

水下鬼成像抗扰动能力的实验研究

吴泳波^{1,2}, 杨志慧¹, 唐志列^{1,2*}

¹华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006;

²广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广东 广州 510006

摘要 水下探测作业过程中, 水体因外界环境而产生扰动, 从而使水下的折射率发生变化, 增强水体对光的散射作用, 导致水下光学目标成像模糊, 成像质量降低。鉴于此, 采用鬼成像方式克服水下扰动, 利用参考光场和测量光场的二阶相干性分别测量某一时刻参考光束在采集平面上的光场分布与测量光束的在采集平面上的总光强, 根据总光强重建鬼成像。实验过程中, 利用超声波对水体进行扰动, 对比鬼成像方式与经典成像方式的成像结果并比较两种成像结果的峰值信噪比, 研究鬼成像系统在水下抗扰动能力。实验结果表明, 在水下扰动的环境中, 鬼成像方式的图像质量高于经典成像方式。

关键词 成像系统; 鬼成像; 抗干扰; 超声波; 峰值信噪比

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011031

Experimental Study on Anti-Disturbance Ability of Underwater Ghost Imaging

Wu Yongbo^{1,2}, Yang Zhihui¹, Tang Zhilie^{1,2*}

¹ School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

² Laboratory of Quantum Control Engineering and material of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract During underwater detection operations, the water body is disturbed by the external environment, which changes the underwater refractive index, enhances the scattering effect of the water body on light, and causes the underwater optical target to be blurred and the image quality is reduced. In view of this, the ghost imaging method is used to overcome underwater disturbances, and the second-order coherence of the reference light field and the measurement light field are used to measure separately. At a certain moment, the light field distribution of the reference beam on the collection plane and the measurement beam on the collection plane. According to the total light intensity, the ghost image is reconstructed. During the experiment, ultrasonic waves are used to disturb the water body, the imaging results of ghost imaging methods and classic imaging methods are compared, and the peak signal-to-noise ratio of the two imaging results are compared to study the anti-disturbance ability of the ghost imaging system under water. The experimental results show that the image quality of ghost imaging method is higher than that of classic imaging method in the environment of underwater disturbance.

Key words imaging systems; ghost imaging; anti-interference; ultrasonic; peak signal-to-noise ratio

OCIS codes 110.1758; 110.7050; 110.3000

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-01-20; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61575067)

*E-mail: tangzhl@scnu.edu.cn

1 引言

水下探测作业过程中,水中生物的运动、探测设备的运转或是正常的地理运动等因素都是水下扰动的来源,这些扰动会引起水介质的折射率产生不均匀的变化,以致光在水下传播的过程中受到散射、吸收及衍射的干扰而无法实现直线传播,致使目标成像模糊,这是水下目标光学成像的难点之一。为了更好地实现水下目标光学成像,目前科研人员主要使用距离选通^[1]和同步扫描^[2]两种技术。距离选通技术是使用脉冲激光器和门控照相机来达到检测效果,通过控制照相机的快门开门时间来分离不同距离处的散射光和目标反射光以获取图像。同步扫描技术是使用窄的连续激光来扫描目标区域,并使用窄视场接收器来接收反射信号以检测和重建图像信息。随着光电技术的发展,更多的水下探测系统得到了广泛的研究与应用,如载波调制激光雷达^[3]和偏振成像系统^[4]等,其中基于鬼成像的系统被越来越多地应用于水下探测,为水下成像系统提供新思路。

鬼成像又称为量子成像,是一种利用光场的二阶相干性来实现成像的技术。1988年,苏联学者 Klyshko^[5]利用了纠缠光子对来实现双光子关联成像并提出了鬼成像的方案。之后有不同的学者从量子角度理论分析鬼成像的条件,并在实验上成功实现了鬼成像^[6-7]。2005年,美国马里兰大学史研华等^[8-9]使用了旋转的毛玻璃来产生赝热光场,成功实现了经典光场下的鬼成像实验,说明鬼成像技术进入经典的光源时代。使用赝热光场进行鬼成像可以大大降低研究成本,为此关于鬼成像的研究掀起热潮。2011年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Gong 等^[10]在高散射介质中实现了鬼成像。2017年,西安交通大学 Le 等^[11]针对水下长距离成像的问题,研究了水下不同条件和不同角度的计算鬼成像,与经典光学成像相比,水下计算鬼成像可以适应更大范围的视场,可获得更令人满意的成像结果。2019年,中国海洋大学李文东团队^[12]针对高散射海水介质中目标成像的问题,使用了黑色墨水来增加海水对光的散射,与经典成像相比,鬼成像的方法在高散射的溶液中具有抗干扰的特性。2010年,韩申生团队^[13]对大气湍流进行了鬼成像,并通过解析表达式来得到湍流对图像分辨率的影响。2011年, Meyers 等^[14]针对星地激光通信之间的湍流影响问题,对大气湍流下的经典成像与鬼成像进行了对比实验。实验结果表明,相比于传统成像,鬼成像的结

果几乎没有受到影响。鬼成像具有较出色的抗干扰能力,能够适应更多的成像环境,成为近年来的研究热点之一。科研人员不仅在更多的实验环境中探索鬼成像的抗干扰特性,也对重建鬼成像的方法进行研究^[15-18],但较少研究水下扰动场的鬼成像。

超声波在水中传播可使水分子发生周期性的压缩或膨胀,从而产生微小的扰动场。由水下超声波产生的微扰动会出现光闪烁和光束漂移等现象,进而影响目标成像质量。针对上述问题,本文首先理论分析水下鬼成像系统的抗干扰原理,然后应用超声波对水体进行扰动实验,最后对经典成像和鬼成像进行对比实验。

2 基本原理

2.1 鬼成像抗干扰原理

光源入射到慢速旋转的毛玻璃后的光场为 $a(x)$,经过分束镜后分为折射光束 $b_r(x)$ 和反射光束 $b_t(x)$ ^[12],其中 x 为光束传播的空间坐标,与入射光场可以满足

$$a(x) = b_r(x) + b_t(x), \quad (1)$$

其中

$$b_r(x) = ra(x), \quad (2)$$

$$b_t(x) = ta(x), \quad (3)$$

式中: r 和 t 分别为振幅反射率和振幅透射率。

$b_r(x)$ 经过空间传播后在采集平面上的光场可表示为

$$c_r(\eta) = \int b_r(x)h_r(\eta-x)dx = \int ra(x)h_r(\eta-x)dx, \quad (4)$$

式中: η 为测量光束采集平面的空间坐标; $h(\eta-x)$ 为自由空间的传递函数, $h_r(\eta-x) = T(\eta)h(\eta-x)$, $T(\eta)$ 为物体信息,所使用的光束为测量光束。 $b_t(x)$ 经过空间传播后在采集平面上的光场可表示为

$$c_t(\xi) = \int b_t(x)h_t(\xi-x)dx = \int ta(x)h_t(\xi-x)dx, \quad (5)$$

式中: ξ 为参考光束采集平面的空间坐标; $h(\xi-x)$ 为自由空间的传递函数, $h_t(\xi-x) = h(\xi-x)$, 所使用的光束为参考光束。

鬼成像是一种利用光场的二阶相干性来实现成像的技术。使用二阶相干成像公式,分别计算在某一时刻参考光束在采集平面上的光场分布 I 与测量光束在采集平面上的总光强 S , 表达式为

$$I = c_r^*(\xi)c_r(\xi) = t^2 \left[\int a'(x)h'(\xi-x)dx' \right] \left[\int a(x)h(\xi-x)dx \right], \quad (6)$$

$$S = \oint_{D_\eta} c_r^*(x)c_r(x)dD_\eta = r^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) \left[\int a'(x)h'(\xi-x)dx' \right] \left[\int a(x)h(\xi-x)dx \right] dD_\eta, \quad (7)$$

式中： c_r^* 和 c_r 分别为参考光束采集平面的光场分布的共轭与测量光场采集平面的光场分布的共轭； $a'(x)$ 为入射光场的共轭场； $h'(\xi-x)$ 和 $h(\eta-x)$ 为参考光束的共轭传递函数与测量光束的共轭传递函数； D_η 为测量光束的采集平面光场总面积。

结合(5)~(7)式，可以得到鬼成像的重建公式，即

$$x_{GI} = \langle SI \rangle - \langle S \rangle \langle I \rangle = t^2 r^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) \delta(\eta - \xi) d\eta, \quad (8)$$

式中： $\langle \cdot \rangle$ 为多次测量的平均值； δ 为由扰动引起的光程差。当成像系统满足 $\eta = \xi$ 时，即可还原物体信息，从而得到物体的近似像。

当光在水中传播时，水分子会受到外来光波的作用受迫振动而向四周发射次波，这些次波相干叠加后再与主光波进行叠加以构成一个散射光场。实验中，

使用超声波对水体进行扰动。在水中改变分子数密度的涨落以产生超声光栅，即水体的折射率发生周期性变化，可改变入射光波前的振幅分布或相位分布。

在超声波的干扰下，光在水中传播的散射光强分布满足瑞利散射的角分布规律。散射场光强的角分布具有轴对称性，散射光强可表示为

$$I_s(\theta) = I_0(1 + \cos^2 \theta), \quad (9)$$

式中： θ 为散射光方向与入射光方向的夹角； I_0 为与入射光束正交方向上的散射光强。根据该理论可知，成像结果会因为水分子的散射而产生变形。

假设光线在水中的传播效率为 β ，在自由空间的传播效率为 α ^[13]，则实际传播到采集平面 D_η 的光强 I_{UW} 为

$$I_{UW} = \beta I + I_s, \quad (10)$$

式中： I 为正常状态下的采集平面测量到的光强。

此时在采集平面 D_η 上得到的总光强 S_{UW} 为

$$\begin{aligned} S_{UW} &= ar^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) \left[\int a'(x)h'(\xi-x)dx' \right] \left[\int a(x)h(\xi-x)dx \right] dD_\eta \\ &= ar^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) I_{UW}(\eta) dD_\eta = \alpha \beta S + ar^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) I_s(\eta) dD_\eta, \end{aligned} \quad (11)$$

结合(8)式和(10)式可得超声波扰动的鬼成像为

$$x_{GI_{UW}} = \langle S_{UW} I \rangle - \langle S_{UW} \rangle \langle I \rangle = \alpha \beta x_{GI} + \langle ar^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) I_s(\eta) dD_\eta I \rangle - \langle ar^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) I_s(\eta) dD_\eta \rangle \langle I \rangle. \quad (12)$$

I_s 值的大小与水的散射强度有关，所以在同一一次的超声扰动实验下， I_s 值应不变。 I 为参考光束热光场的光场强度，该值为一随机量，所以(10)式可改写为

$$\begin{aligned} &\langle ar^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) I_s(\eta) dD_\eta I \rangle - \\ &\langle ar^2 \oint_{D_\eta} T^2(\eta) I_s(\eta) dD_\eta \rangle \langle I \rangle = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

超声波扰动的鬼成像可表示为

$$x_{GI_{UW}} = \alpha \beta x_{GI}. \quad (14)$$

由(14)式可知，当成像系统被应用在水中并运用超声波对水体进行扰动，鬼成像结果不会受到外界随机干扰的影响，只与系统在水中的传播效率 β

和在自由空间的传播效率 α 有关，即在理论上，鬼成像方法可抗水中的微小扰动。

2.2 实验系统

因将实验系统运用在水中，为此建立一套水下鬼成像系统，实验装置如图 1 所示，M 为反射镜。激光器为氦氛内腔激光器，中心波长为 550 nm。扩束镜系统由三部分组成：放大倍率为 40 倍的物镜、直径为 25 μm 的针孔和焦距为 100 mm 的透镜 L_1 。颗粒度约为 0.01 mm 的毛玻璃厚度为 2 mm，双面打磨，直径为 10 cm。毛玻璃的旋转由一台直流电机来控制，直流电机的工作电压为 6 V。毛玻璃转速对热光鬼成像质量的影响较小^[14]，所以在实验中可以固定毛玻璃的转动速度为 0.5 r/min。BS 为 50:50 的非偏

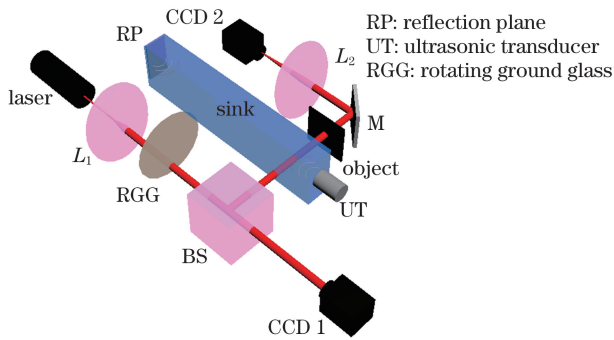


图 1 水下鬼成像的实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for underwater ghost imaging

振分束器,可将入射光源分为测量光束与参考光束。 L_2 为焦距 200 mm 的透镜。因将系统运用在水中,所以超声换能器(UT)采用频率为 2.5 MHz 的水浸式压电陶瓷(PZT)超声换能器(型号为 SIUI 2.5Z20SJ),反射板(RP)为一块平整的不锈钢板。实验所用的电荷耦合器件(CCD)为大恒图像公司出产型号为 MER-500-7UM/UC 的数字摄像机,像素尺寸为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ 。

激光光束经过分束器后分为两束。其中一束光束穿过水槽后传播一段距离照亮物体,经过透镜 L_2 会聚后再被 CCD 2 接收,CCD 2 与透镜 L_2 共同构成桶探测器,使用计算机来计算 CCD 2 中所有像素点的灰度值并作为输出强度。另一束光束的自由传播距离与物平面距离相同,而且直接被 CCD 1 探测。

为了探究鬼成像系统的水下抗扰动能力,利用超声波在水中产生超声光栅并作为实验干扰源。当超声波在液体中传播时,其声压可以使液体分子产生周期性的变化,即液体分子发生周期性的压缩或者膨胀。由于液体的折射率与液体分子的密度有关,当液体分子发生压缩时,其液体密度增大,此时折射率增大;当液体分子发生膨胀时,其液体密度减小,此时折射率变小。超声波可以使液体的折射率产生相对应的周期性变化,从而形成疏密波,此时产生超声光栅,形成原理如图 2 所示,其中 P 为观察平面,即光屏。

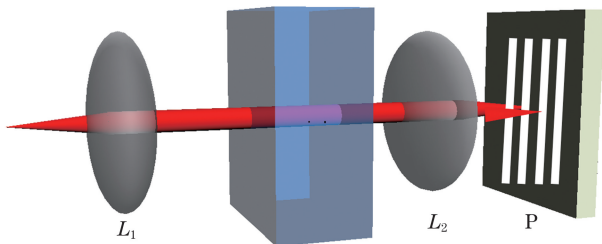


图 2 超声光栅的形成原理

Fig. 2 Formation principle of ultrasonic grating

该类超声光栅会增加水对光波的散射作用,而驻波超声光栅则会最大程度地影响光波的传播。

成像物体为一个高约为 3 mm 的等边三角形,该三角形右上角有一圆形微凸起。首先在水槽中未加入清水的情况下,分别采集该成像物体在经典成像与鬼成像中的实验结果;之后在水槽中加入清水的情况下,记录在清水干扰下的实验数据;然后开启超声换能器并调节超声波的频率和超声换能器与反射板之间的距离,使水槽中产生超声光栅,并在其焦平面记录频谱像的同时在 CCD 中观察超声光栅所形成的像;最后采用传统重建鬼成像的方法重建图像。将实验中采集到的图像存入两个不同的文件夹,使用两个程序对图像进行处理。第一个程序读取测量场的 CCD 图像,得到每一幅图像的灰度总值,作为桶探测器的光强值,将其保存为 TXT 文件;第二个程序读取 TXT 文件与参考臂上的 CCD 图像,对两组数据进行关联计算以得到重建图像。

实验中,根据形成超声光栅的条件,选择的超声波频率为 3142.2 kHz,超声波的幅值为 20 V,超声换能器与反射平面之间的距离为 23 cm。开启旋转的毛玻璃装置,运用 LabView 程序对两路 CCD 实现同步采集。在三组不同的实验条件下分别采集经典图像与鬼成像图像各 1500 张图像,共采集 9000 张。

3 结果分析与讨论

为了讨论水下鬼成像的抗扰动能力,首先使用超声换能器在水中产生超声光栅,实验中产生的超声光栅分别为驻波超声光栅与行波超声光栅,如图 3 所示。从图 3 可以看到,驻波超声光栅的成像衬比度高,即当形成驻波时,超声波对水分子的作用更大,同时对光波传播的影响也较大。为了更好地

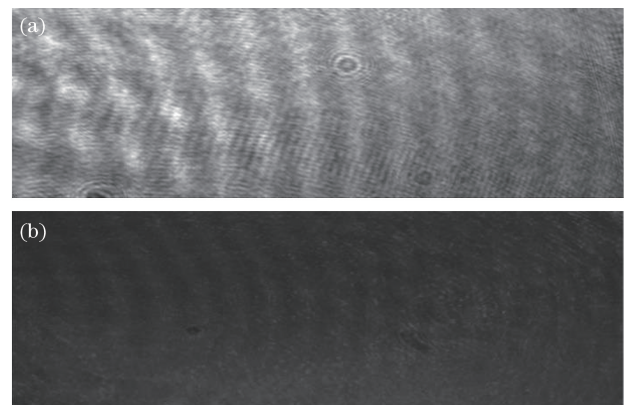


图 3 超声光栅。(a)驻波超声光栅;(b)行波超声光栅

Fig. 3 Ultrasonic grating. (a) Standing wave ultrasonic grating; (b) travelling-wave ultrasonic grating

对比经典成像与鬼成像方式的抗干扰能力,故使用驻波超声光栅作为干扰源。

实验只对图像的成像质量进行讨论。按照干扰

源的不同,依次进行三组不同条件的实验,干扰源有无干扰、清水干扰和 underwater 超声波干扰,结果如图 4 所示。

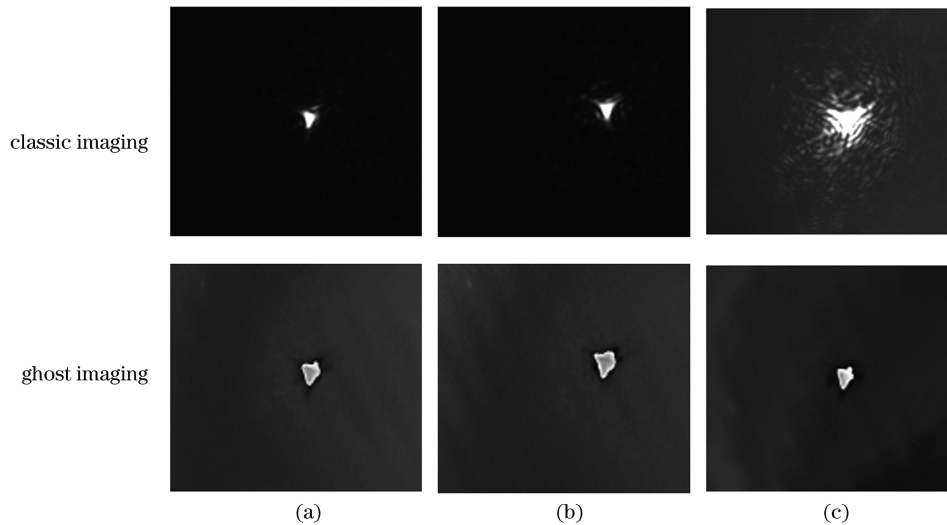


图 4 不同干扰条件下的成像结果。(a) 无干扰;(b) 清水干扰;(c) 水下超声波干扰

Fig. 4 Imaging results under different interference conditions. (a) No interference; (b) clear water interference; (c) underwater ultrasonic interference

从图 4 可以看到,随着干扰情况的变化,经典成像方式的周边水纹波动明显较强,成像质量明显较低,特别是在水下超声波干扰的情况下,周边水纹的干扰使成像三角形的边缘较模糊;随着干扰情况的变化,鬼成像方式的成像结果基本上保持不变。

为了更好地对比成像质量,引入峰值信噪比 (PSNR) 来评价成像质量,PSNR 可表示为

$$P_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left[\frac{(2^m - 1)^2}{x_{\text{MSE}}} \right], \quad (15)$$

式中: m 为图像的比特率,一般 m 值取 8; x_{MSE} 为原图像与处理图像之间的方均误差。使用 PSNR 来表征两种不同成像方式在不同干扰源的情况下的成像质量。PSNR 值越高,表明图像失真越小。

将两种成像方式在无干扰下的成像结果作为参考值,不同干扰条件下的 PSNR 如表 1 所示,柱状图如图 5 所示。

表 1 不同干扰条件下的 PSNR

Table 1 PSNR under different interference conditions

Type	No interference	Clear water	Ultrasonic
Classic imaging	42.2858	41.6744	27.3571
Ghost imaging	28.7977	28.3104	27.5149

从表 1 和图 5 可以看到,两种成像结果的 PSNR 在无干扰的情况下最大,所以两种成像质量均在无干扰的情况下最好。由于使用热光源,鬼成像方式的结果在无干扰与清水情况下的 PSNR

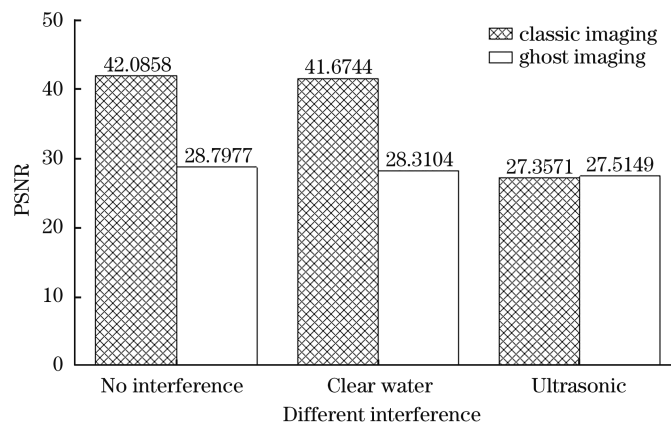


图 5 不同干扰条件下的 PSNR 柱状图

Fig. 5 PSNR histogram under different interference conditions

低于经典成像方式。当存在超声波扰动时,两种成像结果的 PSNR 降低,说明超声波扰动能够影响成像质量。经典成像方式的 PSNR 值约为 15,而鬼成像方式小于 1,即经典成像方式对水下扰动敏感,经典成像方式的成像质量受到外界干扰大,而鬼成像方式受到外界干扰小。在超声波扰动的情况下,鬼成像方式的 PSNR 大于同组经典成像方式,对应的成像质量也高于经典成像方式。

4 结 论

从理论上分析鬼成像的抗干扰原理,对经典成像与鬼成像的结果进行对比,并计算水下各类型干扰下两种不同成像方式的 PSNR。实验结果表明,采用鬼成像方式对水下超声波的扰动具有不敏感性,表明鬼成像方式具有一定的水下抗扰动特性,为研究扰动状态下的水下成像研究积累经验,并为应用在水下探测的鬼成像技术积累经验,为水下探测系统的改进提供支持。

参 考 文 献

- [1] Mariani P, Quincoces I, Haugholt K, et al. Ranged imaging system for underwater monitoring in ocean environment[J]. *Sustainability*, 2018, 11(1): 162.
- [2] Kulp T J, Garvis D, Kennedy R, et al. Development and testing of a synchronous-scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(19): 3520-3530.
- [3] Pellen F, Guern Y, Olivard P, et al. Loss of radio frequency modulation on optical carrier in high scattering medium: effects of multiple scattering and field of view selection[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, 34(11): L49-L51.
- [4] Guan J G, Cheng Y Y, Chang G L. Time-domain polarization difference imaging of objects in turbid water[J]. *Optics Communications*, 2017, 391: 82-87.
- [5] Klyshko D N. Two-photon light: influence of filtration and a new possible EPR experiment[J]. *Physics Letters A*, 1988, 128(3/4): 133-137.
- [6] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): r3429.
- [7] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, et al. Role of entanglement in two-photon imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(12): 123602.
- [8] Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermal light[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 063601.
- [9] Ferri F, Magatti D, Gatti A, et al. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 183602.
- [10] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [11] Le M N, Wang G, Zheng H B, et al. Underwater computational ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22859-22868.
- [12] Zhang Y, Li W D, Wu H Z, et al. High-visibility underwater ghost imaging in low illumination[J]. *Optics Communications*, 2019, 441: 45-48.
- [13] Zhang P L, Gong W L, Shen X, et al. Correlated imaging through atmospheric turbulence[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033817.
- [14] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y. Turbulence-free ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(11): 111115.
- [15] Zhao M, Wang Y, Tian Z M, et al. Method of push-broom underwater ghost imaging computation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(16): 161101.
赵明, 王钰, 田芷铭, 等. 水下推扫式计算鬼成像的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(16): 161101.
- [16] Yan G Q, Yang F B, Wang X X, et al. Computational ghost imaging based on orthogonal sinusoidal speckle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 041019.
闫国庆, 杨风暴, 王肖霞, 等. 基于正交化正弦散斑的计算鬼成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 041019.
- [17] Yang S C, Yu H, Lu R H, et al. Simulation of Fourier-transform ghost imaging using polychromatic X-ray sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0511003.
杨善初, 喻虹, 陆荣华, 等. 非单色 X 光傅里叶变换鬼成像模拟[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0511003.
- [18] Mei X D, Gong W L, Han S S. Laser ghost imaging based on time-over-threshold technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0410003.
梅笑冬, 龚文林, 韩申生. 基于超阈值时间技术的激光关联成像[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0410003.