

实验研究探测器大小与散焦长度对无透镜鬼衍射的影响

罗春伶¹ 林洁^{1,2} 程静³

¹ 华南理工大学电子与信息学院, 广东 广州 510641
² 广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510006
³ 华南理工大学物理系, 广东 广州 510641

摘要 无透镜鬼衍射是一种特殊的非局域关联成像技术,通过对包含物体信息的测试光路和不含物体信息的参考光路的光场强度涨落关联进行测量,在参考光路上可得到物体的衍射图样。利用赝热光源实验研究了探测器尺寸大小和光路散焦长度对无透镜鬼衍射质量的影响。实验以四缝物体为例,定量研究了探测器大小和散焦是如何改变无透镜鬼衍射的成像结果,并和理论模拟进行了比较,获得了比较一致的结果。利用图像相关度定量分析了实验结果与理想无透镜鬼衍射图像的差别,发现这两者都会使无透镜鬼衍射的质量变差。

关键词 傅里叶光学;鬼衍射;散焦;探测器

中图分类号 O436.1; O438.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1104001

Experimental Investigation on the Effects of the Detector Size and Defocusing Length on Lensless Ghost Diffraction

Luo Chunling¹ Lin Jie^{1,2} Cheng Jing³

¹ School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

² School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

³ Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract Lensless ghost diffraction is a kind of correlated imaging technique that produces the diffraction pattern of the object on the reference path by measuring the correlation of intensity fluctuation between the test and reference paths, in which the test path contains the object. The effects of the detector size and defocusing length on lensless ghost diffraction imaging with pseudo-thermal light are investigated experimentally. Using a four-slit object in our experiments, how the detector size and defocusing length change the patterns of lensless ghost diffraction is quantitatively studied. The experimental results are well interpreted with the numerical simulations. The image correlation is used to quantitatively analyze the differences between the experimental patterns and the idealized ghost diffraction images. It is found the diffraction quality is decreased with the appearance of the finite size of the detector and the defocusing length.

Key words Fourier optics; ghost diffraction; defocusing; detectors

OCIS codes 070.4550; 110.2970; 110.6820; 050.1940

1 引 言

近年来,鬼成像的研究越来越受到更多的关

注^[1~17]。由于它的非定域特性,使其具有潜在的应用价值。作为一种非局域的成像技术,鬼成像利用

收稿日期: 2012-05-16; 收到修改稿日期: 2012-06-25

基金项目: 国家 973 计划(2012CB921904)和国家自然科学基金(11174084,10934011)资助课题。

作者简介: 罗春伶(1984—),男,博士研究生,主要从事成像光学方面的研究。E-mail: luochunlin2006@126.com

导师简介: 程静(1973—),男,博士,研究员,主要从事成像光学、量子光学和冷原子物理等方面的研究。

E-mail: phjcheng@scut.edu.cn

对光场强度的关联测量,在一条不含物体任何信息的光路上实现了物体的衍射像。经过多年研究,鬼成像在理论和实验上都取得了较大进展^[5~13],主要表现在实现光源与实现技术这两个方面。许多研究组对鬼成像的实现光源进行了研究^[5~7]。1995年Pittman等^[5]研究了利用纠缠光源实现鬼成像;2002年Bennink等^[6]研究了利用经典光源来实现鬼成像;2004年Gatti等^[7]对利用经典光源和纠缠光源实现鬼成像进行了比较,得到了无论是纠缠光源还是经典光源,都可以实现鬼成像的结论。实现光源的多样性为鬼成像的实际应用提供了更广的平台;其后,不少研究组对鬼成像的实现技术进行了研究^[8~13]。2004年Bache等^[8]提出了利用空间平均技术来提高鬼衍射的方法;2008年Li等^[9]利用三阶关联来提高鬼成像的成像效果;2008年Shapiro等^[10]从理论上提出了计算鬼成像的实现可能性;2009年Bromberg等^[11]提出了利用单个探测器可以实现鬼成像;2009年Katz等^[12]提出了压缩鬼成像,将压缩感知技术用在鬼成像中,能够大大减少成像所要求的采样数;2009年Zhang等^[13]利用光强场的二阶关联提高分辨率等,这些技术的研究为鬼成像技术的成像质量提供了保证,是其能走向实际应用的前提。

无透镜鬼衍射是一种特殊的鬼成像技术,它通过选择合适的光路参数,在参考光路上得到的是物体的衍射图样^[1,14]。2004年中国科学院上海光学精密机械研究所Cheng等^[1]理论分析了这种无透镜鬼衍射成像技术,并探讨了其在缺乏X射线相干光源下实现物体衍射条纹的可能性;2007年由中国科学院上海光学精密机械研究所的Zhang等^[14]从实验上实现了无透镜鬼衍射图样。一个物体的衍射图样反应了物体空间分布在频谱的特性,为全面分析物体提供了更多的信息,所以,对无透镜鬼衍射的研究和普通的鬼成像一样,都有着广泛的应用前景。然而,在鬼成像技术的具体实现中还必须考虑到更多的因素,如成像系统中的散焦、噪声和探测器大小等因素的影响^[15~17]。2008年Cheng^[15]理论上提出了无透镜鬼成像的光学传递函数,并讨论了鬼成像光路中的散焦效应;2010年Gong等^[16]提出了光强场的纵向相关度对鬼成像的影响,并分析了鬼成像与鬼衍射的成像条件;2010年林洁等^[17]理论上提出了探测器大小和散焦长度对无透镜鬼衍射的影响。

本文基于文献^[15,17]的理论工作,实验研究了探测器大小与散焦对无透镜鬼衍射的影响,利用图

像的相关度对无透镜鬼衍射的实验结果进行定量的计算,并利用计算结果进行了详细的分析。利用文献^[17]中的理论对纯振幅的四缝物体进行了数值模拟,实验结果与所对应的数值模拟基本符合,从而表明了其理论工作的正确性,为无透镜鬼衍射的实际应用提供了理论和实验支持。

2 实验构架与部分理论解释

实验采用的光路如图1所示,与文献^[17,18]的实验构架相同,光源是赝热光源,在图1中分束棱镜(BS)把整个系统分成两条光路,含有物体的光路称作“测试臂”,不含物体的光路称为“参考臂”。赝热光源由波长 $\lambda=658.5\text{ nm}$ 的连续激光器打在慢速旋转的毛玻璃上所形成,调节毛玻璃的转速,使得两个探测器每帧所采数据的时间间隔刚好等于毛玻璃转过光斑的时间,光斑的大小为 2 mm 。待成像物体 $t(v)$ 由纯振幅四缝组成,物体单缝宽 $a=215\text{ }\mu\text{m}$,四缝相邻两缝的中心距都为 $b=420\text{ }\mu\text{m}$; z_1, z_2 和 z_0 分别是光源到四缝物体、光源到参考臂探测器和四缝物体到测试臂探测器的距离。 x, v, u 和 u' 分别是光源平面、物体平面、参考臂探测器平面及测试臂探测器平面的坐标。为了方便,只采用一维变量进行分析。本次实验中的两个接收探测器都是面探测器,并且具有相同的参数,横向最小分辨率为 $8.6\text{ }\mu\text{m}$,纵向最小分辨率为 $8.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

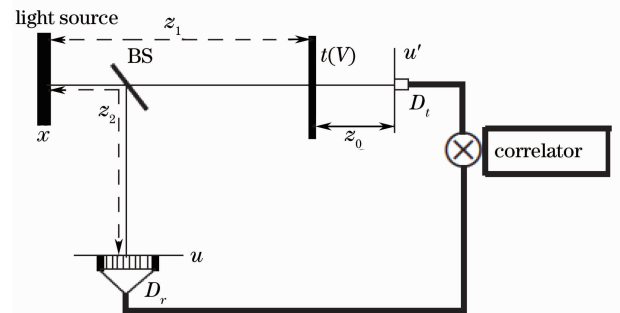


图1 无透镜鬼衍射成像系统光路图

Fig.1 Schematic of a lensless ghost imaging system

根据文献^[17]中的理论,探测器大小对无透镜鬼衍射的影响使成像系统相当于一个部分相干成像系统,而散焦对无透镜鬼衍射的影响相当于在透射物体上加了一个相位啁啾调制,这两者都会影响到图像的质量。为了从实验上研究探测器大小和散焦对无透镜鬼衍射的影响,设计了3组实验方案。考虑在无散焦情况下,探测器尺寸大小对无透镜鬼衍射的影响,由实验1完成;考虑在固定探测器大小的

情况下,散焦对无透镜鬼衍射的影响,由实验 2 完成;综合考虑探测器大小和散焦对鬼衍射的影响,由实验 3 完成。为了更好地对实验结果与理论进行比较和分析,以下讨论中使用文献[17]中的理论结果。

在实验 1 中,为了研究探测器大小对无透镜鬼衍射的影响,将图 1 中的各距离设为 $z_1 = 317 \text{ mm}$, $z_2 = 608 \text{ mm}$, $z_0 = 291 \text{ mm}$, 即无散焦。由文献[6]可知,当两条光路关于分束器严格对称,并满足 $z_1 + z_0 = z_2$ 时,通过测试臂探测器上一点的强度与参考臂探测器上所采点的强度进行关联运算,可以在参考臂上得到物体的傅里叶像。在实际的成像系统中,如图 1 所示,探测器上的一点总是有一定大小的,由文献[17]中相关探测器尺寸大小的理论可知,可以把有限大小探测器的无透镜鬼成像系统等效地看作一个部分相干成像系统^[19],从而可以分析探测器大小是如何改变衍射图像的质量。将测试臂探测器大小 d 分别选取为 $8.6, 176, 344, 512, 688 \mu\text{m}$, 大的探测器所获得的信号是多个像素测量信号的积分。

实验 2 研究的是两条光路长度不相等会如何影响无透镜鬼衍射的成像质量。在实际的实验测量过程中,经常会遇到 $z_1 + z_0 \neq z_2$, 即无透镜鬼衍射的光路实现中存在散焦的情况。由文献[17]中相关散焦理论可知,散焦的效果相当于对物体的透射函数附加一个相位啁啾调制。在实验 1 的基础上,前后移动测试臂探测器 D_t 的位置,将偏离量 δ 分别取为 $-10, -1, 1, 10 \text{ cm}$, 从实验上研究上述理论结果是否成立。

为了统一考虑探测器大小和散焦对无透镜鬼衍射的影响,实验 3 具体研究无透镜鬼衍射图像的质量是如何依赖于探测器大小与散焦长度。相关理论研究已经给出如下结论^[17]:在存在散焦和有限大小探测器两者综合影响的情况下,无透镜鬼衍射系统仍相当于一个部分相干成像系统,只不过物体的透射函数在相位上有一个啁啾调制。将偏离量 δ 分别取为 1 cm 和 -1 cm 时,改变探测臂探测器尺寸 d 进行了一系列的实验, d 分别取为 $8.6, 176, 344, 512, 688 \mu\text{m}$ 。

3 实验结果与分析

为了定量地分析成像的质量,计算了无透镜鬼衍射图像的相关度。相关度指实际成像系统的输出图像与理想系统输出图像的相似程度,其表达式为^[20]

$$r(U, U_c) = \frac{\sum_{i=1}^N U(i)U_c(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N U(i)^2 \sum_{i=1}^N U_c(i)^2}} \quad (1)$$

式中 U, U_c 分别为实际成像系统和理想成像系统的输出图像,为了与理论分析一致,也采用了一维变量的表示方式。 $r(U, U_c)$ 的值由 0 变大到 1 表示实际成像系统输出信号与理想成像系统输出信号的相似度增强,其中 $r(U, U_c) = 1$ 为该成像系统输出信号与理想成像系统完全相同, $r(U, U_c) = 0$ 为该成像系统输出信号与理想成像系统没有任何相似的部分。实验中无透镜鬼衍射的图像都由采样次数为 1×10^4 次所得。

实验 1 研究了成像系统的两条光路在无散焦的情况下,逐渐增大测试臂探测器尺寸对无透镜鬼衍射的影响。图 2(a)~(e) 是探测器尺寸分别为 $8.6, 176, 344, 512, 688 \mu\text{m}$ 时,实验得到的无透镜鬼衍射成像的结果,图中 ΔG 表示两条光路的强度涨落关联函数,横坐标 x 表示参考臂平面坐标。为了便于观察和比较,对二阶强度涨落关联函数作了归一化处理。图 2(f) 则是变化探测器大小时,实验所得到的无透镜鬼衍射成像结果与理想无透镜鬼衍射成像之间的相关度变化情况。

从图 2(a)~(e) 可以看出,当测试臂探测器尺寸越来越大时,无透镜鬼衍射成像的结果变得矮而宽,另一方面,根据透射物体的相关度计算结果如图 2(f) 所示,也进一步验证了随着探测器的增大,透射物体的无透镜鬼衍射结果和理想衍射结果之间的相关度下降。这就说明了测试臂探测器尺寸越大,无透镜鬼衍射的结果和理想衍射图像之间的差别会越大。与文献[17]中相关探测器理论对比发现,实验结果和理论基本符合。在实验 1 中,探测器尺寸大小在 $0 \sim 200 \mu\text{m}$ 的尺度范围内,鬼衍射的效果都能较好地接近理想的衍射图样。

实验 2 研究的是无透镜鬼衍射系统散焦的情况,选择在实验 1 的基础上,移动测试臂上探测器 D_t 的位置,在实验中偏离量 δ 分别取为 $-10, -1, 0, 1, 10 \text{ cm}$ 时,所对应的实验结果如图 3 所示。

图 3(a)~(e) 分别为 δ 等于 $-10, -1, 0, 1, 10 \text{ cm}$ 时的无透镜鬼衍射实验结果,图 3(f) 代表其相关度变化情况。从图 3 可以看出,光路存在散焦时,图像也会变得矮而宽一些,这正是对物体相位进行了啁啾调制的原因。从另一方面看,在存在散焦的情况下,随着散焦 δ 的增大,图像的相关度都会逐

渐下降,这就说明了散焦会使无透镜鬼衍射的成像质量下降。由文献[17]中相关散焦理论可知,当散焦越大的时候,图像会越平滑,实验结果正好说明了这一点。值得注意的是,偏离量 δ 在几个厘米的变化范围内,图像的质量下降得很慢,其相关度都在

0.9 以上,说明在成像光路存在适当散焦的条件下,鬼成像的质量也不会受到大的影响,这有利于鬼成像在实际环境中的应用,将是鬼成像优于传统成像的又一特点。

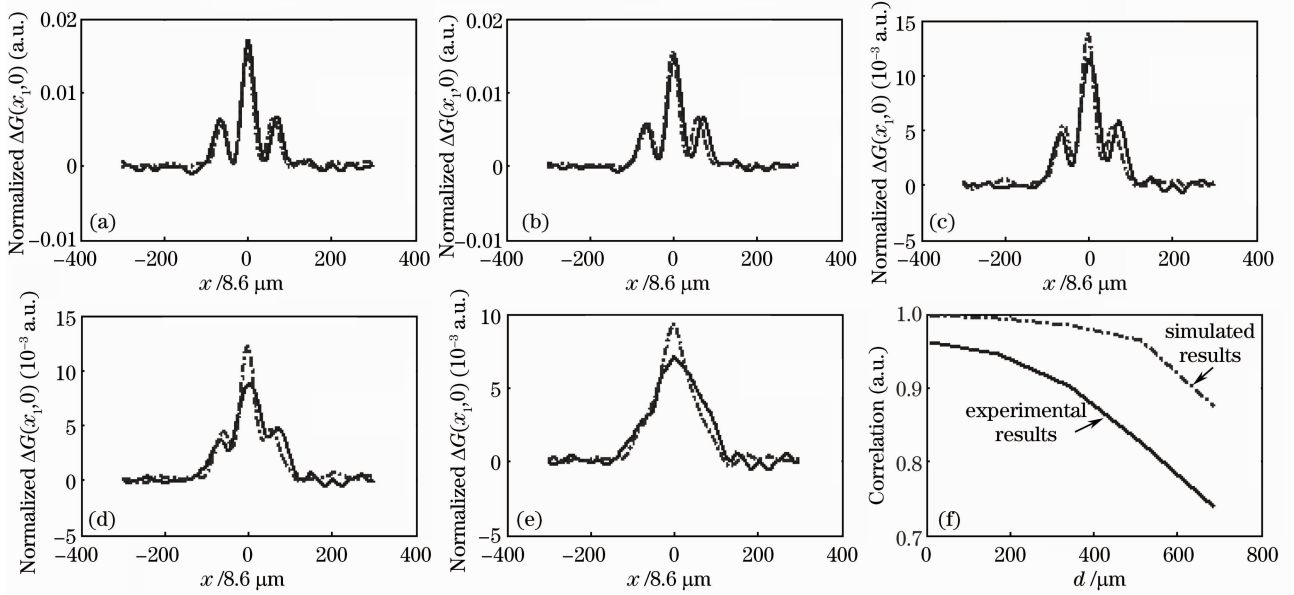


图 2 (a)~(e)不同探测器尺寸 d 下的无透镜鬼衍射成像结果。(a) $d=8.6 \mu\text{m}$; (b) $d=172 \mu\text{m}$; (c) $d=344 \mu\text{m}$; (d) $d=512 \mu\text{m}$; (e) $d=688 \mu\text{m}$; (f) 相关度和探测器尺寸大小的依赖关系

Fig. 2 (a)~(e) Lensless ghost diffraction images with different detector sizes d . (a) $d=8.6 \mu\text{m}$; (b) $d=172 \mu\text{m}$; (c) $d=344 \mu\text{m}$; (d) $d=512 \mu\text{m}$; (e) $d=688 \mu\text{m}$; (f) dependence between correlation and detector size d

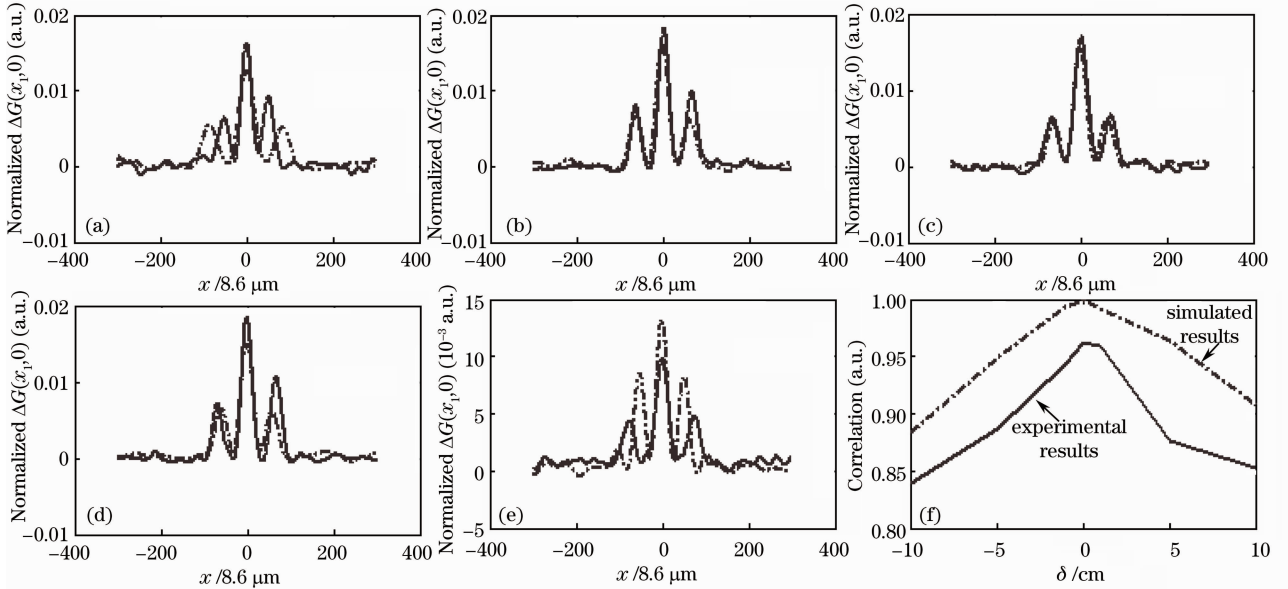


图 3 (a)~(e)不同散焦 δ 的无透镜鬼衍射成像结果,探测器大小固定为 $8.6 \mu\text{m}$ 。(a) $\delta=-10 \text{ cm}$; (b) $\delta=-1 \text{ cm}$; (c) $\delta=0$; (d) $\delta=1 \text{ cm}$; (e) $\delta=10 \text{ cm}$; (f) 相关度与散焦长度的依赖关系

Fig. 3 (a)~(e) Lensless ghost diffraction images with different defocusing lengths δ , and the detector size $d=8.6 \mu\text{m}$. (a) $\delta=-10 \text{ cm}$; (b) $\delta=-1 \text{ cm}$; (c) $\delta=0$; (d) $\delta=1 \text{ cm}$; (e) $\delta=10 \text{ cm}$; (f) dependence between correlation and defocusing length δ

实验3基于在实验2的构架基础上,散焦长度分别取 $\delta=-1$ cm和 $\delta=1$ cm时,慢慢增大测试臂探测器尺寸,其值分别取为8.6、172、344、512、688 μm 时,无透镜鬼衍射实验结果如图4和图5所示。

图4是散焦 $\delta=-1$ cm时不同探测器尺寸大小的无透镜鬼衍射实验结果及其相关度,其中图4(a)~(e)分别表示探测器尺寸为8.6、172、344、512、688 μm 的无透镜鬼衍射成像结果,图4(f)是其相关度图。

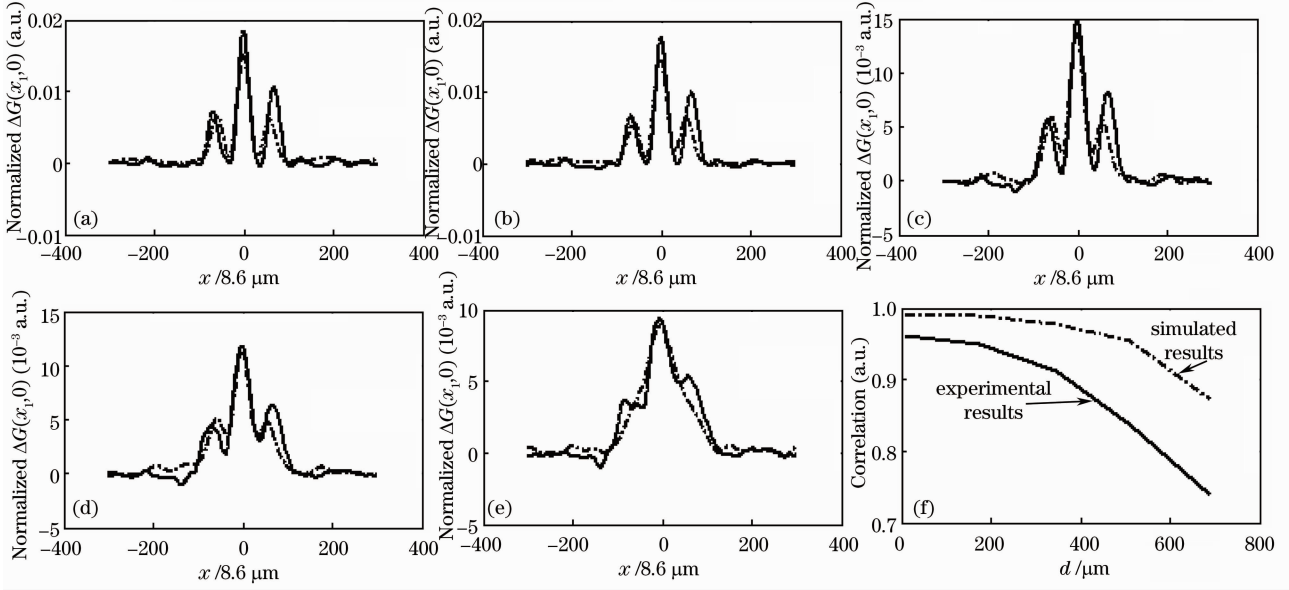


图4 (a)~(e)不同探测器尺寸 d 的无透镜鬼衍射成像结果,散焦 $\delta=-1$ cm。(a) $d=8.6$ μm ; (b) $d=172$ μm ; (c) $d=344$ μm ; (d) $d=512$ μm ; (e) $d=688$ μm ; (f)相关度和探测器尺寸大小的依赖关系

Fig. 4 (a)~(e) Lensless ghost diffraction images with different detector sizes d , and defocusing length $\delta=-1$ cm. (a) $d=8.6$ μm ; (b) $d=172$ μm ; (c) $d=344$ μm ; (d) $d=512$ μm ; (e) $d=688$ μm ; (f) dependence between correlation and detector size d

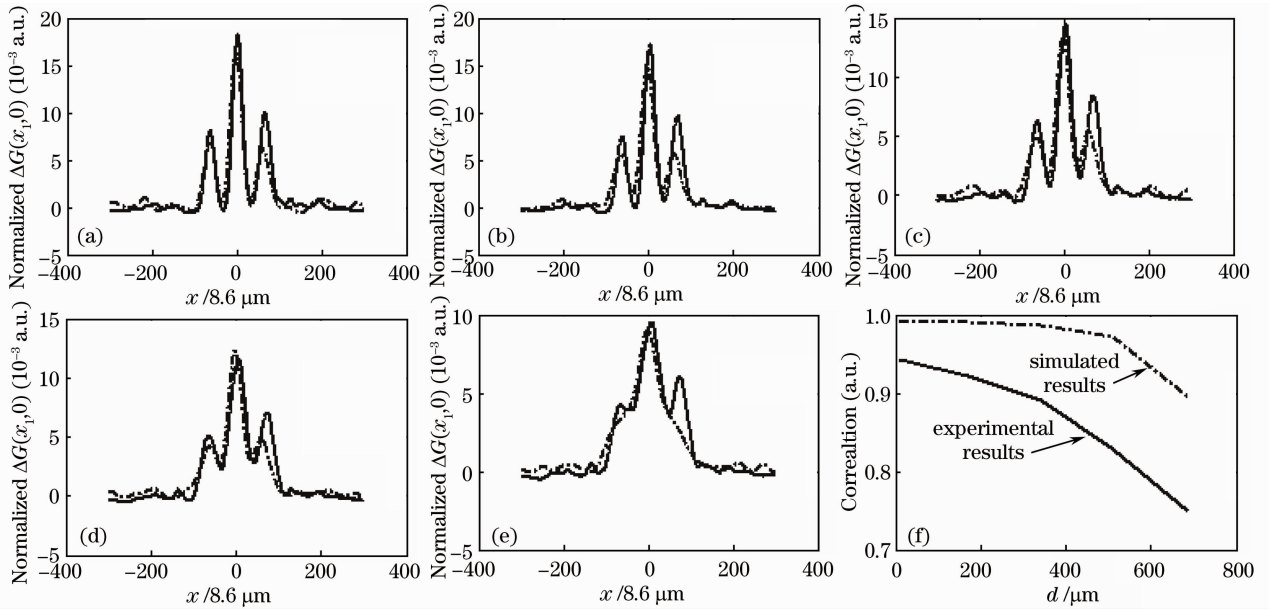


图5 (a)~(e)不同探测器尺寸 d 的无透镜鬼衍射成像结果,散焦 $\delta=1$ cm。(a) $d=8.6$ μm ; (b) $d=172$ μm ; (c) $d=344$ μm ; (d) $d=512$ μm ; (e) $d=688$ μm ; (f)相关度和探测器尺寸大小的依赖关系

Fig. 5 (a)~(e) Lensless ghost diffraction images with different detector sizes d , and defocusing length $\delta=1$ cm. (a) $d=8.6$ μm ; (b) $d=172$ μm ; (c) $d=344$ μm ; (d) $d=512$ μm ; (e) $d=688$ μm ; (f) dependence between correlation and detector size d

图 5 是散焦 $\delta=1$ cm 时不同探测器尺寸大小的无透镜鬼衍射实验结果及其相关度, 其中图 5(a)~(e) 分别表示探测器尺寸为 8.6、172、344、512、688 μm 的无透镜鬼衍射图像, 图 5(f) 是其相关度图。

从图 4 和图 5 可以看出, 在存在散焦的情况下, 无论是正散焦还是负散焦, 随着探测器尺寸的增大, 无透镜鬼衍射的图像会变得矮而宽一些。因此, 实验结果和文献[17]的理论分析数值模拟结果基本相符合, 实验验证了基于傅里叶光学理论解释探测器大小与散焦对无透镜鬼衍射影响的正确性。同时从这些实验的结果中可以看出, 在散焦不是很严重, 或者探测器尺寸不是很大的情况下, 图像的相关度都比较高, 对成像的质量不会造成太大的影响, 相对而言探测器尺寸的影响要比散焦对无透镜鬼衍射的影响更敏感一些, 正由于鬼衍射的这些特性, 将有利于无透镜鬼衍射成像在医学成像等方面的应用。

4 结 论

为了从实验上研究探测器大小与散焦对无透镜鬼衍射的影响, 分别设计了 3 组相关实验对其进行验证, 这 3 组实验与理论文献[17]中的数值模拟是相对应的, 完成了探测器尺寸大小和散焦如何具体影响无透镜鬼衍射图像质量的研究目标。实验结果与理论预测结果基本符合, 无论是光路存在散焦还是探测器存在有限尺寸大小, 对无透镜鬼衍射系统都有一定的影响, 这两者都会使成像的质量下降。此外, 利用图像相关度对 3 组实验结果的图像进行了定量的分析, 进一步验证了基于傅里叶光学理论解释探测器大小与散焦对无透镜鬼衍射影响的正确性。

参 考 文 献

- 1 J. Cheng, S. S. Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(9): 093903
- 2 A. Valencia, G. Scarcelli, M. D. Angelo *et al.*. Two-photon imaging with thermal light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(6): 063601
- 3 R. E. Meyers, K. S. Deacon, Y. H. Shih. A new two-photon ghost imaging experiment with distortion study [J]. *J. Mod.*

- Opt.*, 2007, **54**(16-17): 2381~2392
- 4 R. Meyers, K. S. Deacon, Y. H. Shih. Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(4): 041801
- 5 T. B. Pittman, Y. H. Shih, D. V. Strekalov *et al.*. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(5): 3429~3432
- 6 R. S. Bennink, S. J. Bentley, R. W. Boyd. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(11): 113601
- 7 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
- 8 M. Bache, E. Brambilla, A. Gatti *et al.*. Ghost imaging schemes: fast and broadband [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(24): 6067~6081
- 9 H. G. Li, Y. T. Zhang, D. Z. Cao *et al.*. Third-order ghost interference with thermal light [J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(12): 4510~4515
- 10 J. H. Shapiro. Computational ghost imaging[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(6): 061802
- 11 Y. Bromberg, O. Katz, Y. Silberberg. Ghost imaging with a single detector [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(5): 053840
- 12 O. Katz, Y. Bromberg, Y. Silberberg. Compressive ghost imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(13): 131110
- 13 P. L. Zhang, W. L. Gong, X. Shen *et al.*. Improving resolution by the second-order correlation of light fields[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1222~1224
- 14 M. H. Zhang, W. Qing, S. Xia *et al.*. Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(2): 021803
- 15 J. Cheng. Transfer functions in lensless ghost-imaging systems [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(4): 043823
- 16 W. L. Gong, S. S. Han. The influence of axial correlation depth of light field on lensless ghost imaging [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(4): 675~678
- 17 Lin Jie, Cheng Jing. Effects of detector size and defocusing length on lensless ghost diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2912~2917
- 林 洁, 程 静. 探测器大小与散焦对无透镜鬼衍射的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2912~2917
- 18 Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia *et al.*. Statistical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1858~1866
- 张明辉, 魏 青, 沈 夏等. 基于统计光学的无透镜鬼成像数值模拟和实验验证[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1858~1866
- 19 Wang Zhijiang. *Imaging Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1991
- 王之江. *成像光学* [M]. 北京: 科学出版社, 1991
- 20 Hu Fangming, Wang Xiaorui, Zhang Jianqi *et al.*. Analysis and comparison of typical objective measure criteria of electro-optical image quality[J]. *Infrared Technology*, 2005, **27**(2): 129~134
- 胡方明, 王晓蕊, 张建奇. 光电图像质量客观度量准则的分析与比较[J]. *红外技术*, 2005, **27**(2): 129~133