

基于叠加散斑图的反射鬼成像

蔡宏吉, 姚治海, 高超, 任捷, 刘籍元, 王晓茜*

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 提出了一种基于叠加散斑图的反射鬼成像方案。在散斑颗粒尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 的散斑图上, 随机插入不同尺寸的散斑颗粒, 将叠加成的散斑图作为鬼成像的光源。数值模拟及实验结果表明, 相对于传统的鬼成像方案, 由多种不同尺寸散斑颗粒随机混合形成的叠加散斑不仅显著提高了恢复物体空间信息的衬噪比, 还减少了采样次数, 推动了鬼成像技术的实用化。

关键词 成像系统; 反射鬼成像; 叠加散斑; 衬噪比

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP56.071101

Reflection Ghost Imaging Based on Superimposed Speckle-Pattern

Cai Hongji, Yao Zhihai, Gao Chao, Ren Jie, Liu Jiyuan, Wang Xiaoqian*

College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A reflection ghost imaging scheme based on the superimposed speckle pattern is proposed. The speckle particles of different sizes are randomly inserted into the speckle patterns with the speckle particle size of $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$. The superimposed speckle pattern is applied as the illuminating source for ghost imaging. The numerical simulation and experimental results show that, compared with the traditional ghost imaging scheme, the superimposed speckle pattern formed by random mixing of speckle particles with different sizes significantly improves the contrast-to-noise ratio of the spatial information of the recovered object. The proposed scheme can not only reduce the number of samplings, but also significantly recover the image space information, and further promote the practical application of ghost imaging technology.

Key words imaging systems; reflection ghost imaging; superimposed speckle-pattern; contrast-to-noise ratio

OCIS codes 110.3010; 110.1758; 110.2990

1 引言

鬼成像, 又称关联成像, 是一种新型的成像技术^[1-3]。鬼成像主要是利用二阶关联函数对所获得的光强进行计算, 从而达到恢复待测物体空间信息的目的。2008 年 Shapiro 提出单光路鬼成像方案, 次年 Bromberg 等验证了其可行性, 称之为计算鬼成像^[4-5]。计算鬼成像的优点在于其只有一条光路, 通过一个没有空间分辨能力的桶探测器就能够恢复出物体的空间信息。计算鬼成像主要是利用数字投影仪或空间光调制器对光源进行调制。将所得到的

散斑图样投射到待测物体表面, 将桶探测器记录的光场信息与计算所得到的总光场信息进行关联计算便能够恢复出待测物体的空间信息。相对于传统的双臂鬼成像而言, 计算鬼成像的光路简单, 并且能够人为地控制散斑图样, 可以设计出具有不同特性的散斑图样来提高成像质量, 因此计算鬼成像相比传统的鬼成像具有更高的应用价值^[6-13]。随着鬼成像研究的深入, 人们发现反射鬼成像相比透射式鬼成像更具有实际研究意义, 并且相关学者已经针对反射鬼成像展开研究^[13-17]。

Song 等^[18]在对鬼成像的研究中发现, 无论透

收稿日期: 2018-09-26; **修回日期:** 2018-10-11; **录用日期:** 2018-10-22

基金项目: 吉林省科技厅优秀青年人才基金项目(20180520165JH)、吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(吉教科合字[2016]第 354 号)

* **E-mail:** xqwang21@163.com

射式或反射鬼成像中,可见度和分辨率都呈反比关系,且散斑颗粒尺寸是影响鬼成像的重要因素之一。若使用散斑颗粒尺寸较长的散斑图样作为光源,则恢复出的物体空间信息的可见度较高,但分辨率较低;若使用散斑颗粒尺寸较短的散斑图样作为主动光源,则恢复出的物体空间信息的可见度较低,但分辨率较高。对于不同的待测物体需要不同的散斑颗粒尺寸的散斑进行测量,但是由于某些待测物体的像素点数较多,对恢复此类待测物体空间信息的速度会减慢,因此,选择合适的散斑进行实验,同时减少采样次数已经成为人们研究的重点内容。

本文主要针对散斑特性对提高反射鬼成像的成像质量和成像速度的问题展开研究,提出利用叠加散斑作为反射鬼成像的光源。在相同采样次数的情况下,相比传统的散斑成像其效果更加显著,数值模拟和实验也验证了方案的可行性。通过分析叠加散斑中具有不同种类的散斑颗粒,本文选取了相对适合的叠加散斑作为光源。

2 方法设计及数值模拟

反射鬼成像实验装置如图 1 所示,由计算机生成散斑,利用投影仪(DLP)将散斑投射到待测物体上,并通过桶探测器进行采集,记录到计算机中,作为物臂的信息。同时,这些散斑图样也可以作为参考臂的参考信息直接被存储到计算机中。对物臂以及参考臂所得到的信息进行二阶关联函数计算,即可恢复出待测物体的空间信息。

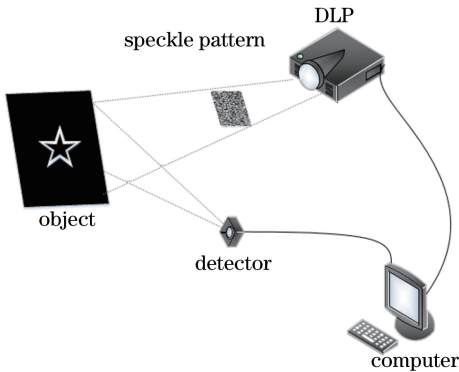


图 1 反射鬼成像的实验装置图

Fig. 1 Experimental device diagram of reflection ghost imaging

计算系统的二阶关联函数,表示为

$$g^{(2)}(x, y) = \frac{\langle I_0(x, y) I_1 \rangle}{\langle I_0(x, y) \rangle \langle I_1 \rangle}, \quad (1)$$

式中 $I_0(x, y)$ 表示投影仪投射到物体表面的空间分布, I_1 表示桶探测器探测的光强, $\langle \cdot \rangle$ 表示求平均

值。此时 $g^{(2)}(x, y)$ 能够体现出待测物体的空间信息。

为了进一步定性地描述鬼成像的成像质量,本文使用衬噪比(CNR)^[19],作为衡量标准,定义为

$$R_{\text{CNR}} = \frac{\langle G_a \rangle - \langle G_b \rangle}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}}, \quad (2)$$

式中 a 表示物体的强反射区, b 表示物体的强吸收区, $\langle G_a \rangle$ 和 $\langle G_b \rangle$ 分别表示待测物体的反光区域和背景区关联函数值的平均, σ_a^2 和 σ_b^2 分别表示位置关联函数值的方差。

为了更好地分析恢复图像的性质,对物体和光源像素化处理。首先利用计算机生成两种随机散斑图样,其单个散斑颗粒的尺寸分别为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 和 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 。在不同相干长度的散斑图样中分别随机选取一张散斑图样,如图 2 所示。

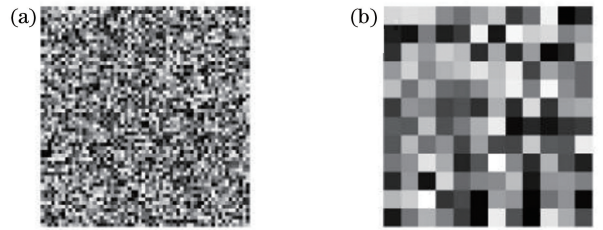


图 2 不同散斑颗粒尺寸的散斑图样。(a) 散斑颗粒尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$; (b) 散斑颗粒尺寸为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$

Fig. 2 Speckle patterns of different speckle particle sizes.

(a) Speckle particle size of $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$;

(b) speckle particle size of $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$

利用所生成的两种不同尺寸的随机散斑图样进行 500 次和 1500 次数值模拟,得到的模拟结果如图 3 所示。

通过对比图 3(a)、(c)可知,在进行 500 次模拟的实验结果中,无论使用散斑颗粒尺寸为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 还是 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 的散斑均未能准确恢复出物体信息;对比图 3(b)、(d)可知,两张数值模拟图虽可以粗略地恢复出物体信息,但是并不具有较高的空间分辨率。

因此,针对散斑尺寸为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 和 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 的散斑进行 500 次和 1500 次数值模拟分析,本文提出了叠加散斑的设计方案。叠加散斑主要是由 3 种不同散斑颗粒尺寸构成,首先生成散斑颗粒尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 的散斑,随后在此散斑图样上随机位置插入随机数量、随机灰度并且具有 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 、 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 两种尺寸的散斑颗粒,形成叠加散斑图。在叠加散斑图中随机选取两张散斑图样,如图 4 所示。

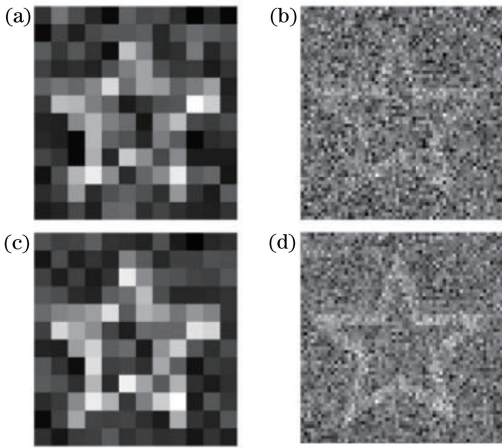


图3 计算鬼成像的数值模拟重构图。(a)(b)基于尺寸为 $5\text{ pixel}\times 5\text{ pixel}$ 的散斑分别经 500 次和 1500 次模拟后得到的重构图;(c)(d)基于尺寸为 $1\text{ pixel}\times 1\text{ pixel}$ 的散斑分别经 500 次和 1500 次模拟后得到的重构图

Fig. 3 Numerical simulation reconstruction results of computational ghost imaging. (a) (b) Reconstruction results based on 500 and 1500 simulations of speckles with a size of $5\text{ pixel}\times 5\text{ pixel}$; (c)(d) reconstruction results based on 500 and 1500 simulations of speckles with a size of $1\text{ pixel}\times 1\text{ pixel}$

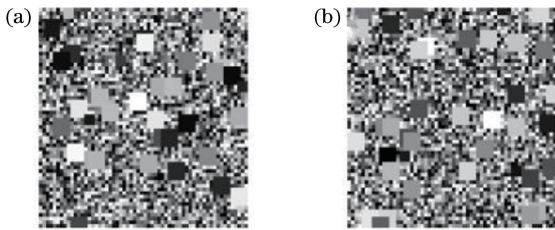


图4 叠加散斑图样。(a)随机选取的叠加散斑图样 1; (b)随机选取的叠加散斑图样 2

Fig. 4 Superimposed speckle patterns. (a) Randomly selected superimposed speckle pattern 1; (b) randomly selected superimposed speckle pattern 2

利用本文设计的叠加散斑分别进行 500 次和 1500 次数值模拟,数值模拟结果如图 5 所示。

考量使用 3 种散斑图进行鬼成像时 CNR 随测量次数增加的变化情况。由图 5 和图 3 可知,相比散斑颗粒尺寸为 $5\text{ pixel}\times 5\text{ pixel}$ 的散斑图,使用叠加散斑图的成像方案不仅可以获得更高的空间分辨率,还能恢复出更多的待测物体细节。相比散斑颗粒尺寸为 $1\text{ pixel}\times 1\text{ pixel}$ 的散斑图,使用叠加散斑图的成像方案可以在相同的测量次数下获得更好的成像质量,即使使最终的成像质量相同,叠加散斑方案所需的测量次数小于使用小尺寸散斑图的方案,

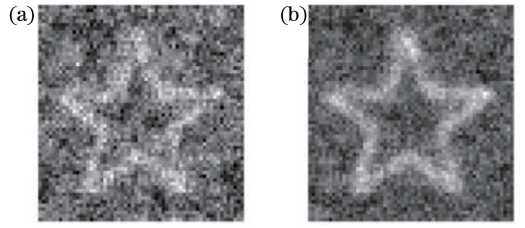


图5 基于叠加散斑的计算鬼成像的数值模拟重构图。

(a) 500 次数值模拟后;(b) 1500 次数值模拟后

Fig. 5 Numerical simulation reconstruction results of computational ghost image based on superimposed speckle. (a) After 500 times of numerical simulation; (b) after 1500 times of numerical simulation

从而提高了成像速度。

在相同采样次数下,CNR 的变化曲线如图 6 所示,当使用叠加散斑时,CNR 随着测量次数 N 的增加而提高,其提升幅度最为显著。当使用散斑颗粒尺寸为 $1\text{ pixel}\times 1\text{ pixel}$ 的散斑时,其 CNR 也会随着测量次数 N 的增加而提高,提升幅度次之。当使用散斑颗粒尺寸为 $5\text{ pixel}\times 5\text{ pixel}$ 散斑时,所得到的实验结果图不清晰,并且 CNR 随着测量次数 N 的增加提升幅度最小。

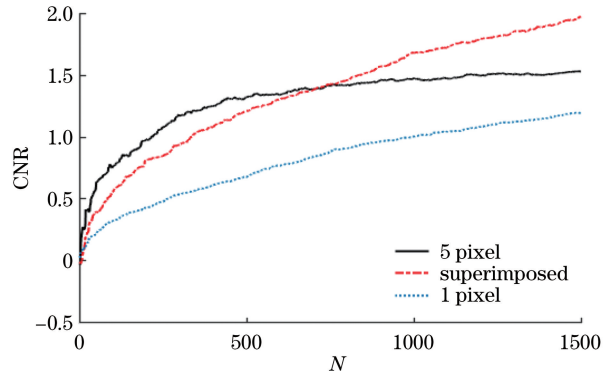


图6 不同尺寸的散斑经不同次数模拟后的 CNR 曲线

Fig. 6 CNR curves of different sizes of speckles after different times of simulation

在对叠加散斑的研究中,改变不同散斑颗粒尺寸的种类,一种仅随机插入 $5\text{ pixel}\times 5\text{ pixel}$ 的散斑颗粒,另一种仅随机插入 $3\text{ pixel}\times 3\text{ pixel}$ 的散斑颗粒,两种叠加散斑图样如图 7 所示。

随后利用包含不同种类的叠加散斑进行数值模拟分析,结果如图 8 所示。

对比图 5 和图 8,并综合分析图 9 可知,叠加散斑中随机插入两种相干长度的散斑颗粒相比随机插入一种相干长度的散斑颗粒,对于图像的恢复以及 CNR 更具有优势。

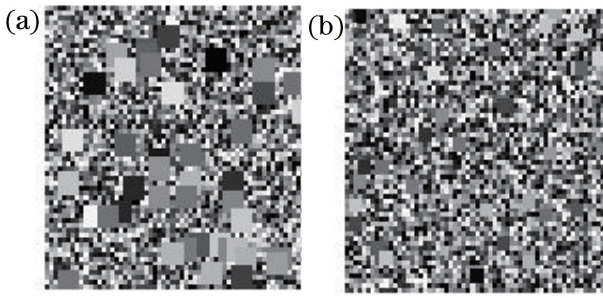


图 7 不同种类的叠加散斑随机选取的散斑图样。(a)仅随机插入 5 pixel×5 pixel 散斑颗粒;(b)仅随机插入 3 pixel×3 pixel 散斑颗粒

Fig. 7 Randomly selected speckle patterns from different types of superimposed speckles. (a) Only 5 pixel×5 pixel speckle particles are randomly inserted; (b) only 3 pixel×3 pixel speckle particles are randomly inserted

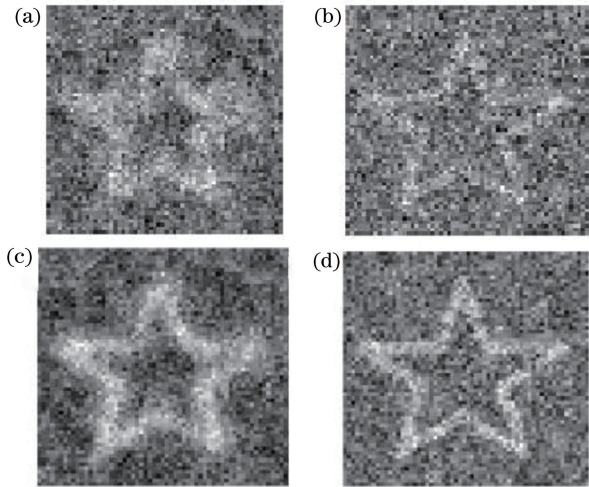


图 8 计算鬼成像的数值模拟重构图。(a)(b)使用基于随机插入的 5 pixel×5 pixel 散斑颗粒的叠加散斑分别经 500 次和 1500 次模拟后得到的重构图;(c)(d)使用基于随机插入的 3 pixel×3 pixel 散斑颗粒的叠加散斑分别经 500 次和 1500 次模拟后得到的重构图

Fig. 8 Numerical simulation reconstruction results of computational ghost imaging. (a) (b) Reconstruction results obtained after 500 and 1500 simulations using superimposed speckles based on randomly inserted 5 pixel×5 pixel speckle particles; (c) (d) reconstruction results obtained after 500 and 1500 simulations using superimposed speckles based on randomly inserted 3 pixel×3 pixel speckle particles

综上所述,在使用叠加散斑作为光源的情况下,相比具有单一相干长度的散斑,其能够在减少采样次数的同时提高成像质量。

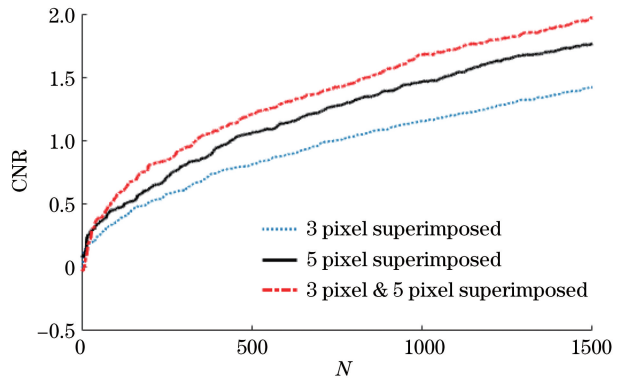


图 9 包含不同散斑颗粒的叠加散斑经不同次数模拟后的 CNR 曲线

Fig. 9 CNR curves of superimposed speckles containing different speckle particles after different times of simulation

3 实验验证

基于上述理论,本次实验使用长度为 40 mm×40 mm 的五角星作为待测物体。实验中 1 pixel×1 pixel 的散斑颗粒的长度为 0.667 mm×0.667 mm,3 pixel×3 pixel 的散斑颗粒的长度为 2 mm×2 mm,5 pixel×5 pixel 的散斑颗粒的长度为 3.33 mm×3.33 mm。分别使用两种不同相干长度的散斑以及随机插入两种散斑颗粒的叠加散斑进行 1500 次实验,待测物体以及实验结果分别如图 10 和图 11 所示。



图 10 待测物

Fig. 10 Analyte

由图 11 可知,叠加散斑在减少采样次数的同时,相比 5 pixel×5 pixel 和 1 pixel×1 pixel 散斑的成像质量有显著提升。为了更客观地评价成像质量的变化情况,通过计算恢复图像后的 CNR 变化趋势来进行比较。

图 12 描述了在相同采样次数的条件下,使用不同相干长度的散斑的 CNR 的变化趋势。综合图 11 可知,在相同采样次数时,叠加散斑在 CNR 和成像分辨率上均优于散斑颗粒尺寸为 5 pixel×5 pixel 和 1 pixel×1 pixel 的散斑,并且实验结果与数值模

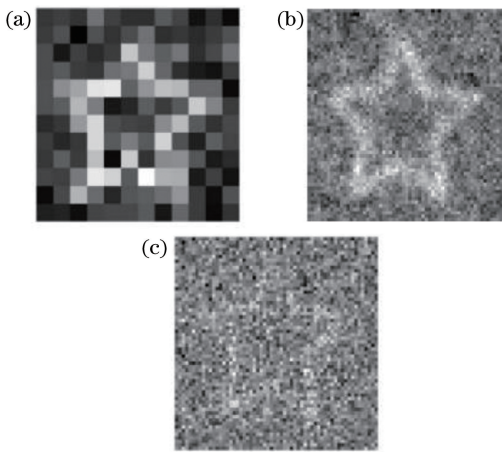


图 11 不同尺寸的散斑经不同次数反射鬼成像实验的结果。(a) 散斑颗粒尺寸为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$, 1500 次; (b) 叠加散斑, 1500 次; (c) 散斑颗粒尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$, 1500 次

Fig. 11 Results of different sizes of speckles after reflection ghost imaging experiments with different times. (a) Speckle particle size of $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$, 1500 times; (b) superimposed speckles, 1500 times; (c) speckle particle size of $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$, 1500 times

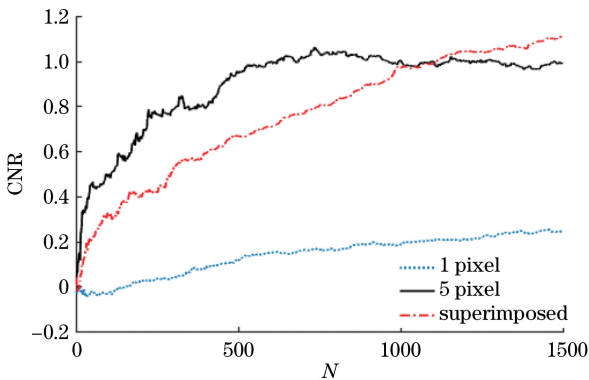


图 12 具有不同相干长度的散斑经不同次数实验后的 CNR 曲线

Fig. 12 CNR curves of speckles with different coherence lengths after different tests

拟结果相符合。

4 结 论

利用具有不同散斑颗粒尺寸的叠加散斑代替传统固定散斑颗粒尺寸的散斑,通过数值模拟以及实验验证了使用叠加散斑对反射计算鬼成像的成像质量的影响。相比只具有单一散斑颗粒尺寸的散斑,使用本文提出的叠加散斑不仅能减少采样次数,还能高质量地恢复待测物体的空间信息,对于推动反射式计算鬼成像的实用化具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [2] Gatti A, Brambilla E, Bache M, *et al.* Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(9): 093602.
- [3] Yang Z, Zhao L J, Zhao X L, *et al.* Lensless ghost imaging through the strongly scattering medium [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(2): 024202.
- [4] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [5] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [6] Jin H Q, Shi J H, Peng J Y, *et al.* Looking around corners and through turbid media with projector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0511006.
金浩强, 石剑虹, 彭进业, 等. 基于投影仪的“街角成像”和穿透散射介质成像 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0511006.
- [7] Zhou C, Huang H Y, Liu B, *et al.* Hybrid speckle-pattern compressive computational ghost imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0911001.
周成, 黄贺艳, 刘兵, 等. 基于混合散斑图的压缩计算鬼成像方法研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0911001.
- [8] Gao C, Wang X Q, Wang Z F, *et al.* Optimization of computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(2): 023838.
- [9] Zhou C, Zhu D X, Huang H Y, *et al.* Long-distance computational ghost imaging encryption strategy based on quantum key distribution [J]. *Acta Sinica Quantum Optics*, 2016, 22(4): 333-340.
周成, 朱德新, 黄贺艳, 等. 基于量子密钥分发的远距离加密计算鬼成像 [J]. *量子光学学报*, 2016, 22(4): 333-340.
- [10] Tan Z J, Yu H, Lu R H, *et al.* Study on Fourier-transform ghost imaging with partially coherent X-ray [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0411001.
谈志杰, 喻虹, 陆荣华, 等. 部分相干 X 光傅里叶变换鬼成像研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0411001.
- [11] Zhou C, Liu B, Huang H Y, *et al.* Effect of scattering medium on multi-wavelength color object correlated imaging [J]. *Laser & Optoelectronics*

- Progress, 2016, 53(10): 101102.
- 周成, 刘兵, 黄贺艳, 等. 散射介质对多波长彩色物体关联成像的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101102.
- [12] Cao F, Zhao S M. Optical encryption scheme with double secret keys based on computational ghost imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0111001.
曹非, 赵生妹. 基于计算鬼成像的双密钥光学加密方案[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0111001.
- [13] Liu S Y, Liu Z T, Wu J R, *et al.* Hyperspectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints with application of flat-field grating [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0511004.
刘盛盈, 刘震涛, 吴建荣, 等. 基于平场光栅的稀疏约束鬼成像高光谱相机[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0511004.
- [14] Meyers R, Deacon K S, Shih Y. Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons [J]. Physical Review A, 2008, 77(4): 041801.
- [15] Duan D Y, Xia Y J. Reflective ghost imaging with classical Gaussian-state light [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(3): 031102.
- [16] Yang H, Zhao S M. 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.
- [17] Li H X, Bai Y F, Shi X H, *et al.* Reflective ghost imaging free from vibrating detectors [J]. Chinese Physics B, 2017, 26(10): 104204.
- [18] Song X B, Zhang S H, Cao D Z, *et al.* Inherent relation between visibility and resolution in thermal light ghost imaging [J]. Optics Communications, 2016, 365: 38-42.
- [19] Chan K W C, O'Sullivan M N, Boyd R W. High-order thermal ghost imaging [J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3343-3345.