

多波长光源提高关联成像的成像质量

杨旭 张勇 杨成华 徐璐 王强 刘越豪 赵远

哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 关联成像的成像机制决定了其成像需要进行大量的测量,测量次数越多成像质量越好,但成像时间较长。为此提出多波长光源关联成像系统,能够从系统结构的角度来降低关联成像的成像时间,每一个波长的光所对应的探测器并行地进行关联成像的测量。通过实验证明:当光源包含三个波长光时,相同时间内对同一目标进行成像,相比传统的单波长关联系统,关联成像的对比度提高36%,衬噪比提高66%。

关键词 成像系统; 关联成像; 多波长; 衬噪比; 对比度

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0314002

Improve Quality of Ghost Imaging with Multi-Wavelength Source

Yang Xu Zhang Yong Yang Chenghua Xu Lu Wang Qiang Liu Yuehao Zhao Yuan

Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The imaging mechanism of ghost imaging determines that it needs a large number of measurement, measuring the more the better imaging quality, but the longer imaging time. Therefore, multi-wavelength ghost imaging system is proposed, it can reduce imaging time through changing system composition, since different detectors measure different wavelength intensities simultaneously. Experimental results indicate that when light source with three wavelengths is used to image the target at the same time, the contrast ratio improves by 36% and the carrier noise ratio improves by 66%, comparing with conventional ghost imaging system with single wavelength.

Key words imaging systems; ghost imaging; multi-wavelength; carrier noise ratio; contrast ratio

OCIS codes 110.1650; 030.1640; 110.3010

1 引言

关联成像是基于强度关联的光学现象,通过测量强度涨落的空间关联,实现了对未知目标的强度分布信息进行间接的测量^[1]。最早的关联成像是利用纠缠态光子的空间关联对目标进行成像^[2-6]。由于纠缠态光源较难于获得,并且应用于实际的探测系统中难度较大,所以研究者希望通过热光关联成像系统来进行实际探测^[7-10]。

大批的研究者对热光关联成像的实际应用进行了深入的研究^[11-15],并重点关注如何有效地提高关联成像的成像质量^[16-19]。一部分研究者通过改进关联成像的算法来提高成像的质量^[20-22]。还有部分研究者希望通过改变关联成像的系统来提高成像质量,因此提出多波长关联成像系统(MWGI)以寻求利用系统结构的改进来进一步提高关联成像的成像质量^[23-24]。MWGI采用多波长的光源,利用调制器件对不同波长的光场分别进行调制,调制后的光场对目标进行照明,透射的光场采用不同的桶探测器进行接收,桶探测器前加滤光片从而实现对不同波长的回波强度进行探测。相比于传统关联成像的方法每一次测量只能测一组数据,该方法在每一次测量中可以得到多组数据,因此在相同时间内 MWGI 系统能够有效地进行大量测量,成像质

收稿日期: 2015-08-27; 收到修改稿日期: 2015-11-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61108072)

作者简介: 杨旭(1988—),男,博士研究生,主要从事关联成像方面的研究。E-mail: yxu@hit.edu.cn

导师简介: 赵远(1963—),男,博士,教授,主要从事激光雷达、光电探测等方面的研究。

E-mail: zhaoyuan@hit.edu.cn(通信联系人)

量比传统的关联成像更高。

本文针对 MWGI 系统进行了理论和实验研究,分别对比了 MWGI 系统与单一波长关联成像系统的对比度和衬噪比(CNR)的区别。实验结果表明:MWGI 系统的对比度和衬噪比均高于采用单一波长的关联成像系统,该研究是之前关于 MWGI 系统的相关研究的一个很好地补充,实验上证明了 MWGI 系统在实际探测中所具有的优势,促进了关联成像的进一步发展。

2 系统设计

图 1 为 MWGI 系统原理图。在 MWGI 系统中所选用的光源为多波长分频调制光源,代替传统的关联成像(CGI)系统中的空间光调制器(SLM)。光源投射的调制光斑包括 3 个不同的频谱,分别为:中心波长 650 nm 的红光,中心波长 532 nm 的绿光和中心波长 450 nm 的蓝光。光斑光场自由传播 z 的距离后投射到目标 T 上,透过目标 T 的光场用经过两个半反半透的分光镜进行分光被 3 个桶探测器 $B_i(i=r,g,b)$ 接收。每一个桶探测器前放置一个带通滤波器 f_i (其中 $i=r,g,b$),不同的带通滤波器只允许特定波长的光场透过。这样,利用 MWGI 系统在相同的时间内,可以得到高于传统 CGI 系统 3 倍的数据。

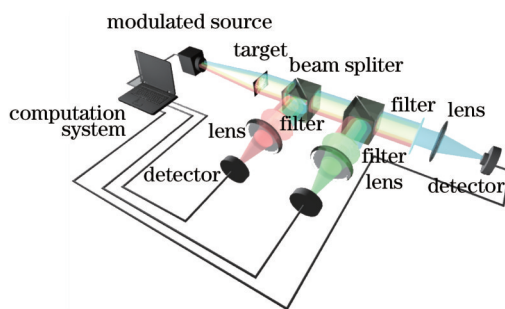


图 1 MWGI 系统原理图

Fig.1 Schematic of MWGI system

在 MWGI 系统中,为了实现对不同波长的光进行不同的强度调制,通常通过投影仪(DLP)来实现。采用的光源是全光谱的热光源,光经过色彩滤镜被分为红、绿、蓝三个不同波段的光。RGB 三色光分别照射到三片数字微镜阵列(DMD)上进行不同的调制,采用的是反射式的 DMD。调制后的 RGB 三色光经过 DMD 反射后借助色彩棱镜重新聚焦,通过光学系统发射到目标上。每一个 DMD 产生的图样是独立的随机分布的二进制图样,反射光场的像素数和不反射光场的像素数的比例约为 1:1,由电脑控制每一片 DMD 上产生的图样,产生的光斑图样的像素数为 64 pixel×64 pixel。

图 2 显示了 DLP 光源产生的图样的分布形式,其为随机选取某一次测量时 DLP 光源产生的光斑分布。图 2(a)是红光分量经 DMD 调制后的光斑分布,图 2(b)是绿光分量经 DMD 调制后的光斑分布,图 2(c)是蓝光分

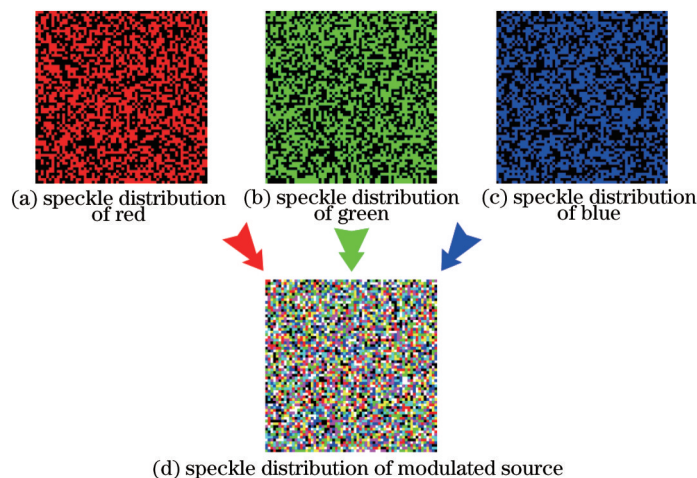


图 2 MWGI 系统产生的光斑图样的分布

Fig.2 Speckle distribution of MWGI system

量经 DMD 调制后的光斑分布图。这三幅光斑分布的图像均是二值图像,并且彼此之间相互独立。调制后的三色光斑经过合束之后,由光学系统投影到目标之上,合束光斑场的分布如图 2(d)所示。通过这种方法,实现了对不同波长的光场调制。

光源发射的光斑透过被探测目标之后,经两个分光镜分成 3 路光,每一路光被 3 个前面放有带通滤波器的探测器探测。这个系统相当于 3 个并行的关联成像系统同时进行工作,因此单位时间内测量的数据量为传统关联成像系统的 3 倍,从而在相同时间内 MWGI 系统可以获得成像质量高于 CGI 系统的成像结果。

3 实验验证

进一步验证基于 MWGI 系统的关联成像具有更高的成像质量,在实验室条件下进行了相关的实验,实验系统如图 3 所示。采用 3 片式的 DLP 光源,由电脑预先生成实验所需要的随机调制的光斑图样,每幅光斑图样的生成方式在图 2 中已作相关说明。电脑将图样的分布信息发送给 DLP,由 DLP 将光斑照射到目标上,实验中确保照射的光斑图样的强度足够大,使得桶探测器接收到强度涨落的信号远大于探测器的噪声产生的随机起伏,因此可以忽略散粒噪声对探测的影响。电脑控制 DLP 的刷新频率约为 1.497 s,其中 DLP 光源距离目标的距离为 $z=10$ cm。用分光平片对透过探测目标的光进行分光,分光平片将透过目标的光场分成 3 路光。这三路光中,其中一路光透过分光平片继续传播,另外两路光为分光平片前后两个面的反射光,且这两路反射光的光路有一定的夹角。因此这个分光平片起到了系统原理图(图 1)中两个分光镜的作用。实验中分开的 3 路光用 3 个焦距为 $f=50$ mm 的聚焦透镜进行聚焦,分别用 3 个加了带通滤波片的桶探测器对这 3 路光进行探测,实验中,目标物体距离聚焦透镜的距离为 $z_0=20$ cm,聚焦透镜距离探测器的距离为 $z_1=4$ cm。实验中,DLP 的光斑包含 3 个频谱分量(R、G、B),因此所选的带通滤波器的中心波长分别为:650、532、450 nm,且每一个带通滤波器的带宽选为 50 nm。所用的 3 个桶探测器与 ADLINK 公司的 4 通道 PCI-9816H 数据采集卡中的 3 个通道相连,对透过目标的光进行采样,PCI-9816H 的采样频率选为 1000 Hz。由电脑控制光斑的变化的时间和数据采集卡的采样所需时间相互匹配,DLP 每刷新幅光斑图样,采集系统就将前一次光斑图样持续时间内采集到的 1000 个数据发送到计算系统之中。计算系统将这段时间内采集到的数据做平均,平均值即为这幅光斑图样所对应的桶探测器的输出值,输出值与对应的光斑分布进行相关运算即可以得到目标的强度像。

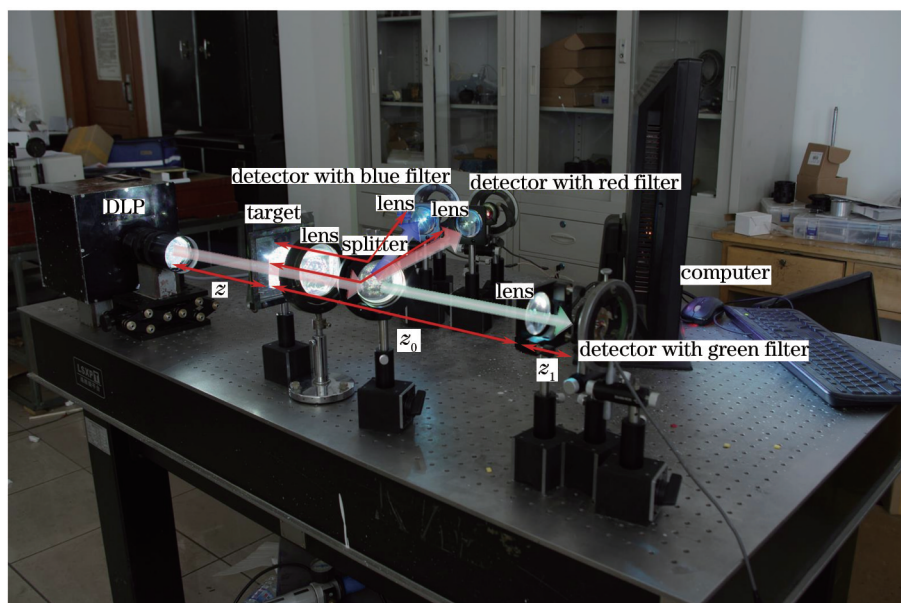


图 3 MWGI 实验系统

Fig.3 Experimental setup of MWGI system

为了详细地证明 MWGI 系统能够提高成像速度,实验中采用传统的关联成像系统和 MWGI 系统对同一目标进行成像,在相同时间内不同系统得到的成像结果如图 4 所示。图 4(a)~(c)分别是 6000 s 时单独使用红

光、绿光、蓝光得到的目标的成像结果。图 4(d)为 6000 s 时 MWGI 系统得到的目标的成像结果。图 4(e)是目标的分布,选取一个卡通的葵花图案作为目标,这个目标是一个二值目标。DLP 发出的光投射到白色区域时,100% 透射;若 DLP 发出的光投射到黑色的区域时,光完全被挡住,没有光透过目标。通常使用衬噪比和对比度来评价关联成像的成像质量。关联成像中,成像结果可以表示为

$$G(x) = \frac{1}{N} \sum_j^N I_o^{(j)} I^{(j)}(x), \quad (1)$$

式中 N 为实验中测量的次数, $I_o^{(j)}$ 为物光路中桶探测器第 j 次测量的结果, $I^{(j)}(x)$ 为实验中第 j 测量照射到目标上的光斑分布。对于提出的 MWGI 系统,(1)式变为

$$G(x) = \frac{1}{N} \sum_j^N \sum_i^{r,g,b} I_o^{(ji)} I^{(ji)}(x), \quad (2)$$

这里的 i 可以选取 r, g, b 。 $I_o^{(jr)}(x)$, $I_o^{(jg)}(x)$ 和 $I_o^{(jb)}(x)$ 表示第 j 次测量红光、绿光和蓝光分别所对应的探测器探测到透过目标的强度, $I^{(jr)}(x)$, $I^{(jg)}(x)$ 和 $I^{(jb)}(x)$ 表示第 j 次测量红光、绿光和蓝光的光斑场分布。

对比度记为

$$V = \frac{\langle G(x_{in}) \rangle - \langle G(x_{out}) \rangle}{\langle G(x_{in}) \rangle + \langle G(x_{out}) \rangle}. \quad (3)$$

衬噪比记为

$$R_{CN} = \frac{\langle G(x_{in}) \rangle - \langle G(x_{out}) \rangle}{\Delta G(x_{in}) + \Delta G(x_{out})}, \quad (4)$$

式中 x_{in} 表示在目标透光区域的像素的位置坐标, x_{out} 表示为目标不透光区域的像素的位置坐标。其中,

$$\Delta G(x) = \left[\langle G(x)^2 \rangle - \langle G(x) \rangle^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

利用(3)式和(4)式,计算了图 4(a)~(d)这四幅图像的对比度和衬噪比,如表 1 所示。

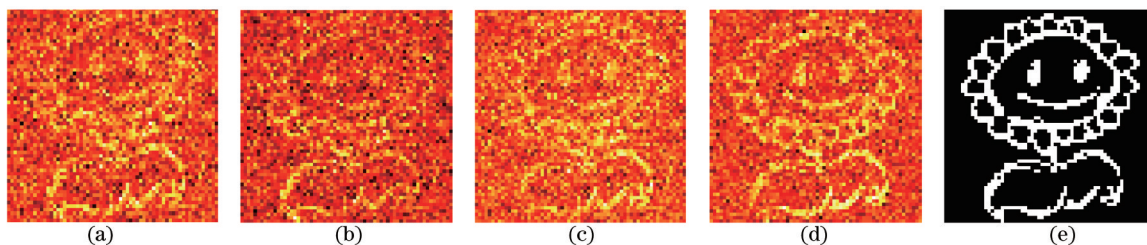


图 4 实验目标及不同系统得到的成像结果。(a)~(c) 红、绿、蓝光作为光源时关联成像的结果;(d) MWGI 系统的结果;(e) 原始目标
Fig.4 Target in experiment and imaging results using different systems. (a)~(c) Imaging results using red, green and blue light respectively; (d) result using MWGI system; (e) original target

表 1 MWGI 系统和 CGI 系统的对比度和衬噪比

Table 1 Contrast ratio and CNR in MWGI and CGI system

System	Visibility	CNR
CGI system with red light source	0.1701	0.3853
CGI system with green light source	0.1796	0.4006
CGI system with blue light source	0.1527	0.3511
MWGI system	0.2080	0.6297

通过表 1 给出的 6000 s 时不同成像系统的成像结果和数据进行对比。当 CGI 的系统用单一波长的光作为光源的时候,对比度和衬噪比大体相同。单一波长的光作为光源的成像结果的对比度和衬噪比的平均值分别为 $\bar{V}' = 0.1741$ 和 $\bar{R}'_{CN} = 0.3790$ 。而所提出的 MWGI 系统对目标进行成像,所得的成像结果的对比度 $V = 0.2080$ 和衬噪比 $R_{CN} = 0.6297$,可以看出 MWGI 系统的对比度 V 和衬噪比 R_{CN} 大于 CGI 成像系统的对比度 V' 和衬噪比 R'_{CN} 。在相同的累积时间内,MWGI 系统的成像质量高于 CGI 成像系统。

图5给出了不同系统的对比度和衬噪比随着时间变化的曲线,黑色的曲线表示提出的MWGI系统成像结果的对比度和衬噪比随时间变化的曲线,红色、蓝色、绿色的曲线分别表示不同光源CGI系统成像结果的对比度和衬噪比随时间变化的曲线。在实验系统介绍中提到,电脑控制的DLP刷新频率是1.497 Hz,因此对于MWGI系统平均每秒获得0.668个数据,而单一波长的CGI系统平均每秒获得2.004个数据。由图5可知,用红光、蓝光、绿光分别作为光源,CGI系统的对比度和衬噪比变化相似,CGI系统的对比度和衬噪比均随着测量时间的增大而提高,且对比度和衬噪比的变化趋势相同。MWGI系统的对比度和衬噪比也同样随着测量时间的增大而提高,且任意时刻的MWGI系统的对比度和衬噪比的数值均大于相同时刻的CGI系统的对比度和衬噪比。通过图5可以得到同样的结论:若要得到相同成像质量(相同的对比度或衬噪比)的成像结果,所提出的MWGI系统所需要的时间远小于CGI系统所需要的时间,即MWGI系统的成像速度远大于CGI系统的成像速度。MWGI系统光源的不同波长对物体成像可以起到增加采样数量的作用。从图5(a)、(b)可以看出,若采用单色光源照明,增加3倍采样时间的情况下,对比度和衬噪比与MWGI系统的对比度和衬噪比基本相同。然而,关联成像的成像时间一直是制约关联成像实用化进程的关键因素,这种增加系统复杂程度来减少成像时间的方法有望成为今后关联成像发展的新方向,特别是在使用宽光谱的真热光作为光源的情况下。

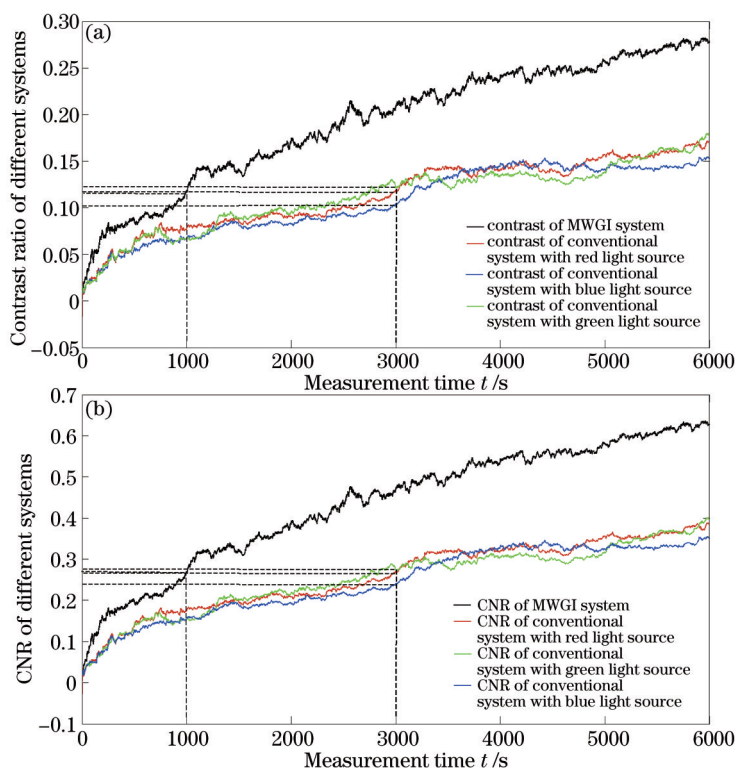


图5 MWGI系统和CGI系统的(a)对比度和(b)衬噪比随时间变化的曲线

Fig.5 (a) Contrast ratio and (b) CNR curves along with time of MWGI and CGI system

4 结 论

通过实验验证了MWGI系统能够有效地减少关联成像的成像时间,用MWGI系统和CGI系统在相同时间对相同目标进行测量,分别比较了MWGI系统的成像结果和CGI系统的成像结果的衬噪比以及对比度。通过比较发现,对同一目标进行成像,若要得到相同质量的成像结果,提出的MWGI系统所需的时间比CGI系统所需要的时间少。因此利用MWGI系统可以大幅提高关联成像的成像质量,进一步提高关联成像的实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Kaige, Cao Dezhong, Xiong Jun. The evolution of correlation imaging[J]. Physics, 2008, 37(4): 223.
汪凯戈, 曹德忠, 熊 俊. 关联光学新进展[J]. 物理, 2008, 37(4): 223.

- 2 T B Pittman, D V Strekalov, D N Klyshko, *et al.*. Two-photon geometric optics[J]. Phys Rev A, 1996, 53(4): 2804–2815.
- 3 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): R3429.
- 4 D Strekalov, A Sergienko, D Klyshko, *et al.*. Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction[J]. Phys Rev Lett, 1995, 74(18): 3600.
- 5 G Scarcelli, V Berardi, Y Shih. Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations[J]. Phys Rev Lett, 2006, 96(6): 063602.
- 6 A F Abouraddy, B E Saleh, A V Sergienko, *et al.*. Role of entanglement in two-photon imaging[J]. Phys Rev Lett, 2001, 87(12): 123602.
- 7 Y Cai, S Y Zhu. Ghost interference with partially coherent radiation[J]. Opt Lett, 2004, 29(23): 2716–2718.
- 8 D Z Cao, J Xiong, K Wang. Geometrical optics in correlated imaging systems[J]. Phys Rev A, 2005, 71(1): 013801.
- 9 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.
- 10 A Gatti, M Bache, D Magatti, *et al.*. Coherent imaging with pseudo-thermal incoherent light[J]. J Mod Opt, 2006, 53(5): 739–760.
- 11 Tang Wenzhe, Cao Zhengwen, Shi Jianhong, *et al.*. Back-side correlation imaging with digital micro mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0511004.
唐文哲, 曹正文, 石剑虹, 等. 基于数字微镜器件的“后视”关联成像[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0511004.
- 12 Wu Nan, Gong Wenlin, Han Shensheng. Experimental research on pseudo-thermal light ghost imaging with random phase plate based on variable motion trail[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0711005.
吴楠, 龚文林, 韩申生. 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[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0711005.
- 13 Chen Chao, Zhao Shengmei. Study on high order difference sifted ghost imaging scheme[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0611002.
陈超, 赵生妹. 高阶差值筛选鬼成像方案研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0611002.
- 14 Xuyang Xu, Enrong Li, Xia Shen, *et al.*. Optimization of speckle patterns in ghost imaging via sparse constraints by mutual coherence minimization[J]. Chin Opt Lett, 2015, 13(7): 071101.
- 15 Yinzuo Zhang, Jianhong Shi, Hu Li, *et al.*. Imaging through aberrating media by computational ghost imaging with incoherent light[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(1): 011102.
- 16 J Cheng, S Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(9): 093903.
- 17 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.
- 18 W Gong, S Han. Correlated imaging in scattering media[J]. Opt Lett, 2011, 36(3): 394–396.
- 19 W Gong, P Zhang, X Shen, *et al.*. Ghost “pinhole” imaging in fraunhofer region[J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(7): 071110.
- 20 W Gong, S Han. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints[J]. Phys Lett A, 2012, 376(17): 1619–1522.
- 21 Y Bromberg, O Katz, Y Silberberg. Ghost imaging with a single detector[J]. Phys Rev A, 2009, 79(5): 053840.
- 22 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0711002.
陆明海, 沈夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0711002.
- 23 D Duan, S Du, Y Xia. Multiwavelength ghost imaging[J]. Phys Rev A, 2013, 88(5): 053842.
- 24 D J Zhang, H G Li, Q L Zhao, *et al.*. Wavelength-multiplexing ghost imaging[J]. Phys Rev A, 2015, 92(1): 013823.

栏目编辑: 苏 岑