

doi:10.3788/gzxb20174602.0210001

关联成像目标重构的伪逆迭代降噪方法

张红伟¹, 郭树旭¹, 张驰¹, 羊超¹, 曹军胜², 郜峰利¹

(1 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大学实验区, 长春 130012)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 长春 130033)

摘要:结合伪逆关联成像和迭代去噪关联成像,提出了关联成像目标重构的伪逆迭代方法.该方法以伪逆关联成像重构结果为初始值,选取合适的与噪声干扰相关的阈值,通过迭代运算逼近实际的噪声干扰,最终抑制噪声并提高重构图像的峰值信噪比.以峰值信噪比和相关系数为衡量标准,将伪逆迭代关联成像的重构结果与差分关联成像、伪逆关联成像进行对比分析.仿真实验结果表明,伪逆迭代方法的峰值信噪比较伪逆关联成像方法、差分关联成像方法分别高出约 1.0 dB、3.1 dB,同时其相关系数、视觉效果也有所改善,验证了该方法的有效性.

关键词:关联成像;目标重构;伪逆矩阵;迭代运算;峰值信噪比

中图分类号:O431.2;O431.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0210001-8

Pseudo-inverse Iterative Denoising Method for Object Reconstruction of Ghost Imaging

ZHANG Hong-wei¹, GUO Shu-xu¹, ZHANG Chi¹, YANG Chao¹, CAO Jun-sheng², GAO Feng-li¹

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

(2 Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Combining Pseudo-inverse Ghost Imaging (PGI) with iterative denoising of ghost imaging, a pseudo-inverse iterative method was proposed for object reconstruction of ghost imaging. This method employed the reconstructed results of PGI as the initial values and selected an appropriate threshold value correlated to the noise interference. It also used iterative operation to approach the actual noise interference, and enhanced the Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) of the reconstructed images by suppressing the noise in the end. By using PSNR and correlation coefficient (CC) as the yardstick, the reconstructed results of Pseudo-inverse Iterative Ghost Imaging (PIGI) were compared and analyzed with those of Differential Ghost Imaging (DGI) and PGI. The simulation experiment results show that the PSNR of the pseudo-inverse iterative method is about 1.0 dB and 3.1 dB higher than those of PGI and DGI respectively, and its CC and visual effects are also improved compared with PGI and DGI, which verify the validity of this method.

Key words: Ghost imaging; Object reconstruction; Pseudo-inverse matrix; Iterative operation; Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

OCIS Codes: 100.3010; 200.1130; 110.3010; 110.2990; 110.3000

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2011YQ040077)和吉林省科技发展计划自然科学基金(Nos. 20160101284JC, 20140101175JC)资助

第一作者:张红伟(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为关联成像目标重构算法. Email: hongwei15@mails.jlu.edu.cn

导师(通讯作者):郜峰利(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为光学成像技术及半导体激光器噪声检测及其应用. Email: gaofl@jlu.edu.cn

收稿日期:2016-09-13; **录用日期:**2016-11-28

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

0 引言

关联成像是一种新兴的间接成像方法,具有广泛的应用前景.与传统成像方法不同的是,关联成像将每束光分成两束,一束光照在物臂的物体上被调制,并由随后的无空间分辨能力的桶探测器接收;另一束光被参考臂上具有空间分辨能力的探测器,如电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)直接接收,通过对两个探测器得到的信息进行关联运算,即可重构出物体的像.最初,研究者广泛认为只有空间纠缠光子对可以实现关联成像^[1-2],随着赝热光源关联成像的实现^[3-4],关联成像技术更加接近实用化,例如三维鬼成像^[5]、三维光学加密^[6]、移动物体关联成像^[7]、多图加密^[8]等.然而,受硬件条件和外部环境的影响,关联成像技术中传统方法重构的图像质量并不理想.

近年来,越来越多的改善重构图像质量的关联成像方法被提出.例如, F. Ferri 等提出的差分关联成像(Differential Ghost Imaging, DGI)法中,桶探测值是物体的交流分量被散斑场调制后的总光强,该方法大大降低了外部环境噪声对成像质量的影响,可以获得较高的信噪比^[9];随后, Ori Katz 等提出压缩感知关联成像(Compressive Ghost Imaging, CGI),利用压缩感知(Compressive Sensing, CS)可以在远低于奈奎斯特采样率下对信号采样并高质量重构这一优点,将 CS 理论与关联成像结合起来,采用梯度投影稀疏重构(Gradient Projection for Sparse Reconstruction, GPSR)压缩感知恢复算法,高质量地重构出物体图像^[10-12].除了传统的双臂关联成像以外,文献[12]提出单臂关联成像,使用空间激光调制器(Spatial Laser Modulator, SLM)作为虚拟参考臂,实现了较高质量的目标重构.尽管 CGI 可以在低测量次数下高质量地重构出物体图像,但是它的算法复杂,运算时间较长. Yao X R 等提出了迭代去噪关联成像(Iterative Denoising of Ghost Imaging, IDGI)^[13],在实现差分关联成像的基础上,选取合适的与噪声干扰相关的阈值,通过迭代运算来逼近并消除真实的噪声,得到比 DGI 更好的重构结果.但是,迭代去噪关联成像方法需要在大量的测量次数下才能得到较好的重构图像质量. Zhang C 等提出伪逆关联成像(Pseudo-inverse Ghost Imaging, PGI)并由 Gong W 完成实验验证^[14-15],该方法用观测矩阵的伪逆代替传统重构方法的矩阵转置,提高了重构图像的质量,得到了优于 GI、DGI、CGI 的结果,在较低的测量次数下和较短运算时间内获得了较高的重构图像的峰值信噪比.

本文在伪逆关联成像的基础上,结合迭代去噪关联成像方法,提出了低测量次数下有效实现关联成像目标重构的伪逆迭代方法,称之为伪逆迭代关联成像(Pseudo-inverse Iterative Ghost Imaging, PIGI).该方法以伪逆关联成像为初始结果,选取合适的阈值,该阈值与基于伪逆的重构矩阵非对角线部分(噪声干扰项)相关,以比较接近重构目标的伪逆关联成像重构结果为初始值构造假设的噪声干扰,再通过迭代运算,实现对实际噪声干扰的逼近,与实际噪声做差从而抑制实际噪声的干扰,改善目标重构结果.在理论上,开展了数值仿真实验,分别以峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、相关系数(Correlation Coefficient, CC)为量化指标,将伪逆迭代关联成像的重构结果与差分关联成像和伪逆关联成像进行对比分析.

1 理论方法

传统经典光学关联成像示意图如图 1. 激光光源通过旋转毛玻璃作为赝热光源,产生不同的散斑场,通过分束棱镜后分成物臂及参考臂两路光束,物臂光束被传输系数为 $T(x, y)$ ($p \times p$ 像素)的目标物体调制后,由无空间分辨的桶探测器获得总光强,其第 n 次测量的数据记为 B_n ;同时,参考臂光束被距离激光光源 z_2 ($z_2 = z_1$) 处的 CCD 接收,获得照射在目标物体上的散斑场分布,其第 n 次测量的散斑场记为 $I_n(x, y)$ ($p \times p$ 像素).二者通过关联算法即可重构出物体的像.传统关联成像的重构公式表示为^[10]

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

式中, $B_n = \iint I_n(x, y) T(x, y) dx dy$ 为第 n 次测量的总光强, N 为总的测量次数, $\langle B_n \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N B_n$ 为 N 次测量总光强的平均值.传统关联成像算法对环境噪声比较敏感,需要大量的测量次数才可以提高信噪比^[13].

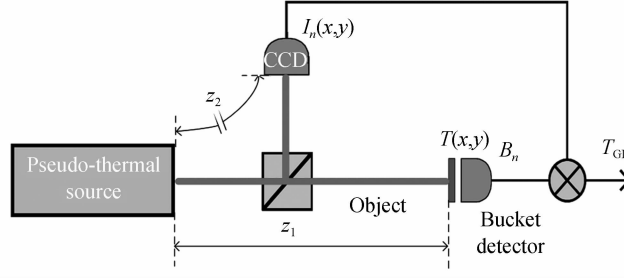


图1 关联成像原理框图

Fig.1 Schematic of GI system

从矩阵的角度出发,伪逆关联成像方法是用观测矩阵的伪逆代替传统重构方法中的矩阵转置,其重构公式表示为^[14]

$$\mathbf{T}_{\text{PGI}} = \frac{1}{N} \Phi^\dagger \Phi \mathbf{T} \quad (2)$$

式中, \mathbf{T} 为由目标物体的透射系数 $T(x,y)$ 排列成的具有 $p \times p$ 个元素的列向量,即 $\mathbf{T} = [T(1,1), T(1,2) \cdots T(p,p)]^\top$; Φ 为由 N 幅散斑场逐行排列而成的 $N \times p^2$ 的观测矩阵, Φ^\dagger 为 Φ 的伪逆矩阵. 矩阵 Φ 的第 n 行是第 n 幅散斑 $I_n(x,y)$ 逐行排列得到的行向量,即

$$\Phi = \begin{bmatrix} I_1(1,1) & I_1(1,2) & \cdots & I_1(p,p) \\ I_2(1,1) & I_2(1,2) & \cdots & I_2(p,p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_N(1,1) & I_N(1,2) & \cdots & I_N(p,p) \end{bmatrix} \quad (3)$$

理论上, $\Phi^\dagger \Phi$ 中的对角线元素对成像质量起关键作用,非对角线部分的元素为噪声干扰项,所以其对角线元素的值越趋于一致,噪声干扰项越趋近于零,则重构出来的图像质量越好. 所以,本文把矩阵 $\Phi^\dagger \Phi$ 分解成两个矩阵 s 和 n 之和,如式(4)所示.

$$\Phi^\dagger \Phi = s + n \quad (4)$$

其中, $s = \text{diag}(\Phi^\dagger \Phi)$, 是 $\Phi^\dagger \Phi$ 的对角线元素组成的对角矩阵, $\text{diag}(\cdot)$ 表示将矩阵除对角元素以外的元素置零; n 即噪声干扰项,其对角线元素为零,非对角线元素对应 $\Phi^\dagger \Phi$ 的非对角线部分. 这样,式(2)可以重新表示为

$$\mathbf{T}_{\text{PGI}} = \frac{1}{N} \Phi^\dagger \Phi \mathbf{T} = \frac{1}{N} s \mathbf{T} + \frac{1}{N} n \mathbf{T} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,PGI 重构图像的实际噪声干扰 $\frac{1}{N} n \mathbf{T}$ 与物体的传输系数 \mathbf{T} 有关,为了逼近实际噪声干扰,在没有重构目标先验知识的情况下,可以考虑用比较接近目标传输系数的 PGI 重构结果作为初始值,以构造假设的噪声干扰 $\frac{1}{N} n' \mathbf{T}_{\text{PGI}}$, 以期接近实际噪声,通过与式(5)作差来抑制实际噪声,称为降噪 PGI (Denoising PGI, DPGI), 即

$$\mathbf{T}_{\text{DPGI}} = \frac{1}{N} s \mathbf{T} + \frac{1}{N} n \mathbf{T} - \frac{1}{N} n' \mathbf{T}_{\text{PGI}} \quad (6)$$

此处, n' 可按式(7)进行取值^[13], 即

$$n'(x,y) = \begin{cases} n(x,y) & n'(x,y) \leq t \\ 0 & n'(x,y) > t \end{cases} \quad (7)$$

式中, t 称为阈值,其取值区间为 $[\min\{n(x,y)\}, \max\{n(x,y)\}]$, 这样,当选取合适的阈值时, $\Phi^\dagger \Phi$ 对角线附近的对于成像质量有贡献的值得以保留,而对成像质量具有干扰作用的噪声被抵消,从而实现抑制实际噪声.

由上述分析可知,所选取的目标传输系数的初始值越接近重构目标的实际透射系数,逼近并抑制实际噪声的效果越好,所以为了更好地逼近并抑制实际噪声,考虑迭代运算,即将上一次降噪 PGI 的重构结果作为下次逼近实际噪声的透射系数,称之为伪迭代关联成像 (Pseudo-inverse Iterative Ghost Imaging, PIGI),

表示为

$$\mathbf{T}_{\text{PIGI}}^{(k+1)} = \frac{1}{N} \Phi^\dagger \Phi \mathbf{T} - \mathbf{X} \frac{1}{N} \mathbf{T}_{\text{PIGI}}^{(k)} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{T}_{\text{PIGI}}^{(0)} = \mathbf{T}_{\text{PGI}}$, $\mathbf{T}_{\text{PIGI}}^{(1)} = \mathbf{T}_{\text{DGI}}$, $\mathbf{X} = \Phi^\dagger \Phi - \text{diag}(\Phi^\dagger \Phi)$, 当 $X(x, y) > t$ 时, $X(x, y) = 0$. 在低测量次数下 PGI 的重构结果可以比较理想地接近重构目标^[14-15], 将其作为初始值, 即 $\mathbf{T}_{\text{PIGI}}^{(0)} = \mathbf{T}_{\text{PGI}}$, 得到第一次降噪后的重构结果, 这个重构结果的质量优于 PGI 重构结果, 更接近重构目标; 再将该重构结果作为透射系数, 再次进行降噪, 得到第二次降噪的重构图像, 以此类推, 实现 k 次迭代运算获得最优的重构图像.

2 仿真实验分析

本文选用四幅 50×50 pixels 的二值图像, 即“吉”, “林”, “大”, “学”(“Ji”“Lin”“Da”“Xue”)和一幅 100×100 pixels 的二值图像‘Ghost’作为重构目标, 开展仿真实验以验证本方法的可行性. 仿真实验中选用的散斑场由实际实验装置获得, 以半导体激光器作为光源(波长 $\lambda = 635$ nm), 通过旋转毛玻璃产生不同的散斑场, 并由 CCD 采集存入计算机中进行后续的仿真实验. 实验中, 对每一个重构目标用 PIGI 进行重构时, 首先得到其 PGI 重构结果, 并以其为初始值, 来构造假设的噪声干扰, 再用式(8)所示的 PIGI 进行重构. 四幅图像的仿真实验结果如图 2 所示, 其中, (a)为原图像, (b)是 DGI 的重构结果^[9], (c)是 PGI 的重构效果, (d)是 PIGI 的重构结果, 其测量次数 N 均为 1100, 阈值 t 的归一化取值为 0.4, 迭代次数为 3. 比较四幅图像的重构结果可以看出, 同等测量次数下, DGI 重构法能重构出目标的轮廓, 但仍存在较明显的噪声; 与 DGI 相比, PGI 重构法的效果有较大的改善, 基本可以清晰重构出原物体的像; 显而易见, 与 DGI 相比, PIGI 的重构效果有了更明显的改善, 同时较 PGI 在对比度上有了明显的增强. 上述现象说明依据式(8)的 PIGI 在 PGI 重构结果的基础上, 重构图像的噪声得到了抑制.

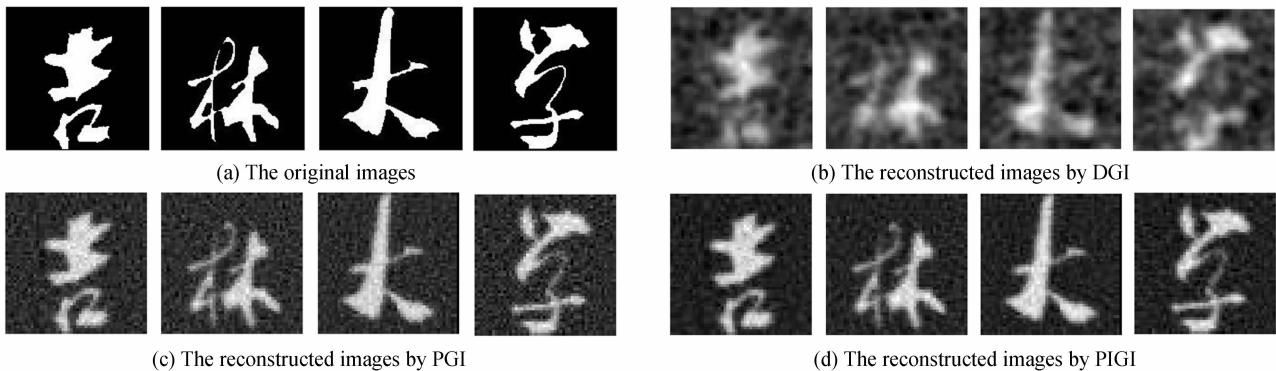


图 2 DGI, PGI, PIGI 的重构结果比较

Fig. 2 Comparison of reconstructed results for DGI, PGI and PIGI

峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)是衡量图像质量的一种客观标准, 其定义为

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \left[\frac{(2^m - 1)^2}{\text{MSE}} \right] \quad (9)$$

式中, MSE 表示原始图像与重构图像的均方误差, 对于灰度取值 $0 \sim 255$ 的图像, $m = 8$. 为了进一步分析上述方法的重构效果, 以 PSNR 为量化指标, 定量比较不同测量次数(400~1 100 次)下三种方法的重构图像的质量, PIGI 中阈值 t 的归一化取值为 0.4, 迭代次数为 3, 实验结果如图 3 所示, 其中, (a)、(b)、(c)、(d)分别对应图 2 中的四个重构目标. 测量次数较低时, 散斑场的随机性比较大, 在测量次数相差不大的情况下, PSNR 可能会出现波动, 由图可以观察到, 在某些测量次数范围内, 出现测量次数增多而 PSNR 减小的情况, 但整体上 PSNR 随着测量次数 N 的增大而增大, 且所有测量次数下, PGI 的 PSNR 比 DGI 提高较为明显, 同时 PIGI 较 PGI 的 PSNR 有所改善, 该结果与图 2 所示的视觉效果是一致的. 在 PSNR 的具体数值上, 对于图 3(a), PGI 比 DGI 最大提高 2.640 3 dB, 而 PIGI 最大高出 PGI 1.404 4 dB; 对于图 3(b), PGI 比 DGI 最大提高 3.358 0 dB, PIGI 最大高出 PGI 1.437 7 dB; 对于图 3(c), PGI 比 DGI 最大提高 3.824 3 dB, 而 PIGI 比 PGI 最大高出 1.643 1 dB; 对于图 3(d), PGI 比 DGI 最多提高 2.960 4 dB, 而 PIGI 比 PGI 最多高出 1.459 4 dB.

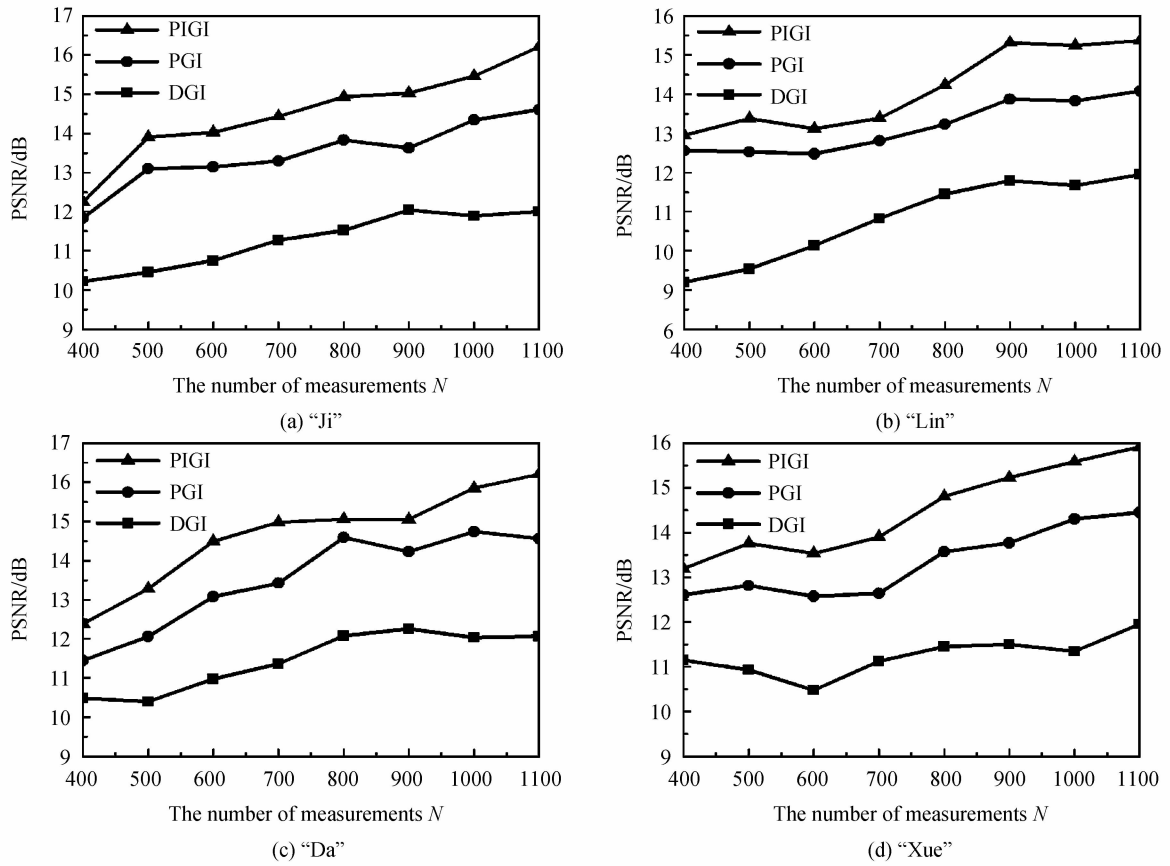


图3 重构结果的 PSNR 曲线

Fig. 3 PSNR curves of reconstructed results

用三种算法在不同测量次数(400~1 100 次)下重构所得图像的 PSNR,计算 PIGI 相比 PGI、DGI 的提
高量的平均值.为表示方便,用 $(PSNR)_{PIGI}$ 、 $(PSNR)_{PGI}$ 、 $(PSNR)_{DGI}$ 分别表示 PIGI、PGI、DGI 重构图像的峰
值信噪比,那么 PIGI 相比 PGI 在 PSNR 上的平均提高量为 $[(PSNR)_{PIGI} - (PSNR)_{PGI}]/8$,记为
 $\Delta(PSNR)_{PI-P}$,同理,相比 DGI 的 PSNR 平均提高量 $\Delta(PSNR)_{PI-D} = [(PSNR)_{PIGI} - (PSNR)_{DGI}]/8$,计算结
果如表 1 所示.从表 1 可以看出,对于这四幅图像,与 DGI 相比,PIGI 的重构结果提高显著,同时,与 PGI 相
比有部分提高.最后测量了不同测量次数下,重构目标与三种方法(DGI、PGI、PIGI)的重构图像的相关系数,
如表 2 所示.

相关系数用来衡量重构图像的质量,重构目标 O 与重构图像 R 间的相关系数定义为

$$CC = \left| \frac{E\{[O-E(O)][R-E(R)]\}}{\{E\{[O-E(O)]^2\}E\{[R-E(R)]^2\}}^{1/2}} \right| \quad (10)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 表示期望算子. CC 反应了图像 O 与 R 之间的相似程度,若 $CC=1$,则重构图像与重构目标完全
相似; $CC=0$,则重构图像与重构目标完全不相似.由表 2 可以看出,对于四个重构目标,与 DGI 相比,PIGI
重构结果与重构目标的相关系数提高显著,同时与 PGI 相比,提升不明显,说明 PIGI 重构结果更接近原图.
上述结果从数值上表明,PIGI 可以实现重构图像质量的提高和改善.

阈值 t 是影响重构结果的重要参量,其值的选取直接影响重构图像的质量^[13].对每一个重构目标进行
PIGI 重构时,需要选取与噪声干扰相关的合适的阈值以逼近并抑制 PGI 重构结果中的实际噪声从而得到较
好的重构质量,由于 PIGI 方法是以 PGI 的重构结果为初始结果,为了选取合适的阈值,实验计算不同阈

表 1 与 PGI、DGI 相比,PIGI 的 PSNR 平均提高量

Table 1 Compared with PGI and DGI, the average PSNR increments of PIGI

| | “Ji” | “Lin” | “Da” | “Xue” |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| $\Delta(PSNR)_{PI-P}/dB$ | 0.948 2 | 0.903 0 | 1.066 2 | 1.086 4 |
| $\Delta(PSNR)_{PI-D}/dB$ | 3.107 4 | 3.346 1 | 3.135 6 | 3.178 4 |

表 2 不同测量次数 N 下三种方法重构结果与原图的相关系数Table 2 CC between the originals and the reconstructed results of three methods under different measurements N

| | | The number of measurements N | | | | | | | |
|-------|------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1 000 | 1 100 |
| “Ji” | DGI | 0.784 2 | 0.804 9 | 0.829 3 | 0.841 5 | 0.853 0 | 0.857 1 | 0.859 9 | 0.863 4 |
| | PGI | 0.890 5 | 0.908 0 | 0.922 1 | 0.933 5 | 0.942 0 | 0.950 6 | 0.955 9 | 0.962 7 |
| | PIGI | 0.891 1 | 0.916 5 | 0.932 4 | 0.944 8 | 0.951 3 | 0.959 5 | 0.964 3 | 0.969 6 |
| “Li” | DGI | 0.714 4 | 0.746 3 | 0.768 1 | 0.788 6 | 0.799 3 | 0.806 8 | 0.809 6 | 0.816 4 |
| | PGI | 0.844 3 | 0.863 1 | 0.880 4 | 0.894 8 | 0.905 5 | 0.917 5 | 0.925 4 | 0.933 4 |
| | PIGI | 0.850 9 | 0.876 2 | 0.895 8 | 0.910 6 | 0.919 9 | 0.931 7 | 0.938 0 | 0.943 8 |
| “Da” | DGI | 0.798 3 | 0.819 0 | 0.832 8 | 0.841 2 | 0.847 7 | 0.854 1 | 0.860 1 | 0.864 5 |
| | PGI | 0.905 5 | 0.919 8 | 0.931 0 | 0.940 1 | 0.946 9 | 0.954 7 | 0.959 3 | 0.962 8 |
| | PIGI | 0.906 2 | 0.924 8 | 0.941 9 | 0.951 1 | 0.957 1 | 0.963 8 | 0.968 2 | 0.971 4 |
| “Xue” | DGI | 0.762 5 | 0.778 5 | 0.796 9 | 0.808 4 | 0.814 3 | 0.818 3 | 0.822 8 | 0.825 5 |
| | PGI | 0.848 1 | 0.877 1 | 0.892 2 | 0.902 1 | 0.913 4 | 0.923 2 | 0.931 2 | 0.939 2 |
| | PIGI | 0.855 9 | 0.886 6 | 0.907 1 | 0.918 5 | 0.930 3 | 0.938 7 | 0.945 9 | 0.952 4 |

值下相对于 PGI 重构结果四幅重构目标 PIGI 重构结果的 PSNR 提高量 ΔPSNR , 其中 $\Delta\text{PSNR} = (\text{PSNR})_{\text{PIGI}} - (\text{PSNR})_{\text{PGI}}$, 结果如图 4 所示, 图中, 零处的虚线为水平基准线, 阈值 t 的取值区间为 $[\min\{n(x, y)\}, \max\{n(x, y)\}]$ (n 即噪声干扰项, 其对角线元素为零, 非对角线元素对应 $\Phi^\dagger \Phi$ 的非对角线部分), 计算中在此区间对 t 进行归一化取值, 测量次数为 1 100 次, 迭代次数 k 为 3, 阈值 t 以 0.05 为步长从 0 取到 1. 由图 4 可以看出, 整体上, 四幅重构图像的 PSNR 提高量随阈值的变化趋势基本一致, 说明阈值的选取几乎不受重构目标的影响. 此外, 还可以看出, 当 t 较小 ($t \leq 0.1$) 或 t 较大 ($t \geq 0.7$) 时, PSNR 提高量几乎为 0, 在水平基准线(图 4 中的虚线)上下浮动; 当 t 在 0.1~0.3 范围内, 四幅图像 PIGI 的重构效果相对于 PGI 有所下降; 仅在 t 取 0.35~0.65 范围内时, 四幅图像的 PIGI 的 PSNR 相对于 PGI 有所提升, 且在 0.35~0.55 区间内 PSNR 提高最为明显, 综合考虑上述实验结果, 在区间 0.35~0.55 内选取阈值, 在图 2、图 3 的实验中, 选取阈值为 0.4, 同时这也与文献[13]中的阈值选取一致.

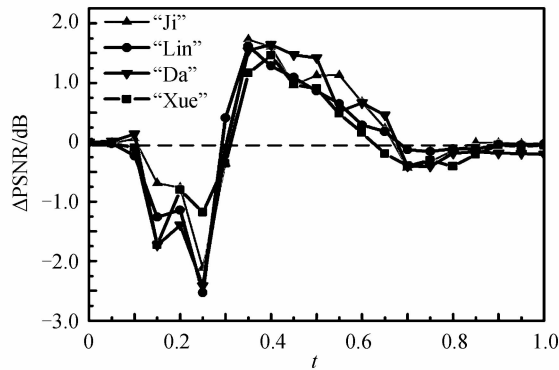
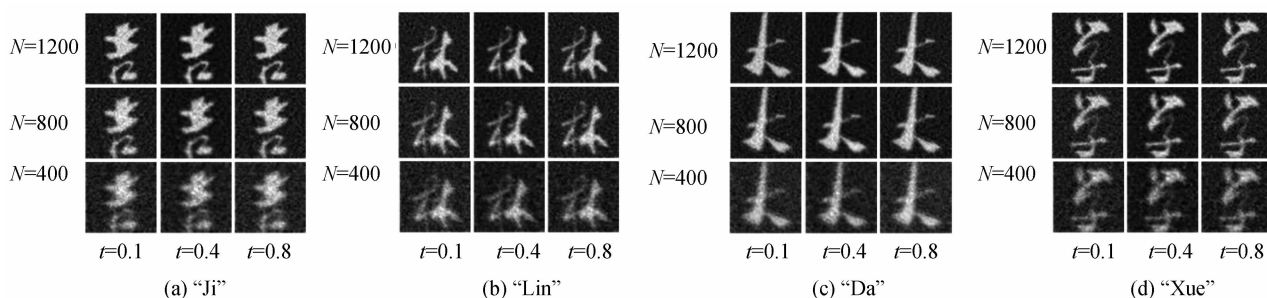


图 4 不同阈值下, 与 PGI 相比, PIGI 的 PSNR 提高量

Fig. 4 Compared to PGI, the increasement of PSNR of PIGI under different threshold values

为了进一步验证 PIGI 的有效性, 需要综合考虑阈值 t 和测量次数 N 同时对 PIGI 重构结果的影响. 在不同测量次数、不同阈值选取的情况下, PIGI 的重构结果如图 5 所示, 其中(a)、(b)、(c)、(d)从左至右为阈值 t 分别取 0.1、0.4、0.8 的结果, 从下至上为测量次数 N 依次取 400、800、1 200 的结果. 从图 5 可以观察到, 在测量次数 N 一定时, t 取 0.1 和 0.8 时, PIGI 的视觉效果比较接近, 噪声明显, 而当 t 取 0.4 时, 视觉效果最优, 噪声被较好的抑制, 得到了对比度较强的重构图像, 说明视觉效果与图 4 所示的结果一致; 同时, 当阈值 t 固定时, 从下至上观察, 重构图像的视觉效果同样随着测量次数的增加而变优, 这也与图 3 所示的 PIGI 重构结果的 PSNR 曲线相对应. 综合观察, 在 t 取 0.4, N 取 1 200 时, 可以得到比较理想的重构结果.

图5 不同阈值 t 和测量次数 N 下的 PIGI 重构结果Fig. 5 The reconstructed results of PIGI under different threshold values and measurements N

最后,由图4的实验数据可以看出,阈值的选取几乎不受重构目标的影响,在对其它重构目标进行 PIGI 重构时,可以在 $0.35 \sim 0.55$ 区间内选取阈值.将 100×100 pixels 的‘Ghost’图像作为目标物体进行 PGI 和 PIGI 的重构实验,测量次数为 1 000 次,阈值取 0.5,迭代次数为 3,重构结果如图6所示,其中(a)为原图,(b)为 PGI 重构得到的结果,(c)为 PIGI 重构得到的结果,可以看出,在视觉上与 PGI 重构结果相比,PIGI 重构结果有较明显改善,数值上 PIGI 在 PSNR 上提高了 1.012 4 dB,进一步说明对于不同像素的重构目标,在选取合适阈值时,PIGI 方法能可靠地在低测量次数下较好地重构出目标图像,提高重构图像的峰值信噪比.

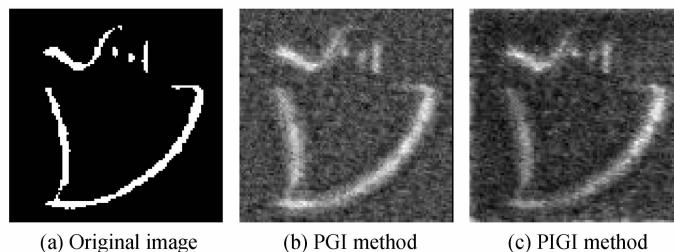


图6 PGI 和 PIGI 的重构结果比较

Fig. 6 Comparison of reconstructed results for PGI and PIGI

3 结论

结合伪逆关联成像和迭代去噪关联成像,提出了关联成像目标重构的伪迭代方法,开展了详细理论分析及仿真实验验证.首先在伪逆关联成像的重构结果的基础上,选取合适的阈值,通过迭代运算对实际噪声进行逼近并抑制了噪声,从而实现了目标重构质量的改善和提高.通过仿真实验,分别利用 DGI、PGI、PIGI 三种方法对四个重构目标进行重构,并对重构图像的视觉效果、PSNR 曲线及相关系数进行对比分析.实验结果显示视觉上 PIGI 的重构效果要优于 DGI 和 PGI,数值上 PIGI 的 PSNR 较 DGI 提高显著,平均提高量在 3.1 dB 左右,同时比 PGI 的 PSNR 有部分提高,平均提高量在 1.0 dB 左右;PIGI 重构图像与重构目标的相关系数均较 PGI、DGI 重构结果与重构目标的相关系数有所提高.最后选用不同尺寸的重构目标和阈值进行实验,进一步验证了 PIGI 方法确实能在较低测量次数下可靠实现重构质量的提升和改善,实验结果与理论分析一致. PIGI 方法实现目标重构质量的改善是有效可靠的,具有自身的优势及应用价值.

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.
- [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.
- [3] BENNINK R S, BENTLEY S J, BOYD R W. “Two-photon” coincidence imaging with a classical source[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(11): 113601.
- [4] 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.
- [5] ZHANG C, GUO S, GUAN J, *et al.* Three-dimensional ghost imaging using acoustic transducer [J]. *Optics Communications*, 2016, **368**: 134-140.

- [6] CHEN W, CHEN X. Ghost imaging for three-dimensional optical security[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(22): 221106.
- [7] LI E, BO Z, CHEN M, *et al.* Ghost imaging of a moving target with an unknown constant speed[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(25): 251120.
- [8] WU J, XIE Z, LIU Z, *et al.* Multiple-image encryption based on computational ghost imaging [J]. *Optics Communications*, 2016, **359**: 38-43.
- [9] FERRI F, MAGATTI D, LUGIATO L A, *et al.* Differential ghost imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(25): 253603.
- [10] KATZ O, BROMBERG Y, SILBERBERG Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(13): 131110.
- [11] DU J, GONG W, HAN S. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(6): 1067-1069.
- [12] BROMBERG Y, KATZ O, SILBERBERG Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, **79**(5): 053840.
- [13] YAO X R, YU W K, LIU X F, *et al.* Iterative denoising of ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(20): 24268-24275.
- [14] ZHANG C, GUO S, CAO J, *et al.* Object reconstitution using pseudo-inverse for ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(24): 30063-30073.
- [15] GONG W. High-resolution pseudo-inverse ghost imaging[J]. *Photonics Research*, 2015, **3**(5): 234-237.
- [16] ZHONG Ya-jun, LIU Jiao, LIANG Wen-qiang, *et al.* Multiple speckle patterns differential compressive ghost imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(1): 014202.
仲亚军, 刘娇, 梁文强, 等. 针对多散斑图的差分压缩鬼成像方案研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(1): 014202.
- [17] GONG W, HAN S. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light[J]. *Physics Letters A*, 2010, **374**(8): 1005-1008.
- [18] XUE Yu-liang, WAN Ren-gang, FENG Fei, *et al.* Lensless ghost imaging experiments in three different configurations [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8):0823006.
薛玉郎, 万仁刚, 冯飞, 等. 三种不同结构的无透镜鬼成像实验研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8):0823006.
- [19] SHAPIRO J H. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, **78**(6): 061802.
- [20] CHEN W, CHEN X. Marked ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(25): 251109.
- [21] LI Xin-yu, CAO Fei, ZHAO Sheng-mei. A compressive complex-valued ghost imaging theoretical scheme based on phase modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0111001.
李欣禹, 曹非, 赵生妹. 基于相位调制的复值物体压缩关联成像理论研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(S1): 0111001.