

基于自适应阈值方法实现迭代降噪鬼成像

周阳 张红伟 钟菲 郭树旭

Iterative denoising of ghost imaging based on adaptive threshold method

Zhou Yang Zhang Hong-Wei Zhong Fei Guo Shu-Xu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 244201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181240

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181240>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于数字微镜器件的自适应高动态范围成像方法及应用](#)

Adaptive high-dynamic-range imaging method and its application based on digital micromirror device

物理学报.2017, 66(23): 234201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234201>

[单像素探测频谱重构成像理论分析](#)

Theoretical analysis of spectrum reconstruction imaging using single-pixel detection

物理学报.2017, 66(3): 034201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.034201>

[贝叶斯迭代联合双边滤波的散焦图像快速盲复原](#)

Fast Bayesian blind restoration for single defocus image with iterative joint bilateral filters

物理学报.2016, 65(23): 234202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234202>

[基于激光散斑成像的零件表面粗糙度建模](#)

Surface roughness modeling based on laser speckle imaging

物理学报.2015, 64(23): 234203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234203>

[编码孔径光谱成像仪光学简化彗差对图谱反演误差分析](#)

Analysis on the simplified optic coma effect on spectral image inversion of coded aperture spectral imager

物理学报.2015, 64(5): 054205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054205>

# 基于自适应阈值方法实现迭代降噪鬼成像\*

周阳<sup>1)</sup> 张红伟<sup>1)</sup> 钟菲<sup>2)</sup> 郭树旭<sup>1)†</sup>

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

2) (长春工程学院电气与信息工程学院, 长春 130012)

(2018年6月27日收到; 2018年8月29日收到修改稿)

为了有效降低传统鬼成像中相关噪声对成像质量的影响, 本文提出一种基于最佳阈值的迭代降噪鬼成像. 首先在迭代降噪鬼成像的基础上, 采用自适应阈值迭代法, 在不需要目标先验信息的前提下, 找到一个逼近传统鬼成像中相关噪声的阈值, 根据得到的阈值构造噪声干扰项. 为了每次迭代初值更接近原始目标的透射系数, 对其进行二值化, 降低重构图像背景噪声对迭代性能的影响. 仿真以及实验结果表明, 本文提出的方法与传统方法相比, 视觉效果以及峰值信噪比值有明显提高.

**关键词:** 鬼成像, 自适应阈值, 迭代降噪, 图像重构

**PACS:** 42.30.Va, 42.30.Wb

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181240

## 1 引言

关联成像又被称为鬼成像(ghost imaging, GI), 是一种新颖的成像技术, 利用两束光的强度关联性实现目标重构. 其中一束光作为探测光束, 包含目标信息, 由无空间分辨率的桶探测器接收, 另一束光作为参考光束, 直接被有空间分辨率的探测器接收. 与传统光学成像技术相比, GI的突出特点在于可实现无透镜成像以及抗湍流干扰, 在信息安全、遥感、生物医学等领域有广泛的应用价值<sup>[1-6]</sup>, 是近年来量子光学<sup>[7-10]</sup>以及经典光学成像中的研究热点<sup>[11-13]</sup>.

最早由Klyshko<sup>[8]</sup>提出基于纠缠光子对的方案, 随后由Pittman等<sup>[9]</sup>完成第一个GI实验. 随着GI技术的发展, 相关理论以及实验证明, 纠缠光源并不是关联成像的必要条件, 通过经典的热光源也能实现GI. 然而, 庞大的测量次数以及低信噪比制约了传统GI技术在实际中的应用. 近年来, 为了改善GI质量, 提出了许多改进方法, 如差分鬼成像(differential ghost imaging, DGI)<sup>[14]</sup>, 归一化鬼

成像(normalized ghost imaging, NGI)<sup>[15]</sup>, 压缩感知鬼成像(compressive ghost imaging, CGI)<sup>[16-19]</sup>以及其他改进方法<sup>[20-27]</sup>. 在相同的测量次数下, 相比DGI, NGI等方法, CGI在提高成像质量方面优势明显, 然而CGI自身的优化过程是耗时的, 并且对处理器性能要求较高. 伪逆关联成像(pseudo-inverse ghost imaging, PGI)<sup>[21,22]</sup>虽然能够快速实现高分辨率成像, 但在实际应用中, 抗噪性能较差, 不能获得稳定的重构目标. 文献<sup>[23]</sup>提出了一种迭代降噪鬼成像(iterative denoising of ghost imaging, IDGI)方法, 该方法能够获得高信噪比图像, 但是阈值的选取方法并不具有实际通用性. 文献<sup>[24]</sup>提出伪逆迭代降噪鬼成像(pseudo-inverse iterative denoising of ghost imaging, PIGI), 较PGI效果有一定提升, 但PIGI方法的实现, 须以PGI能够获得更接近于目标的透射系数为前提, 由于PGI重构结果易受噪声干扰, 因此会影响迭代降噪性能, 并且PIGI的阈值选取方法同样不具普适性. 文献<sup>[25]</sup>在NGI的基础上提出了一种自适应阈值迭代降噪的思想, 但是在阈值选取的过程中, 仍需要参考目

\* 国家自然科学基金(批准号: 61627823)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guosx@jlu.edu.cn

标验证合适的阈值. 文献 [26] 在对应NGI的基础上提出迭代降噪归一化鬼成像 (iterative normalized correspondence ghost imaging, INCGI), 呈现了较好的重构效果, 但是没有讨论阈值对迭代降噪性能的影响.

与上述方法不同, 为了降低测量次数以及提高成像信噪比, 本文提出一种自适应阈值方法实现IDGI方案, 在不需要目标先验知识的基础上, 通过自适应阈值方法完成GI中与相关噪声有关的阈值计算, 根据得到的阈值完成噪声干扰项的构造, 结合IDGI的降噪模型, 经过3次迭代降噪即可抑制相关噪声对GI质量的影响, 最终实现重构目标信噪比的提高. 同时, 为了使每次迭代值更接近目标的透射系数, 对归一化后的目标透射系数进行二值化, 可进一步提高迭代降噪的性能. 仿真以及实验结果表明, 本文提出的方法相对于传统GI方法, 重构图像的背景噪声被明显抑制.

## 2 方法理论以及仿真分析

图 1 为本文采用的GI实验示意图, 激光器发出的光经过透镜L2以及L3放大后, 通过缓慢旋转的毛玻璃, 产生赝热光源. 赝热光经过分束棱镜 (beam splitter, BS) 后, 被分为参考光束以及探测光束两束相同的光. 参考光束直接被电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 接收, 记为  $I_R$ , 探测光束被物体调制后, 再经过透镜L1后, 被无空间分辨率的桶探测器接收, 记为  $I_B$ .

根据文献 [11], 在传统关联成像系统中, 去除背景的相关函数公式为

$$\Delta G^{(2)}(x) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_B^{(i)} I_R^{(i)}(x) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_B^{(i)} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_R^{(i)}(x), \quad (1)$$

其中,  $M$  代表总测量次数;  $I_R^{(i)}(x)$  表示第  $i$  次测量中, 参考探测器 CCD 上点  $x$  处的光强;  $I_B^{(i)} = \sum_x I_R^{(i)}(x) O(x)$  为第  $i$  次测量时, 桶探测器得到的光强值;  $O(x)$  表示目标的透射系数/反射系数. 对  $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_B^{(i)} I_R^{(i)}(x)$  进行进一步分析, 如 (2) 式:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_B^{(i)} I_R^{(i)}(x) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{x_1}^N O(x_1) (I_R^{(i)}(x_1) - \bar{I}(x_1)) \\ & \quad \times (I_R^{(i)}(x) - \bar{I}(x)) + \bar{I}(x) \sum_{x_1}^N \bar{I}(x_1) O(x_1) \\ &= \delta^2(x, x) O(x) + \sum_{x_1 \neq x} \delta^2(x, x_1) O(x_1) \\ & \quad + \bar{I}(x) \sum_{x_1}^N \bar{I}(x_1) O(x_1), \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\delta^2(x, x)$  表示自相关系数,  $\delta^2(x, x_1)$  表示互相关系数.

$$\begin{aligned} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_B^{(i)} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_R^{(i)}(x) &= \bar{I}(x) \sum_{x_1}^N \bar{I}(x_1) O(x_1), \\ \bar{I}(x) &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_R^{(i)}(x) \end{aligned}$$

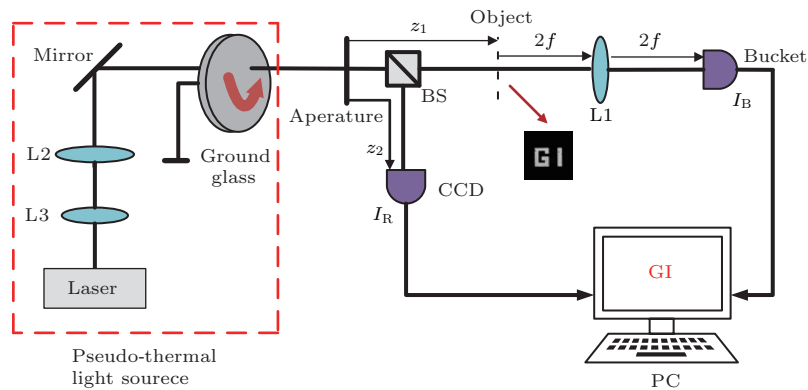


图 1 基于赝热光的GI实验示意图 (BS, 分束棱镜; PC, 计算机;  $z_1$ , 目标与光源之间的距离;  $z_2$ , CCD与光源之间的距离)

Fig. 1. Experimental schematic of GI with pseudo-thermal light. BS, beam splitter; PC, personal computer;  $z_1$ , the distance between the light source and the object;  $z_2$ , the distance between the light source and the CCD.

表示在像素点  $x$  处的平均光强值, 总像素点的大小为  $N$ . 假设像素各点的光强是相互独立变化的, 则有  $\delta^2(x, x_1) = 0$ , 因此, 成像公式可以简化成  $\Delta G^{(2)}(x) = \delta^2 O(x)$ , 其中  $\delta^2(x, x) = \delta^2$ . 但是在实际的应用中, 由于有限的测量次数以及噪声等因素的影响, 导致各像素点之间存在相关性噪声, 即  $\delta^2(x, x_1) \neq 0$ .

$$\Delta G^{(2)}(x) = \delta^2(x, x)O(x) + \sum_{x_1 \neq x} \delta^2(x, x_1)O(x_1), \quad (3)$$

其中,  $\delta^2(x, x_1)$  的存在是造成 GI 重构图像信噪比低的关键因素, 虽然相关噪声值很小, 但是会最终影响 GI 效率. 正如 IDGI 方法以及文献 [27] 所描述的, 去除  $\delta^2(x, x_1)$  较小值, 能够提高成像信噪比. 根据 IDGI, 迭代降噪公式为

$$IDGI^{(s)}(x) = \Delta G^{(2)}(x) - \sum_{x_1 \neq x} \delta'(x, x_1) \times IDGI^{(s-1)}(x_1), \quad (4)$$

其中,  $\delta'(x, x_1)$  为通过设定阈值构造的噪声干扰项;  $s$  表示迭代次数, 当  $s = 1$  时,  $IDGI^{(s-1)}(x_1)$  为传统方法重构出的目标透射系数/反射系数. 由于 NGI 以及 DGI 效果近似, 为了与 IDGI 算法原理一致, 本文同样以 DGI 重构出目标的透射系数作为初始迭代值. 下一次迭代时, 则以上一次的迭代结果作为目标透射系数继续迭代降噪, 一般经过 3 次迭代后可获得高信噪比图像. 在 IDGI 方法中,  $\delta'(x, x_1)$  构造过程如下:

$$\delta'(x, x_1) = \begin{cases} \delta^2(x, x_1), & \delta^2(x, x_1) < t, \\ 0, & \delta^2(x, x_1) > t. \end{cases} \quad (5)$$

阈值设定方法如下:

$$t' = \frac{t - \min\{\delta^2(x, x_1)\}}{\max\{\delta^2(x, x_1)\} - \min\{\delta^2(x, x_1)\}}, \quad (6)$$

其中,  $t'$  为归一化后的阈值, 取值范围  $[0, 1]$ . 但是,  $t$  与  $t'$  是未知的两个变量, 需要设定初始阈值  $t'$ , 通过已知参考目标, 确定与噪声干扰项逼近的阈值  $t$  的大小. 如何在不需要先验知识的基础上, 实现噪声干扰项的构造, 是 IDGI 方法满足工程实际应用的关键. 本文采用一种自适应阈值的方法, 在不需要参考目标的情况下, 实现噪声干扰项有关阈值的选取. 为了方便说明, 首先对 (4) 式进行重新改写.

$$T_{IDGI-At}^{(s)} = T_{GI} - n' T_{IDGI}^{(s-1)}, \quad (7)$$

其中,  $T_{GI}$  为 GI 重构的目标系数, 以列向量的形式表示;  $n'$  为构造的噪声干扰项; 当  $s = 1$  时,  $T_{IDGI}^{(s-1)}$  为 DGI 重构的目标透射系数, 同样以列向量的形式表示. 在  $M$  次测量下, 获得的散斑场逐行排列可得到测量矩阵  $\Phi$ :

$$\Phi = \begin{bmatrix} I_R^{(1)}(1) & I_R^{(1)}(2) & \cdots & I_R^{(1)}(x) \\ I_R^{(2)}(1) & I_R^{(2)}(2) & \cdots & I_R^{(2)}(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_R^{(M)}(1) & I_R^{(M)}(2) & \cdots & I_R^{(M)}(x) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

这里, 协方差矩阵  $\text{COV}(\Phi)$  的对角以及非对角元素分别对应自相关系数  $\delta^2(x, x)$  以及互相关系数  $\delta^2(x, x_1)$ . 进一步对协方差矩阵的非对角元素进行归一化:

$$\mathbf{n} = \frac{\Phi'_c}{\delta_{\max}^2}, \quad (9)$$

其中,  $\Phi'_c$  表示协方差矩阵  $\text{COV}(\Phi)$  非对角元素,  $\delta_{\max}^2$  表示  $\max\{\delta^2(x, x_1)\}$ . 假设,  $n(x, x_1)$  是  $\mathbf{n}$  在  $(x, x_1)$  上的值, 求出  $\mathbf{n}$  中的最大值  $n_{\max}$  以及最小值  $n_{\min}$ , 将  $n_{\max}$  以及  $n_{\min}$  相加求平均, 求得初始迭代阈值  $T_0$ , 即  $T_0 = (n_{\max} + n_{\min})/2$ . 通过  $T_0$  将  $\mathbf{n}$  分为大于  $T_0$  以及小于  $T_0$  两部分, 分别求出两部分的期望值, 取两部分期望值的均值为新的阈值  $T_1$ . 经过  $k$  次迭代后,  $|T_{k+1} - T_k|$  足够小时, 此时  $t'' = T_{k+1}$  为最佳阈值.

当阈值为  $T_k$  时, 小于阈值以及大于阈值两部分的期望值求解如下:

$$n_b(T_k) = \frac{\sum_{n(x, x_1) < T_k} n(x, x_1)p(x, x_1)}{\sum_{n(x, x_1) < T_k} p(x, x_1)},$$

$$n_c(T_k) = \frac{\sum_{n(x, x_1) \geq T_k} n(x, x_1)p(x, x_1)}{\sum_{n(x, x_1) \geq T_k} p(x, x_1)}, \quad (10)$$

其中,  $n_b(T_k)$  与  $n_c(T_k)$  分别为小于阈值  $T_k$  以及大于阈值  $T_k$  两部分的期望值,  $p(x, x_1)$  表示  $(x, x_1)$  点处值为  $n(x, x_1)$  的概率

$$p(x, x_1) = \frac{\psi[n(x, x_1)]}{\varphi[n]}, \quad (11)$$

其中,  $\psi[\cdot]$  和  $\varphi[\cdot]$  分别为计算协方差矩阵中协方差系数等于  $n(x, x_1)$  的元素个数和协方差矩阵的整体元素个数.

$$t'' = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{n_b(T_k) + n_c(T_k)}{2}. \quad (12)$$

为了降低迭代次数, 当满足条件  $|T_{k+1} - T_k| < 0.001$  时, 停止迭代计算,  $T_k$  为最佳阈值. 将  $t'' = T_k$  代入 (13) 式中, 实现点  $(x, x_1)$  处噪声干扰项  $n'(x, x_1)$  的构造.

$$n'(x, x_1) = \begin{cases} n(x, x_1) \times \delta_{\max}^2, & n(x, x_1) \leq t'', \\ 0, & n(x, x_1) > t''. \end{cases} \quad (13)$$

通过 (13) 式, 可以将相关噪声从协方差矩阵  $\text{COV}(\Phi)$  中分离出来, 实现噪声干扰项的构造. 因此 (4) 式重新定义为

$$IDGI_{\text{At}}^{(s)}(x) = \Delta G^{(2)}(x) - \sum_{x_1 \neq x} n'(x, x_1) \times IDGI_{\text{At}}^{(s-1)}(x_1), \quad (14)$$

其中,  $IDGI_{\text{At}}^{(s-1)}(x)$  为上次迭代得到的 0—1 归一化后的目标透射系数, 但是对于一个透射目标, 透光部分像素点为 1, 不透光的部分为 0. 而  $IDGI_{\text{AT}}^{(s-1)}(x)$  除了 0 或 1 之外, 还会存在 0—1 之间的像素值, 我们认为这是影响迭代降噪效果另一个因素, 因此在每次迭代前, 利用本文的最佳阈值方法对  $IDGI_{\text{At}}^{(s-1)}(x)$  进行二值化, 得到的  $IDGI_{\text{AT}}^{(s-1)}(x)$  可更接近目标透射系数, IDGI-AT 方法定义如下:

$$IDGI_{\text{AT}}^{(s)}(x) = \Delta G^{(2)}(x) - \sum_{x_1 \neq x} n'(x, x_1) \times IDGI_{\text{AT}}^{(s-1)}(x_1). \quad (15)$$

为了验证本文提出方法的有效性, 在 5400 次仿真测量次数下, 采用不同重构方法对二值图像“Z”进行重构, 归一化结果如图 2 所示.

图 2 (b)—(e) 分别对应 GI, DGI, IDGI 以及 IDGI-At 方法的重构图像. 如果直接设  $t' = 0.5$ , 在视觉上, 基于 IDGI-At 的重构图像分辨率要好于 IDGI 方法, 这说明本文提出的阈值方法对于相关噪声干扰项的选取是有效的. 正如图 2 (f) 所示, IDGI-AT 的重构图像的背景噪声相对于 IDGI-At 被进一步去除, 这说明对于数字掩膜目标, 透光部分的像素点对应 1, 不透光部分像素点对应 0, 对每次迭代初值进行二值化, 可更接近原始目标的透射系数, 这是重构图像背景噪声被进一步移除的根本原因. 为了更好地对比成像效果, 将采用峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 衡量重构图像质量, 其定义如下:

$$PSNR = 10 \lg \left( \frac{MAX_I^2}{MSE} \right), \quad (16)$$

其中,  $MAX_I$  表示图像颜色的最大数值, 8 位采样点表示 255.  $MSE$  为原始目标图像与重构目标图像的均方误差.

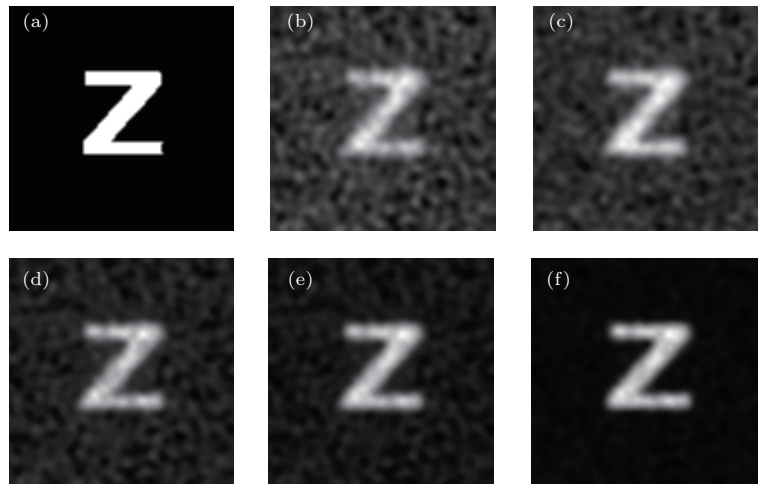


图 2 目标字母“Z”的仿真结果对比 (a) 原始目标; (b) GI 的重构图像,  $PSNR = 10.72$  dB; (c) DGI 的重构图像,  $PSNR = 13.54$  dB; (d)  $t' = 0.5$  时, IDGI 的重构图像,  $PSNR = 15.44$  dB; (e) IDGI-At 的重构图像,  $PSNR = 16.92$  dB; (f) IDGI-AT 的重构图像,  $PSNR = 19.0227$  dB

Fig. 2. Simulation demonstration of reconstruction results for letter “Z”: (a) Original object; (b) GI reconstruction image,  $PSNR = 10.72$  dB; (c) DGI reconstruction image,  $PSNR = 13.54$  dB; (d)  $t' = 0.5$ , IDGI reconstruction image,  $PSNR = 15.44$  dB; (e) IDGI-At reconstruction image,  $PSNR = 16.92$  dB; (f) IDGI-AT reconstruction image,  $PSNR = 19.0227$  dB.

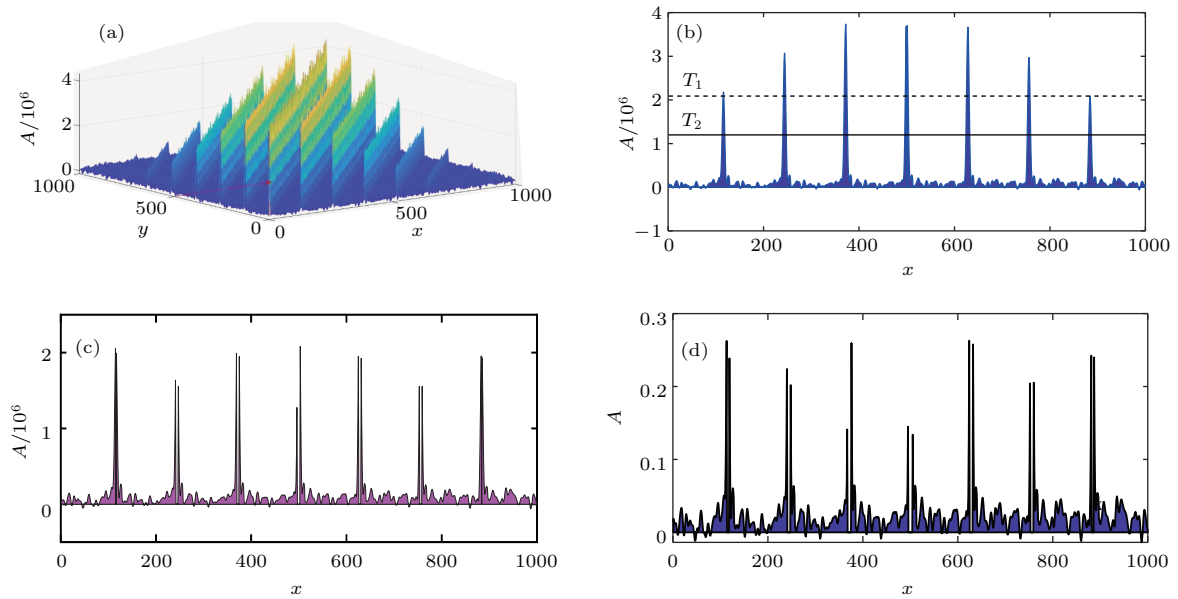


图3 不同阈值方法下噪声干扰项构造 (a) 矩阵  $\Phi'_c$  部分三维图,  $x$  与  $y$  分别表示矩阵  $\Phi'_c$  的横坐标以及纵坐标,  $A$  表示  $\Phi'_c$  的幅值; (b) 矩阵  $\Phi'_c$  的部分截面图,  $y = 500, x = 1, 2, \dots, 1000$ ; (c)  $T_1 = t$ , 小于阈值  $T_1$  的截面图; (d)  $T_2 = t'' \times \delta_{\max}^2$ , 小于阈值  $T_2$  的截面图

Fig. 3. Noise interference construction based on different thresholds: (a) Calculated results for the part region of matrix  $\Phi'_c$ . The  $x$  and  $y$  represent the row and column coordinate respectively. The  $A$  denotes the amplitude of  $\Phi'_c$ ; (b) the partial sectional view of the matrix  $\Phi'_c$ ,  $y = 500, x = 1, 2, \dots, 1000$ ; (c)  $T_1 = t$ , corresponding to the part less than  $T_1$  in (b); (d)  $T_2 = t'' \times \delta_{\max}^2$ , corresponding to the part less than  $T_2$  in (b).

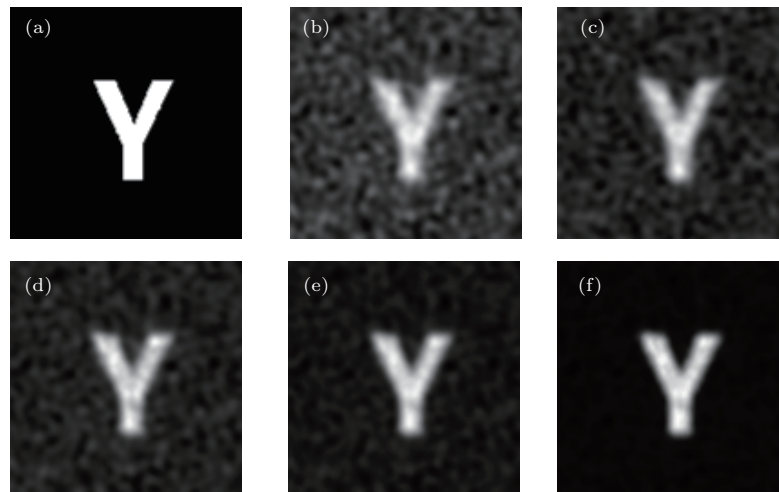


图4 目标字母“Y”的仿真结果对比 (a) 原始目标; (b) GI的重构图像,  $PSNR = 12.94$  dB; (c) DGI的重构图像,  $PSNR = 15.44$  dB; (d)  $t' = 0.5$  时, IDGI的重构图像,  $PSNR = 16.06$  dB; (e) IDGI-At的重构图像,  $PSNR = 18.07$  dB; (f) IDGI-AT的重构图像,  $PSNR = 20.8274$  dB

Fig. 4. Simulation demonstration of reconstruction results for letter “Y”: (a) Original object; (b) GI reconstruction image,  $PSNR = 12.94$  dB; (c) DGI reconstruction image,  $PSNR = 15.44$  dB; (d)  $t' = 0.5$ , IDGI-At reconstruction image,  $PSNR = 16.06$  dB; (e) IDGI-At reconstruction image,  $PSNR = 18.07$  dB; (f) IDGI-AT reconstruction image,  $PSNR = 20.8274$  dB.

图2(b)—(f)中图像对应的PSNR值分别为10.72, 13.54, 15.44, 16.92以及19.0227 dB. IDGI-At重构图像的PSNR值高出阈值为0.5的IDGI方法1.48 dB, 同时, IDGI-AT重构图像PSNR值要高出IDGI-At方案2.1027 dB.

图3为不同阈值方法下噪声干扰项构造, 沿着图3(a)的箭头方向, 取矩阵  $\Phi'_c$  的截面图, 如图3(b)所示, 图3(c)对应图3(b)中小于虚线的部分, 图3(d)对应图3(b)中小于实线的部分. 正如图2(d)和图2(e)所示, IDGI-At重构图像的PSNR

值要高于 IDGI 方法, 主要原因是采用的自适应阈值方法在噪声干扰项构造过程中, 有效地去除了  $\{\delta(x, x_1)\}$  值较大的部分, 因此构造的噪声项更接近于 GI 中的噪声项, 通过迭代消去有效地移除重构图像背景噪声.

为了证明本方法对不同目标的有效性, 下面更换重构目标, 对二值图像“Y”进行仿真, 基于不同方法的重构图像结果如图 4 所示.

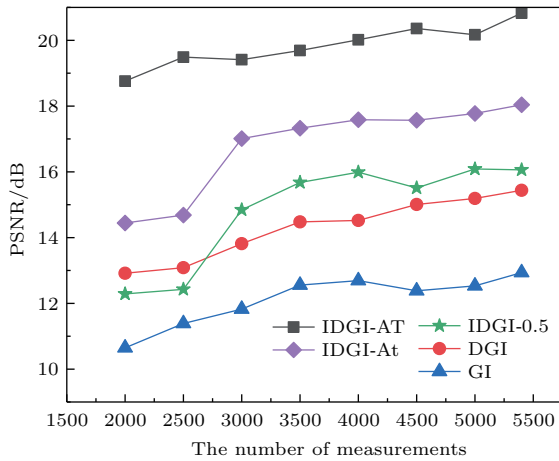


图5 不同测量次数下重构图像的 PSNR 值拟合曲线对比 (黑色带方角形的实线代表 IDGI-AT 的 PSNR 值拟合曲线, 紫色带菱形的实线代表 IDGI-At 的 PSNR 值拟合曲线, 绿色带星形的实线代表 IDGI-0.5 的 PSNR 值拟合曲线, 红色带圆形的实线以及蓝色带三角形的实线分别代表 DGI 以及 GI 重构图像 PSNR 值拟合曲线)

Fig. 5. The PSNRs of GI, DGI, IDGI-0.5, IDGI-At and IDGI-AT for different number of measurements. Black solid curve with squares shows IDGI-AT reconstruction results. Purple solid curve with diamonds indicates IDGI-At reconstruction results. Green solid curve with stars shows IDGI-0.5 reconstruction results. Red solid curve with rings and blue solid curve with triangles correspond to DGI and GI reconstruction images respectively.

如图 4 所示, 在 5400 次测量次数下, 基于 IDGI-At 方法重构出的图像较阈值为 0.5 的 IDGI 方法具有更好的清晰度, 图像的背景噪声被进一步去除, 基于 GI, DGI, IDGI 以及 IDGI-At 方法的重构结果的 PSNR 值分别为 12.94, 15.44, 16.06 以及 18.07 dB. IDGI-At 方法相对于 DGI 方法提高 2.63 dB, 较 IDGI 方法提高 2.01 dB. 正如图 4 展示的结果, IDGI-AT 重构图像的背景噪声明显被去除, 相对于 IDGI-At 方法, PSNR 值提高 2.7574 dB. 为了分析本文提出方法的可靠性, 下面对不同测量次数 (2000—5400) 下 GI, DGI, IDGI-0.5, IDGI-At 以及 IDGI-AT 五种成像方法重构图像的 PSNR 值

进行定量比较, 结果如图 5 所示.

如图 5 所示, 在 2000—5400 次测量次数下, IDGI-AT 方法要好于 IDGI-At, IDGI-0.5, DGI 以及 GI 方法. 如 IDGI-0.5 在低测量次数 ( $M = 2500$ ) 时, 成像质量较 DGI 变差, 而 IDGI-At 较 DGI 以及 IDGI-0.5 提高明显. 而 IDGI-AT ( $M = 2000$ ) 重构图像的 PSNR 值要明显高于 IDGI-At ( $M = 5400$ ), 基于 IDGI-AT 方法重构图像的 PSNR 值为 18.76 dB, 而 IDGI-At 重构图像的 PSNR 值为 18.04 dB. 这些定量的仿真结果表明, IDGI-AT 的 PSNR 值有所提升. 虽然本文方法在阈值计算过程中可能消耗更多时间, 但是与相关噪声有关的阈值可直接通过散斑场的信息求取. 因此, 在 5400 次测量次数下, 实际成像时间仅高出 IDGI 方法约 0.8 s, 多出的微小时间差可以通过提高实验电脑的配置而进一步缩小. 表 1 列出了 DGI, IDGI 以及 IDGI-AT 方法性能的比较.

表 1 三种成像方案的性能比较

Table 1. Performance comparison of three imaging schemes.

方法	PSNR 性能	复杂度	设定阈值	迭代次数	二值化次数
DGI	差	低	不需要	0	0
IDGI-0.5	差	高	需要	3	0
IDGI-AT	好	高	需要	3	2

### 3 实验平台测试以及结果分析

为了验证本文提出方法的实际可行性, 根据图 1 的 GI 实验原理图完成实验系统的搭建. 激光器 (波长  $\lambda = 532$  nm) 发出的光束经过透镜 L2, L3 后, 通过缓慢旋转的毛玻璃形成赝热光源, 赝热光被分束棱镜 50 : 50 分成两束相同的光, 一部分为探测光束, 经过物体调制后, 经过透镜 L1 被物臂上的桶探测接收. 另一部分光为参考光束, 被参考臂上的探测器直接接收. 赝热光源与目标以及与参考探测器之间的距离分别由  $z_1$  以及  $z_2$  表示, 这里  $z_1 = z_2 = 200$  mm.  $f$  表示透镜的焦距,  $f = 150$  mm. 参考探测器采用的 CCD (Stingray F-504, AVT, Germany) 分辨率约为  $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ . 因为对 CCD 采集的光强度分布进行求和可获得总光强度, 所以实验中采用

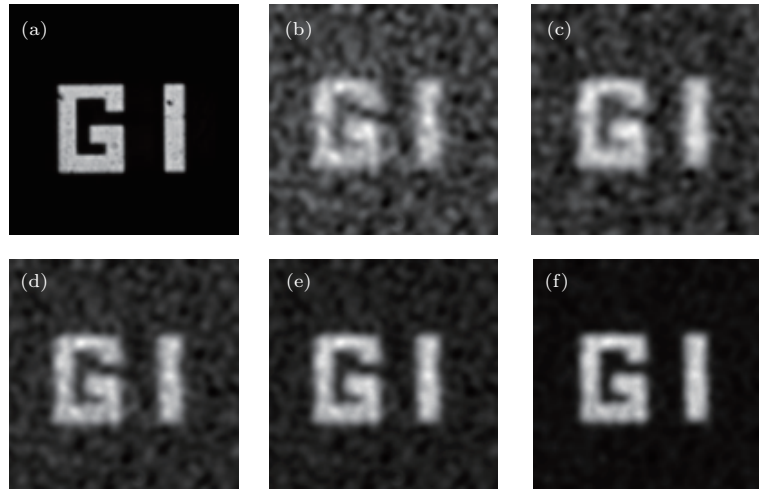


图6 目标“GI”实验结果对比 (a) 原始目标; (b) GI 方法的重构图像,  $PSNR = 11.54$  dB; (c) DGI 的重构图像,  $PSNR = 13.09$  dB; (d)  $t' = 0.5$  时, IDGI 的重构图像,  $PSNR = 14.24$  dB; (e) IDGI-At 的重构图像,  $PSNR = 15.37$  dB; (f) IDGI-AT 的重构图像,  $PSNR = 17.0783$  dB

Fig. 6. Experimental demonstration of reconstruction results for letter “GI” object: (a) Original object; (b) GI reconstruction image,  $PSNR = 11.54$  dB; (c) DGI reconstruction image,  $PSNR = 13.09$  dB; (d)  $t' = 0.5$ , IDGI reconstruction image,  $PSNR = 14.24$  dB; (e) IDGI-At reconstruction image,  $PSNR = 15.37$  dB; (f) IDGI-AT reconstruction image,  $PSNR = 17.0783$  dB.

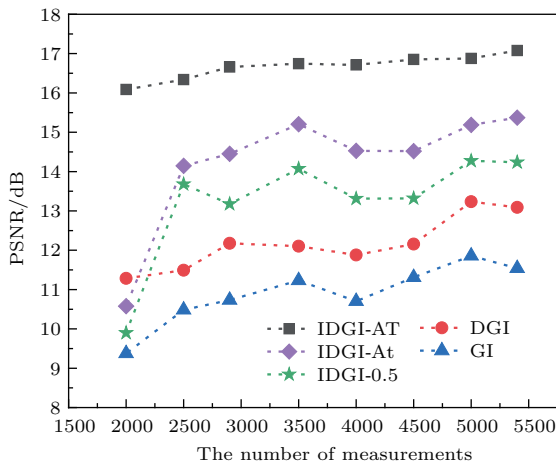


图7 不同测量次数下重构图像的PSNR值曲线拟合结果(黑色带方形的虚线代表IDGI-AT的PSNR值拟合曲线,紫色带菱形的虚线代表IDGI-At的PSNR值拟合曲线,绿色带星形的虚线代表IDGI-0.5的PSNR值拟合曲线,红色带圆形的点线以及蓝色带三角形的虚线分别代表DGI以及GI重构图像PSNR值拟合曲线)

Fig. 7. The PSNR of GI, DGI, IDGI-0.5, IDGI-At and IDGI-AT for different number of measurements. Black dashed curve with squares represents IDGI-AT reconstruction results. Purple dashed curve with diamonds indicates IDGI-At reconstruction results. Green dashed curve with stars shows IDGI-0.5 reconstruction results. Red dashed curve with rings and blue dashed with triangles correspond to the DGI and GI reconstruction results.

等同的CCD代替桶探测器. 成像目标“GI”大小为  $128 \times 128$  pixels. 在本次实验中, 用于图像重构的

计算机为华硕台式电脑(CPU: Intel core is i7-7700, 3.60 GHz, 16 GB), 总测量次数为5400次, 图6为不同方法下目标“GI”的重构结果对比.

如图6所示, 实验结果与理论的仿真结果一致, 在视觉上, IDGI-At的重构图像要好于GI, DGI以及IDGI方法, 基于IDGI-At的重构图像的背景噪声在一定程度上被去除. 在5400次测量次数下, IDGI-At方法重构图像的PSNR值为15.37 dB, DGI的PSNR值为13.09 dB, IDGI-At的PSNR值较DGI提高2.28 dB, 相对于GI提高3.83 dB. 同时, IDGI-AT的PSNR值可达17.0783 dB, 与视觉观察效果一致, 与其他几种成像方法相比, 重构图像的背景噪声被明显抑制.

图7给出了2000—5400次测量次数下, GI, DGI, IDGI-0.5, IDGI-At以及IDGI-AT五种重构方法的PSNR值曲线拟合结果. 本文提出的方法在相同测量次数下, 明显高出GI, DGI, IDGI-0.5以及IDGI-At方法图像的PSNR值, 随着测量次数的增加, PSNR值逐渐提高.

## 4 结 论

综上所述, 本文在IDGI的基础上, 提出基于最佳阈值的IDGI方案. 采用最佳阈值的方法, 在不需要目标先验信息的前提下, 找到与噪声干扰项有



关的最佳阈值, 在迭代降噪方法的基础上, 将每次迭代初值进行二值化, 再进行迭代降噪, 经过三次迭代后, 可获得高质量重构图像. 仿真以及实验结果表明, 本文提出的方法是可行的, 相对于GI, DGI以及IDGI方法, IDGI-AT重构图像具有更高的分辨率以及PSNR值. 但本文只对二值图像进行仿真以及实验验证, 对于灰度图像实现迭代降噪GI方法将会是我们未来的研究任务.

## 参考文献

- [1] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, Lagendijk A, Vos W L, Mosk A P 2012 *Nature* **491** 232
- [2] Zhao C, Gong W, Chen M, Li E, Wang H, Xu W, Han S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 141123
- [3] Zhao S, Wang L, Liang W, Cheng W, Gong L 2015 *Opt. Commun.* **353** 90
- [4] Li S, Yao X R, Yu W K, Wu L A, Zhai G J 2013 *Opt. Lett.* **38** 2144
- [5] Le M, Wang G, Zheng H, Liu J, Zhou Y, Xu Z 2017 *Opt. Express* **25** 22859
- [6] Ren H, Zhao S, Gruska J 2018 *Opt. Express* **26** 550
- [7] Brown R H, Twiss R Q 1956 *Nature* **177** 27
- [8] Klyshko D N 1988 *Sov. Phys. JETP* **67** 1131
- [9] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V 1995 *Phys. Rev. A* **52** R3429
- [10] Bai Y, Han S 2009 *J. Mod. Opt.* **56** 851
- [11] Zerom P, Shi Z, O'Sullivan M N, Chan K W C, Krogstad M, Shapiro J H, Boyd R W 2012 *Phys. Rev. A* **86** 063817
- [12] Luo K, Huang B, Zheng W, Wu L 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 074216
- [13] Yuan S, Liu X, Zhou X, Li Z, Yang Y 2016 *J. Opt.* **45** 92
- [14] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, Gatti A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 253603
- [15] Sun B, Welsh S S, Edgar M P, Shapiro J H, Padgett M J 2012 *Opt. Express* **20** 16892
- [16] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 131110
- [17] Bai X, Li Y Q, Zhao S M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044209 (in Chinese) [白旭, 李永强, 赵生妹 2013 物理学报 **62** 044209]
- [18] Zhao S, Zhuang P 2014 *Chin. Phys. B* **23** 054203
- [19] Zhou C, Huang H Y, Liu B, Song L J 2016 *Acta Opt. Sin.* **9** 0911001 (in Chinese) [周成, 黄贺艳, 刘兵, 宋立军 2016 光学学报 **9** 0911001]
- [20] Huo Y, He H, Chen F 2016 *Appl. Opt.* **55** 3356
- [21] Zhang C, Guo S, Cao J, Guan J, Gao F 2014 *Opt. Express* **22** 30063
- [22] Gong W 2015 *Photon. Res.* **3** 234
- [23] Yao X R, Yu W K, Liu X F, Li L Z, Li M F, Wu L A, Zhai G J 2014 *Opt. Express* **22** 24268
- [24] Zhang H W, Guo S X, Zhang C, Yang C, Cao J S, Gao F L 2017 *Acta Photon. Sin.* **46** 0210001 (in Chinese) [张红伟, 郭树旭, 张驰, 羊超, 曹军胜, 郜峰利 2017 光子学报 **46** 0210001]
- [25] Li G, Yang Z, Zhao Y, Yan R, Liu X, Liu B 2017 *Laser Phys. Lett.* **14** 025207
- [26] Li G, Yang Z, Yan R, Zhang A, Wu L A, Qu S 2018 *Optik* **161** 20
- [27] Yang C, Wang C, Guan J, Zhang C, Guo S, Gong W, Gao F 2016 *Photon. Res.* **4** 281

# Iterative denoising of ghost imaging based on adaptive threshold method\*

Zhou Yang<sup>1)</sup> Zhang Hong-Wei<sup>1)</sup> Zhong Fei<sup>2)</sup> Guo Shu-Xu<sup>1)†</sup>

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

2) (School of Electrical Engineering and Information Technology, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

( Received 27 June 2018; revised manuscript received 29 August 2018 )

## Abstract

Ghost imaging (GI) is an important technique in the fields of quantum imaging and classical optical imaging, and it can solve the problems which are difficult to solve by the traditional imaging techniques in the optically harsh environments. In this paper, we present the iterative denoising of GI based on an adaptive threshold method. This method is abbreviated as IDGI-AT, which takes the advantages of adaptive threshold, differential, binarization and iterative operation method, and can enhance image quality in GI. In addition, this method can reduce the number of measurements. As is well known, the enormous number of measurements and poor reconstruction quality are obstacles to the engineering application of GI. The correlation noise leads to low signal-to-noise ratio and low imaging efficiency in GI as well. Therefore, we establish a denoising model, which can reduce correlation noise and improve reconstruction quality. We first analyze the iterative denoising of ghost imaging (IDGI) theory, and use the adaptive threshold technique to calculate the ideal threshold associated with the correlation noise. It should be noted that the threshold can be obtained by this method under the condition without requiring prior knowledge of the object. Afterwards, we can construct the correlation noise in this denoising model. In the IDGI, the differential ghost imaging (DGI) image is taken as the initial iteration value. We use the adaptive threshold method, which is different from IDGI, to binarize the initial value of each iteration to make it closer to the original object's transmission coefficient. After three iterations, we can obtain a higher-quality reconstruction image. In order to demonstrate that the IDGI-AT is available, a GI experimental system with a pseudo-thermal light source is set up. The considerable simulation and experimental results show the advantage of our scheme in terms of removing reconstruction image background noise. Especially, the visual effects and peak signal-to-noise ratio values are improved in comparison with those from the traditional GI, DGI and IDGI. Besides, we demonstrate the role of binarization in our scheme. For a binary object, the iterative value binarization can achieve better image quality than that in the case without binarizing the iterative initial value. Therefore, this novel method is likely to provide an alternative mean for GI and further pave the way for the application fields of GI, such as lidar, biomedical engineering, etc.

**Keywords:** ghost imaging, adaptive threshold, iterative denoising, image reconstruction

**PACS:** 42.30.Va, 42.30.Wb

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181240

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61627823).

† Corresponding author. E-mail: [guosx@jlu.edu.cn](mailto:guosx@jlu.edu.cn)