(1)} = \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^q A_{j,l}^{\lambda_s} X_{l+d}^{\lambda_s} + \epsilon_j^{(1)} \quad (4)$$

以此类推, 第  $t$  次探测时探测面上第  $j$  列像元的输出信号为

$$Y_j^{(t)} = \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^q A_{j,l}^{\lambda_s} X_{l+t,d}^{\lambda_s} + \epsilon_j^{(t)} \quad (5)$$

则共  $r$  帧信号直接叠加后得到的探测信号为

$$Y_j = \sum_{t=0}^{r-1} \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^q A_{j,l}^{\lambda_s} X_{l+t,d}^{\lambda_s} + \sum_{t=0}^{r-1} \epsilon_j^{(t)} = \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^q A_{j,l}^{\lambda_s} \sum_{t=0}^{r-1} X_{l+t,d}^{\lambda_s} + \sum_{t=0}^{r-1} \epsilon_j^{(t)} \quad (6)$$

式(6)采用相同的测量矩阵与不同帧待测目标物体的多光谱图像灰度值相乘得到系统总的探测矩阵,在此过程中多帧探测信号产生混叠导致探测信噪比降低.由于该系统为局域空间平移不变系统,位于不同列上的相同目标所产生的散斑场会相应地在列方向上平移,且前后帧图像中目标所平移的列间隔  $d$  和对应的散斑场平移的列间隔  $d_1$  满足公式

$$\frac{z_1}{z_2} = \beta \frac{d}{d_1} \quad (7)$$

式中,  $\beta$  为前置成像系统的成像倍率,  $z_1$  为前置成像面到空间相位调制器的距离,  $z_2$  为空间相位调制器到散斑探测面的距离.将不同帧的探测信号错开  $d_1$  列叠加,能够使不同帧探测信号的重构图像对齐叠加,从而在提高探测信号信噪比的同时起到减小推扫模式带来的运动模糊效应.

利用前后帧图像散斑场光强分布的错位叠加推导探测过程的数学表达式.如图1所示,假定距透镜  $f_1$  处有一轴外(距轴  $h$  处)点光源发射球面波,当  $(r-1) \cdot d \leq \frac{f_2 z_2}{f_1 z_1} h$  时,根据散斑场光强分布局部空间平移不变性的原理可知

$$A_{j,l}^{\lambda_s} = A_{j \pm d_1, l \pm d}^{\lambda_s} = A_{j \pm t \cdot d_1, l \pm t \cdot d}^{\lambda_s} \quad (8)$$

式中,  $j$  ( $j > r-1$ ) 为探测面上的列数,  $l$  为物面上的列数.将每次推扫过的像素数错列相加,由式(6)~(8)可得

$$\begin{aligned} Y_j' &= \sum_{t=0}^{r-1} Y_{j-t \cdot d_1}^{(t)} = \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^q \sum_{t=0}^{r-1} A_{j-t \cdot d_1, l}^{\lambda_s} X_{l+t \cdot d}^{\lambda_s} + \sum_{t=0}^{r-1} \epsilon_{j-t \cdot d_1}^{(t)} = \sum_{s=1}^S \sum_{T=1}^{q+(r-1) \cdot d \cdot \min(\lfloor \frac{T-1}{d} \rfloor, r-1)} A_{j-t \cdot d_1, T-t \cdot d}^{\lambda_s} X_T^{\lambda_s} + \\ &\sum_{t=0}^{r-1} \epsilon_{j-t \cdot d_1}^{(t)} = \sum_{s=1}^S \sum_{T=1}^{q+(r-1) \cdot d \cdot \min(\lfloor \frac{T-1}{d} \rfloor, r-1)} \sum_{l=\max(0, \lceil \frac{T-q}{d} \rceil)} A_{j,T}^{\lambda_s} X_T^{\lambda_s} + \sum_{t=0}^{r-1} \epsilon_{j-t \cdot d_1}^{(t)} = \\ &\sum_{s=1}^S \sum_{T=1}^{q+(r-1) \cdot d} \left[ \min(\lfloor \frac{T-1}{d} \rfloor, r-1) - \max(0, \lceil \frac{T-q}{d} \rceil) + 1 \right] A_{j,T}^{\lambda_s} X_T^{\lambda_s} + \sum_{t=0}^{r-1} \epsilon_{j-t \cdot d_1}^{(t)} \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\lfloor \cdot \rfloor$  和  $\lceil \cdot \rceil$  分别表示向下取整和向上取整.由式(9)可知,将不同帧待测目标物体的多光谱图像灰度值与平移后的测量矩阵匹配相乘得到错位叠加后的探测信号值,与式(6)对比可以发现,式(9)存在一个系数矩阵  $\min(\lfloor \frac{T-1}{d} \rfloor, r-1) - \max(0, \lceil \frac{T-q}{d} \rceil) + 1$ , 相同噪声条件下,错位叠加方法的探测信号值  $Y_j'$  大于直接叠加探测信号值  $Y_j$ , 系统探测信噪比增加,重构图像质量提高.

## 2 数值模拟结果

首先对推扫模式下探测信号直接叠加和前后帧错位叠加的多光谱关联成像重构图像质量进行数值模拟分析.假设待测目标为两横杠一竖杠的全色物体,其不同模式下光谱图像分布如图3所示.单帧单谱段像元个数为  $p \times q = 100 \times 10 = 1000$ ,如图3(a)所示.选择探测谱段数  $S = 10$  (535 nm~625 nm),其中相邻谱段间隔 10 nm,则单帧 10 个谱段像元个数为  $p \times q \times L = 100 \times 10 \times 10 = 10000$ ,如图3(b)所示.若取曝光次数  $t_k = 10$ ,前后两帧图像之间的像素差  $d = 1$ ,则经过 10 次探测,10 帧 10 个谱段像元个数为  $q \times m \times L = 100 \times 19 \times 10 = 19000$ ,如图3(c)所示.

由于实际探测信号包含的噪声主要来源于探测器的暗电流噪声和读出噪声以及信号强度相关的散粒噪声.本文数值模拟过程中探测信号  $Y$  主要考虑散粒噪声,噪声模型满足泊松分布.

测量矩阵  $A$  采用多光谱关联成像原理样机系统标定时的实测实验数据.将探测矩阵  $Y$  和测量矩阵  $A$  代入式(2),利用压缩感知算法即可重构出单帧探测的多光谱重构图像.如果将后续 9 次曝光的探测信号按照

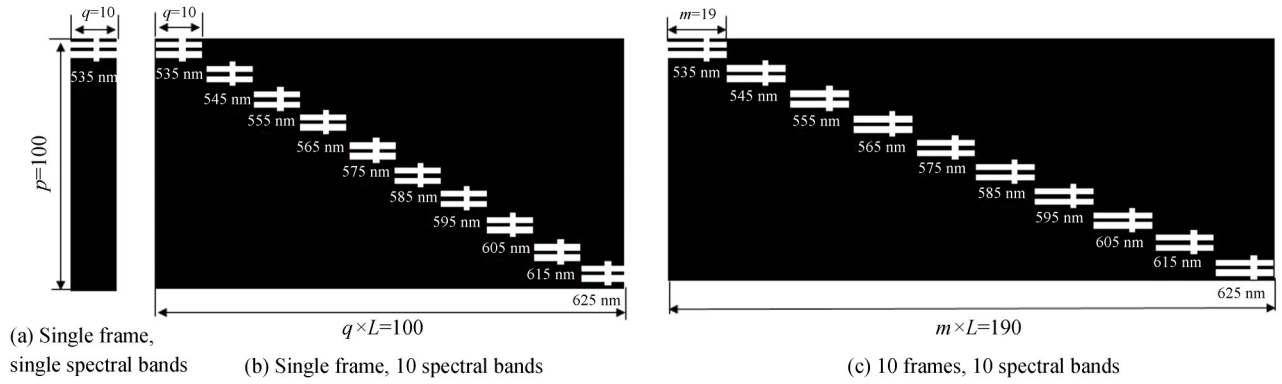


图3 待测目标物体的光谱图像分布  
Fig.3 Spectral images of the test object

式(6)直接对准叠加,得到总的探测矩阵  $Y_j$ ,代入式(2)获得直接对准叠加的重构图像;如果将后续9次曝光的探测信号按照式(9)进行错位叠加,得到总的探测矩阵  $Y'_j$ ,代入式(2)得到错位叠加的重构图像.

为定量说明重构图像质量,本文采用均方根误差对多光谱图像重构质量进行评价,定义为

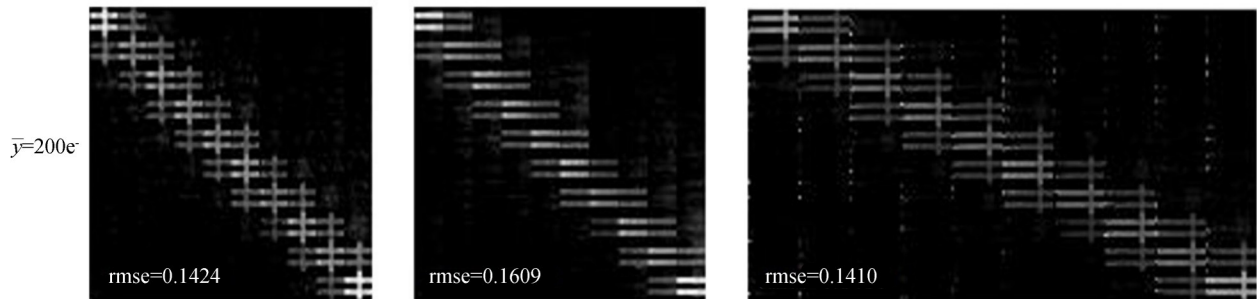
$$\bar{x}(i) = \frac{x(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [x(i)]^2}} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{x}(i) \cdot x^*(i)}{\sum_{i=1}^N [x^*(i)]^2} \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\alpha x^*(i) - \bar{x}(i)]^2} \quad (12)$$

式中,  $N$ 为拍摄帧数,  $x$ 是目标物体,  $x^*$ 是重构图像. RMSE值越小,重构图像质量越好.

不同电子数均值条件下,单帧和10帧探测信号不同叠加方法重构图像数值模拟结果如图4所示.其中(a)列为CCD记录的电子数均值为  $200 e^-$ 、 $1000 e^-$ 和  $1500 e^-$ 时,单帧探测信号重构图像的数值模拟结果, RMSE分别为0.1424、0.1414和0.1410,表明增加电子数均值可以提高系统重构图像质量;(b)列为10帧探测信号直接叠加重构图像结果, RMSE分别为0.1609、0.1606和0.1637;(c)列为10帧探测信号错位叠加重构图像结果, RMSE分别为0.1410、0.1403和0.1400.由此可知,在相同电子数均值条件下,采用探测信号直接叠加方法的RMSE值较大,重构图像质量较差,待测目标物体的竖杠均没有重构出来,图像中存在大量噪声点;而采用错位叠加方法的RMSE值比单帧重构图像的RMSE小,待测目标物体重构图像完整,图像噪声点明显减少,比直接叠加重构图像质量具有显著提高.由上述多光谱重构图像数值模拟结果还可以发现,无论采用哪种叠加方法,任意谱段的图像信号均会展宽到相邻谱段上,这是由于多光谱关联成像主要是基于散斑场关联进行光谱分辨,相邻谱段的散斑场存在一定关联性造成的<sup>[13]</sup>.



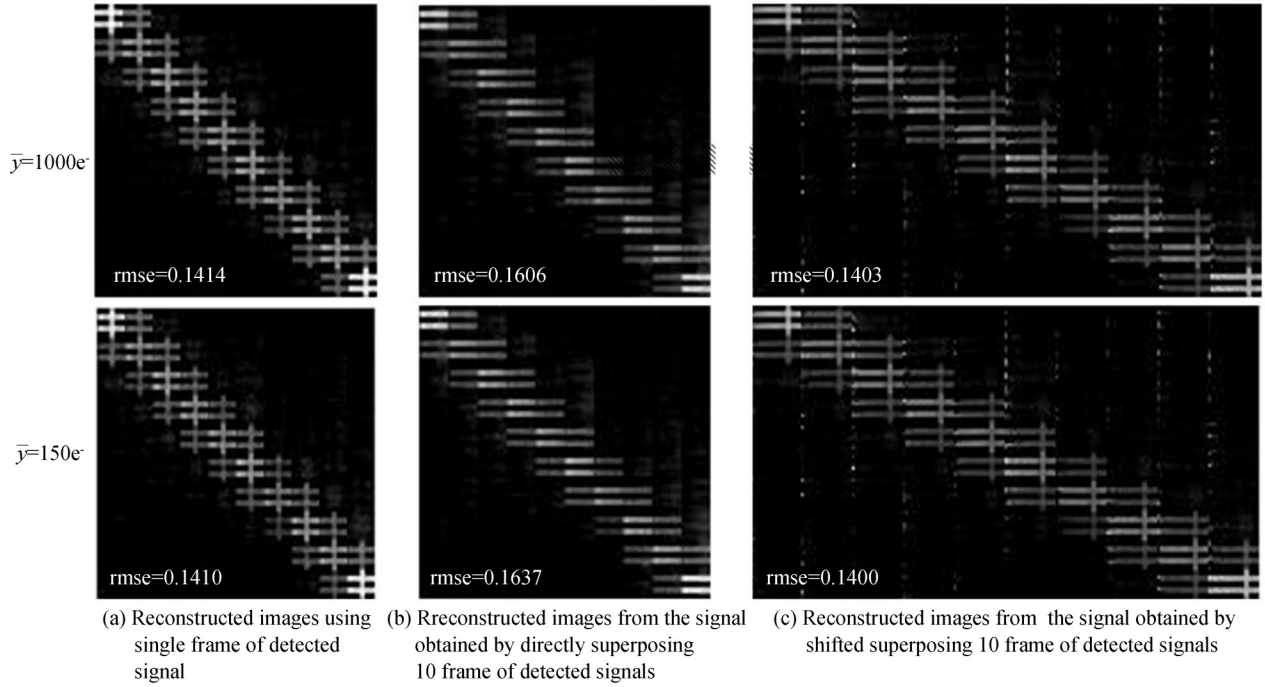


图4 不同电子数均值时,单帧和10帧探测信号不同叠加方法重构图像数值模拟结果

Fig.4 Simulation results of the reconstructed images from single frame and 10 frames of detection signals, using different superposition methods, and under different mean electronic number values

### 3 实验结果

推扫模式下基于稀疏约束关联成像光谱相机实验在实验室环境完成.多光谱相机主要参数如下:光谱范围覆盖450~700 nm;成像视场角为 $15^\circ \times 1^\circ$ ;采样帧频 $\geq 20$  Hz;像元分辨率优于0.5 mrad;光谱通道数 $\geq 10$ .监视相机型号为Aca2040-120uc,空间分辨率为 $2064 \times 1544$ ,时间分辨率为120 fps.待测目标物体为绿色、红色和黄色3种不同颜色高反膜制作的2个横杠和1个竖杠靶标,所占的像元个数分别为 $350 \times 14$ 和 $114 \times 14$ ,如图5所示.采用白色LED强光手电筒作为实验室照明光源,待测目标物体在距原理样机1780 mm处,1个像素对应目标物体宽度为 $D = 1780 \times \tan(0.5 \text{ mrad}) = 0.89 \text{ mm}$ .利用步进精度为 $0.05^\circ/\text{s}$ 的MA2单反电动云台带动成像系统以 $180^\circ/\text{H}$ 的速度匀速旋转对目标物体进行推扫成像,1秒扫过的线度为 $L = 1780 \times \tan(0.05^\circ/\text{s}) = 1.55 \text{ mm}$ ,预设前后两帧图像的像素差 $d = 1$ ,则相机的曝光间隔为 $D/L = 573 \text{ ms}$ ,前置成像系统的成像倍率为1.

实验过程中,设置相机曝光时间分别为70 ms、365 ms和545 ms,对应CCD记录的电子数均值为 $200 e^-$ 、 $1000 e^-$ 和 $1500 e^-$ .实验中取光谱范围为487~633 nm,10个谱段,相邻谱段间隔约15 nm,前后两帧图像的像素差 $d = 1$ .采用相对均方根误差(rRMSE)来评价实验结果图像的重建质量,定义为

$$\bar{x}_{\text{ref}}(i) = \frac{x_{\text{ref}}(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [x_{\text{ref}}(i)]^2}} \quad (13)$$

$$\bar{x}^*(i) = \frac{x^*(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [x^*(i)]^2}} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{x}_{\text{ref}}(i) \cdot \bar{x}^*(i)}{\sum_{i=1}^N [\bar{x}^*(i)]^2} \quad (15)$$

$$rRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x^*(i) [\alpha \bar{x}^*(i) - \bar{x}_{ref}(i)]^2} \quad (16)$$

式中,  $x_{ref}(i)$  表示参考图像, 采用曝光时间为 545 ms 时探测信号错位叠加的重构图像.

当相机曝光时间为 365 ms 时, 推扫模式下 10 次曝光得到的探测信号直接叠加和错位叠加的多光谱关联成像重构伪彩图实验结果如图 5 所示. 其中, 图 5(a) 为待测目标物体; 图 5(b) 为采用式(6)中探测信号直接叠加方法重构图像结果. 由图 5(b) 可以发现, 推扫模式所造成的目标物体运动模糊现象非常明显, 重构图像的 rRMSE 为 0.766 8; 图 5(c) 为利用公式(9)计算得到的错位叠加方法重构图像结果. 与图 5(b) 比较, 相同曝光时间下 10 帧探测信号错位叠加的重构图像质量比直接叠加显著提高, rRMSE 为 0.108 6. 实验结果与数值模拟结果相吻合.

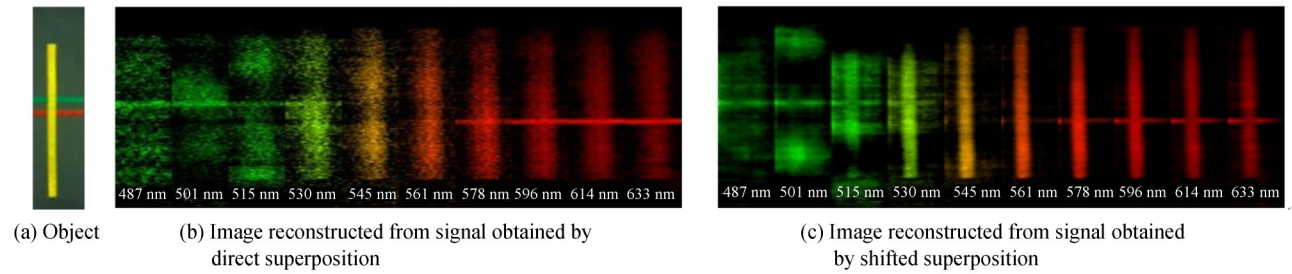


图 5 10 帧探测信号不同叠加方法重构图像实验结果

Fig.5 Experimental results of reconstructed images from detected signals of 10 frames with different superposition methods

分析不同曝光条件下, 单帧和 10 帧重构图像实验结果对比情况. 推扫模式下 CCD 探测信号、单次曝光和 10 次曝光的多光谱关联成像重构伪彩图实验结果如图 6 所示. 其中, 图 6(a) 为相机曝光时间分别为 70 ms、365 ms 和 545 ms 时 CCD 的探测信号; 图 6(b) 为对应的单帧重构图像结果; 图 6(c) 为推扫 10 帧的重构图像结果. 由图 6(b) 可以发现: 在相机曝光时间为 70 ms 时, 单帧重构图像由于存在大量噪声点, 模糊不清,  $rRMSE = 0.498 1$ ; 当曝光时间为 365 ms 时, 噪声有所减少, 相应谱段的横杠和竖杠比较清晰,  $rRMSE = 0.241 2$ ; 当曝光时间增大到 545 ms 时, 重构图像质量明显提高,  $rRMSE = 0.213 5$ . 对比图 6(b) 和图 6(c) 可以

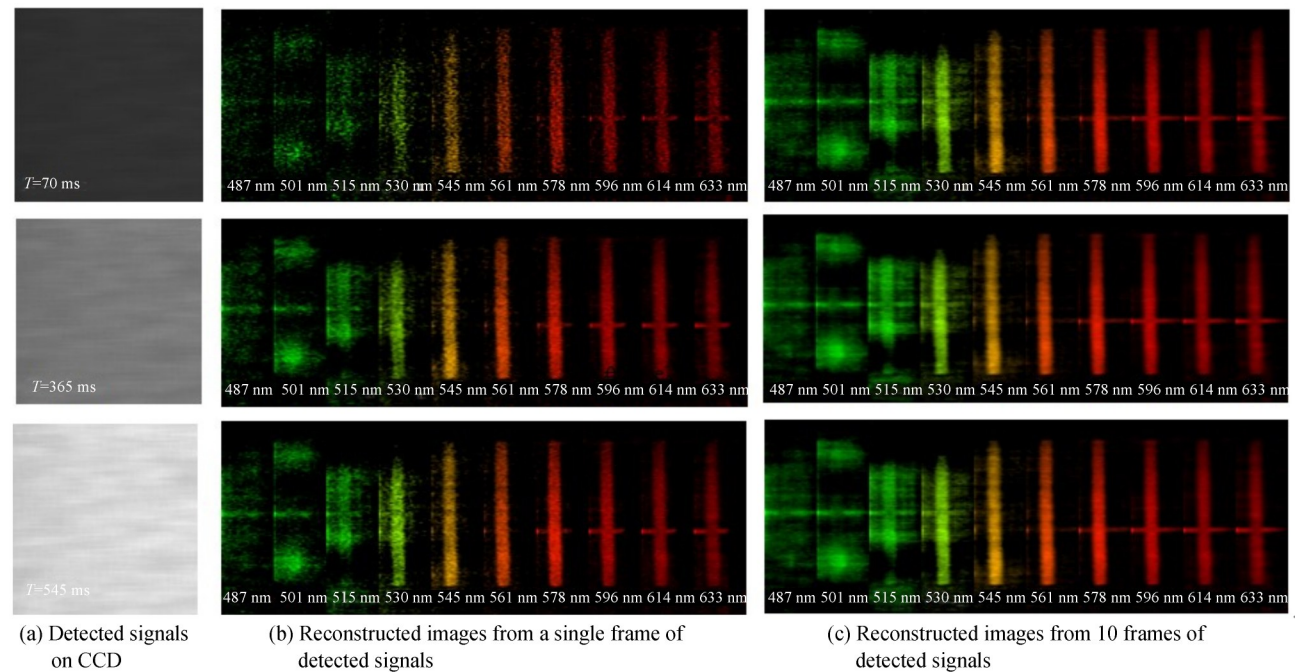


图 6 不同曝光时间单帧和 10 帧重构图像实验结果

Fig.6 Experimental results of reconstructed images from detected signals of both a single frame and 10 frames under different exposure times

发现:相同曝光时间下,采用推扫模式的10帧探测信号错位叠加的重构图像明显优于单帧重构图像.当曝光时间为70 ms时, $rRMSE=0.1122$ ;当曝光时间为365 ms时,单帧重构图像中515 nm和530 nm两个谱段的绿色横杠均没有重构出来,而对应的推扫10帧重构图像中非常清楚地重构出绿色横杠, $rRMSE=0.1086$ .实验结果与模拟结果相一致.

## 4 结论

本文提出了一种新的推扫模式多光谱压缩关联成像方案.利用前后帧探测信号的散斑场光强分布错位叠加来提高待测目标物体信噪比.理论推导了探测信号直接叠加和错位叠加的探测矩阵数学表达式,并进行了数值模拟分析,结果表明推扫模式下探测信号错位叠加重构多光谱图像质量明显优于直接叠加的重构图像.实验室环境下完成了基于推扫模式的彩色物体靶标单次曝光多光谱关联实验,结果表明,当CCD的曝光时间分别为70 ms、365 ms、545 ms时,均可得到质量较好的多光谱重构图像,并且随曝光时间增加,重构图质量有所提高.相同曝光时间下,10帧探测信号错位叠加重构图像质量比单帧重构图像质量显著提高.本文对促进单次曝光多光谱压缩感知关联成像的实际应用具有指导意义.

致谢 感谢上海光机所吴建荣、胡晨昱的有益讨论.

### 参考文献

- [1] PITTMAN T B, SHIH Y H, STREKALOV D V, *et al.* Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Physical Review A*, 1995, **52**(5): R3429-R3432.
- [2] STREKALOV D V, SERGIENKO A V, KLYSHKO D N, *et al.* Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 1995, **74**(18): 3600-3603.
- [3] GONG Wen-lin, WANG Cheng-long, MEI Xiao-dong, *et al.* Recent research progress and thoughts on GISC Lidar with respect to practical applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(3): 10-16  
龚文林, 王成龙, 梅笑冬, 等. 面向实际应用的GISC Lidar近期研究进展与思考[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(3): 10-16.
- [4] HAN S S, YU H, SHEN X, *et al.* A review of ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Applied Sciences*, 2018, **8**(8): 1379.
- [5] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, **52**(2): 489-509.
- [6] ARCE G R, BRADY D J, CARIN L, *et al.* Compressive coded aperture spectral imaging an introduction[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, **31**(1): 105-115.
- [7] CORREA C V, ARGUELLO H, ARCE G R. Snapshot colored compressive spectral imager[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, **32**(10): 1754-1763
- [8] PARADA-MAYORGA A, ARCE G R. Colored coded aperture design in compressive spectral imaging via minimum coherence[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2017, **3**(2): 202-216.
- [9] FU C, DON M L, ARCE G R. Compressive spectral imaging via polar coded aperture [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2017, **3**(3): 408-420.
- [10] WU Jian-rong. Push-broom snapshot spectral ghost imaging [C]. Wuhan: Proceedings of the Fourth Annual Higu Resolution Earth Observation Conference, 2017.  
吴建荣. 推扫模式下强度关联快照式光谱成像[C]. 武汉: 第四届高分辨率对地观测学术年会论文集, 2017.
- [11] WU J R, LI E R, SHEN X, *et al.* Experimental results of the balloon-borne spectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints[J]. *IEEE Access*, 2018, **6**: 68740-68748.
- [12] TAN Shi-yu. The application research of structured compressed sensing in multispectral ghost imaging [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.  
谭诗语. 结构压缩感知在多光谱强度关联成像中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 31-55.
- [13] ZHANG Hong-wei, GUO Shu-xun, ZHANG Chi, *et al.* Pseudo-inverse iterative denoising method for object reconstruction of ghost imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(2): 0210001.  
张红伟, 郭树旭, 张驰, 等. 关联成像目标重构的伪逆迭代降噪方法[J]. *光子学报*, 2017, **46**(2): 0210001.