

# 运动目标强度关联成像及在遥感探测中的应用

张 聪 龚文林\* 韩申生

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 开展了强度关联成像领域中对于运动目标成像的研究,为了克服目标与系统之间的相对运动引起的图像退化问题,提出了基于参考臂探测器记录的光场强度分布平移补偿进而提高运动目标强度关联成像分辨率的方案。理论和实验结果表明:通过对参考臂探测器记录的光场强度分布进行平移补偿,利用强度关联成像技术仍然可以获得运动目标的高分辨率图像。针对强度关联线性重构和稀疏约束非线性重构算法,分别讨论了遥感探测应用过程中探测噪声对运动目标强度关联成像重构质量的影响。此外,比较了所述技术与现有去运动模糊技术的优缺点。

**关键词** 相干光学;强度关联成像;运动目标;稀疏约束;遥感

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.1214003

## Ghost Imaging for Moving Targets and Its Application in Remote Sensing

Zhang Cong Gong Wenlin Han Shensheng

(Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The moving target imaging in the field of ghost imaging is researched. In order to overcome the imaging degradation caused by relative motion between imaging system and target, a method of translation compensation of light intensity distribution recorded by the reference detector is proposed so that the resolution of ghost imaging for moving target can be improved. Both theoretical and experimental results suggest that ghost imaging technique can obtain high-resolution imaging of moving target by the proposed method of translation compensation. According to the application of remote sensing, the influence of detection noise to ghost imaging for moving target is discussed based on intensity correlation linear reconstruction and nonlinear sparsity constraints reconstruction algorithms, respectively. The advantages and disadvantages of both the proposed technique and existing motion-deblurring techniques are also discussed.

**Key words** coherent optics; ghost imaging; moving target; sparsity constraints; remote sensing

**OCIS codes** 030.1640; 030.6600; 110.1758; 100.3020

## 1 引 言

强度关联成像,也称鬼成像(GI),是一种基于光场涨落特性的高阶关联成像技术。基于光场涨落的量子或者经典关联特性,通过测量参考光场与目标探测光场之间的强度关联函数可以非局域地获取目标的图像信息<sup>[1~16]</sup>,其成像机理和相关应用研究

成为近 15 年来量子光学领域中的热点之一<sup>[11~16]</sup>。与以往的成像方法一样,成像分辨率和对比度一直是评价成像质量两个最为主要的技术指标,因此高分辨成像也是 GI 的追求目标。近年来,随着压缩感知(CS)稀疏图像重建技术的兴起<sup>[17,18]</sup>,可以将目标的稀疏先验特性与 GI 技术结合起来,实验证明:

收稿日期: 2012-05-28; 收到修改稿日期: 2012-08-20

基金项目: 国家 863 计划(2011AA120101, 2011AA120102)资助课题。

作者简介: 张 聪(1988—),男,硕士研究生,主要从事强度关联成像方面的研究。E-mail: zhangcong2009@gmail.com

导师简介: 韩申生(1960—),男,博士生导师,主要从事强度关联成像方面的研究。E-mail: sshan@mail.shcnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: gongwl@siom.ac.cn

即使采样数低于奈奎斯特率,我们仍可以重建目标的高对比度图像<sup>[19,20]</sup>,而且成像分辨率也可以突破GI系统的衍射极限<sup>[21~24]</sup>。然而,上述这些GI研究结果均是针对静止目标而言的。

由于实际应用过程中目标大部分是运动的,能够对运动目标实现强度关联成像在实践中具有更为重大的意义。比如,在遥感探测应用过程中,成像系统多是由车辆、飞机等搭载,探测目标也常常具有较高的运动速度,这一点使得成像过程中成像系统与目标之间往往是相对运动的。在传统成像中,这一相对运动将会导致成像分辨率的退化(即运动模糊),因此运动目标的高分辨成像一直是遥感探测所面临的一个重大研究课题。已有初步结果表明:对于GI的实空间像系统,目标运动也会导致成像分辨率的退化<sup>[25]</sup>。为了克服目标运动引起的成像分辨率退化,本文提出了一种对GI系统参考臂探测器记录的光场强度分布进行平移补偿的方法,理论和实验证明了该方法可以对运动目标实现高分辨成像。针对遥感探测中运动目标成像的应用场景,探讨了线性关联重构和稀疏约束非线性重构算法进行图像重构时,探测噪声对运动目标强度关联成像质量的影响。此外,比较了文中所述的强度关联成像去运动模糊方法与以往去运动模糊技术的优缺点。

## 2 系统装置与理论分析

### 2.1 运动目标强度关联成像装置

图1为运动目标强度关联成像装置图。利用缓慢旋转的毛玻璃调制激光束产生赝热光源,其中激光束的波长为 $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,光束直径 $D = 2 \text{ mm}$ 。经

毛玻璃调制后的光场,通过自由传播距离 $z$ 后,由透镜 $f_s$ 会聚到分束器(BS)上而分为两个独立的光路:一路为参考臂,透镜 $f_r$ 将透镜 $f_s$ 平面处的光场成像于CCD相机 $D_r$ 上;另一路为物臂,透镜 $f_o$ 将透镜 $f_s$ 平面处的光场成像于目标平面上,经目标反射后的光场信息通过望远镜系统成像于桶探测器 $D_t$ 上。其中透镜 $f_s$ 平面为物臂目标平面和参考臂CCD相机 $D_r$ 平面的共轭物面,即满足高斯薄透镜成像关系: $\frac{1}{u_o} + \frac{1}{v_o} = \frac{1}{f_o}$ ,  $\frac{1}{u_r} + \frac{1}{v_r} = \frac{1}{f_r}$ 。同时物臂目标平面与探测平面 $D_t$ 也满足高斯薄透镜成像关系: $\frac{1}{u_t} + \frac{1}{v_t} = \frac{1}{f_t}$ 。

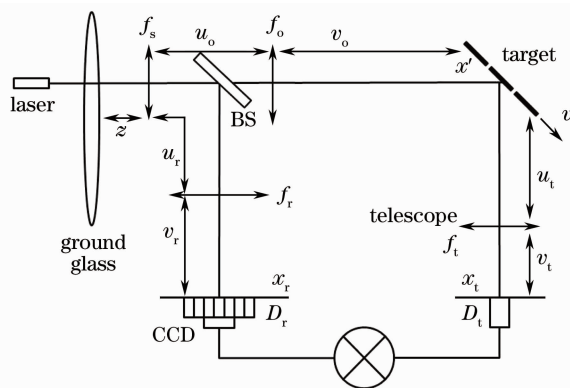


图1 运动目标强度关联成像光路图

Fig.1 Schematic of ghost imaging for moving target

### 2.2 运动目标强度关联成像理论

根据强度关联成像理论<sup>[4,5]</sup>,物臂探测面 $D_t$ 处的光场与参考臂CCD探测面 $D_r$ 处的光场之间的二阶关联函数为

$$\Delta G^{(2,2)}(x_r, x_t) = \langle E_r(x_r) E_r^*(x_r) E_t^*(x_t) E_t(x_t) \rangle - \langle E_r(x_r) E_r^*(x_r) \rangle \langle E_t(x_t) E_t^*(x_t) \rangle = \left| \int dx_0 dx'_0 \langle E_0(x_0) E_0^*(x'_0) \rangle h_r(x_r, x_0) h_t^*(x_t, x'_0) \right|^2, \quad (1)$$

式中 $\langle \dots \rangle$ 表示系综平均,  $E_r(x_r)$ 与 $E_t(x_t)$ 分别表示参考臂与物臂探测面处的光场。 $\langle E_0(x_0) E_0^*(x'_0) \rangle$ 为毛玻璃面处光场的一阶自相关函数。 $h_r(x_r, x_0)$ 为参考臂毛玻璃面到CCD探测面 $D_r$ 处的点扩散函数,  $h_t^*(x_t, x'_0)$ 为物臂毛玻璃面到桶探测器探测面 $D_t$ 处的点扩散函数的复共轭。

如图1所示,由于 $u_r, v_r$ 满足高斯薄透镜成像关系: $\frac{1}{u_r} + \frac{1}{v_r} = \frac{1}{f_r}$ ,则参考臂对应的放大率为 $M_r = \frac{v_r}{u_r}$ 。在透镜 $f_r$ 的数值孔径较大且满足傍轴近似条件

下,参考臂的点扩展函数为

$$h_r(x_r, x_0) \propto \exp \left[ \frac{jk}{2z} \left( \frac{x_r}{M_r} - x_0 \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。对于物臂, $u_o, v_o, u_t, v_t$ 也满足高斯薄透镜成像关系: $\frac{1}{u_o} + \frac{1}{v_o} = \frac{1}{f_o}$ ,  $\frac{1}{u_t} + \frac{1}{v_t} = \frac{1}{f_t}$ ,则对应的放大率分别为 $M_o = \frac{v_o}{u_o}$ ,  $M_t = \frac{v_t}{u_t}$ 。假设目标以速度 $v$ 进行匀速运动,则经过时间 $\tau$ 后成像目标中心的偏移量 $\xi = v\tau$ 。在透镜 $f_o$ 和望远镜系统的数值孔径

均较大情况下,则当目标中心位置偏移量为  $\xi$  时,物臂的点扩展函数为

$$h_t(x_t, x_0) \propto \exp\left[\frac{jk}{2z}\left(\frac{x_t}{M_0M_t} - x_0\right)^2\right] t\left(\frac{x_t}{M_t} - \xi\right). \quad (3)$$

系综平均下,假设经过毛玻璃后的光场空间非相干且强度满足均匀分布时,即

$$\langle E_0(x_0)E_0^*(x'_0) \rangle = I_0\delta(x_0 - x'_0). \quad (4)$$

假设目标运动的速度与热光场涨落的弛豫时间相比较足够慢时,在每一时刻的邻域内,可以获得足够多的统计样本,那么该运动物体的成像可看作为一个准静态过程。将(2)~(4)式代入(1)式后,若光源的横向尺寸无限大且物臂探测器为“桶”探测器时,则目标中心偏移量为  $\xi$  对应的二阶关联函数为

$$\Delta G^{(2,2)}(x_r) \propto \int dx_t \left| t\left(\frac{x_t}{M_t} - \xi\right) \delta\left(\frac{x_t}{M_0M_t} - \frac{x'_r}{M_r}\right) \right|^2 = |t(Mx_r - \xi)|^2, \quad (5)$$

式中  $M = \frac{M_0}{M_t}$ 。(5) 式表明:目标运动时通过二阶关联函数获得的图像与目标中心偏移量  $\xi$  有关。对于运动目标成像而言,由于目标运动导致了成像目标中心偏移量  $\xi$  在变化,如果无法在  $\xi$  的邻域内获得足够多的统计样本,而用全程的样本(即不同  $\xi$  值时)来计算对应的二阶关联函数,将导致成像分辨率的急剧下降,无法获得目标的图像,即出现运动模糊。

为了消除运动模糊进而提高成像分辨率,在参考臂 CCD 相机记录视场较大的情况下,通过对 CCD 相机记录的光场强度分布进行平移补偿操作,从而等价于参考臂 CCD 相机也在以一定的速度做匀速移动,使得成像目标与 CCD 相机具有相对静止的功能。由于成像目标平面处的强度分布与参考臂 CCD 相机平面处的强度分布存在一定的放大关系,且放大率为  $M$ ,则对 CCD 相机记录的光场强度分布进行平移补偿操作时应满足参考臂平移速度为  $v/M$ 。于是当物臂目标中心位置偏移量为  $\xi = v\tau$  时,平移补偿后对应的参考臂点扩散函数为  $h'_r(x_0, x'_r) \propto \exp\left[\frac{jk}{2z}\left(\frac{x'_r + \xi/M}{M_r} - x_0\right)^2\right]$ 。将补偿后的参考臂点扩散函数和(3),(4)式代入到(1)式后,可得

$$\Delta G^{(2,2)}(x'_r) \propto \int dx_t \left| t\left(\frac{x_t}{M_t} - \xi\right) \delta\left(\frac{x_t}{M_0M_t} - \frac{x'_r}{M_r} - \frac{\xi}{M_0}\right) \right|^2 = |t(Mx'_r)|^2. \quad (6)$$

这一结果与文献[8,14]中的成像目标处于静止情形

下的强度关联成像结果一样。可见:通过对参考臂 CCD 相机记录的光场强度分布进行平移补偿操作,利用强度关联线性重构技术可以获得与成像目标静止时一样的成像分辨率。

实验过程中,强度关联成像的发射和接收系统在成像目标平面具有较大的视场,这一点保证整个采样过程中始终能够接收到成像目标的反射信号;同时要求强度关联成像系统参考臂探测器记录的视场也足够大。参考臂探测器记录的光场强度分布平移补偿具体过程如下:如图 2 所示,采样的每一帧保证参考臂探测器记录了一个大视场的光场强度分布,即图中的  $I_r$ ;而参考臂探测面与成像目标相关联的光场强度分布仅对应于图 2 中所示的  $I'_r$  区域。采样的第一帧,假如参考臂探测面与成像目标相关联的光场强度分布对应于图 2 中的最右边一块区域,此时将该区域数据作为参考臂光场强度分布采样的第一帧,用于强度关联运算,随着成像目标的匀速运动,参考臂探测面与成像目标相关联的光场强度分布区域将相应地从右往左平移,按第一帧类似的方式设置不同时刻用于关联运算的参考臂光场强度分布,直至到达记录视场的最左端。通过对参考臂探测器记录的光场强度分布进行平移补偿,无需平移参考臂 CCD 相机,即可保证物臂成像目标区域与参考臂关联区域的相对静止。如果目标在整个探测区域匀速运动,速度为  $v$ ,根据图 1 所示的强度关联成像系统,物臂成像目标平面处的光场相对于参考臂探测面处的光场放大率为  $M$ ,为了保证参考臂探测器与成像目标的相对静止,则参考臂探测器记录的光场强度分布的平移补偿速度应为  $v/M$ 。若图 2 中所示的  $I'_r$  区域对应的参考臂光场强度分布记为

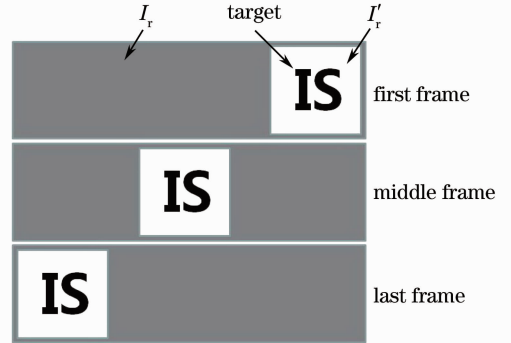


图 2 参考臂探测器记录的光场强度分布平移补偿操作示意图

Fig. 2 Illustration for the translation compensation of light intensity distribution recorded by the reference detector

$I'_r(x'_r)$ , 则  $I'_r(x'_r) = I_r(x'_r + v\tau/M)$ 。

### 3 实验结果

#### 3.1 实验设计与结果

为了验证理论结果,下面将给出相应的实验论证。利用图 1 所示的光路结构,具体的实验参数如下:各透镜焦距分别为  $f_s = 62.66 \text{ mm}$ ,  $f_r = 95.4 \text{ mm}$ ,  $f_o = 188.27 \text{ mm}$ ,  $f_t = 400 \text{ mm}$ ,  $z = 95.84 \text{ mm}$ , 各物像距离分别为  $u_r = 172.33 \text{ mm}$ ,  $v_r = 213.70 \text{ mm}$ ,  $u_o = 191.95 \text{ mm}$ ,  $v_o = 9.81 \text{ m}$ ,  $u_t = 9.00 \text{ m}$ ,  $v_t = 418.60 \text{ mm}$ , 则放大率为  $M = 41.2$  (其中  $M = M_o/M_r$ ,  $M_o$ 、 $M_r$  分别为物臂、参考臂成像放大率)。成像目标为如图 3(a)所示的两个英文字母“IS”,其横向与纵向尺寸分别为  $35 \text{ mm}$  和  $27 \text{ mm}$ ,线条宽度为  $6 \text{ mm}$ 。为了模拟目标运动,采取步进电机电控平台带动目标运动,设定目标运动方式为匀速运动。通过电机设定目标匀速运动速度为  $v = 186.4 \text{ } \mu\text{m/s}$ , 采样时间  $t = 853 \text{ s}$ , 从而保证采样次数为  $K = 4800$ 。根据发射和接收系统的设计参数,距离目标  $10 \text{ m}$

远处对应直径为  $250 \text{ mm}$  的圆形视场,而成像目标从右往左运动的总位移为  $s = 159 \text{ mm}$ ,这一点保证了采样过程中都能接收到目标的反射信号。为了使得成像目标与参考臂 CCD 相机处于相对静止的状态,对参考臂 CCD 相机记录的光场强度分布进行了平移补偿操作。根据上面设置的运动参数,可以算出每一次采样时成像目标的位移为  $\xi = \frac{s}{K} = \frac{159}{4800} \times 10^3 \text{ } \mu\text{m} \approx 33.1 \text{ } \mu\text{m}$ ,由于物臂成像目标平面与参考臂探测平面之间的光场放大率为  $M$ ,则此时参考臂 CCD 相机记录的光场强度分布应该平移  $\eta = \frac{\xi}{M} = \frac{33.1}{41.2} \text{ } \mu\text{m} \approx 0.8 \text{ } \mu\text{m}$ 。此外,参考臂探测器单像素分辨率为  $d_{\text{pixel}} = 6.45 \text{ } \mu\text{m}$ ,因此参考臂 CCD 相机记录的光场强度分布平移补偿是一个不连续的平移过程。在实验过程中,由于  $\frac{d_{\text{pixel}}}{\eta} \approx 8$ ,保证每采样 8 帧后参考臂 CCD 相机记录的光场强度分布才平移一个像素。

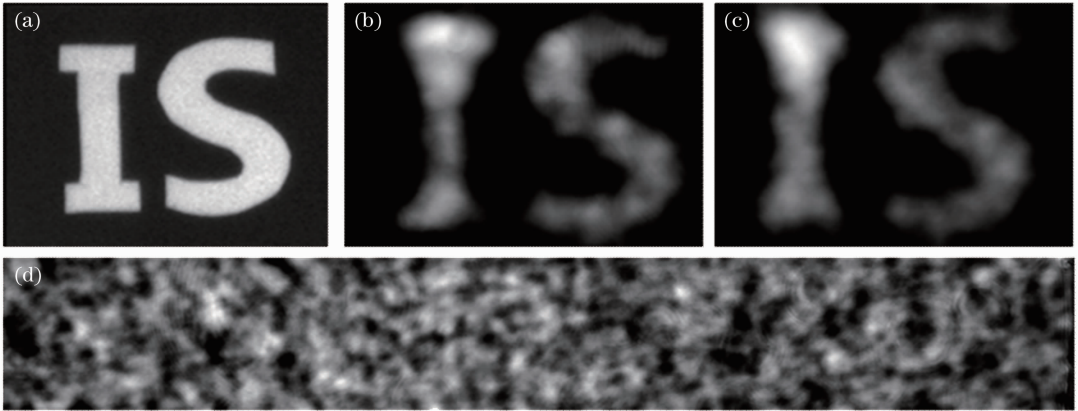


图 3 运动目标强度关联成像实验结果。(a)原始目标图像;(b)目标处于静止状态时的成像结果;(c),(d)分别为目标处于匀速运动状态下,参考臂进行平移补偿操作和不进行平移补偿操作获得的成像结果

Fig. 3 Experimental results of ghost imaging for moving target. (a) Photograph of the original target; (b) imaging pattern of static target; (c), (d) reconstruction results obtained with translation compensation and without translation compensation, respectively, when the target is moving at constant velocity

图 3(b)显示了目标处于静止情况下,利用线性关联重构算法获得的实验结果;而图 3(c)和(d)分别为目标处于匀速运动状态下,采用上面所述的平移补偿方法和不平移补偿获得的实验结果。根据图 3(b)~(d)所示的结果可以看出:如果参考臂不进行平移补偿操作,成像目标的运动导致了成像分辨率的急剧下降,在图 3(d)中由于运动尺度远大于目标自身尺度,其图像已被完全模糊;在图 3(c)中,通过对参考臂 CCD 相机记录的光场强度分布进行

平移补偿,成像目标处于运动状态下重构图像的分辨率与静止时的重构结果一样,没有出现运动模糊导致分辨率下降的现象,这一结果与(5),(6)式所述的理论分析结果相一致。

#### 3.2 遥感探测中场景噪声影响

遥感探测(尤其是空间对地观测)中,比如飞机对地进行航拍,由于强度关联成像系统置于飞机上,此时飞机处于匀速运动状态而成像目标处于静止状态;这与成像目标处于匀速运动状态而强度关联成

像系统处于静止状态是完全等价的。若强度关联成像系统具有较大的发射视场和接收视场,当成像目标置于一个复杂场景时,一方面需保证飞机飞行过程中物臂探测器始终能够接收到成像目标的反射信号;另一方面,由于强度关联成像系统发射视场和接收视场远大于成像目标,在成像目标的反射信号被物臂桶探测器接收的同时,目标周边场景的反射信息也会被物臂桶探测器所接收,而且随着飞机运动平移量的增加,周边场景的反射信息将以累积的形式对成像目标的反射信息进行干扰(即等价于一种加性噪声)。为了模拟上述成像场景,将以成像目标运动代替成像系统运动,基于参考臂 CCD 相机记录的光场强度分布进行平移补偿方法,讨论了成像目标周边场景反射信号(即加性噪声)对运动目标成像质量的影响。

通过平移补偿方法之后,若物臂探测器所接收到的信号存在加性噪声  $n$ ,线性关联重构结果等效于在理想无噪声的成像结果之上叠加了噪声  $n$  与参考臂光场强度分布  $I'_r(x'_r)$  的关联,即

$$\Delta G^{(2,2)}(x'_r) = \langle I'_r(x'_r) I_t \rangle - \langle I'_r(x'_r) \rangle \langle I_t \rangle + \langle I'_r(x'_r) n \rangle - \langle I'_r(x'_r) \rangle \langle n \rangle. \quad (7)$$

对于加性噪声,由于参考臂 CCD 所选取的区域  $I'_r(x'_r)$  只与物臂探测器所接收到的成像目标返回信号  $I_t$  相关联,因此当噪声  $n$  与  $I'_r(x'_r)$  是统计无关时,即(7)式中的后面一项满足

$$\langle I'_r(x'_r) n \rangle - \langle I'_r(x'_r) \rangle \langle n \rangle = 0. \quad (8)$$

(7)、(8)式表明:理论上加性噪声对线性关联重构的图像质量无影响。然而,实验过程中运动目标强度关联成像往往不能获得足够多的采样数,使得线性关联图像重构不能做到完全的系综平均。因此,当加性噪声较大时,图像重构质量也会受到一些影响。

同时,强度关联成像也可以利用稀疏约束非线性重构算法而获得<sup>[20,21]</sup>。通过平移补偿方法对参考臂光场分布进行补偿之后,单次采样时参考臂 CCD 记录的光场强度分布排成测量矩阵  $\Phi$  的一个行向量  $1 \times N$ ,经过  $M$  次采样后则构成了  $M \times N$  的测量矩阵  $\Phi$ ,同时物臂桶探测器接收的光强信号组成一个  $M \times 1$  的列向量  $\mathbf{Y}$ ,而待测目标为一个  $N \times 1$  的列向量  $\mathbf{X}$ ,在稀疏约束非线性图像重构的框架中,强度关联成像即为求解欠定方程组:

$$\mathbf{Y} = \Phi \mathbf{X} + \mathbf{n}, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{n}$  为  $M \times 1$  的列向量,代表所述的加性噪声。(9)式一般可以通过求解凸优化问题而重构待测目标图像  $\mathbf{X}^{[20 \sim 22]}$ ,即

$$\mathbf{X} = \Psi \boldsymbol{\alpha},$$

$$\text{which minimizes } \frac{1}{2} \|\mathbf{Y} - \Phi \mathbf{X}\|_2^2 + \tau \|\boldsymbol{\alpha}\|_1, \quad (10)$$

式中  $\Psi$  为稀疏表达基的变换算符, $\boldsymbol{\alpha}$  为  $\mathbf{X}$  在稀疏表象中的向量表示; $\tau$  为非负常数, $\|\mathbf{V}\|_2$  和  $\|\mathbf{V}\|_1$  分别为  $\mathbf{V}$  的欧几里德范数和  $l_1$  范数。根据(9),(10)式可知:随着噪声  $n$  的增加,(10)式中的欧几里德范数项将会增大,这对求解  $\mathbf{X}$  的稀疏解  $\boldsymbol{\alpha}$  是不利的,它会导致稀疏解  $\boldsymbol{\alpha}$  的表达误差增大。

针对同一成像目标“IS”,在强度关联成像系统的发射和接收视场内设置不同反射特性的目标场景(见图 4 左列所示),用于模拟物臂桶探测器接收到的加性噪声大小对运动目标强度关联成像质量的影响。实验中仍然按照图 3 所示的实验参数,成像目标“IS”开始就位于系统的发射和接收视场内,然后随着成像目标从右往左匀速运动,将会有越来越多的场景信号反射到物臂桶探测器内,从而降低了成像目标“IS”的探测信噪比。图 4(a)显示了成像目标周边场景无反射信号(即无噪声干扰)时的线性关联重构和稀疏约束非线性重构结果;图 4(b)~(d)为成像目标周边场景存在低反射信号(即弱噪声干扰)、中等反射信号(即中等噪声干扰)和高反射信号(即强噪声干扰)时对应的线性关联重构和稀疏约束非线性重构结果。从图 4(a)~(d)所示的实验结果可以看出:与线性关联重构的图像质量相比,噪声对稀疏约束非线性重构的图像质量影响更大。

### 3.3 与其他去运动模糊技术比较

在遥感探测领域,往往通过缩短成像系统的曝光时间来减弱目标运动引起的运动模糊现象,然而缩短曝光时间往往牺牲了图像的信噪比。运动补偿技术是一种通过硬件手段减弱运动模糊的方法,包括机械补偿、光学补偿、电子补偿等<sup>[26]</sup>,不过目前在补偿器件的设计与控制过程中仍存在诸多难题,从而限制了补偿技术的发展,同时成像分辨率也受到补偿精度的限制。利用图像复原技术也可以减弱运动模糊<sup>[27,28]</sup>,然而一方面需要大量的数值计算,另一方面易引入计算误差导致去模糊后图像质量难以保证。而本文提出的基于参考臂探测器记录的光场强度分布平移补偿的运动目标强度关联成像技术,一方面由于该系统中物臂信号接收器为无空间分辨率的桶探测器,仅仅用于接收运动目标的反射信息,因此具有非常高的探测灵敏度和信噪比,可以进一步缩短单帧采样时间以减小运动影响。另一方面,

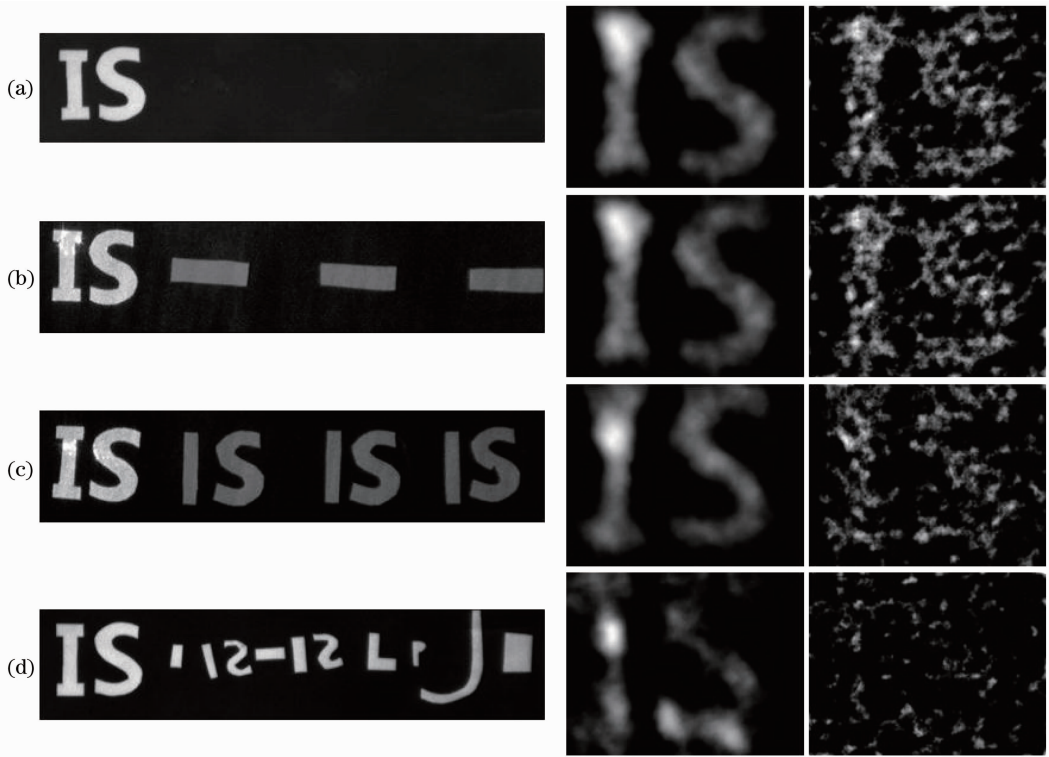


图 4 物臂桶探测器接收到的加性噪声大小对运动目标强度关联成像质量的影响。(a)无噪声干扰;(b)弱噪声干扰;(c)中等噪声干扰;(d)强噪声干扰。左列为实际拍摄的成像目标及场景。中间列为线性关联重构结果。右列为稀疏约束非线性重构结果

Fig. 4 Influence of the additive noise in different magnitude to ghost imaging for moving target. (a) Noiseless case; (b) weak noise case; (c) middle noise case; (d) strong noise case. Images in the left column are the photographs of imaging targets with different scenes. Images in the middle column are the reconstruction results recovered by linear correlation reconstruction algorithm. Images in the right column are the images reconstructed by nonlinear sparsity constraints reconstruction algorithm

与其他硬件补偿技术相比,该技术的运动补偿方法是通过参考臂探测器记录的光场强度分布进行平移补偿而实现的,补偿过程简单、易于控制,并且无需其他硬件补偿系统。与图像复原技术相比,运动目标强度关联成像图像处理过程极其简单,没有大的计算量且不受计算误差影响。但是,基于参考臂探测器记录的光场强度分布平移补偿的运动目标强度关联成像技术要求多次曝光采样,同时要求参考臂探测器的记录视场足够大,以保证平移补偿时能够获取一定独立的采样数,因此需要较大面阵的 CCD。然而,通过空间光调制器、数字微镜器件或者光纤稀疏阵预置赝热光源<sup>[29~31]</sup>,采用计算鬼成像技术的基本原理<sup>[32]</sup>,此时参考臂探测面处的光场强度分布可以通过数值计算而获得,这可解决运动目标强度关联成像面临的大面阵 CCD 难题。通过无分束器非局域成像技术,可进一步简化实验装置<sup>[33]</sup>。此外,基于压缩感知领域近年来发展的动态信号重

构方法<sup>[34]</sup>,将其与强度关联成像结合起来,有望进一步提高系统对于运动目标成像的性能。

## 4 结 论

通过对参考臂探测器记录的光场强度分布进行平移补偿,理论和实验验证了强度关联成像技术对运动目标实现高分辨成像的可行性。针对遥感探测中成像目标周围场景反射信号(即噪声)对强度关联成像质量的影响,理论和模拟实验表明:基于线性关联重构的强度关联成像技术具有抵抗加性噪声的作用;同时与线性关联重构的图像质量相比,噪声对稀疏约束非线性重构的图像质量影响更大。本文提出的运动目标强度关联成像技术在遥感探测领域中有着重大的应用前景。

## 参 考 文 献

1 P. H. S. Ribeiro, S. Pádua, J. C. M. da Silva *et al.*

- Controlling the degree of visibility of Young's fringes with photon coincidence measurements[J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(5): 4176~4179
- 2 D. Strekalov, A. Sergienko, D. Klyshko *et al.*. Observation of two-photon "ghost" interference and diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(18): 3600~3603
- 3 R. S. Bennink, S. J. Bentley, R. W. Boyd. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(11): 113601
- 4 J. Cheng, S. Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(9): 093903
- 5 A. Gatti, E. Brambilla, M. Bache *et al.*. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(9): 093602
- 6 J. Xiong, D. Z. Cao, F. Huang *et al.*. Experimental observation of classical subwavelength interference with a pseudothermal light source [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(17): 173601
- 7 D. Zhang, Y. H. Zhai, L. A. Wu *et al.*. Correlated two-photon imaging with true thermal light[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2354~2356
- 8 A. Valencia, G. Scarcelli, M. D. Angelo *et al.*. Two-photon imaging with thermal light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(6): 063601
- 9 D. Z. Cao, J. Xiong, K. Wang. Geometrical optics in correlated imaging systems[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(1): 013801
- 10 Wang Kaige, Cao Dezhong, Xiong Jun. Progress in correlated optics[J]. *Physics*, 2008, **37**(4): 223~232  
汪凯戈, 曹德忠, 熊俊. 关联光学新进展[J]. *物理*, 2008, **37**(4): 223~232
- 11 F. Ferri, D. Magatti, A. Gatti *et al.*. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(18): 183602
- 12 A. Gatti, M. Bache, D. Magatti *et al.*. Coherent imaging with pseudo-thermal incoherent light[J]. *Journal of Modern Optics*, 2006, **53**(5-6): 739~760
- 13 G. Scarcelli, V. Berardi, Y. Shih. Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations? [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(6): 063602
- 14 W. Gong, P. Zhang, X. Shen *et al.*. Ghost "pinhole" imaging in Fraunhofer region[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(7): 071110
- 15 W. Gong, S. Han. Correlated imaging in scattering media[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(3): 394~396
- 16 S. H. Zhang, L. Gao, J. Xiong *et al.*. Spatial interference: from coherent to incoherent [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(7): 073904
- 17 D. L. Donoho. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, **52**(4): 1289~1306
- 18 E. J. Candès, M. B. Wakin. An introduction to compressive sampling[J]. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 2008, **25**(2): 21~30
- 19 O. Katz, Y. Bromberg, Y. Silberberg. Compressive ghost imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(13): 131110
- 20 J. Du, W. Gong, S. Han. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(6): 061067
- 21 W. Gong, S. Han. Super-resolution far-field ghost imaging via compressive sampling [DB/OL]. Arxiv preprint arXiv: 0911.4750, 2009. <http://arxiv.org/abs/0911.4750v1>
- 22 W. Gong, S. Han. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints [J]. *Phys. Lett. A*, 2012. 1519~1522
- 23 H. Wang, S. Han. Coherent ghost imaging based on sparsity constraint without phase-sensitive detection [J]. *Europhysics Letters*, 2012, **98**(2): 24003
- 24 C. Zhao, W. Gong, M. Chen *et al.*. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[DB/OL]. Arxiv preprint arXiv:1203.3835, 2012. <http://arxiv.org/abs/1203.3835>
- 25 H. Li, J. Xiong, G. Zeng. Lensless ghost imaging for moving objects[J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(12): 127005
- 26 G. Olson. Image motion compensation with frame transfer CCDs [C]. *SPIE*, 2002, **4567**: 153~160
- 27 N. Wiener. Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series; with engineering applications[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, **47**(258): 319
- 28 R. C. Gonzalez, R. E. Woods. Digital Image Processing[M]. Prentice Hall, 2002
- 29 Y. Bromberg, O. Katz, Y. Silberberg. Ghost imaging with a single detector[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(5): 053840
- 30 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0711002  
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
- 31 Chen Mingliang, Li Enrong, Wang Hui *et al.*. Ghost imaging based on sparsity array pseudothermal light system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0503001  
陈明亮, 李恩荣, 王慧等. 基于稀疏阵列赝热光系统的强度关联成像研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0503001
- 32 J. H. Shapiro. Computational ghost imaging[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(6): 061802
- 33 He Shibei, Shen Xia, Wang Hui *et al.*. Ghost imaging without beamsplitter in thermal optical field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3332~3335  
贺拾贝, 沈夏, 王慧等. 热光场无分束器非局域成像研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3332~3335
- 34 M. S. Asif, A. Charles, J. Romberg *et al.*. Estimation and dynamic updating of time-varying signals with sparse variations [C]. *Processings of the 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal*, 2011. 3908~3911