

引用格式: ZHANG Qin-wei, CAO Lian-zhen, LIU Xia, *et al.* Imaging Analysis of Reflective Ghost Imaging in Oceanic Turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9):0901002

张钦伟, 曹连振, 刘霞, 等. 反射式鬼成像在海洋湍流中的成像分析[J]. 光子学报, 2020, 49(9):0901002

# 反射式鬼成像在海洋湍流中的成像分析

张钦伟, 曹连振, 刘霞, 杨阳, 赵加强, 逯怀新, 贺志波

(潍坊学院 物理与光电工程学院 山东省高校多光子纠缠与操纵重点实验室, 山东 潍坊 261061)

**摘 要:** 基于惠更斯-菲涅尔原理和鬼成像理论, 研究了反射式无透镜鬼成像在 Kolmogorov 海洋湍流中目标成像问题, 得到了成像脉冲响应函数和可见度理论表达式。结果表明随着目标随机反射角的增大, 关联重构的图像质量将会失真退化。为进一步分析海洋湍流对目标图像质量的影响, 数值模拟了不同探测距离、不同海洋湍流情况下鬼成像的可见度, 得到了海洋湍流作用下的鬼成像目标探测规律。该研究对远距离自适应水下鬼成像大规模应用具有重要的理论指导意义。

**关键词:** 量子光学; 海洋光学; 反射式鬼成像; 海洋湍流; 可见度

中图分类号: O431.2; O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0901002

## Imaging Analysis of Reflective Ghost Imaging in Oceanic Turbulence

ZHANG Qin-wei, CAO Lian-zhen, LIU Xia, YANG Yang, ZHAO Jia-qiang,  
LU Huai-xin, HE Zhi-bo

(Shandong Provincial Key Laboratory of Multi-photon Entanglement and Manipulation, Department of Physics and Optoelectronic Engineering, Weifang University, Weifang, Shandong 261061, China)

**Abstract:** Based on the extended Huygens-Fresnel integral and the theory of ghost imaging, the reflective lensless ghost imaging through Kolmogorov oceanic turbulence is investigated. The theoretical expressions for the impulse response function and the visibility of reflective ghost imaging in oceanic turbulence are obtained. The results show that the quality of reflective ghost imaging could be maintained at a relatively small incident reflective angle, whereas the quality is degraded dramatically at a relatively long distance with a relatively big incident reflective angle. The visibility of reflective ghost imaging is analyzed under various turbulence conditions and over different propagation distances by numerical calculation. It is a guidance for the realization of adaptive underwater optical ghost imaging over different length scales under the effect of oceanic turbulence.

**Key words:** Quantum optics; Ocean optics; Reflective ghost imaging; Oceanic turbulence; Visibility

**OCIS Codes:** 010.4450; 110.0715; 010.7060; 010.7295; 270.1670

## 0 引言

随着海洋资源勘探、开发、利用的日益深入, 海洋复杂环境中水下目标的探测识别越发重要。水下成像技术作为海洋观测的一种重要手段, 主要包括基于声呐的水下声成像和基于光电技术的水下光成像。近年来, 随着光电传感器以及信号和图像处理技术的快速发展, 水下光成像技术越来越受到各国军事应用和科学研究的重视, 成为与声呐成像技术互补的一种水下观测方式。目前, 主要的水下光成像技术包括距离选通<sup>[1-2]</sup>、

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 11404246), 山东省重点研发计划(No. 2019GGX101073), 山东省自然科学基金(Nos. ZR2019LL006, ZR2018LA014, ZR2017MF040), 山东省高等学校科技计划项目(No. J17KA188)

**第一作者:** 张钦伟(1990-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为量子信息处理与关联成像。Email: qwzhang@wfu.edu.cn

**通讯作者:** 贺志波(1972-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为光量子信息理论。Email: 20110707@wfu.edu.cn

**收稿日期:** 2020-06-01; **录用日期:** 2020-07-07

<http://www.photon.ac.cn>

偏振光成像<sup>[3-4]</sup>、同步扫描<sup>[5]</sup>等技术,而水下光成像技术由于受到水气界面、湍流、海水的吸收散射等影响,使得其在水下目标探测中有效探测距离、有效信息量和成像质量等方面受到较大限制,给目标识别带来了很大困难.为实现高分辨率、抗干扰的水下光学目标探测,亟需一种新的成像技术.

近年来,起源于量子光学的鬼成像,又称为关联成像,是一种新颖的非局域成像技术.1988年,科学家首次提出了基于纠缠光的量子鬼成像理论<sup>[6]</sup>,该理论于1995年被史砚华等实验所证实<sup>[7]</sup>,随后,使用光子纠缠态实现量子鬼成像的大量研究成果相继被报道<sup>[8-11]</sup>.随着研究的深入,通过周期转镜产生的空间部分相干赝热光实现鬼成像方案<sup>[12]</sup>和通过空间光调制器简化实验装置的计算鬼成像方案<sup>[13]</sup>相继被提出,鬼成像机理已基本清晰.鬼成像是一种通过计算参考光和物光的二阶统计关联获得图像的全新成像方式,其中参考光须具有时空双重随机性,而物光的探测无须具有空间分辨能力.已证明,鬼成像具有突破瑞利衍射极限的能力<sup>[14-15]</sup>,并具有良好的抗干扰性<sup>[16-17]</sup>.为了提高成像质量,差分关联算法<sup>[18]</sup>、归一化关联算法<sup>[19]</sup>、伪逆关联算法<sup>[20]</sup>和压缩感知关联算法<sup>[21-22]</sup>等图像重构算法相继被提出.为进一步优化成像系统环境适应性,研究者分别从大气湍流<sup>[16]</sup>、介质散射<sup>[17]</sup>等方面分析环境因素对成像质量的影响,提出了自适应鬼成像<sup>[23]</sup>.

由于海洋湍流及水体吸收散射问题的存在,水下鬼成像的研究远远滞后自由空间与大气环境中鬼成像的研究.2015年,华中科技大学从理论和实验上论证了水下光学鬼成像的可行性,并指出在远距离、浑浊水体环境中其成像具有明显优势<sup>[24]</sup>.为了进一步优化成像质量实现自适应水下关联成像,就必须掌握海洋湍流这一关键干扰因素对鬼成像的作用规律.海洋湍流运动在时间和空间具有随机性,常采用统计理论来得到湍流场运动参量.远离海面、海岸和海底不受边界条件限制处于Kolmogorov小尺度涡旋量级的大洋内部湍流场都可以近似为均匀各向同性湍流,这是研究海洋湍流的基础模型.由于水下探测目标位置往往具有不确定性,透射式鬼成像往往不具备灵活性、易操作性,而反射式鬼成像易对水下物体的反射信号进行收集,具有很强的灵活性、操作性,但反射式鬼成像在海洋湍流中传输问题鲜有报道.

本文建立了反射式鬼成像在海洋湍流中传输模型,在此基础上,采用广义惠更斯-菲涅尔原理和海洋湍流Rytov近似,理论推导出反射式鬼成像在Kolmogorov海洋湍流中脉冲响应函数表达式.研究表明,随着水下探测目标距离的增长,入射角度的增大,关联重构图像的质量将会严重退化.为了进一步分析海洋湍流对关联重构图像的影响,定量分析了不同海洋湍流情况下鬼成像的可见度.该研究对远距离自适应水下鬼成像应用具有理论指导意义.

## 1 基本原理

在不考虑水的吸收散射前提下,建立的水下反射式鬼成像系统模型,如图1所示.激光照射到旋转的玻璃制备的赝热光源,被分束器BS分成两束,参考光被面阵CCD探测器 $D_r$ 接收;物光经海洋湍流以入射角 $\theta_1$ 照射到表面光滑的反射目标上,并以反射角 $\theta_0$ 反射经海洋湍流后被单像素的桶探测器 $D_t$ 接收. $\psi_1$ 和 $\psi_2$

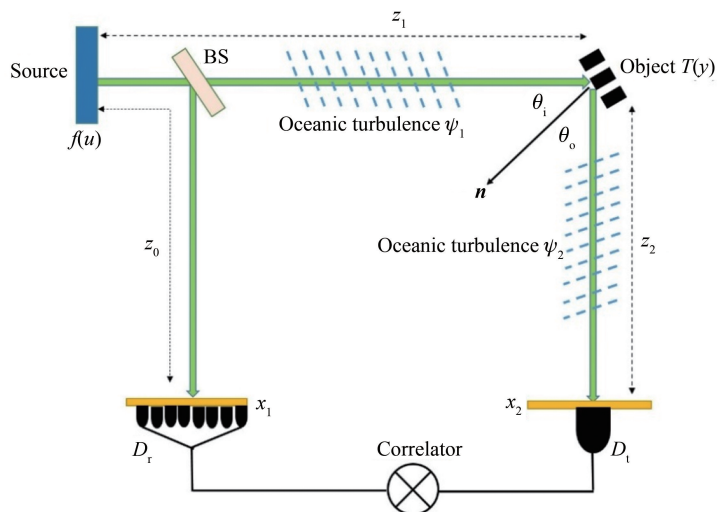


图1 反射式鬼成像在海洋湍流中传输模型

Fig.1 Schematic of reflective ghost imaging through oceanic turbulence

是海洋湍流带来的相位扰动。 $z_0, z_1, z_2$  分别表示光源到参考光探测器、反射目标,目标到物光探测器的距离。 $T(y)$ 为反射目标的反射系数。

根据广义的惠更斯-菲涅耳原理,参考探测器接收面  $x_1$  处的光场可写为<sup>[25]</sup>

$$E(x_1) = \int f(u)h_0(x_1, u)du \quad (1)$$

式中,  $f(u)$ 为光源的场分布,  $h_0(x_1, u)$ 是从光源到参考探测器的脉冲响应函数,其形式为

$$h_0(x_1, u) = \left(\frac{-j}{\lambda z_0}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_0}(x_1 - u)^2\right] \quad (2)$$

同样,物光探测器接收面  $x_2$  处的光场可以写为

$$E_2(x_2) = \int dudyf(u)h_1(y \cos \theta_i, u)T(y)h_2(x_2, y \cos \theta_o) \quad (3)$$

式中,  $h_1(y \cos \theta_i, u)$ 和  $h_2(x_2, y \cos \theta_o)$ 分别是光源到反射目标的脉冲响应函数和反射目标到物光探测器的脉冲响应函数,其形式为

$$h_1(y \cos \theta_i, u) = \left(\frac{-j}{\lambda z_0}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_0}(y \cos \theta_i - u)^2\right] \exp[\psi_1(y \cos \theta_i, u)] \quad (4)$$

$$h_2(x_2, y \cos \theta_o) = \left(\frac{-j}{\lambda z_2}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_2}(x_2 - y \cos \theta_o)^2\right] \exp[\psi_2(x_2, y \cos \theta_o)] \quad (5)$$

物光和参考光的强度起伏二阶关联函数为<sup>[25]</sup>

$$G(x_1, x_2) = \langle I_1(x_1)I_2(x_2) \rangle - \langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle \quad (6)$$

式中,  $\langle I_1(x_1)I_2(x_2) \rangle$ ,  $\langle I_2(x_2) \rangle$ ,  $\langle I_1(x_1) \rangle$ 分别为两路光强的关联平均、物光平均光强、参考光平均光强。

通过对赝热光场的高斯随机零平均处理<sup>[25]</sup>,可得到

$$\langle f(u_1)f^*(u'_1)f(u_2)f^*(u'_2) \rangle = \langle f(u_1)f^*(u'_1) \rangle \langle f(u_2)f^*(u'_2) \rangle + \langle f(u_1)f^*(u'_2) \rangle \langle f(u_2)f^*(u'_1) \rangle \quad (7)$$

假定光源为空间完全不相干且光强为高斯型分布的赝热光,则光源处光场的光强可改写为

$$\langle f(u)f^*(u') \rangle = \exp(-u^2/\rho_s^2)\delta(u - u') \quad (8)$$

式中,  $\rho_s$ 是光源的相干长度.将式(7)与式(8)带入式(6)可得到

$$\begin{aligned} G(x_1, x_2) &= \langle I_1(x_1)I_2(x_2) \rangle - \langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle = \\ &= \frac{1}{\lambda^3 z_0 z_1 z_2} \int du_1 du'_1 du_2 du'_2 dy dy' T(y) T^*(y') \langle f(u_1)f^*(u'_2) \rangle \times \langle f(u_2)f^*(u'_1) \rangle \times \\ &= \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z_0}[(x_1 - u_1)^2 - (x_1 - u'_1)^2]\right\} \times \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z_1}[(y \cos \theta_i - u_2)^2 - (y' \cos \theta_i - u'_2)^2]\right\} \times \\ &= \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z_2}[(x_2 - y \cos \theta_o)^2 - (x_2 - y' \cos \theta_o)^2]\right\} \times \langle \exp[\psi_1(y \cos \theta_i, u_2) + \psi_1^*(y' \cos \theta_i, u'_2)] \rangle \times \\ &= \langle \exp[\psi_2(x_2, y \cos \theta_o) + \psi_2^*(x_2, y' \cos \theta_o)] \rangle \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\langle \cdot \rangle$ 为统计平均, \*为复共轭.在各向同性均匀介质中,利用 Rytov 近似,海洋湍流引起的相位统计平均可以写为球面波结构函数的形式<sup>[27]</sup>

$$\begin{aligned} &\langle \exp[\psi_i(y, u_2) + \psi_i^*(y', u'_2)] \rangle = \\ &= \exp\left\{-4\pi^2 k^2 z_i \int_0^1 \int_0^\infty \kappa \phi_n(\kappa) \{1 - J_0[|(1 - \xi)(u_2 - u'_2) + \xi(y - y')|]\} d\kappa d\xi\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $J_0$ 为0阶贝塞尔函数.在光源起伏程度比随机介质起伏程度大的多的时候,贝塞尔函数可以用二阶近似  $J_0 = 1 - x^2/4$  代替,式(10)则改写为

$$\begin{aligned} &\langle \exp[\psi_i(y, u_2) + \psi_i^*(y', u'_2)] \rangle = \\ &= \exp\left\{-\frac{\pi^2 k^2 z_i}{3} [(u_2 - u'_2)^2 + (u_2 - u'_2)(y - y') + (y - y')^2] \int_0^\infty \kappa^3 \phi_n(\kappa) d\kappa\right\} = \\ &= \exp\left\{-\frac{(u_2 - u'_2)^2 + (u_2 - u'_2)(y - y') + (y - y')^2}{\rho_i^2(z_i)}\right\} \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $\rho_i(z_i)$  为球面波在海洋湍流中相干长度, 该物理量的大小可以反应出海洋湍流对光场影响的强弱, 其形式为

$$\rho_i(z_i) = \left[ \frac{\pi^2 k^2 z_i}{3} \int_0^\infty \kappa^3 \phi_n(\kappa) d\kappa \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中,  $\phi_n(\kappa)$  是各项同性的海水的折射率扰动的空间功率谱, 其形式为<sup>[28]</sup>

$$\phi_n(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} \epsilon^{-\frac{1}{3}} \kappa^{-\frac{11}{3}} \left[ 1 + 2.35 (\kappa\eta)^{\frac{2}{3}} \right] \frac{\chi_T}{\omega^2} [\omega^2 \exp(-A_T \delta) + \exp(-A_S \delta) - 2\omega \exp(-A_{TS} \delta)] \quad (13)$$

式中,  $\epsilon$  是单位质量液体中的湍流动能耗散率, 取值范围是  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3 \sim 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$ ,  $\eta$  是 Kolmogorov 海洋湍流内尺度, 一般取值为  $10^{-3} \text{ m}$ .  $\chi_T$  是均方温度的耗散率, 取值范围是  $10^{-10} \text{ K}^2/\text{s} \sim 10^{-4} \text{ K}^2/\text{s}$ .  $\omega$  表示温度波动和盐度波动的相对强度, 其取值范围是  $-5 \sim 0$ , 当  $\omega = -5$  时, 说明海洋湍流主要是由盐度波动引起的; 当  $\omega = 0$  时说明海洋湍流是由温度波动引起的, 其余参数为  $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$ ,  $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$ ,  $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ ,  $\delta = 8.248(\kappa\eta)^{\frac{4}{3}} + 12.978(\kappa\eta)^2$ .

当光源相干长度与湍流尺寸满足  $\rho_s \gg \eta$  时, 海洋湍流中球面波相干长度则可以表示为

$$\rho_i(z_i) = \left[ 3.603 \times 10^{-7} k^2 z_i \epsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{2\omega^2} (0.419\omega^2 - 0.838\omega + 0.419) \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (14)$$

定义  $\gamma_i = \frac{\pi}{\lambda z_i}$ , ( $i=0, 1, 2$ ),  $\beta_1 = \frac{1}{\rho_1^2(z_1)}$ ,  $\beta_2 = \frac{1}{\rho_2^2(z_2)}$ ,  $l = \frac{1}{\rho_s^2}$ , 将式(11)和式(14)带入式(9)中, 可得到

$$G(x_1, x_2) = \frac{\gamma_0 \gamma_1 \gamma_2}{\pi^3} \int dy dy' T(y) T^*(y') \exp[j\gamma_1(y^2 - y'^2) \cos^2 \theta_i + j\gamma_2(x_2 - y \cos \theta_o)^2 - j\gamma_2(x_2 - y' \cos \theta_o)^2 - (\beta_1 \cos^2 \theta_i - \beta_2 \cos^2 \theta_o)(y - y')^2] \times h(y, y', x_1) \quad (15)$$

其中

$$h(y, y', x_1) = \int du_1 du_2 \exp\{-u_1^2(l + \beta_1 + j\gamma_1 - j\gamma_0) + 2u_1 u_2 \beta_1 - u_2^2(l + \beta_1 + j\gamma_0 - j\gamma_1) - u_1[-\beta_1 \cos \theta_i(y - y') + 2j\gamma_0 x_1 - 2j\gamma_1 y'] - u_2[\beta_1 \cos \theta_i(y - y') - 2j\gamma_0 x_1 + 2j\gamma_1 y']\} \quad (16)$$

当满足无透镜鬼成像的条件  $z_0 = z_1$  时, 即  $\gamma = \gamma_0 = \gamma_1$ , 令  $A = C = l + \beta_1$ ,  $B = -2\beta_1$ ,  $D = -\beta_1 \cos \theta_i(y - y') + 2j\gamma x_1 - 2j\gamma y' \cos \theta_i$ ,  $E = \beta_1 \cos \theta_i(y - y') - 2j\gamma x_1 + 2j\gamma y \cos \theta_i$ , 则式(16)可化简为

$$h(y, y', x_1) = \frac{2\pi}{\sqrt{4AB - C^2}} \exp\left(\frac{-BDE - CD^2 - AE^2}{4AB - C^2}\right) \quad (17)$$

通过对  $x_2$  处参考光进行单像素积分探测, 则可得到鬼成像表达式

$$G(x_1) = \frac{\gamma^2 \gamma_2}{\pi^3} \int |t(y)|^2 dy h(y, y', x_1) \quad (18)$$

鬼成像可见度则可以表示为

$$\text{Visibility} = \frac{G_{\max}(x_1) - G_{\min}(x_1)}{G_{\max}(x_1) + G_{\min}(x_1)} \quad (19)$$

因此, 通过式(18)和式(19)就可以分析反射式鬼成像在海洋湍流中成像可见度的变化情况, 进而为引入自适应技术提高水下鬼成像质量提供理论指导.

## 2 鬼成像传输特性的数值计算与分析

以缝宽为 2 cm, 缝间距为 6 cm 的双缝作为水下反射目标, 该部分将采用上一节建立的反射式鬼成像在海洋湍流中传输模型进行数值分析.

### 2.1 不同反射角的反射式鬼成像

为了得到反射式鬼成像在海洋湍流中成像特性与目标反射角的关系, 模拟了当反射角分别为  $\theta_i = \pi/8$ ,  $\theta_i = \pi/4$ ,  $\theta_i = \pi/3$  情况下反射式鬼成像, 如图 2 所示. 为了对比不同反射角鬼成像在海洋湍流中成像特性, 选



取了共同参数如下:  $z_1 = 100$  m,  $\lambda = 532$  nm,  $\rho_s = 0.025$  m,  $\omega = -5$ ,  $\chi_T = 10^{-7}$  K<sup>2</sup>/s,  $\epsilon = 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>,  $\eta = 10^{-3}$  m. 由图 2 可以看出, 在相同的水下成像环境中, 随着反射角的增大, 双缝间距进一步缩小, 双缝图像质量失真退化. 当反射角  $\theta_i = \pi/3$  时, 双缝间距变为 0.03 m, 其缝宽也仅为 0.001 m. 目标反射角作用在鬼成像脉冲响应函数上, 反射角的增大, 将导致成像脉冲响应函数振幅衰减, 进而影响图像质量. 因此, 在对水下目标探测时, 尽量采取小角度对目标反射探测以保证关联重构目标的保真性. 如果在复杂环境大角度对水下目标探测时, 就要需采取相位补偿自适应技术进行目标反射探测.

## 2.2 不同探测距离下反射式鬼成像

由于在实际水下环境对目标探测时, 探测距离是不确定的, 因此有必要研究不同探测距离的鬼成像. 相关研究表明, 激光在最浑浊的 jerlov 类型 III 海水中(总衰减系数为 0.3 m)可传输百米量级<sup>[29]</sup>, 因此本文选取的探测目标距离  $z_1 = 10$  m,  $z_1 = 50$  m,  $z_1 = 100$  m 情况下反射式鬼成像, 如图 3 所示, 其共同参数如下:  $\theta_i = \pi/4$ ,  $\lambda = 532$  nm,  $\rho_s = 0.025$  m,  $\omega = -5$ ,  $\chi_T = 10^{-7}$  K<sup>2</sup>/s,  $\epsilon = 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>,  $\eta = 10^{-3}$  m. 由图 3 可以看出, 随着探测距离的延长, 其成像质量将进一步退化, 当探测距离为 100 m 时, 双缝已变成两个尖峰, 完全失去了双缝目标的真实性. 产生这种现象的主要原因是, 随着探测距离的延长, 海洋湍流对物光带来的随机相位增大, 导致物光场与参考光场的二阶相干性存在一定的消相干.

## 2.3 不同海洋湍流反射式鬼成像可见度

为了进一步研究海洋湍流对鬼成像的影响, 分析了不同海洋湍流情况下反射式鬼成像的可见度.

为了探究鬼成像可见度与海洋湍流  $\chi_T$  的关系, 选取了共同参数的参量:  $z_1 = 100$  m,  $\theta_i = \pi/4$ ,  $\lambda = 532$  nm,  $\rho_s = 0.025$  m,  $\omega = -1$ ,  $\epsilon = 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>,  $\eta = 10^{-3}$  m; 研究了海洋湍流均方温度的耗散率  $\chi_T = 9 \times 10^{-8}$  K<sup>2</sup>/s,  $\chi_T = 5 \times 10^{-8}$  K<sup>2</sup>/s,  $\chi_T = 10^{-8}$  K<sup>2</sup>/s 情况下的成像可见度. 由图 4 可以看出, 当对较远目标探测时, 随着  $\chi_T$  的增大, 海洋湍流扰动增大, 球面波相干长度变小, 目标重构图像严重退化. 假设对水下 60m 远的目标进行探测, 海洋湍流均方温度的耗散率  $\chi_T$  由  $10^{-8}$  K<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> 增大至  $5 \times 10^{-8}$  K<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> 时, 图像可见度则由 0.33 衰退接近 0.26, 衰退相当严重. 然而, 在对近距离目标探测时, 图像质量几乎不随海洋湍流均方温度的耗散率  $\chi_T$  变化而退化. 该模拟结果可作为弱海洋湍流长距离水下鬼成像目标探测可行性理论依据.

为了探究鬼成像可见度与海洋湍流  $\epsilon$  的关系, 选取了共同参数的参量:  $z_1 = 100$  m,  $\theta_i = \pi/4$ ,  $\lambda = 532$  nm,  $\rho_s = 0.025$  m,  $\omega = -1$ ,  $\chi_T = 10^{-7}$  K<sup>2</sup>/s,  $\eta = 10^{-3}$  m; 研究了单位质量液体中的湍流动能耗散率为  $\epsilon = 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>,  $\epsilon = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>,  $\epsilon = 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> 情况下的成像可见度. 如图 5 所示, 当目标在较远的

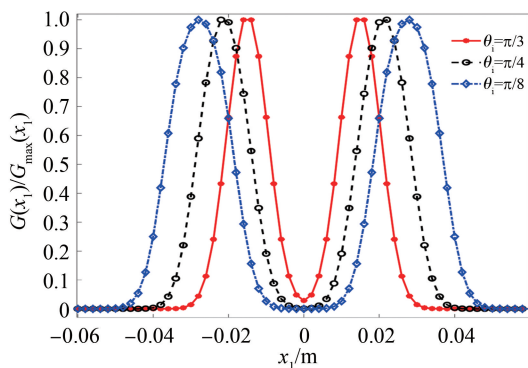


图 2 不同反射角双缝鬼成像在海洋湍流中传输特性  
Fig.2 Reflective ghost imaging of a double slit in oceanic turbulence with different reflective angles

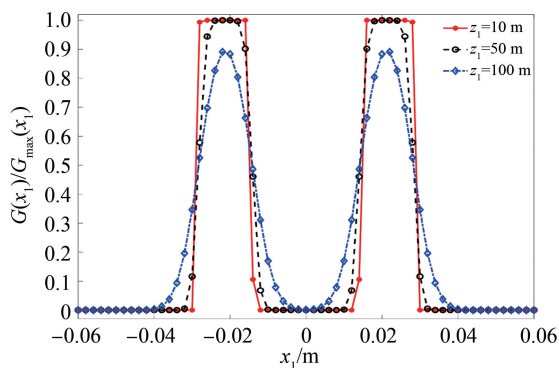


图 3 不同探测距离双缝鬼成像在海洋湍流中传输特性  
Fig.3 Reflective ghost imaging of a double slit in oceanic turbulence with different detection distances

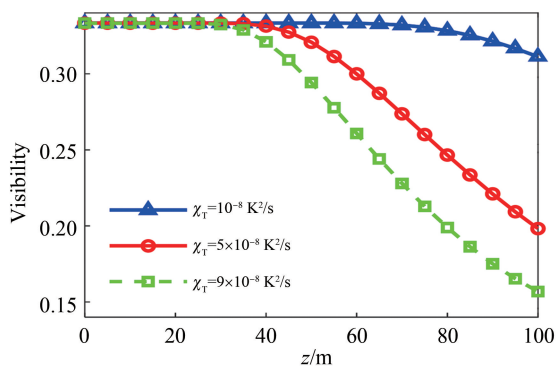


图 4 不同海洋湍流  $\chi_T$  下反射式鬼成像可见度  
Fig.4 Visibility of reflective ghost imaging for different oceanic turbulence  $\chi_T$

距离时,不同单位质量液体中的湍流动能耗散率  $\epsilon$  下,鬼成像可见度变化是非常明显的.在对远距离目标探测时,随着单位质量液体中的湍流动能耗散率  $\epsilon$  减小,球面波相干长度变小,鬼成像的可见度将严重退化.

为了探究鬼成像可见度与海洋湍流  $\omega$  的关系,选取了共同参数的参量:  $z_1 = 100$  m,  $\theta_i = \pi/4$ ,  $\lambda = 532$  nm,  $\rho_s = 0.025$  m,  $\epsilon = 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>,  $\chi_T = 10^{-7}$  K<sup>2</sup>/s,  $\eta = 10^{-3}$  m;研究了温度波动和盐度波动的相对强度为  $\omega = -1$ ,  $\omega = -3$ ,  $\omega = -5$  情况下的成像可见度.从图6可以发现,  $\omega$  是影响关联成像可见度的一个关键物理量.  $\omega$  越接近 0,影响程度越剧烈.由湍流形成机理可得出,温度波动引起的湍流比盐度波动引起的湍流对鬼成像目标探测影响程度更为剧烈.

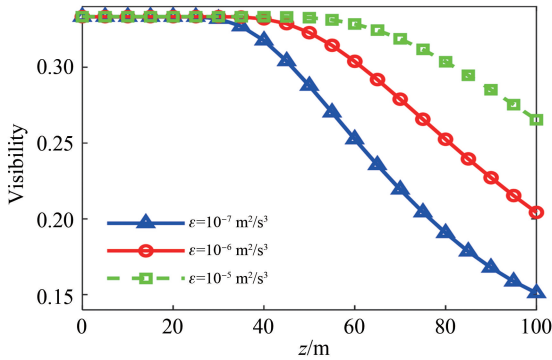


图5 不同海洋湍流  $\epsilon$  下反射式鬼成像可见度

Fig.5 Visibility of reflective ghost imaging for different oceanic turbulence  $\epsilon$

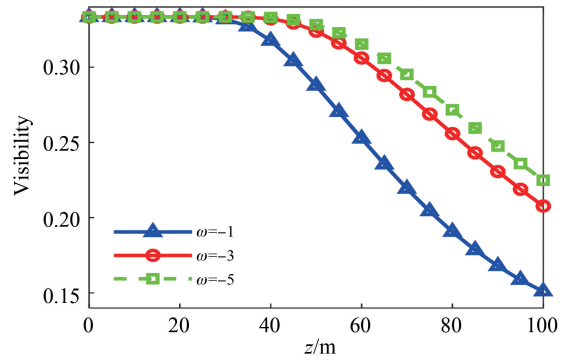


图6 不同海洋湍流  $\omega$  下反射式鬼成像可见度

Fig.6 Visibility of reflective ghost imaging for different oceanic turbulence  $\omega$

### 3 结论

基于广义惠更斯-菲涅尔衍射原理和关联成像的基本理论,利用波结构函数的 Rytov 近似,得到了反射式无透镜鬼成像在 Kolmogorov 海洋湍流的成像脉冲响应函数和成像可见度理论表达式.其次,为进一步发现水下反射式鬼成像在海洋湍流中传输情况,数值模拟了不同反射角、不同探测距离下鬼成像,得到了反射角、探测距离与成像质量的关系,即随着反射角增大、目标探测距离的增长,鬼成像脉冲响应函数振幅将衰减,成像质量严重退化.同时本文也定量分析了不同海洋湍流情况下反射式鬼成像的可见度,得到了不同海洋湍流参数与鬼成像质量的关系.该研究建立的理论模型和相应的数值模拟结果为引入自适应技术提高水下鬼成像质量具有重要的理论指导意义.为弄清真实水环境中鬼成像传输机理问题,鬼成像在不同散射介质的水环境中传输是我们下一步要研究的重点.

### 参考文献

- [1] CHEN Yu-zhang, LI Wei, XIA Min, *et al.* Model-based restoration and reconstruction for underwater range-gated imaging[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(11): 1132031-1132039.
- [2] CHEN Chao, YANG Hong-ru, LI Gao-ping, *et al.* Underwater objects detection using range-gated imaging system[J]. *Applied Optics*, 2011, **32**(4): 662-666.
- [3] PETER C Y C, JONATHAN C F, KEITH I, *et al.* Improving visibility depth in passive underwater imaging by use of polarization[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(15): 2794-2803.
- [4] HAN Ping-li, LIU Fei, ZHANG Guang, *et al.* Multi-scale analysis method of underwater polarization imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(5): 112-121.  
韩平丽,刘飞,张广,等.多尺度水下偏振成像方法[J]. *物理学报*, 2018, **67**(5): 112-121.
- [5] MIRALLES F, BEAUDRY J, BLAIN M, *et al.* Laser scanning system for inspecting large underwater hydroelectric structures[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, **19**(2): 023015-023015-14.
- [6] KLYSHKO D N. *Photons and nonlinear optics*[M]. New York: Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1988.
- [7] 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-R3432.
- [8] FONSECA E J S, MONKEN C H, PÁDUA S. Measurement of the de Broglie wavelength of a multiphoton wave packet [J]. *Physical Review Letters*, 1999, **82**(14): 2868-2871.
- [9] MONKEN C H, RIBEIRO P H S, PÁDUA S. Transfer of angular spectrum and image formation in spontaneous parametric down-conversion[J]. *Physical Review A*, 1998, **57**(4): 3123-3126.

- [10] JOST B, SERGIENKO A, ABOURADDY A, *et al.* Spatial correlations of spontaneously down-converted photon pairs detected with a single-photon-sensitive CCD camera[J]. *Optics Express*, 1998, **3**(2): 81-88.
- [11] GATTI A, BRAMBILLA E, LUGIATO L A, *et al.* Quantum entangled images[J]. *Physical Review Letters*, 1999, **83**(83): 1763-1766.
- [12] BENNINK R S, BENTLEY S J, BOYD R W. “Two-Photon” coincidence imaging with a classical source[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(11): 113601-113601-4.
- [13] SHAPIRO J H. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, **78**(6): 061802-061802-4.
- [14] OH J E, CHO Y W, SCARCELLI G, *et al.* Sub-Rayleigh Imaging via speckle illumination[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(5): 682-684.
- [15] ZHANG Ping-li, GONG Wen-lin, SHEN Xia, *et al.* Improving resolution by the second-order correlation of light fields. [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(8): 1222-1224.
- [16] CHENG Jing. Ghost imaging through turbulent atmosphere[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(10): 7916-7921.
- [17] GONG Wen-lin, HAN Shen-sheng. Correlated imaging in scattering media[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(3): 394-396.
- [18] BINA M, MAGATTI D, MOLTENI M, *et al.* Backscattering differential ghost imaging in turbid media[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(8): 083901-083901-5.
- [19] SUN Bao-qing, WELSH S S, EDGAR M P, *et al.* Normalized ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(15): 16892-16901.
- [20] ZHANG Chi, GUO Shu-xu, GAO Jun-sheng, *et al.* Object reconstitution using pseudo-inverse for ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(24): 30063-30073.
- [21] ORI K, YARON B, YARON S. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*. 2009, **13**(95): 131110-131110-3.
- [22] LI Xin-yu, CAO Fei, ZHAO Sheng-mei. A compressive complex-valued ghost imaging theoretical scheme based on phase modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 219-224.  
李欣禹,曹非,赵生妹. 基于相位调制的复值物体压缩关联成像理论研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(S1): 219-224.
- [23] SHI Dong-feng, FAN Cheng-yu, ZHANG Peng-fei, *et al.* Adaptive optical ghost imaging through atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(27): 27992-27998.
- [24] XIANG Qing, YANG Ke-cheng, YU Long, *et al.* Reflective underwater ghost imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(7): 135-140.  
项青,杨克成,于龙,等. 反射式水下量子成像[J]. 光学学报, 2015, **35**(7): 135-140.
- [25] JENNIFER C R, FREDERIC M D. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, **19**(9): 1794-1802.
- [26] 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.
- [27] LU Lu, JI Xiao-ling, BAYKAL Y. Wave structure function and spatial coherence radius of plane and spherical waves propagating through oceanic turbulence[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(22): 27112-27122.
- [28] NIKISHOV V V, NIKISHOV V I. Spectrum of turbulence fluctuations of the sea-water refraction index [J]. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 2000, **27**(1): 82-98.
- [29] ZHANG Qin-wei, LI Wen-dong, GU Yong-jian, *et al.* Polarization properties of Gaussian schell-model beams propagating through ocean turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(12): 117-124.  
张钦伟,李文东,顾永建,等. 高斯-谢尔模型光束在海洋湍流中偏振传输特性[J]. 光子学报, 2015, **44**(12): 117-124.