

高阶差值筛选鬼成像方案研究

陈 超 赵生妹

(南京邮电大学信号处理与传输研究院, 江苏 南京 210003)

摘要 鬼成像提供了一种运用常规手段难以获得清晰图像的方法,能够解决一些常规成像技术不易解决的问题,是近些年来量子光学领域的前沿和热点之一。提出了一种基于少量数据预处理的差值筛选鬼成像恢复重建方法。该方法利用闲置光路测得的强度值和桶探测器测得的强度值的差值作为筛选门限,并且只选取少量差值进行预处理而无需对所有差值求平均得到筛选门限。将该方法应用于高阶鬼成像方案,分析高阶差值筛选鬼成像方案的可见度、峰值信噪比和阶数 N 的关系。研究结果表明,该方案可获得与对应鬼成像性能相当的成像质量,但重建时间明显少于对应鬼成像方案。随着阶数 N 的增加,成像可见度得到提高;当 N 足够大时理论上可见度可以接近 1。同时可见度的增加将以峰值信噪比为代价,当阶数 N 由 2 阶增加到 9 阶时,图像的峰值信噪比下降了 26.3%。

关键词 成像系统;鬼成像;对应鬼成像;高阶;可见度

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0611002

Study on High Order Difference Sifted Ghost Imaging Scheme

Chen Chao Zhao Shengmei

(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract Ghost imaging offers a great potentiality with respect to conventional imaging for obtaining imaging of objects which are located in optically harsh or noisy environment. It can solve the problems which are difficult by conventional techniques. Recently, it has become one of the hot topics in quantum optics. A novel reconstruction algorithm using a small amount of data preprocessing difference is proposed. The sifted idle optical measurements are selected by the difference between the sum of reconstruction algorithm using a small amount of data preprocessing difference. The sifted idle optical measurements are selected by the difference between the sum of charge coupled device (CCD) measurements and bucket detector measurements with a small amount of data preprocessing. The relationship among the visibility, peak signal noise ratio, and the number of high-order are analyzed by using the reconstruction algorithm to the high-order ghost imaging scheme in the high-order ghost imaging system. The numerical simulation results show that the images reconstructed by our algorithm are as good as those from correspondence ghost imaging (CGI) with less construction time and the visibility is gradually improved against the number of order and the visibility is close to 1 if the order of ghost imaging is large enough. At the same time, the improved visibility is at the cost of the quality of images. The peak signal-to-noise rate of the recovered image is reduced by 26.3% when the number of order of ghost imaging increases from 2 to 9.

Key words imaging systems; correlated imaging; correspondence ghost imaging; high-order; visibility

OCIS codes 110.1650; 110.3010; 010.7295; 030.4280

1 引 言

鬼成像(GI),或者称为关联成像(CI),是近些

年来量子光学领域的前沿和热点^[1-17]。与传统成像不同,鬼成像系统包括两支光路:其中一支光路经

收稿日期: 2013-11-06; **收到修改稿日期**: 2014-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61271238)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123223110003)、江苏省高校自然科学基金重大项目(11KJA510002)、固体微结构物理国家重点实验室开放课题(M25020, M25022)、江苏高校优势学科建设工程项目、图像处理与图像通信江苏省重点实验室资助项目

作者简介: 陈 超(1988—),男,硕士研究生,主要从事热光源关联成像方面的研究。E-mail: a793544531@163.com

导师简介: 赵生妹(1968—),女,博士,教授,主要从事量子信息技术和无线通信与信号处理技术方面的研究。

E-mail: zhaosm@njupt.edu.cn

过待测物体,由桶探测器接收(称为信号光路);另一支光路由具有空间分辨率的点探测器接收(称为闲置光路),通过两个支路的符合测量得到物体的信息。作为一种新型的成像技术,现得到了广泛的关注^[18-24]。

鬼成像开始于 20 世纪 80 年代。根据自发参量下转换光子对的纠缠行为,Klyshko 等^[2]提出了鬼成像方案。1995 年,Pittman 等^[1]利用自发参量下转换产生的纠缠光子对,完成了基于量子纠缠的鬼成像实验。人们通过理论证明和实验验证发现热光源也能实现鬼成像^[3-7],其中赝热光源是一种重要形式。如文献[8]利用实验研究了赝热光源的相关性质,文献[9]给出了一种由稀疏阵独立子光源产生赝热光源、实现稀疏约束非线性算法的强度关联成像方法。文献[10-11]研究了热光源的强度关联性以及强度涨落对于鬼成像的影响。文献[12]讨论了基于强度波动函数的热光源鬼成像可见度的影响因素。在此基础上,文献[15,17,19]分析了高阶热光源鬼成像及反射型物体的高阶鬼成像的性能,其中文献[17]从理论和实验上验证了可通过增加鬼函数的阶数提高关联成像的可见度。不仅如此,文献[20]还研究了多种频率热光源的高阶鬼成像相关性质。特别是,2012 年 Lu 等^[25]提出了一种新型赝热光源鬼成像图像恢复方案,即对应鬼成像方案(CGI)。方案认为所要恢复的成像信息可以通过部分闲置光路所获得的光场分布测量值来恢复,而无

需计算两支光路的关联系数;其关键在于采用总均值为阈值将成像信息从闲置光路获得的光场分布测量值中筛选出来。总均值筛选门限的设置需在全部测量完成后方可进行。

尽管对应鬼成像方案最后可以用一半的测量值恢复目标物体的像信息,但是恢复过程必须在全部测量后进行。本文提出了基于少量数据预处理的差值筛选鬼成像恢复重建方法,它以闲置光路测得强度值和与桶探测器测得值的差值为筛选门限,仅需选取少量差值数据即可进行预处理,无需将所有数据采集完得到均值再进行筛选。论文进一步将这种差值筛选成像恢复方法应用于高阶鬼成像的恢复算法中,获得高阶鬼成像相关性能。通过理论分析和数值仿真方法,验证了高阶差值筛选鬼成像方案研究的可行性,并分析了高阶差值筛选鬼成像方案的可见度、峰值信噪比等性能。

2 少量数据预处理差值筛选高阶鬼成像方案

图 1 是高阶差值筛选高阶鬼成像实现示意图,其中阶数为 N 。赝热光源发出的光被分光镜组分为 N 束完全一致的光。其中一束光传播 L 距离后透射物体 $T(x)$ 被桶探测器接收,第 i 次桶探测器测得的光强度值为 $I_B(t_i)$, t 表示时刻, t_i 即第 i 次测量的时刻。其余 $N-1$ 束光则分别在自由空间传播 L 距离

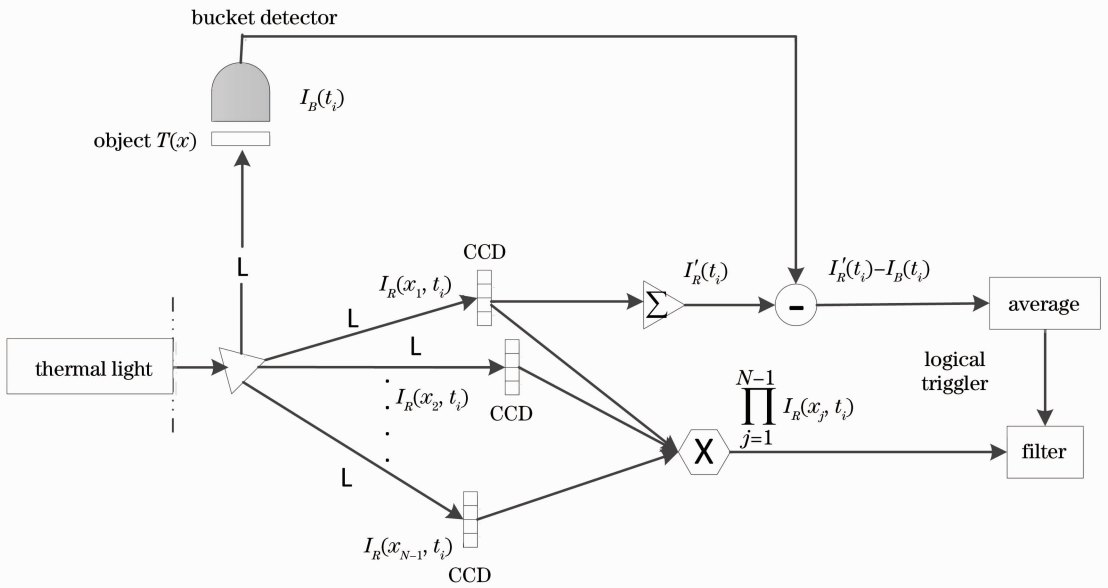


图 1 高阶差值筛选鬼成像实现示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the high order difference sifted ghost imaging

后,由 $N-1$ 个电荷耦合器件(CCD) 分别测得各点光强度值为 $I_R(x_1, t_i), I_R(x_2, t_i), \dots, I_R(x_{N-1}, t_i)$, 这 $N-1$ 个光强度值的乘积为 $\prod_{j=1}^{N-1} I_R(x_j, t_i)$ 。从 $N-1$ 个闲置光路中选取一路(根据关联光学理论^[26] 可知 $N-1$ 个闲置光路之间是等价的) 对其由 CCD 测得的各点光强度值 $I_R(x_R, t_i)$ 求和得 $I'_R(t_i)$ 。利用 $I'_R(t_i)$ 和 $I_B(t_i)$ 的差值 $I'_R(t_i) - I_B(t_i)$ 的均值作为筛选 $\prod_{j=1}^{N-1} I_R(x_j, t_i)$ 的门限值, 通过逻辑判决门滤除不需要的 $\prod_{j=1}^{N-1} I_R(x_j, t_i)$, 从而得到需要的 $\prod_{j=1}^{N-1} I_R(x_j, t_i)$, 进行图像的恢复。

现设透射物体 $T(x)$ 中不透光部分和透光部分的坐标 x 分别属于 X_0 集合和 X_1 集合, 透射物体 $T(x)$ 一般为两灰度物体。根据关联光学理论^[26], 可得

$$I_B(t_i) = \sum_{x \in X_1} I_R(x, t_i) |T(x)|^2, \quad (1)$$

$$I'_R(t_i) = \sum_{x \in X_0+X_1} I_R(x, t_i), \quad (2)$$

则,

$$I'_R(t_i) - I_B(t_i) = \sum_{x \in X_0+X_1} I_R(x, t_i) - \sum_{x \in X_1} I_R(x, t_i) |T(x)|^2 = \sum_{x \in X_0} I_R(x, t_i) |T_-(x)|^2 = I'_B(t_i), \quad (3)$$

式中 $T_-(x)$ 称为负物体, 即原物体中透光部分变为不透光部分, 不透光部分变为透光部分, 则 $T_-(x)$ 的不透光部分和透光部分分别为 X_1 和 X_0 。

设在时刻 t_i 信号光路桶探测器测得的光强度为 $I_B(t_i)$, 闲置光路 CCD 测得光强度为 $I_R(x_R, t_i)$, $I_B(t_i)$ 的均值为 \bar{I}_B , 可得:

$$\bar{I}_R(x_R) = \frac{1}{N} \sum_{\{t_i | i=1, \dots, N\}} I_R(x_R, t_i) = \bar{I}_R, \quad (4)$$

式中 N 为测量次数。由(3)和(4)式可得:

$$\bar{I}'_B = \bar{I}_R \sum_{\{x\}} |T_-(x)|^2, \quad (5)$$

根据文献^[25] 对于一个窄桶探测器可知 $I'_B(t_i) \approx I^+_B$, 其中 $I^+_B \gg \bar{I}'_B$, 可得如下近似:

$$I'_B(t_i) \approx \sum_{\{x | x \in X_0\}} I_R(x, t_i) |T_-(x)|^2, \quad (6)$$

对于服从圆高斯分布的光场复变量 $U(x)$, 其均值为零, 即 $[U(x)] = 0$ 。根据高斯距定理^[27], 光场的空间关联函数满足如下的数学关系:

$$G^{(M, N)}(x_1, x_2, \dots, x_M; y_1, y_2, \dots, y_N) = \sum_n G^{(1, 1)}(x_1, y_{j_1}) G^{(1, 1)}(x_2, y_{j_2}) \dots G^{(1, 1)}(x_M, y_{j_M}), \quad M = N, \quad (7)$$

式中 \sum_n 是表示对所有的 $M!$ 种排列 (j_1, j_2, \dots, j_M) 求和。

由(7)式可得:

$$\langle I^n(x) \rangle = n! \langle I(x) \rangle^n, \quad (8)$$

$$\langle I(x_1) I^{N-1}(x_2) \rangle = (N-1)! \langle I(x_1) \rangle \langle I(x_2) \rangle^{N-1} + (N-1)! \times (N-1) \langle I(x_2) \rangle^{N-2} |\langle E^*(x_1) E(x_2) \rangle|^2, \quad (9)$$

由(3)、(6)、(8)和(9)式可得:

$$G^N_+(x) \equiv \frac{1}{N^+_B} \sum_{\{t_i | I'_B(t_i) \approx I^+_B\}} I'_B(t_i) I_R^{N-1}(x, t_i) \approx \frac{I^+_B}{N^+_B} \sum_{\{t_i | I'_B(t_i) \approx I^+_B\}} I_R^{N-1}(x, t_i) \equiv \frac{I^+_B}{N^+_B} [I^{N-1}(x)]^+, \quad (10)$$

$$G^N_+(x) \approx (N-1)! \bar{I}'_B (\bar{I}_R)^{N-1} + (N-1)! \times (N-1) (\bar{I}_R)^{N-2} \Delta_R^2 |T_-(x)|^2, \quad (11)$$

$$\text{式中 } \Delta_R^2 = \frac{1}{N^+_B} \sum_{\{t_i | I'_B(t_i) \approx I^+_B\}} [I_R(x, t_i) - \bar{I}_R]^2.$$

$$\text{式中 } C_b = \frac{\bar{I}'_B \bar{I}_R}{\Delta_R^2}.$$

对于 $x \in X_0$ 由(10)和(11)式可得:

$$[I^{N-1}(x)]^+ \propto \frac{C_b}{N-1} + |T_-(x)|^2, \quad (12)$$

同理, 对于 $x \in X_1$ 有:

$$[I^{N-1}(x)]^+ \propto \frac{C_b}{N-1} + 0, \quad (13)$$

所以由 $[I^{N-1}(x)]^+$ 可以恢复出 N 阶负物体, 由

$[I^{N-1}(x)]^-$ 可以恢复出 N 阶正物体。

当阶数为 2 时,对于 $x \in X_0$ 可得:

$$I^+(x) \propto C_b + |T_-(x)|^2, \quad (14)$$

式中

$$C_b = \frac{\bar{I}_B \bar{I}_R}{\Delta_R^2}, \Delta_R^2 = \frac{1}{N_B^+} \sum_{\{t_i | I'_B(t_i) \approx I_B^+(t_i)\}} [I_R(x, t_i) - \bar{I}_R]^2.$$

同理,对于 $x \in X_1$ 有:

$$I^+(x) \propto C_b + 0, \quad (15)$$

所以由 $I^+(x)$ 可以恢复出负物体,由 $I^-(x)$ 可以恢复出正物体,此时的筛选门限值为 $I'_B(t_i)$ 的均值 \bar{I}'_B 。

选取数据量为 N 的 $I'_R(t_i)$ 和 $I_B(t_i)$ 的差值 $I'_R(t_i) - I_B(t_i)$ 的前 $N/100$ 个数据进行预处理,得出筛选门限值。将 $N/100$ 个数据均匀划分为四个部分,并且这四个部分的最大值和最小值分别为 $M1$ 、 $m1$ 、 $M2$ 、 $m2$ 、 $M3$ 、 $m3$ 和 $M4$ 、 $m4$ 。设 N 次采样对应的差值的最大值、最小值和均值分别为 M_{AX} 、 M_{IN} 和 \bar{I}'_B 。由文献[25]可知 $I'_B(t_i)$ 是以 \bar{I}'_B 为中心呈现高斯分布,所以对于其中某一次测量数据大于等于或小于等于均值的概率相等均为 $1/2$,则 $M1 < \bar{I}'_B$ 的概率约为 $(1/2)^{N/400} \approx 0$ (N 取 3000)。又可知 $M1 < M_{AX}$ ($M1 = M_{AX}$ 的概率约为 0),则 $M1$ 满足如下关系式:

$$\bar{I}'_B \leq M1 < M_{AX}, \quad (16)$$

同理可得 $m1$ 、 $M2$ 、 $m2$ 、 $M3$ 、 $m3$ 和 $M4$ 、 $m4$ 的范围。整理可得:

$$M_{IN} < m1 \leq \bar{I}'_B \leq M1 < M_{AX}, \quad (17)$$

$$M_{IN} < m2 \leq \bar{I}'_B \leq M2 < M_{AX}, \quad (18)$$

$$M_{IN} < m3 \leq \bar{I}'_B \leq M3 < M_{AX}, \quad (19)$$

$$M_{IN} < m4 \leq \bar{I}'_B \leq M4 < M_{AX}, \quad (20)$$

从而将 $\{t_i\}$ 分为两部分:

$$t_- = \{t_i | I'_B(t_i) < k_-\}, \quad (21)$$

$$t_+ = \{t_i | I'_B(t_i) \geq k_+\}, \quad (22)$$

式中 k_- 和 k_+ 分别为

$$k_- = \max\{m1, m2, m3, m4\}, \quad (23)$$

$$k_+ = \min\{M1, M2, M3, M4\}, \quad (24)$$

式中 $\max\{\cdot\}$ 和 $\min\{\cdot\}$ 分别为取最大值和最小值函数。

由(17)~(20)式可知:

$$M_{IN} < k_- \leq \bar{I}'_B, \quad (25)$$

$$\bar{I}'_B \leq k_+ < M_{AX}, \quad (26)$$

由文献[25]可知通过(21)和(22)式筛选出的对应 $I_R(x, t_i)$ 可以恢复出物体信息,从而只利用少量数据预处理得到筛选门限无需等采样结束求出均值作为筛选门限,获得物体的成像数据,节约了恢复时

间。

二阶和 N 阶 ($N > 2$) 的可见度分别为 V^2 和 V^N :

$$V^2 = \frac{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}{V_{\max}^2 + V_{\min}^2} = \frac{1}{2C_b + 1}, \quad (27)$$

$$V^N = \frac{V_{\max}^N - V_{\min}^N}{V_{\max}^N + V_{\min}^N} = \frac{N-1}{2C_b + N-1}, \quad (28)$$

式中 $C_b = \bar{I}'_B \bar{I}_R / \Delta_R^2$ 。

由(27)和(28)式可得:

$$\frac{V^N}{V^2} = \frac{2(N-1)C_b + N-1}{2C_b + N-1}. \quad (29)$$

由于 $N > 2$,所以 $V^N > V^2$,随着阶数 N 的增加可见度 V 不断增加。

3 数值仿真

为了验证所提出的鬼成像方案的有效性,现通过数值仿真方法进行分析。本数值仿真使用的赝热光源是波长 $\lambda = 633$ nm 的高斯光,它是在菲涅尔-惠更斯衍射下得到,所成像的目标物体的尺寸均为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$,采样次数为 3000 次。所有数值计算是在主频为 2 GHz 配置的计算机中完成。

为了更客观准确地说明性能,引入图像信息处理中的均方误差 E_{MS} 和峰值信噪比 R_{PSN} 作为评估参数。对于大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 图像, E_{MS} 的定义为

$$E_{MS} = \frac{\sum_{0 \leq i < M} \sum_{0 \leq j < N} (x_{i,j} - x'_{i,j})^2}{M \times N}, \quad (32)$$

式中 $x_{i,j}$ 和 $x'_{i,j}$ 分别代表原始图像数据和恢复后图像的数据。 R_{PSN} 定义为

$$R_{PSN} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{M_{AX}^2}{E_{MS}} \right), \quad (33)$$

式中 M_{AX} 表示原始图像中的最大灰度值。若图像中的灰度值是采用 B 进制表示,则 M_{AX} 可以表示为: $2^B - 1$ 。一般来讲,图像的峰值信噪比数值越大,图像重建质量越好。

图 2 是预处理的数据量和筛选后的数据量的关系图, D_{op} 表示预处理的数据量, D_{of} 表示筛选后的数据量。预处理的数据量和筛选后的数据量的整体关系是,随着预处理的数据量增加,筛选后的数据量逐渐减少。当预处理的数据量小于 25 时,会由于数据量太少、随机性过大而无法正确进行算法恢复。预处理的数据量为 30 即采样数的百分之一时,筛选后的数据量大约为 550,计算机仿真时间约为 1.027 s;传统对应鬼成像筛选后的数据量约为 1500,计算机仿真时间约为 1.352 s。随着预处理的数据量增加,预

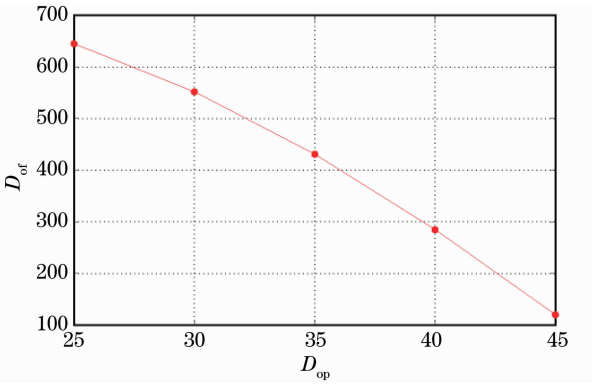


图2 预处理数的数据量 D_{op} 和筛选后的数据量 D_{of} 关系图

Fig. 2 Relationship between preprocessing data D_{op} and sifted data D_{of}

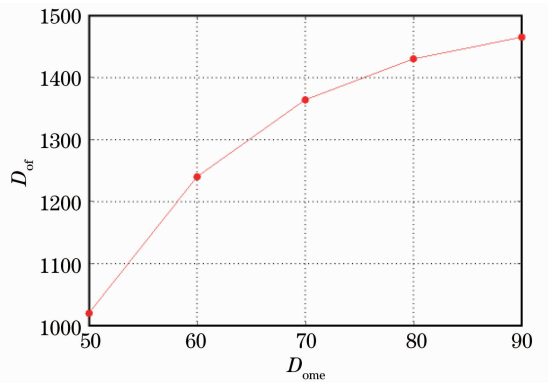


图3 均值预估的数据量 D_{ome} 和筛选后的数据量 D_{of} 关系图

Fig. 3 Relationship between mean estimated data D_{ome} and sifted data D_{of}

处理数据区间越来越大,整个差值数据的较大值或较小值落入这个区间的概率越来越大,从而预处理后得到的负图像和正图像的筛选门限会分别很大和很小,导致筛选后的数据量越来越少。当筛选后的数据量少于 300 时,会由于数据量太少而导致成像质量下降。图 3 是均值预估的数据量和筛选后的数据量关系图, D_{ome} 表示均值预估的数据量, D_{of} 表示筛选后的数据量。当选取的均值预估的数据量从 50 开始逐渐增加时,筛选后的数据量也逐渐增加,最终趋于 1500;此时和传统对应鬼成像筛选后的数据量几乎相同。当预处理的数据量较大时,整个数据的较大值和较小值落入预处理的数据中的概率将会增加,之前的预处理方法会将整个数据的较大值和较小值选取出来作为判决门限,从而导致筛选出的数据量过少而无法清晰成像。此时数据量较大,预处理的数据的统计分布非常接近全体数据的统计分布,可以用预处理的数据的均值来近似代替全体数据的均值。具体方法是将预处理的数据等分为四段,分别求这四段数据的均值,并将求得的四个均值的最小值和最大值分别作为正图像和负图像的筛选门限,这样可以有效的避免正图像的筛选门限大于全体数据的均值和负图像的筛选门限小于全体数据的均值的情况。随着预处理数据的数据量的增加其正态分布性越强,从而越逼近整个数据的统计分布,该方法的误差也会越来越小。

图 4 是目标物体为“中”图时,二阶差值筛选鬼成像方案和三阶差值筛选鬼成像方案。其中,图 4 (a)是目标物体图像,图 4(b)是二阶差值筛选鬼成像图像,图 4(c)是三阶差值筛选鬼成像图像。二阶和三阶差值筛选鬼成像的可见度分别为 0.0476 和

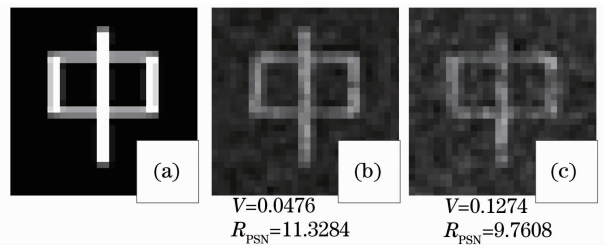


图4 二阶和三阶差值筛选鬼成像图像对比图。(a)目标物体图像;(b)二阶差值筛选鬼成像图像;(c)三阶差值筛选鬼成像图像

Fig. 4 Contrast images for the second-order and the third-order difference sifted ghost imaging. (a) Target object image; (b) second-order difference sifted ghost imaging; (c) third-order difference sifted ghost imaging

0.1274,峰值信噪比分别为 11.3284 和 9.7608。从图中可以发现三阶和二阶差值筛选鬼成像相比,可见度增加,峰值信噪比下降。

图 5 是二阶对应鬼成像和差值筛选鬼成像对比图。其中,图 5(a)为目标物体图像,图 5(b)为对应鬼成像方案获得的正图像,图 5(d)为对应鬼成像方案获得的负图像,图 5(c)为少量数据预处理差值筛选鬼成像方案获得的正图像,图 5(e)少量数据预处理差值筛选鬼成像方案获得的负图像,其中少量数据数是采样次数的百分之一,采样次数 N 为 3000。两种成像方法的正负图像的 E_{MS} 分别为 0.0858、0.0862、0.0736 和 0.0776, R_{PSN} 分别为 10.6615、10.6419、11.3284 和 11.0983。由于光源强度具有随机性,以上数据都是通过对目标物体进行 10 次成像过程取均值得到。研究结果表明,同一种算法的正负图像的 E_{MS} 几乎相同,进行少量数据预处理的差值筛选鬼成像成像性能与传统对应鬼成像成像性

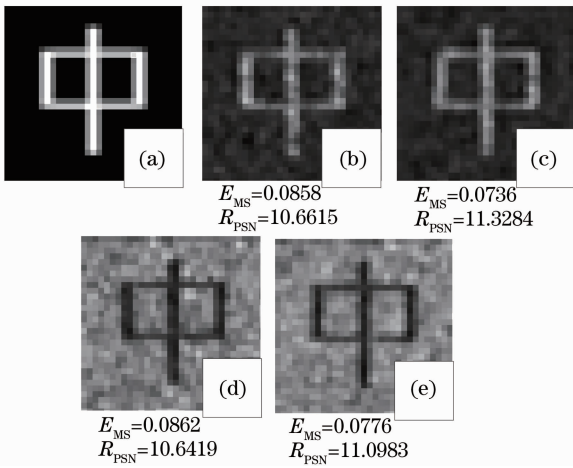


图 5 二阶对应鬼成像和差值筛选鬼成像对比图

Fig. 5 Contrast images for corresponding ghost imaging and difference sifted ghost imaging

能几乎相当,但成像时间明显少于传统对应鬼成像。

进一步分析基于差值筛选的高阶鬼成像的性能,由于同一种成像方法的正负图像性能相当,故仅讨论差值筛选对应鬼成像的高阶正图像成像方法,探讨其性能。仿真的图像是 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的“中”图,采样次数为 3000 次。不同阶数 N 下,预处理和非预处理的可见度 V 曲线图如图 6 所示。

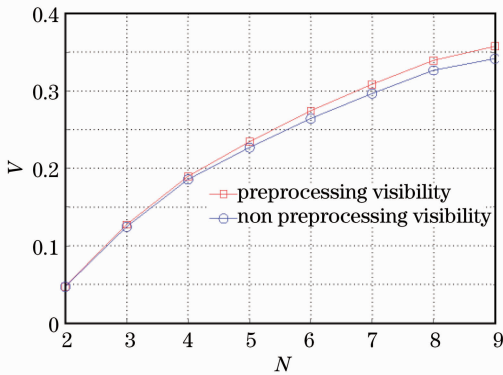


图 6 不同阶数 N 下,预处理和非预处理的可见度曲线图

Fig. 6 Visibility against the order N both for preprocessing and non preprocessing high-order difference sifted ghost imaging scheme

图 6 结果表明随着阶数 N 的不断增加经过预处理方案的可见度 V 和没有经过预处理方案的可见度 V 都随之上升,当阶数 N 相同时经过预处理的可见度 V 略高于没有经过预处理的可见度 V ,当阶数 N 比较大时,两者的可见度可以接近 1。阶数 N 和峰值信噪比 R_{PSN} 的关系如图 7 所示。从图 7 中观察可见,随着阶数 N 的不断加峰值信噪比 R_{PSN} 随之下降,且下降幅度逐渐减小。在鬼成像中,可见度的增加是以牺牲信噪比为代价的,当阶数 N 由 2 阶增

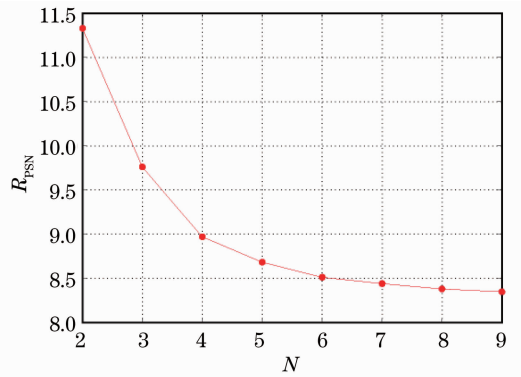


图 7 阶数 N 和峰值信噪比 R_{PSN} 关系图

Fig. 7 R_{PSN} value against the order N for high-order difference sifted ghost imaging scheme

加到 9 阶时,图像的 R_{PSN} 下降了 26.3%。

4 结 论

鬼成像所要恢复的成像信息已经存在于闲置光路所得到的测量值之中,恢复成像的关键在于采用何种方法将成像数据筛选出来。利用闲置光路 CCD 测得的强度值和桶探测器测得的强度值的差值作为筛选门限,利用少量数据的预处理得到筛选门限值,而无需等到所有测量完成后求所有差值的均值。在此基础上,提出了一种基于少量数据预处理的差值筛选高阶鬼成像恢复重建方法。研究表明,基于少量数据预处理的差值筛选鬼成像恢复重建方法可大大节约成像恢复的时间。同时,随着阶数 N 的增加鬼成像的可见度逐渐提高。当阶数 N 足够大时理论上可见度可以接近 1。但是,随着可见度增加 R_{PSN} 会逐渐减小。仅利用部分闲置光路数据就可以进行图像恢复的方法开辟了鬼成像的新思路,将有利于鬼成像的实际应用。

参 考 文 献

- 1 T B Pittman, Y H Shih, A V Sergienko, *et al.*. Experimental tests of Bell's inequalities based on space-time and spin variables [J]. Phys Rev A, 1995, 51(5): 3495-3498.
- 2 D N Klyshko. Combine EPR and two-slit experiment: interference of advanced waves[J]. Phys Lett A, 1988, 132(6): 299-304.
- 3 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.
- 4 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): 183601.
- 5 A Gatti, M Bache, D Magatti, *et al.*. Coherent imaging of a pure phase object with classical incoherent light [J]. Phys Rev A, 2006, 73(5): 053802.
- 6 R Qi, X L Yu, Z B Li, *et al.*. Non-Abelian Josephson effect between two $F = 2$ spinor Bose-Einstein condensates in double

- optical traps[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(18): 185301.
- 7 A C Ji, Q Sun, X C Xie, *et al.*. Josephson effect for photons in two weakly linked microcavities[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(2): 023602.
- 8 Shen Xia, Zhang Minghui, Liu Honglin, *et al.*. Research on the pulsed pseudo-thermal light [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2893–2898.
沈夏, 张明辉, 刘红林, 等. 脉冲式赝热光源的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2893–2898.
- 9 Chen Mingliang, Li Enrong, Han Shensheng, *et al.*. Ghost imaging based on sparse array pseudothermal light system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0503001.
陈明亮, 李恩荣, 韩申生, 等. 基于稀疏阵赝热光系统的强度关联成像研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0503001.
- 10 T Iskhakov, A Allevi, D A Kalashnikov, *et al.*. Intensity correlations of thermal light[J]. *Eur Phys J-Spec Top*, 2011, 199(1): 127–138.
- 11 Liu Xuefeng, Yao Xuri, Wu Ligan, *et al.*. The role of intensity fluctuations in thermal ghost imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 184205.
刘雪峰, 姚旭日, 吴令安, 等. 强度涨落在热光鬼成像中的作用[J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 184205.
- 12 W L G, S S Han. Lens ghost imaging with thermal light; from the far field to the near field [J]. *Phys Lett A*, 2010, 374(36): 3723–3725.
- 13 Y H Zhai, X H Chen, L A Wu, *et al.*. Correlated two-photon imaging with true thermal light[J]. *Phys Rev A*, 2005, 30(18): 2354–2356.
- 14 X H Chen, K H Luo, L A Wu, *et al.*. Lensless ghost imaging with true thermal light[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(5): 695–697.
- 15 K W Chan, N Malcolm, O Sullivan, *et al.*. High-order thermal ghost imaging[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3343–3345.
- 16 Y C Liu, L M Kuang. Theoretical scheme of thermal-light many-ghost imaging by Nth-order intensity correlation[J]. *Phys Rev A*, 2011, 83(5): 053808.
- 17 D Z Cao, J Xiong, K G Wang, *et al.*. Enhancing visibility and resolution in Nth-order intensity correlation of thermal light[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(20): 201102.
- 18 H Li, J H Shi, G H Zeng, *et al.*. Detailed quality analysis of ideal high-order thermal ghost imaging [J]. *Josa A*, 2012, 29(11): 2256–2262.
- 19 Yang He, Zhao Shengmei. Study on high-order reflective ghost imaging with incoherent thermal light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1127002.
杨贺, 赵生妹. 基于反射型物体的高阶非相干热光源关联成像性能研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1127002.
- 20 Q Liu, K H Luo, L A Wu, *et al.*. High-order ghost imaging with N-colour thermal light [J]. *Chin Phys B*, 2010, 19(9): 094211.
- 21 Y Z Zhang, J H Shi, G H Zeng, *et al.*. Imaging through aberrating media by computational ghost imaging with incoherent light[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(1): 011102.
- 22 J Q Sun, H S Li, D S Wen, *et al.*. Computational imaging technology for high-sensitivity space-image acquisition[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(11): 111101.
- 23 X F Liu, M F Li, L A Wu, *et al.*. High-visibility ghost imaging from artificially generated non-Gaussian intensity fluctuations[J]. *AIP Advances*, 2013, 3(5): 052121.
- 24 Chen Jie, Bo Zunwang, Han Shensheng. Sparsity-based ghost imaging with gaussian-amplitude modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0911003.
陈洁, 薄遵望, 韩申生. 高斯振幅调制下基于稀疏性的鬼成像[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0911003
- 25 K H Luo, B Q Huang, L A Wu, *et al.*. Nonlocal imaging by conditional averaging of random reference measurements[J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(7): 074216.
- 26 R J Glouber. The quantum theory of optical coherence[J]. *Phys Rev*, 1963, 130(6): 2529.
- 27 Lü Naiguang. *Fourier Optics*[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1988. 45–46.
吕乃光. *傅里叶光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 45–46.

栏目编辑: 张浩佳