

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

## 激光散斑平均尺寸对关联成像重构的影响

孔庆楠,王善德,张 驰,秦伟平\*

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室,吉林 长春 130012)

**摘要:**研究了散斑平均尺寸对赝热光关联成像的影响。分别采用1幅二值图和1幅多灰度图作为待重构目标物体的图像,以峰值信噪比(PSNR)作为衡量指标,对重构质量进行了量化,同时从小到大选取3组不同尺寸散斑重构的图像进行了直观的对比。通过仿真实现了传统关联成像(GI)、差分关联成像(DGI)、基于压缩感知的关联成像(CGI)和基于伪逆的关联成像(PGI)4种关联成像方案。使用尺寸从小到大的多组散斑场分别对每一种方案进行重构。仿真结果表明,随着散斑平均尺寸的增大,GI、DGI和PGI重构图像的PSNR都有显著的提高,最高可达到7 dB;而CGI重构图像的PSNR没有明显的提高。此外,当实验中的物臂和参考臂不完全对称时,双臂的散斑平均尺寸会有一定的偏差。4种方案重构图像的PSNR都随着偏差的增大而有不同程度的下降,直至图像无法辨认。在保证重构图像可辨认的条件下,GI和DGI容许的偏差较大,CGI次之,PGI最小。

**关键词:**关联成像;鬼成像;激光散斑;散斑尺寸;双臂对称

**中图分类号:** O436.1; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0000

## Influence of laser speckle average size on ghost imaging

KONG Qing-nan, WANG Shan-de, ZHANG Chi, QIN Wei-ping\*

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: wpqin@jlu.edu.cn

**Abstract:** The influence of speckle average size on the ghost imaging with pseudo-thermal light was investigated. A binary image and a grayscale image were used as images of an object to be reconstructed. The reconstruction quality was quantified by Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) as the measure, while three sets of reconstructed pictures with different size speckles from small to large were compared intuitively. Four correlation imaging methods including Ghost Imaging (GI), Differential Ghost Imaging (DGI), Compressive-sensing Ghost Imaging (CGI) and Pseudo-inverse Ghost Imaging (PGI) were simulated. Then, several groups of speckle fields with a growing size were used to reconstruct respectively by these methods. The simulation result shows that the PSNRs of GI, DGI and PGI are improved to 7 dB remarkable as the speckle size increasing, while the PSNR of the CGI enhances little. Besides, when the object arm and reference arm are not quite symmetrical in the experiment, the speckle size of two arms are deviated slightly. The reconstruction PSNRs of four methods are decreased as the bias increasing and indistinguishable finally. For a distinguishable reconstruction, the allowable deviations of GI and DGI could be bigger than that of the CGI, in which the PGI is the

收稿日期:2015-06-15;修订日期:2015-06-30.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(No. 61401013)

smallest.

**Key words:** correlation imaging; laser speckle; ghost imaging; speckle size; two-arm symmetry

## 1 序 言

关联成像又称鬼成像(Ghost Imaging, GI),能够在不包含物体的光路上获得物体的像,作为一种新的成像方案,近来受到了人们的广泛关注。它将探测和成像部分分开,通过光场的二阶关联来获取物体的信息。最初的 GI 实验使用纠缠光子对作为光源<sup>[1-2]</sup>,并且一些学者曾一度认为纠缠光是实现 GI 的必要条件。但后来人们采用赝热光和热光等经典光源进行了 GI 实验<sup>[3-5]</sup>,从而打破了必须使用纠缠光的限制,促进了 GI 从理论到实验的发展。自 2002 年以来,人们使用经典光源开展了大量的 GI 理论和实验研究,并提出了许多新的 GI 方案。这些方案在提高重构图像信噪比的同时,也为 GI 带来了更广阔的应用前景<sup>[6-21]</sup>。例如,Jeffrey 提出的计算关联成像(Computational GI, CGI)<sup>[6,13]</sup>已经被用于遥感和 3D 关联成像等领域。Ferri 等改进了传统的 GI 方法,提出了差分关联成像(Differential GI, DGI)方案<sup>[7]</sup>。他在参考臂上增加了一个桶状探测器用于采集总光强,提高了成像的信噪比。SUN 等使用空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)生成随机光场,并提出了有较高信噪比的归一化关联成像方案(Normalized GI, NGI)<sup>[8]</sup>。Katz 等提出了压缩感知关联成像,应用压缩感知理论极大地减少了重构图像所需的测量次数<sup>[9]</sup>。Zhang 等提出了基于伪逆的关联成像方案(Pseudo-Inverse GI, PGI),用较少的测量次数即可取得很高的峰值信噪比<sup>[10]</sup>。

表面粗糙的物体受到激光照射时会散射出无数相位随机分布的相干子波。这些子波在周围空间相互干涉,形成具有颗粒结构的大量随机分布的亮点和暗点。人们将这些亮点与暗点称为散斑。散斑场作为赝热光 GI 的光源,对 GI 重构有着重要的影响。本文细致地研究了散斑平均尺寸对于 GI、DGI、CGI 和 PGI 4 种关联成像方案的影响。通过计算机仿真生成了不同尺寸的散斑场,分别采用一张二值方格图和一张 Lena 图作为探测器测得的待重构物体的图像,在不同尺寸的散

斑场下用 4 种方案进行重构,并对重构结果进行了对比。最后在同一尺寸的散斑场下,探讨了双臂偏差对上述 4 种方案的影响。

## 2 原理与方法

根据光场的传播方式,通过成像系统在观察面上形成的散斑称为主观散斑(像面散斑),而通过自由空间在观察面上形成的散斑称为客观散斑。本文的赝热光源形成的是客观散斑。

根据菲涅尔衍射公式<sup>[23-24]</sup>,客观散斑的复振幅可表示为:

$$A(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(\xi, \eta) \times \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda z}(x\xi + y\eta)\right] \times \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta, \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为激光波长, $Z$  为散射面到观察面之间的距离, $k$  为波数。

由于散斑的光强连续分布并且起伏变化很快,通常显示一种颗粒状结构。这种颗粒的粗细程度反映了散斑图内光强分布起伏变化的快慢。用散斑光强自相关函数的半高全宽<sup>[9]</sup>(Full Width at Half Maximum, FWHM)来度量这种粗细程度,称为散斑平均尺寸。通常是在与散射屏出射面平行的平面上观察和接收散斑图样,因此把这一方向上的相关长度称为横向散斑平均尺寸(Spatial Transverse Coherence Length, STCL)。类似地,垂直于这个方向的相关长度即为纵向散斑平均尺寸(Spatial Longitudinal Coherence Length, SLCL)<sup>[18]</sup>。

根据文献[23]和[24],观察面上散斑复振幅的自相关函数为:

$$J_A(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle A(x_1, y_1) A^*(x_2, y_2) \rangle. \quad (2)$$

对于圆对称复高斯散斑,观察面上强度的自相关函数为:

$$R_I(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1) \rangle \langle I(x_2, y_2) \rangle + |J_A(x_1, y_1; x_2, y_2)|^2. \quad (3)$$

进一步得到归一化的散斑强度自相关函

数为:

$$r_{\Delta l}(\Delta x, \Delta y) = \frac{R_{\Delta l}(\Delta x, \Delta y)}{R_{\Delta l}(0, 0)} = \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi, \eta) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} (\xi \Delta x + \eta \Delta y)\right] d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi, \eta) d\xi d\eta} \right|. \quad (4)$$

对于直径为  $D$  的圆形散射区域,有:

$$I(\xi, \eta) = \begin{cases} I_0, & \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \leq \frac{D}{2} \\ 0, & \sqrt{\xi^2 + \eta^2} > \frac{D}{2} \end{cases}. \quad (5)$$

客观散斑的横向平均尺寸为:

$$\delta_t = 1.4 \frac{\lambda z}{D}. \quad (6)$$

类似地,客观散斑的纵向平均尺寸为:

$$\delta_l = 6.7 \frac{\lambda z^2}{D^2}. \quad (7)$$

在赝热光源 GI 系统中,激光波长  $\lambda$  是确定的,出射光斑尺寸  $D$  确定后,影响成像散斑平均尺寸的主要因素是  $Z$ ,即散射屏出射平面到观察面的距离。散斑大小与  $Z$  成正比, $Z$  越大,散斑平均尺寸越大。由于出射散斑是由桶探测器和 CCD 探测器在平行于出射面的方向上接收到的,因此这里主要考虑散斑横向平均尺寸变化对成像效果的影响。

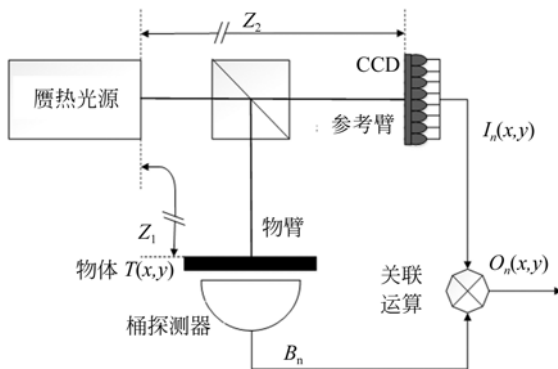


图1 GI系统示意图

Fig. 1 Scheme of ghost imaging system

图1为GI系统的示意图。由一束激光通过旋转毛玻璃所形成的散斑场作为光源,由50:50的分束器分为两束,一束通过目标物体,由物体后的桶状探测器接收。物体的透射函数为  $T(x, y)$ ,

测得通过物体后光束的总光强为  $B_n$ ,称为物臂;另一束照射到具有空间分辨率的点探测器或电荷耦合器件(CCD)上,测得参考光的空间强度分布为  $I(x, y)$ ,称为参考臂。光源到物臂桶探测器的距离为  $Z_1$ ,到参考臂 CCD 的距离为  $Z_2$ ,现假设  $Z_1 = Z_2$ ,即双臂严格对称。 $O_n(x, y)$  为待重构物体图像单次测量的二阶强度关联函数,通过  $N$  次测量关联运算的线性叠加,即可得到被测物体的像  $O_{GI}$ 。

$$B_n = \int I_n(x, y) T(x, y) dx dy, \quad (8)$$

$$O_{GI}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N O_n(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (B_n - \langle B_n \rangle) I_n(x, y), \quad (9)$$

式中  $\sum$  表示求和。

其他方案与 GI 系统类似,如 CGI 和 PGI 则是在 GI 系统的基础上分别加入了压缩感知算法和伪逆算法;而 DGI 系统在参考臂上增加了一个桶状探测器采集参考臂的散斑光场总光强  $B_R$ ,所以有:

$$B_R = \int I_n(x, y) dx dy, \quad (10)$$

$$O_{DGI}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N O_n(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( B_n - \frac{\langle B_n \rangle}{\langle B_R \rangle} B_R \right) I_n(x, y). \quad (11)$$

对于 GI 方案,要想取得较高的信噪比,通常测量次数  $N$  要大于物体图像的奈奎斯特采样极限。而采用了压缩感知算法的 CGI 方案利用自然图像在特定变换下的稀疏性,可用低于奈奎斯特极限的测量次数恢复出物体图像。

所谓自然图像,是指用照相机等成像设备通过拍照得到的物体的像。对于一个  $100 \times 100$  像素的灰度图像,每一个像素都有 256 种可能的灰度值,共有 2 560 000 种可能的灰度组合。然而实际上自然图像的灰度组合却远远小于这个数字,这便是自然图像的稀疏性。

### 3 Matlab 数值仿真与分析

图1所示的鬼成像系统中,赝热光源为波长

$\lambda = 635 \text{ nm}$  的激光,出射光的光斑尺寸  $D = 0.9 \text{ mm}$ 。选取一张二值方格图和一张灰度 Lena 图作为待恢复目标物体的图像,图片尺寸为  $100 \times 100$  像素。这里使用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)来衡量图像的重构质量。

$$PSNR = 10 \times \lg\left(\frac{(2^m - 1)^2}{MSE}\right), \quad (12)$$

式中:MSE 代表原图像与目标图像的均方误差; $m$  为图像的位深,即存储每个像素点所用的二进制位数。通常对于计算机中的灰度图, $m = 8$ 。

尽管 PSNR 是广泛使用的评价图像质量的参数,其结果有时却和人眼所见的视觉效果并不完全一致。为了对比散斑平均尺寸对于各种 GI 方案的影响,这里对重构效果较差的方案采用更高的测量次数,在保证每种方案都有较高 PSNR 的同时,也使重构后的图像具有较直观的视觉效果。对于二值图像,GI 和 DGI 的测量次数  $N = 2\,000$ ,CGI 的  $N = 500$ ,PGI 的  $N = 1\,000$ ,其中 CGI 使用离散余弦变换(DCT)构造变换矩阵。对于灰度图像,CGI 方案在 500 次测量下的重构

效果不理想,因此将  $N$  增加至 1 000 次,其他 3 种方案的  $N$  不变。同时,每个方案都选取  $Z$  值为 60,120 和 180 mm 时 3 张重构后的图像进行直观的对比,结果如图 2 和图 3 所示。

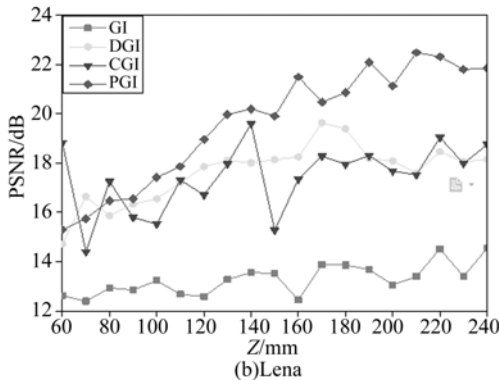
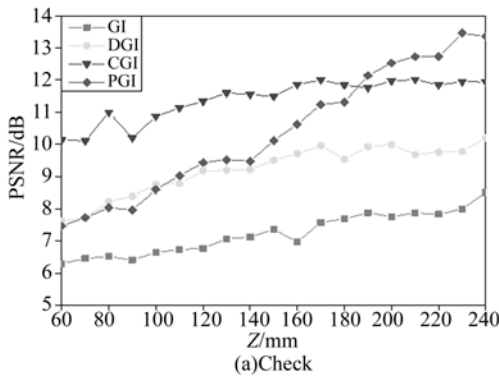


图 2 方格图和 Lena 图的 PSNR 曲线  
Fig. 2 PSNR curves of different images

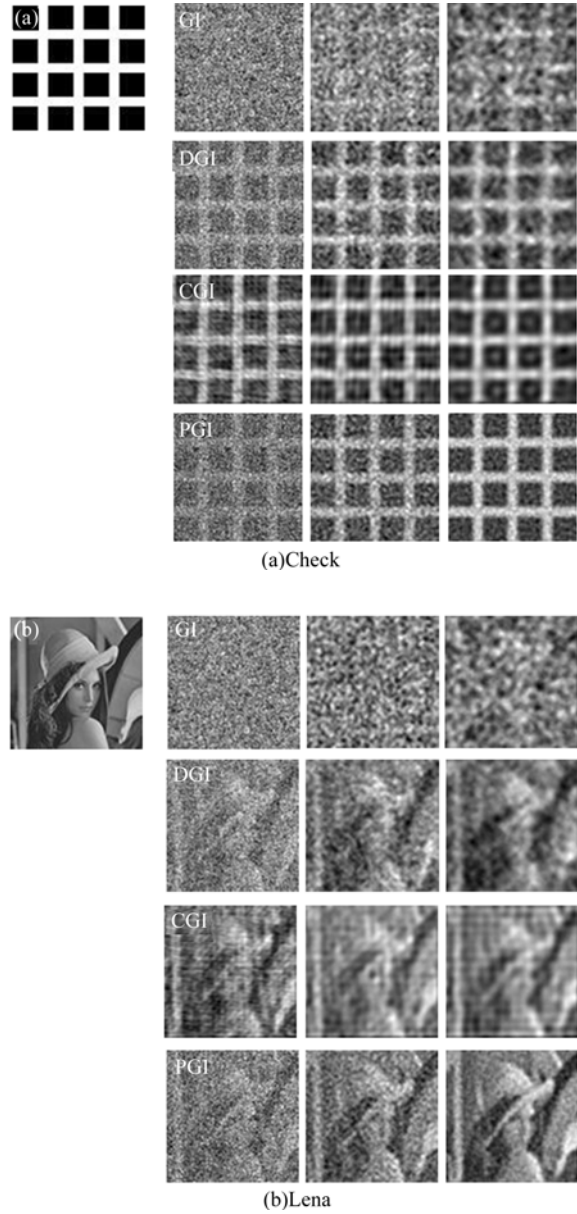


图 3 4 种方案重构图与目标图对比  
Fig. 3 Contrast of reconstruction and object images for 4 methods

由 2 组重构后的图像和 PSNR 曲线可以看出,对于方格图的二值图像,GI、DGI、PGI 3 种方案还原的 PSNR 随着散斑尺寸的增加有显著的提高;而 CGI 方案由于二值图像良好的稀疏性,在  $Z$  值较小的时候依然有很高的 PSNR,随着  $Z$  值的

增加 PSNR 仅有小幅提高。总体看来,4 种方案的 PSNR 都随着散斑平均尺寸的增加而有所提高,中间个别点的微小波动是由于散斑场的随机性引起的。其中 GI、DGI、PGI 3 种方案的效果提升显著。

对于 Lena 图, GI 方案重建的效果整体较差,随着散斑尺寸的增大,PSNR 的提升很少;较之二值图像,CGI 方案在多灰度图上重建目标的优势已经不明显,但依然有较高的 PSNR,在不同的散斑尺寸下,CGI 方案的 PSNR 变化不大;而 DGI 和 PGI 方案的 PSNR 随着散斑尺寸的增大提高得比较明显。

与采用 SLM 的成像实验不同,在实际的 GI 中,实验装置经过调整后,参考臂 CCD 通常与物臂探测器无法完全对称<sup>[20]</sup>。在这种双臂不对称的情况下,双臂各自接收到的散斑的尺寸存在差异,使重构图像的质量受到很大影响。由于参考臂 CCD 平面可能在多个方向上存在偏差,本文采用单一变量的方法,假定其他方向无偏差,只考虑 CCD 的纵向偏差,即垂直于 CCD 平面这个方向的偏差值。现假设物臂和参考臂到激光出射面的距离存在偏差,设为  $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ 。根据文献[18]的研究结果,当  $|\Delta Z| < \text{SLCL}$  时,GI 能够实现重构。对于不同的 GI 方案,随着  $|\Delta Z|$  的增加,重构图像的 PSNR 有不同程度的下降,在尚未达到 SLCL 时,重构效果就已经变得很差。下面通过仿真研究  $|\Delta Z|$  造成的散斑尺寸偏差对 GI、DGI、CGI 和 PGI 这 4 种方案的影响。

取  $Z_1 = 180 \text{ mm}$ ,  $Z_2$  逐渐增加,4 种方案的测量次数与之前相同。在双臂有偏差的情况下,各方案重构图像的 PSNR 见图 4。

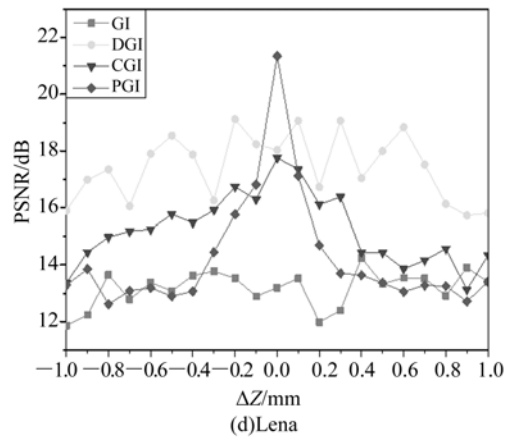
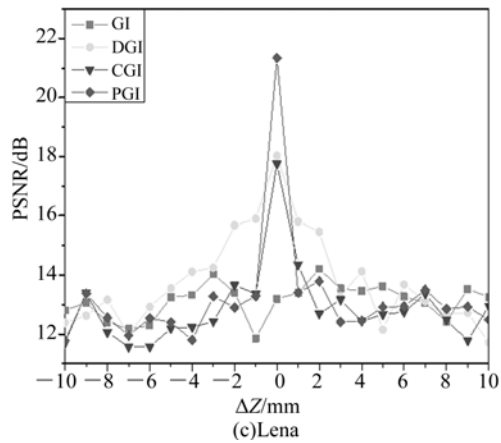
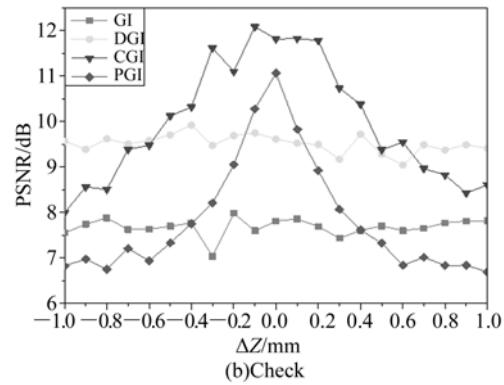
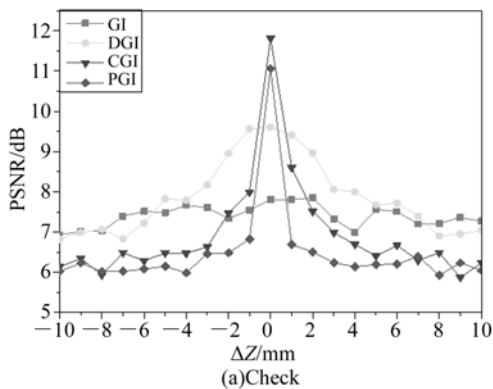


图4 方格图和 Lena 图 PSNR 随  $\Delta Z$  的变化曲线  
Fig. 4 PSNRs of Check and Lena as functions of  $\Delta Z$

由于 PSNR 对重构后图像质量的衡量并不直观,而在各偏差值下重构后的图像数量较多,不方便全部列出;因此,本文对重构后的图像进行了视觉上的主观评价,并结合图像的 PSNR 从高到低划分为 4 个区间,对应 A ~ D 共 4 个视觉上的主观评价等级。这里列出了 4 个区间的 3 个边界 PSNR 值附近的图像作为直观的示例,见表 1 和图 5。

表 1 重构图像的 PSNR 与主观评价

Tab. 1 PSNRs and subjective evaluation of reconstructed images (dB)

主观评价等级	方格图 PSNR	Lena 图 PSNR
A 清晰	[12, +∞]	[20, +∞]
B 容易辨认	[10, 12)	[18.5, 20)
C 可以辨认	[7.5, 10)	[16.0, 18.5)
D 无法辨认	(-∞, 7.5)	(-∞, 16.0)

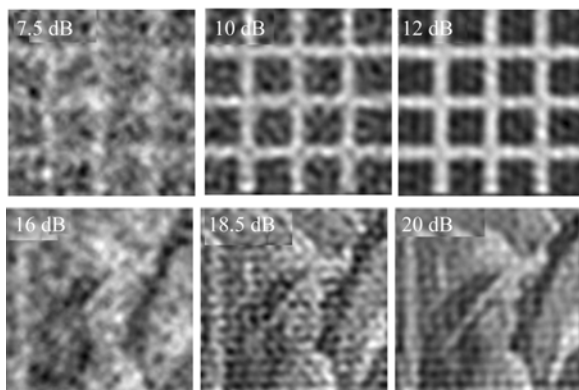


图 5 重构图像的 PSNR 与视觉效果对照

Fig. 5 Contrast of PSNRs and visual effect for reconstructed images

图 4 为方格图和 Lena 图重构的 PSNR 曲线图, (a)(c) 取  $|\Delta Z| < 10$  mm (b)(d)  $|\Delta Z| < 1$  mm, 结合表 1 和图 5 的主观视觉评价可以看出: 10 mm 偏差内各方案重构的图像受到的影响。对于 GI, 重构方格图的 PSNR 较低, 在 6 mm 的偏差值内都可以辨认; 而重构 Lena 图的 PSNR 很低, 图像无法辨认。对于 DGI, 当偏差小于 1 mm 时, 重构图像的 PSNR 几乎不下降; 而当偏差大于 1 mm 时, PSNR 随着偏差的增大而下降, 5 mm 的偏差内重构的方格图都可以辨认, 2 mm

#### 参考文献:

- [1] STREKALOV D V, SERGIENKO A V, SHIN Y H. Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74 (18): 3600-3603.
- [2] PITTMAN T B, SHIH Y H, STREKALOV D, et al.. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52 (5): 3429-3432.
- [3] BENNINK R S, BENLEY S J, BOYD R W. Two-photon coincidence imaging with a classical source [J].

的偏差内重构的 Lena 图都可以辨认。对于 CGI, 重构方格图在 2 mm 偏差内都可以辨认, 而重构 Lena 图仅在 0.3 mm 偏差内可以辨认。对于 PGI, 重构方格图在 0.4 mm 偏差内可以辨认, 而重构 Lena 图仅在 0.1 mm 偏差内可以辨认。

## 4 结 论

本文通过 Matlab 仿真实现了 GI、DGI、CGI、PGI 这 4 种 GI 方案, 以 PSNR 作为重构质量的衡量指标, 分别对比了散斑横向平均尺寸变化对这 4 种成像方案的影响。此外, 在双臂不对称情况下研究了双臂纵向距离偏差造成的散斑尺寸偏差对重构效果的影响。仿真结果表明, 在测量次数不变的情况下, 随着散斑横向平均尺寸的增加, GI、DGI、CGI 和 PGI 方案重构二值图像的 PSNR 都有一定程度的提高, 其中以 PGI 最显著; 而重构灰度图像时, CGI 方案的 PSNR 无明显提升, 其他 3 种方案都有一定程度的提升, 但是提升幅度均小于重构二值图像的情况。在双臂不对称的情况下, 4 种方案重构图像的 PSNR 都随着偏差的增大而有不同程度的下降, 直至图像无法辨认。其中 PGI 和 CGI 的 PSNR 下降得很快, 而 DGI 和 GI 则较慢。在保证重构图像可以辨认的情况下, GI 和 DGI 容许的偏差较大, CGI 次之, PGI 最小。虽然 PGI 和 CGI 重构的图像可以达到清晰的水平, 但只有在偏差值接近 0 时才能辨认。随着偏差值的增大, DGI 的重构效果会优于 PGI 和 CGI。因此在 GI 实验中, 为了取得较好的重构效果, 当系统偏差很小时, 可以选择 PGI 或 CGI 进行重构; 而偏差大时则应该选择 DGI 进行重构。

*Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601-4.

- [4] GATTI A, BRAMBILLA E, BACHE M, et al.. Correlated imaging, quantum and classical [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(1): 013802-10.
- [5] GATTI A, BRAMBILLA E, BACHE M, et al.. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(9): 093602-4.
- [6] SHAPIRO H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802-4.
- [7] FERRI F, MAGATTI D, LUGIATO L A, et al.. Differential ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603-4.

- [8] SUN B, WELSH S S, EDGAR M P, *et al.*. Normalized ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [9] KATZ O, BROMBERG Y, SILBERBERG Y E. Compressive ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 133-141.
- [10] ZHANG C, GUO S, CAO J, *et al.*. Object reconstruction using pseudo-inverse for ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 30063-30073.
- [11] CLEMENTE P, DURAN V, TORRES-COMPON Y, *et al.*. Optical encryption based on computational ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [12] CHEN W, CHEN X. Marked ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251109.
- [13] ERKMEN B I. Computational ghost imaging for remote sensing [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(5): 131110.
- [14] GONG W L, HAN S S. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light [J]. *Physics Letters A*, 2010, 374(8): 1005-1008.
- [15] BASANO L, OTTONELLO P. Experiment in lensless ghost imaging with thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(9): 091109.
- [16] FERRI F, MAGATTI D, GATTI A, *et al.*. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 183602.
- [17] LIU H, HAN S S. Spatial longitudinal coherence length of a thermal source and its influence on lensless ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(8): 824-826.
- [18] GONG W L, HAN S S. The influence of axial correlation depth of light field on lensless ghost imaging [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(4): 675-678.
- [19] 王铭海, 曹军胜, 邴锋利. 双臂对称性对压缩传感用于关联成像重构的影响 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1438-1445.
- WANG M H, CAO J SH, GAO F L. Influence of two-arm symmetry on reconstructed image of compressive sensing for ghost imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1438-1445. (in Chinese)
- [20] 郭树旭, 张驰, 曹军胜, 等. 基于压缩感知归一化关联成像实现目标重构 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 288-294.
- GUO SH X, ZHANG CH, CAO J SH, *et al.*. Object reconstruction by compressive sensing based normalized ghost imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 288-294. (in Chinese)
- [21] 白旭, 李永强, 赵生妹. 基于压缩感知的差分关联成像方案研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 044209-8.
- BAI X, LI Y Q, ZHAO SH M. Differential compressive correlated imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044209-8. (in Chinese)
- [22] 徐美芳, 王维彪, 高文宏. 激光投影显示中静态复合散斑的表征与建模 [J]. *光学精密工程*, 2015, 21(12): 3021-3028.
- XU M F, WANG W B, GAO W H. Characterization and modeling of static compound speckle in laser projection display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 21(12): 3021-3028. (in Chinese)
- [23] 古德曼. 光学中的散斑现象: 理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- GOODMAN J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [24] 刘培森. 散斑统计光学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- LIU P S. *Basic of Statistical Speckle Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)

## 作者简介:



孔庆楠 (1987 -), 男, 吉林四平人, 2010 年于吉林大学获得学士学位, 主要从事数字信号处理和半导体激光器驱动电路的研究。E-mail: kqn000@163.com

## 通讯作者:



秦伟平 (1961 -), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 1999 年于中科院长春物理研究所获得博士学位, 主要从事稀土上转换发光性质及其器件的研究。E-mail: wpqin@jlu.edu.cn