

基于运动轨迹可调式随机相位板的赝热光鬼成像 实验研究

吴楠 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 为了保证采样的独立性,目前基于随机相位板的赝热光鬼成像系统是以每次移动不小于一个激光光斑大小进行相位调制的形式来产生高亮度的赝热光源。通过旋转、平移两台电机控制随机相位板的运动轨迹,搭建了一种运动轨迹可调的随机相位板赝热光鬼成像实验平台。基于差分鬼成像和稀疏约束鬼成像重构算法,从实验角度对比分析了随机相位板的偏移量 Δx 对赝热光鬼成像质量的影响。数值模拟和实验结果均表明,在相同的采样压缩比下,当随机相位板的偏移量 Δx 不大于物面处的散斑大小 Δx_s 时,成像质量随着 Δx 的增大而提高;而当 Δx 大于 Δx_s 时,随着 Δx 的增大,成像质量几乎不变。此外,稀疏约束鬼成像质量优于相同采样数下的差分鬼成像质量。

关键词 成像系统; 相干光学; 鬼成像; 赝热光源; 散斑场; 稀疏约束

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0711005

Experimental Research on Pseudo-Thermal Light Ghost Imaging with Random Phase Plate Based on Variable Motion Trail

Wu Nan Gong Wenlin Han Shensheng

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

Abstract In order to ensure the independence of every sampling, ghost imaging system with repeatable pseudo-thermal light based on random phase plate moves one laser spot in each sampling to produce pseudo-thermal light. By using rotating motor and linear motor to control motion trail of random phase plate, an experimental platform is established. Based on differential ghost imaging linear reconstruction algorithm and nonlinear sparsity constraints reconstruction algorithm, the influence of different offset value Δx of the random phase plate on the quality of ghost imaging is studied researched. The results of the simulation and experimental results demonstrate that in the case of the same compression ratio, when Δx is no more than the speckle size Δx_s , the imaging quality enhances with increasing Δx , and when Δx is larger than Δx_s , the imaging quality almost does not change with increasing Δx . Besides, in the case of the same sampling, the imaging quality by using nonlinear sparsity constraints reconstruction algorithm is better than that by using differential ghost imaging linear reconstruction algorithm.

Key Words imaging systems; coherence optics; ghost imaging; pseudothermal light; speckle field; sparsity constraints

OCIS codes 110.1650; 110.3010; 030.6140; 160.2750

1 引言

强度关联成像,俗称鬼成像(GI),是一种基于光场的涨落特性而获取目标图像信息的非局域凝视成像方

收稿日期: 2015-01-21; 收到修改稿日期: 2015-03-14

基金项目: 国家863计划(2013AA122901)

作者简介: 吴楠(1990-),男,硕士研究生,主要从事关联成像方面的研究。E-mail: wunan7@hotmail.com

导师简介: 韩申生(1960-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事新概念X光成像技术、量子成像和压缩感知关联成像技术等方面的研究。E-mail: sshan@mail.shcnc.ac.cn

*通信联系人。E-mail: gongwl@siom.ac.cn

法,具备高探测灵敏度、高分辨、高图像获取效率以及一定程度上改善大气干扰对成像质量影响的特点^[1-16]。与纠缠光和真实热光相比,赝热光在工程应用中更容易实现,因此近几年来在赝热光鬼成像方面的研究进展相对较大。对于赝热光鬼成像系统,产生赝热光最常用的方法是由 Martienssen 等^[17]提出的,当激光穿越平移加旋转运动的随机相位板(或者空间光调制器)时,随机相位板中百万量级无规分布的细小颗粒将会对激光进行相位调制,从而形成空间涨落的无规散斑场^[2,5,10,18]。为了保证每次采样时赝热光所形成的散斑场完全不同,现有的随机相位板赝热光鬼成像系统以每次的偏移量大于或者等于随机相位板上所辐照的激光光斑大小而实现。这样一来,要想获得 10000 组独立采样,所需随机相位板的直径大小至少在 40 cm(激光光斑为 3.6 mm 时)以上^[18]。在实际应用过程当中,由于受到系统总体尺寸大小的限制,随机相位板的尺寸通常控制在 10 cm 以下,若按照随机相位板的偏移量 Δx 大于或者等于一个激光光斑大小的方式进行采样,独立样本数则无法满足实际应用需求。然而,数值模拟和实验研究发现,当激光光斑所辐照的随机相位板区域内包含的独立相位个数达到一定数量时,即使任意两次采样之间随机相位板的偏移量 Δx 小于一个激光光斑大小,也可以保证两次采样具有很强的独立性。这样一来,在随机相位板尺寸较小的情况下不但可以获得足够多的独立样本数,而且也可以降低随机相位板的旋转速度,从而有利于大幅度提升预置随机相位板赝热光鬼成像系统的预置精度并增强其重复性^[19]。针对实际应用需求,在保证成像结果不受影响的条件下,每次采样时随机相位板的偏移量大小需满足什么条件,是一个尤为重要且值得深入研究的问题。

基于上述问题,本文搭建了一套运动轨迹可调的随机相位板赝热光鬼成像实验平台,通过差分鬼成像(DGI)线性重构算法和稀疏约束鬼成像(GISC)非线性重构算法的对比分析^[11-14],开展了随机相位板的偏移量幅度大小对赝热光鬼成像质量影响的数值模拟和实验研究。确定了在保证成像结果不受影响的条件下,每次采样时随机相位板的最小偏移量值。

2 系统实验装置和图像重建

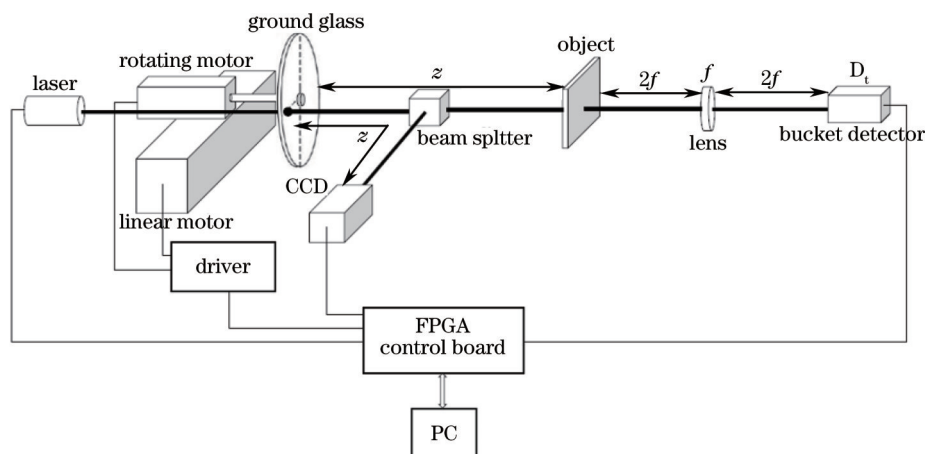


图1 赝热光源鬼成像实验光路图

Fig.1 Experimental setup of pseudo-thermal light ghost imaging

运动轨迹可调的随机相位板赝热光鬼成像实验平台如图 1 所示,激光轰击旋转随机相位板所产生的赝热光源经分束棱镜后分成两条光路——物光路和参考光路。物光路包含待测物体,待测物体的透射光经一个 $2f-2f$ (透镜焦距为 f) 成像系统成像于无空间分辨能力的桶探测器 D_t 上,由该桶探测器记录待测物体透过的总光强;参考光路则通过光场的自由传播直接到达一个高空间分辨能力的电荷耦合器件(CCD)上,由该 CCD 记录与待测物面处相关联的强度分布信息。为了使得随机相位板的运动轨迹可调,实验采用高精度的旋转伺服电机和直线伺服电机对随机相位板进行控制,使得随机相位板的位置、状态等参量容易跟随输入指令的变化进行自动控制。实验中采用脉冲作为指令,可以这样理解:伺服电机每接收到一个脉冲,就会旋转或平移一个脉冲对应的角度或位移;由于伺服电机本身具备发出脉冲的功能,可以实时地反馈电机的状态,这样就实现了位置、速度和力矩的闭环控制。实验平台采用具有 20 位增量式编码器的松下 MSMD012G1V 型旋转伺服电机和雅克贝思 SGL64-AUM2-S-S2 型直线伺服电机,直线伺服电机的编码器采

用 RENISHAW 公司的 RGH22S30D61A 型号。激光的脉冲同步触发、旋转电机和直线电机的二维同步运动、CCD 的曝光时间和数据采集均由自主开发的同步控制器及现场可编程门阵列(FPGA)核心板进行控制,通过计算机(PC)发布指令给 FPGA 核心板,从而达到控制整个实验平台的目的。

鬼成像的成像质量(成像分辨率与信噪比)与光场的涨落特性密切相关,光场的涨落特性通常可以用二阶互相关度 $g^{(2)}$ 进行表征^[11,15],即

$$g^{(2)}(r_1, r_2 = 0) = \frac{\langle I(r_1)I(r_2 = 0) \rangle}{\langle I(r_1) \rangle \langle I(r_2 = 0) \rangle}, \quad (1)$$

在鬼成像系统中,二阶互相关度 $g^{(2)}$ 可以反映鬼成像的空间成像分辨率和信噪比。即:它的半峰全宽大小决定了鬼成像的成像分辨率;而它的峰值大小直接影响到成像信噪比。

对于鬼成像,目前主要采用以下两种图像重构算法:一种是 DGI 线性重构算法^[11-12],另一种是将鬼成像技术与目标的稀疏先验特性结合起来的 GISC 非线性重构算法^[13-15]。

若参考光路上的 CCD 第 s 次测量所记录的二维强度分布为 $I_s(x, y)$, 此时物光路上的桶探测器 D_1 所记录的对应强度值为 B_s , 经过 M 次测量后,待测物体的图像可以通过以下的 DGI 重构算法而获得^[11-12],即

$$T_{\text{DGI}}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M (B_s - \gamma B'_s) I_s(x, y), \quad (2)$$

式中 $B'_s = \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} I_s(x, y)$, $\gamma = \frac{\sum_{s=1}^M B_s}{\sum_{s=1}^M B'_s}$, N_x 、 N_y 分别为 $I_s(x, y)$ 在 CCD 的 x 和 y 方向所占的像元总数。

将待测物体的稀疏先验特性引入鬼成像的图像重建,已有的大量实验证明:在采样数远低于 Nyquist 采样率的情况下, GISC 算法仍可以稳定地重建待测物体的图像^[13-16, 20-21]。在 GISC 的框架下,将参考光路上的 CCD 每一次记录的二维强度分布 $I_s(x, y)$ 按先后顺序排成一个行向量 ($1 \times N, N = N_x \times N_y$)。经过 M 次测量后便可以得到一个随机测量矩阵 A ($M \times N$)。相应地,物光路探测器 D_1 所对应记录的强度值 B_s 组成了一个列向量 Y ($M \times 1$)。此时待测物体的透射像可通过求解以下的凸优化问题而稀疏重构出来^[13-16, 19],

$$T_{\text{GISC}} = |T'|; \text{ which minimizes } \left\| \psi \left\{ |T'(x, y)|^2 \right\} \right\|_1, \text{ subject to } B_s = \int dx dy I_s(x, y) |T'(x, y)|^2, \forall s = 1, \dots, M, \quad (3)$$

式中 M 为总的随机测量数, ψ 为稀疏变换操作算符, $\|V\|_1$ 为 V 的 ℓ_1 -范数。

为了定量地评价 DGI 和 GISC 的图像重建质量,通常可以通过计算重构图像 T_{DGI} 或 T_{GISC} 与原始目标图像 T_{ref} 的均方误差(MSE)来衡量^[13-14],其定义为

$$M_{\text{MSE}} = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y (T_{\text{DGI/GISC}}(x, y) - T_{\text{ref}}(x, y))^2, \quad (4)$$

式中 M_{MSE} 值越小,重构的图像质量越好。

3 数值模拟和实验论证

在数值模拟和实验中,图 1 所示的光路结构具体参数设置如下:激光波长 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, $f = 125 \text{ mm}$, $z = 160 \text{ mm}$, CCD 像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$;待测物体为如图 2(a)所示的双缝:缝宽 $a = 100 \mu\text{m}$,缝间距 $d = 220 \mu\text{m}$ 。DGI 的图像重建过程见参考文献[11-12]所述;GISC 的图像重建采用梯度投影算法(GPSR)^[22],因待测目标为透射型,故采用笛卡儿基对待测物体进行稀疏表达。此外,实验中定义: $\delta = \frac{\Delta x}{\Delta x_s}$ 为每次采样时随

机相位板相对于待测物面处散斑横向尺寸的偏移幅度大小。式中 $\Delta x_s = \frac{\lambda z}{D}$ 为待测物面处散斑的横向尺寸大小^[6-7], D 为辐照在随机相位板上的激光光斑直径大小。

3.1 随机相位板偏移量 Δx 的影响

当辐照于随机相位板上的激光光斑直径 $D = 1.8 \text{ mm}$ 保持不变的情况下,此时待测物面处的散斑横向尺

寸 $\Delta x_s = \frac{\lambda z}{D} \approx 47.2 \mu\text{m}$, 图2给出了随机相位板的偏移量 Δx 对 DGI 和 GISC 成像质量影响的数值模拟和实验结果。图2(a)为原始物体,图2(b)~(f)显示了偏移量 Δx 依次为 1、10、30、60、100、200、1800 μm (即:偏移幅度 δ 依次为 0.02、0.21、0.63、1.27、2.11、4.23、38.06)时的 DGI(第一行)和 GISC(第二行)数值模拟结果,其对应的 DGI 和 GISC 实验结果分别如第三行和第四行所示。从图2可以清晰地看出,当激光光斑直径保持不变且偏移幅度 δ 不大于 1 时, DGI 和 GISC 的成像质量将会随着 δ 值的增大而提高;而当 δ 大于 1 时,随着 δ 值的增大, DGI 和 GISC 的成像质量基本不会得到改善。图3中所示的 $\delta - M_{\text{MSE}}$ 曲线关系也给出了类似的结论。数值模拟和实验结果表明,若每次采样时随机相位板的偏移量 Δx 超过待测物面处的一个散斑大小,则可以认为任意两次采样也是独立的,因此其成像结果与偏移量为 $\Delta x = \Delta x_s$ 时所对应的成像结果几乎相同,从而可以大幅度降低随机相位板的旋转速度(如:当 CCD 帧频为 10 Hz、光斑直径 1.8 mm、随机相位板半径 70 mm、散斑大小为 47.2 μm 时,原有的光斑相切采样旋转速度约为 0.26 rad/s,新的理论下采样旋转速度约为 0.0067 rad/s)。此外,从图3中可以直观地看到,在采样数相同的情况下, GISC 图像重建质量总体上要比 DGI 重建结果要好,这一点与已有的实验论证结果类似^[13-16,19]。

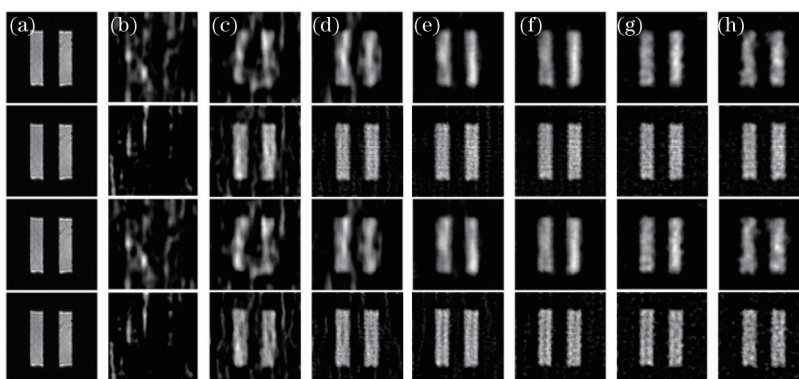


图2 不同偏移量 Δx (即 δ 值)对 DGI 和 GISC 重建质量的影响,测量次数 $M=2000$

Fig.2 Influence of different offset value Δx (namely δ) on the quality of T_{DGI} and T_{GISC} when $M=2000$

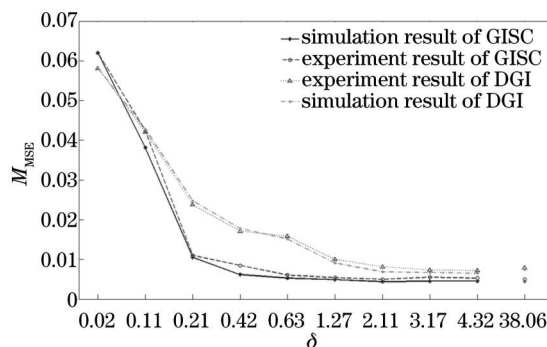


图3 $\delta - M_{\text{MSE}}$ 关系曲线

Fig.3 Relationship between δ and M_{MSE}

图4(a)~(h)依次给出了偏移量 Δx 为 1、10、20、30、60、100、200、1800 μm (即:偏移幅度 δ 依次为 0.02、0.21、0.42、0.63、1.27、2.11、4.23、38.06)时的二阶互相关度 $g^{(2)}$ 的分布,而图5给出了对应情况下的 $\delta - g^{(2)}$ 峰值曲线关系。从图4和图5可以看出,随着偏移量 Δx 的增大, $g^{(2)}$ 分布的旁瓣逐渐减弱而 $g^{(2)}$ 的峰值逐渐增大;而当 Δx 大于 47.2 μm (即: $\delta \geq 1$) $g^{(2)}$ 分布和 $g^{(2)}$ 的峰值基本趋于一致,表明任意两次采样已完全独立了,这一点与前面的分析结论相吻合。

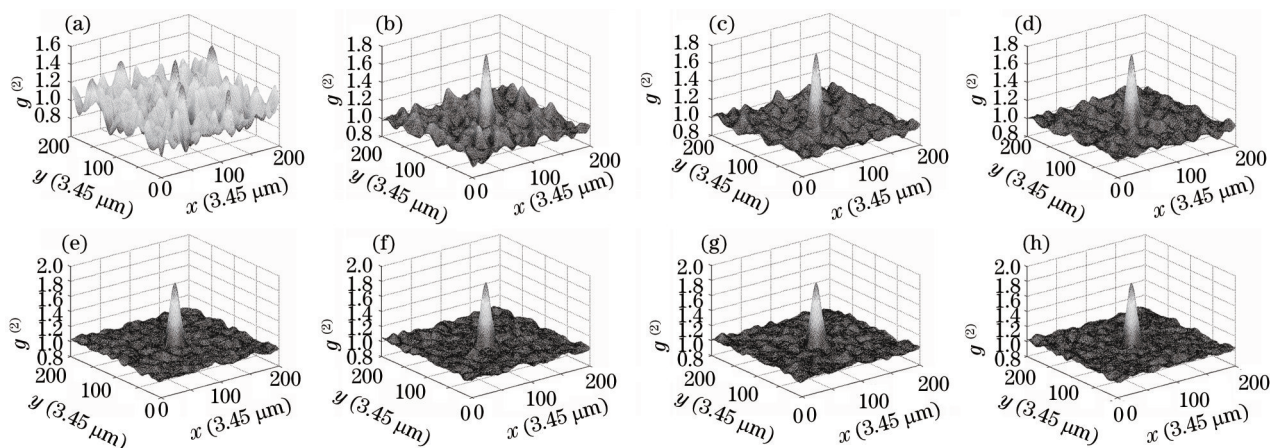


图4 不同偏移量 Δx (即 δ 值) 下散斑场 $g^{(2)}$ 的三维图形

Fig.4 Three-dimensional images of $g^{(2)}$ in different offset values of Δx (namely δ)

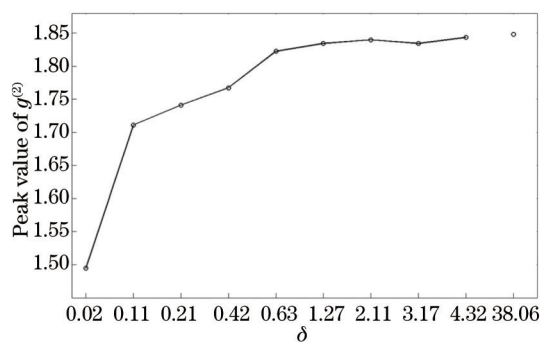


图5 $\delta - g^{(2)}$ 最大值变化曲线

Fig.5 Relationship between δ and peak value of $g^{(2)}$

3.2 激光光斑大小 D 的影响

在以上数值模拟和实验研究的基础之上,保持随机相位板的偏移量 $\Delta x = 30 \mu\text{m}$ 不变,可以通过调节照射于随机相位板上的激光光斑大小 D 来改变偏移幅度 δ 的大小。仍然采用图2所示的双缝作为待测物体,图6(a)~(d)分别给出了激光光斑大小 D 为0.9、1.8、3.6、5.4 mm(即偏移幅度 δ 依次为0.32、0.63、1.27、1.9)时所对应的DGI和GISC重建结果。在探测距离 z 和激光波长均不变的情况,由 $\Delta x_s = \lambda z/D$ 可知,随着激光光斑大小 D 的增大,待测物面处的散斑大小将会减少。因此,对于同一个待测物体,为了保证相同的采样压缩比^[14],设定激光光斑大小 D 为0.9、1.8、3.6、5.4 mm时所对应的测量次数 M 依次为500、2000、8000、18000。图6(a)~(d)中的第一行和第三行为DGI数值模拟和实验结果,而第二行和第四行分别给出了对应情况下的GISC数值模拟和实验结果。图6(e)给出了相应的 $\delta - M_{\text{MSE}}$ 曲线关系。从图6可以看出:当随机相位板的偏移量 Δx 保持不变且当移幅度 δ 不大于1时,DGI和GISC的成像质量将会随着 δ 的增大而提高;而当 δ 大于1时,随着 δ 的增大,DGI和GISC的成像质量基本不会得到改善,这一结论与图2和图3所示的结果一致。

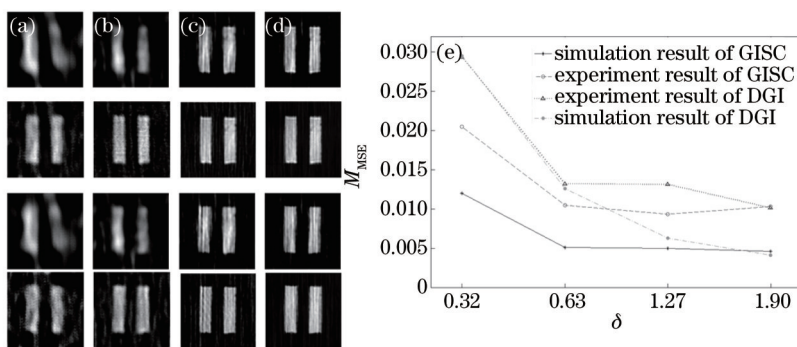


图6 不同光斑大小 D (即 δ 值) 对 DGI 和 GISC 重建质量的影响

Fig.6 Influence of different size D of the spot (namely δ) on the qualities of T_{DGI} and T_{GISC}

4 结 论

基于所搭建的运动轨迹可调式随机相位板赝热光鬼成像系统,分析了随机相位板的偏移量对 DGI 和 GISC 图像重建质量的影响。数值模拟和实验结果均表明,对于赝热光鬼成像系统,要想保证任意两次采样的独立性,随机相位板的偏移量无需等于或者大于一个激光光斑大小,实际上其偏移量只要超过待测物面处的一个散斑大小即可。这一结论对于小型化的高精度预置赝热光鬼成像系统的研制具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 Jing Cheng, Shensheng Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(9), 093903.
- 2 M D Angelo, Y H Shih. Quantum imaging[J]. *Laser Phys Lett*, 2005, 2(12): 567-596.
- 3 Dezhong Cao, Jun Xiong, Kaige Wang. Geometrical optics in correlated imaging systems[J]. *Phys Rev A*, 2005, 71(1): 013801.
- 4 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.
- 5 A Gatti, M Bache, D Magatti, *et al.*. Coherent imaging with pseudo-thermal incoherent light[J]. *J Mod Opt*, 2006, 53(5-6): 739-760.
- 6 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, 183602.
- 7 Wenlin Gong, Pengli Zhang, Xia Shen, *et al.*. Ghost "pinhole" imaging in Fraunhofer region[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(7): 071110.
- 8 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.
- 9 Wenlin Gong, Shensheng Han. Correlated imaging in scattering media[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(3): 394-396.
- 10 J H Shapiro, R W Boyd. The physics of ghost imaging[J]. *Quantum Inf Process*, 2011, 11(4): 949-993.
- 11 Wenlin Gong, Shensheng Han. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light[J]. *Phys Lett A*, 2010, 374(8): 1005-1008.
- 12 F Ferri, D Magatti, L A Lugiato, *et al.*. Differential ghost imaging[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(25): 253603.
- 13 O Katz, Y Bromberg, Y Silberberg. Compressive ghost imaging[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(13): 131110.
- 14 Jin Du, Wenlin Gong, Shensheng Han. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(6): 1067-1069.
- 15 Wenlin Gong, Shensheng Han. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Phys Lett A*, 2012, 376(17): 1519-1522.
- 16 Chenqiang Zhao, Wenlin Gong, Mingliang Chen, *et al.*. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(14): 141123.
- 17 W Martienssen, E Spiller. Coherence and fluctuations in light beam[J]. *Am J Phys*, 1964, 32(12): 919-926.
- 18 Shen Xia, Zhang Minghui, Liu Honglin, *et al.*. Research on the pulsed pseudo-thermal light[J]. *Chinese J Laser*, 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.
- 19 Jiao Jia, Zhao Chengqiang, Cui Lijun, *et al.*. Research on the repeatable pseudo-thermal light based on random phase plate scanning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0911002.
焦 佳, 赵成强, 崔丽君, 等. 基于随机相位板扫描的可重复赝热光源研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0911002.
- 20 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.
- 21 Cui Lijun, Zhao Chengqiang, Xu Wendong, *et al.*. Study on the measurement matrix in intensity correlation imaging laser radar[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0918002.
崔丽君, 赵成强, 徐文东, 等. 强度关联激光成像雷达测量矩阵研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0918002.
- 22 M A T Figueiredo, R D Nowak, S J Wright. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems[J]. *IEEE J Sel Top Sig Proc*, 2007, 1(4): 586-597.

栏目编辑: 张 雁