

关联成像的点扩散函数分析法

施展,樊祥,程正东,朱斌,陈熠

(合肥电子工程学院 脉冲功率技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037)

摘要:点扩散函数(PSF)是传统成像光学中一种典型的分析方法。针对关联成像这一全新的成像理论,借鉴点扩散函数分析方法,采用半经典理论对其成像过程进行了重新推导,给出了鬼像和物体透射函数之间的点扩散函数。以此为基础,推导了成像光路中存在湍流时,与之对应的 PSF 以及鬼像的表达式。最后对成像过程进行了数值仿真分析。结果表明,PSF 可以有效地描述关联成像的过程,并且可以定量分析成像距离、光源大小和湍流强度对鬼像的影响程度。

关键词:点扩散函数; 关联成像; 赝热光; 湍流

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1124001

PSF analysis of Correlated Imaging

Shi Zhan, Fan Xiang, Cheng Zhengdong, Zhu Bin, Chen Yi

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute of Hefei, Hefei 230037, China)

Abstract: The Point Spread Function (PSF) is a typical analytical method of traditional imaging. Using it for reference, the theory of Correlated Imaging(GI) was re-deduced and the PSF of Ghost Image(GI) was derived. Based on this theory, the PSF and GI formula were derived when turbulent was considered in optical paths. Finally, numerical simulation was done and the result indicates that GI process can be described by PSF properly. The variation caused by distance, source size and turbulence intensity can be quantitatively analyzed.

Key words: PSF; Correlated Imaging; pseudo-thermal light; turbulent

收稿日期:2016-03-17; 修订日期:2016-04-11

基金项目:国家自然科学基金(61307025);安徽省自然科学基金(1308085MF114)

作者简介:施展(1988-),男,博士生,主要从事关联成像方面的研究。Email:shizhaneci@foxmail.com

导师简介:樊祥(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事光电系统方面的研究。Email:FanXiangLXL@163.com

0 引言

关联成像(Correlated Imaging)由于其独特的成像特性,自理论提出之日起就得到了国内外学者的广泛关注^[1-3]。关联成像最初由纠缠双光子对实现^[4],随着热光关联成像理论的逐步完善,热光源以诸多优势逐步取代了纠缠光子源,成为关联成像的主要光源^[5-7]。由于热光源在强度上的优势,关联成像的距离由厘米量级提高到米、千米量级。随着成像距离的不断增长,影响关联成像质量的各种因素也逐渐凸显出来。

对于关联成像质量的分析,目前主要采用分辨率、对比度、(峰值)信噪比(SNR)和均方差(MSE)等方式来进行评价^[8]。Zhang Erfeng 等提出了一种采用非负指数散斑场的关联成像方法^[9],以分辨率和信噪比为评判标准,说明了该方法相较传统方法的优越之处。Wang Wei 等提出的迭代鬼成像^[10](Iterative Ghost Imaging)方法,以均方误差为评价标准,分析了新方法的成像质量。可见,国内外在关联成像的质量分析中,主要方法是比较原图和鬼像,获得二者之间的一些差异信息,根据这些差异的大小来评价成像质量,是一种“事后评价”的方式。

在传统光学成像领域,系统成像能力除了采用上述图像比较的方法以外,还可采用光学传递函数(OTF)及相干传递函数(CTF)来评价。目前还没有一种类似的方法描述关联成像系统。点扩散函数(PSF)^[11-12]是光学系统对点源所成之像,相当于电子线路中的冲击响应函数,可以用于描述光学成像系统成像能力。文中借鉴传统光学成像中的点扩散函数分析法,对关联成像过程进行了重新推导,给出了关联成像系统的点扩散函数以及鬼像的表达式。

1 关联成像的点扩散函数分析法

采用赝热光源进行关联成像的原理如图 1 所示。激光束经旋转毛玻璃调制后,形成赝热光场;经过分束镜后,一路为参考臂,由具有空间分辨能力的探测器(CCD)进行探测,得到测量光场的分布;另一路为探测臂,对物体进行照射(即测量,文中以透射型物体为例),光场经过物体调制,再由透镜收集之后,由桶探测进行探测;最后将两路探测器的探测数据进行关联

计算,可以得到物体的“鬼像”(Ghost Image)。

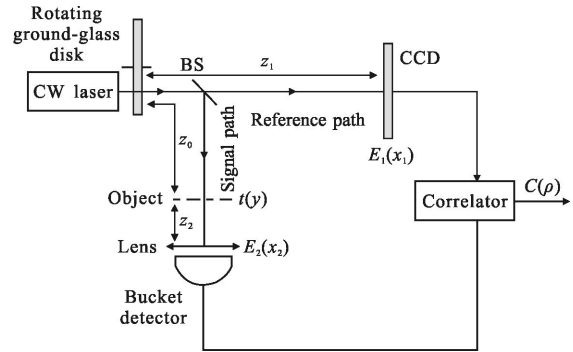


图 1 赝热光关联成像示意图

Fig.1 Scheme of Correlated Imaging based on pseudo-thermal light

毛玻璃表面产生的赝热光场在自由空间中的传播符合拓展惠更斯-菲涅尔积分原理,在参考臂和探测臂的探测平面的光场分布分别为:

$$E_1(x_1) = \left(\frac{-j}{\lambda z_1} \right)^{1/2} \int du f(u) e^{j\pi/\lambda z_1 (x_1 - u)^2} \quad (1)$$

$$E_2(x_2) = \left(\frac{-j}{\lambda z_0} \right)^{1/2} \left(\frac{-j}{\lambda z_2} \right)^{1/2} \times \int du dy f(u) e^{j\pi/\lambda z_0 (y - u)^2} t(y) e^{j\pi/\lambda z_2 (y - x_2)^2} \quad (2)$$

式中: $f(u)$ 为赝热光源光场分布; $t(y)$ 为物体的透射函数。强度波动关联可以表示为:

$$G(x_1, x_2) = \langle I_1(x_1) I_2(x_2) \rangle - \langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} \langle I_1(x_1) I_2(x_2) \rangle &= \langle E_1(x_1) E_1^*(x_1) E_2(x_2) E_2^*(x_2) \rangle = \\ &= \frac{1}{\lambda^3 z_1 z_2 z_3} \left\langle \int du_1 du_1' du_2 du_2' dy dy' \times f(u_1) f^*(u_1') f(u_2) \right. \\ &\quad \left. f^*(u_2') t(y) t^*(y') \times e^{\frac{j\pi}{\lambda z_1} [(x_1 - u_1)^2 - (x_1 - u_1')^2]} \right. \\ &\quad \left. e^{\frac{j\pi}{\lambda z_0} [(y - u_2)^2 - (y - u_2')^2]} e^{\frac{j\pi}{\lambda z_2} [(y - x_2)^2 - (y - x_2')^2]} \right\rangle \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle &= \langle E_1(x_1) E_1^*(x_1) \rangle \langle E_2(x_2) E_2^*(x_2) \rangle = \\ &= \frac{1}{\lambda^3 z_1 z_2 z_3} \left\langle \int du_1 du_1' f(u_1) f^*(u_1') e^{\frac{j\pi}{\lambda z_1} [(x_1 - u_1)^2 - (x_1 - u_1')^2]} \right. \\ &\quad \left. \times \int du_2 du_2' dy dy' f(u_2) f^*(u_2') t(y) t^*(y') \times \right. \\ &\quad \left. e^{\frac{j\pi}{\lambda z_0} [(y - u_2)^2 - (y - u_2')^2]} e^{\frac{j\pi}{\lambda z_2} [(y - x_2)^2 - (y - x_2')^2]} \right\rangle \quad (5) \end{aligned}$$

赝热光源可以采用零均值高斯随机过程来描述:

$$\begin{aligned} \langle f(u_1) f^*(u_1') f(u_2) f^*(u_2') \rangle &= \langle f(u_1) f^*(u_1') \rangle \langle f(u_2) f^*(u_2') \rangle + \\ \langle f(u_1) f^*(u_2') \rangle \langle f(u_2) f^*(u_1') \rangle &= \Gamma(u_1, u_1') \Gamma(u_2, u_2') + \\ &\Gamma(u_1, u_2') \Gamma(u_2, u_1') \quad (6) \end{aligned}$$

结合公式(4)~(6)可知,公式(3)相减后仅剩包含 $\Gamma(u_1, u_2')\Gamma(u_2, u_1')$ 的项,即:

$$G(x_1, x_2) = \frac{1}{\lambda^3 z_1 z_2 z_3} \int du_1 du_1' du_2 du_2' dy dy' \times t(y) t^*(y') \Gamma(u_1, u_2') \Gamma(u_2, u_1') \times e^{\frac{j\pi}{\lambda z_1} [(x_1 - u_1)^2 - (x_1 - u_1')^2]} e^{\frac{j\pi}{\lambda z_0} [(y - u_2)^2 - (y' - u_2')^2]} e^{\frac{j\pi}{\lambda z_2} [(y - x_2)^2 - (y' - x_2')^2]} \quad (7)$$

利用旋转毛玻璃产生的光源可视为完全不相干光,即:

$$\Gamma(u, u') = \langle f(u) f^*(u') \rangle = I(u) \delta(u - u') \quad (8)$$

公式(7)中:

$$\Gamma(u_1, u_2') \Gamma(u_2, u_1') = I(u_1) \delta(u_1 - u_2') I(u_2) \delta(u_2 - u_1') \quad (9)$$

即: $u_1 = u_2', u_2 = u_1'$, 令: $\gamma = \frac{\pi}{\lambda z_i}$, 代入公式(7):

$$G(x_1, x_2) = \frac{\gamma_0 \gamma_1 \gamma_2}{\pi} \int du_1 du_2' dy dy' t(y) t^*(y') I(u_1) I(u_2) \times e^{j\gamma_1 [(x_1 - u_1)^2 - (x_1 - u_2')^2]} e^{j\gamma_0 [(y - u_2)^2 - (y' - u_1')^2]} e^{j\gamma_2 [(y - x_2)^2 - (y' - x_2')^2]} \quad (10)$$

假设光源强度为高斯分布,光源大小为 ρ_s , 则 $I(u) =$

$$e^{-\frac{u^2}{\rho_s}}. \text{ 令 } \alpha = \frac{1}{2}, I(u) = e^{-\alpha u^2}. \text{ 代入并将包含 } u \text{ 的项分离开:}$$

$$G(x_1, x_2) = \frac{\gamma_0 \gamma_1 \gamma_2}{\pi} \int dy dy' t(y) t^*(y') e^{j\gamma_0 (y^2 - y'^2)} e^{j\gamma_2 [(y^2 - y'^2) + 2x_2 (y' - y)]} \times \int du_1 du_2' e^{-\alpha u_1^2} e^{-\alpha u_2'^2} e^{j\gamma_1 (u_1^2 - u_2'^2 + 2x_1 u_2 - 2x_1 u_1)} e^{j\gamma_0 (u_2^2 - u_1'^2 + 2y' u_1 - 2y u_2)} \frac{\gamma_0 \gamma_1 \gamma_2}{\pi} \int dy dy' t(y) t^*(y') h(y, y', x_1) \times e^{j\gamma_0 (y^2 - y'^2)} e^{j\gamma_2 [(y^2 - y'^2) + 2x_2 (y' - y)]} \quad (11)$$

式中:

$$h(y, y', x_1) = \int du_1 du_2' e^{-\alpha u_1^2} e^{-\alpha u_2'^2} \times e^{j\gamma_1 (u_1^2 - u_2'^2 + 2x_1 u_2 - 2x_1 u_1)} e^{j\gamma_0 (u_2^2 - u_1'^2 + 2y' u_1 - 2y u_2)} \quad (12)$$

关联成像中,一般取参考臂和探测臂长度相等,即 $z_0 = z_1 = z$, 那么 $\gamma_0 = \gamma_1 = \gamma$, 根据积分公式,将 $u_1^2, u_1 u_2, u_2^2, u_1, u_2$ 的系数分别用 A, B, C, D, E 表示^[13]:

$$h(y, y', x_1) = \int du_1 du_2' e^{-A u_1^2 - B u_1 u_2 - C u_2^2 - D u_1 - E u_2} = \frac{2\pi}{\sqrt{4AC - B^2}} e^{-\frac{BDE - CD^2 - AE^2}{4AC - B^2}} \quad (13)$$

其中:

$$A = C = \alpha$$

$$B = 0$$

$$D = 2j\gamma(x_1 - y')$$

$$E = -2j\gamma(x_1 - y) \quad (14)$$

化简可得:

$$h(y, y', x_1) = \frac{\pi}{\alpha} e^{-\frac{\gamma^2 [(x_1 - y)^2 + (x_1 - y')^2]}{\alpha}} \quad (15)$$

关联成像中,当 x_1, x_2 分别表示参考平面和探测平面时,鬼像的表达式为:

$$M(x_1) = \int_{\text{Bucket}} dx_2 G(x_1, x_2) \quad (16)$$

将公式(11)代入可得:

$$M(x_1) = \frac{\gamma^2}{\pi^2} \int dy dy' t(y) t^*(y') \times h(y, y', x_1) \delta(y - y') e^{j(\gamma_0 + \gamma_2)(y^2 - y'^2)} = \frac{\gamma^2}{\pi^2} \int dy |t(y)|^2 h(y, y', x_1) \quad (17)$$

式中: $y = y'$, 将公式(15)表示为 $\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$ 的高斯形式:

$$h(y, x_1) = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \times \frac{\pi}{\gamma} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(y - x_1)^2}{2\sigma^2}} = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \times \frac{\pi}{\gamma} \times h_z(y) \quad (18)$$

根据公式(17),将 γ, α 的表达式代入,同时考虑到 $z_0 = z_1 = z, \gamma_0 = \gamma_1 = \gamma$, 可得:

$$M(x_1) = \frac{1}{\lambda z} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} |t(y)|^{2*} h_z(y) \quad (19)$$

其中:

$$h_z(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(y - x_1)^2}{2\sigma^2}} \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\alpha}}{2\gamma} = \frac{\lambda z}{2\pi \rho_s} \quad (21)$$

则公式(19)可视为物体透射函数 $t(y)$ 和距离 z 处的点扩散函数 $h_z(y)$ 的卷积。结合公式(19)~(21)可以看出,影响鬼像的主要因素包括探测激光的波长、成像距离以及光源大小。其中,激光波长 λ 出现在公式的两个因子内:点扩散函数 $h_z(y)$ 的标准差 σ 和卷积系数 $\frac{1}{\lambda z}$ 中。随着 λ 的增大,标准差 σ 变大,卷积系数 $\frac{1}{\lambda z}$ 变小,都将导致成像质量下降。成像距离 z 和 λ 相同,距离的增长将导致成像距离的下降。光源

大小 ρ_s 和标准差 σ 负相关,光源增大将会提升成像质量。

经过上述推导,该节建立了关联成像的点扩散函数分析法的基本理论,并给出了成像公式。将关联成像所得的鬼像描述为物体像和点扩散函数的卷积,这与经典光学成像中的描述方式是统一的。用点扩散函数方法来描述成像过程,可以用于定量分析不同因素对关联成像质量的影响。下一节以大气湍流为例,代入湍流这一影响因素,对成像公式进行推导。

2 大气湍流对关联成像的影响

随着反射成像等远距离成像等理论基础逐渐成熟,当成像距离上升到百米量级时,大气湍流就成为一个不可忽视的影响因素。湍流对关联成像的影响,可以按照上节描述的点扩散函数方法进行分析。光学路径中包含大气湍流的关联成像示意图如图 2 所示。

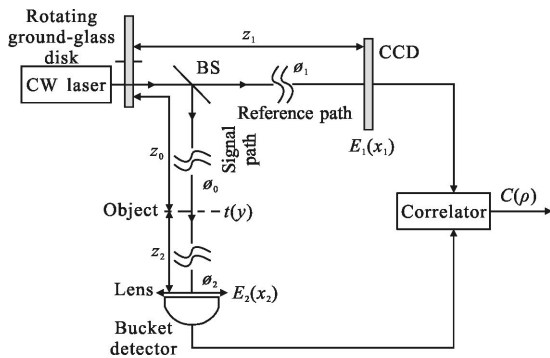


图 2 湍流关联成像示意图

Fig.2 Scheme of correlated imaging through turbulent

有湍流影响时,参考臂和探测臂的探测平面的光场分布分别为:

$$E_1(x_1) = \left(\frac{-j}{\lambda z_1}\right)^{1/2} \int duf(u) e^{(j\pi/\lambda z_1)(x_1-u)^2} e^{\phi_1(u, x_1)} \quad (22)$$

$$E_2(x_2) = \left(\frac{-j}{\lambda z_0}\right)^{1/2} \left(\frac{-j}{\lambda z_2}\right)^{1/2} \int dudyf(u) \times e^{(j\pi/\lambda z_0)(y-u)^2} e^{\phi_0(u, y)} t(y) e^{(j\pi/\lambda z_2)(y-x_2)^2} e^{\phi_2(x_2, y)} \quad (23)$$

式中: $e^{\phi(x, y)}$ 为湍流对相位造成的影响。由 Rytov's 相位结构方程的二次近似可得,大气湍流的统计特性可以被近似表示为:

$$\langle e^{\phi_1(x, y) + \phi_2(x', y')} \rangle \exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (x-x')(y-y') + (y-y')^2}{\rho_l}\right) \quad (24)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示大气湍流的系综平均; $\rho_l = (0.55 C_n^{2(i)} k^2 z_i)^{-3/5}$

为湍流介质中传播的球面波的相干半径, $C_n^{2(i)}$ 为折射率结构参数,用来描述大气湍流的强度。与上节推导过程相同,可得:

$$G(x_1, x_2) = \frac{\gamma_0 \gamma_1 \gamma_2}{\pi^3} \int dy dy' t(y) t^*(y') \times e^{j\gamma_0(y^2 - y'^2)} e^{j\gamma_2[(y^2 - y'^2) + 2x_2(y' - y)]} e^{-(\beta_0 + \beta_2)(y - y')^2} \times \int du_1 du_2 e^{-\alpha u_1} e^{-\alpha u_2} e^{j\gamma_1(u_1^2 - u_2^2 + 2x_1 u_2 - 2x_1 u_1)} e^{j\gamma_0(u_2^2 - u_1^2 + 2y' u_1 - 2y u_2)} \times e^{-\beta_1(u_1^2 - 2u_1 u_2 + u_2^2)} e^{-\beta_0(u_2^2 - 2u_1 u_2 + u_1^2 - u_2^2)(y - y') - u_1(y - y')} = \frac{\gamma_0 \gamma_1 \gamma_2}{\pi^3} \int dy dy' t(y) t^*(y') h(y, y', x_1) \times e^{j\gamma_0(y^2 - y'^2)} e^{j\gamma_2[(y^2 - y'^2) + 2x_2(y' - y)]} e^{-(\beta_0 + \beta_2)(y - y')^2} \quad (25)$$

$$h(y, y', x_1) = \int du_1 du_2 e^{-\alpha u_1} e^{-\alpha u_2} e^{j\gamma_1(u_1^2 - u_2^2 + 2x_1 u_2 - 2x_1 u_1)} e^{j\gamma_0(u_2^2 - u_1^2 + 2y' u_1 - 2y u_2)} e^{-\beta_1(u_1^2 - 2u_1 u_2 + u_2^2)} e^{-\beta_0(u_2^2 - 2u_1 u_2 + u_1^2 - u_2^2)(y - y') - u_1(y - y')} \quad (26)$$

鬼像的表达式为:

$$M(x_1) = \int dx_2 G(x_1, x_2) = \frac{\gamma^2}{\pi^2} \int dy dy' t(y) t^*(y') h(y, y', x_1) \delta(y - y') \times e^{j(\gamma_0 + \gamma_2)(y^2 - y'^2)} e^{-(\beta_0 + \beta_2)(y - y')^2} \quad (27)$$

$$h(y, y', x_1) = \frac{\pi}{\sqrt{\alpha(\alpha + 2\beta_0 + 2\beta_1)}} e^{-\frac{2\gamma^2(x_1 - y)^2}{\alpha + 2\beta_0 + 2\beta_1}} \quad (28)$$

则公式(27)可视为物体透射函数 $t(y)$ 和距离 z 处由湍流造成的点扩散函数 $h_z(y)$ 的卷积:

$$M(x_1) = \frac{1}{\lambda z} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} |t(y)|^2 * h_z(y) \quad (29)$$

$$h_z(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(y-x_1)^2}{2\sigma^2}} \quad (30)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\alpha + 2\beta_0 + 2\beta_1}}{2\gamma} = \frac{\lambda z}{2\pi \rho_s} \sqrt{1 + 2\rho_s^2 (0.55 k^2 z)^{\frac{6}{5}} [(C_n^{2(0)})^{\frac{6}{5}} + (C_n^{2(1)})^{\frac{6}{5}}]} \quad (31)$$

经过上述推导,对于光路中包含大气湍流的关联成像过程,公式(29)~(31)给出了其鬼像的成像公式。对比公式(19)~(21)可得,湍流对成像所造成的影响体现在 PSF 中的 σ 项内,随着湍流强度 $C_n^{2(i)}$ 的增长,标准差 σ 变大,导致成像质量下降。其与探测激光的波长、成像距离以及光源大小共同影响鬼像的质量。为了直观地理解点扩散函数分析法,观察不同因素对鬼像质量的影响,下一节将进行数值仿真分析。

3 成像仿真及分析

3.1 边界条件设置

根据上述理论推导,此节对关联成像过程进行建模仿真。仿真实验中,采用如图 2 所示的经典无透镜计算鬼成像实验光路的模型进行仿真。CCD 探测器表面的光场由菲涅尔衍射公式进行计算。实验中,激光波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$,双缝宽度 10 mm ,间距 30 mm ,光源大小(宽度) $\rho_s=2\text{ mm}$,成像距离 $z=50\text{ m}$ 。仿真采用控制变量法,固定其它参数,观察特定参数对 PSF 和成像质量的影响。

3.2 无湍流时的关联成像

根据第 1 节的推导和 3.1 小节中设置的参数,通过仿真,可以得出距离 z 处所成的鬼像和相应的点扩散函数,如图 3 所示。

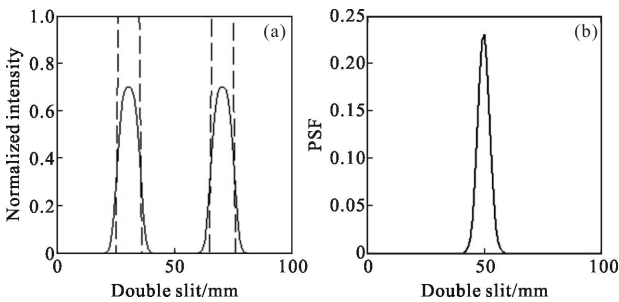


图 3 双缝鬼成像仿真

Fig.3 Ghost image simulation of double slit

图 3(a)中,横坐标以 mm 为单位,纵坐标为归一化后的透射强度。虚线为双缝,实线为鬼像。右图为该成像条件下的 PSF。从图中可以看出,在相应的参数设置下,鬼像项峰值下降了约 30%。

从第 2 节的结论中可以看出,影响鬼像的主要因素包括探测激光的波长、成像距离以及光源大小。下面就针对这 3 个变量,通过仿真,分析其对成像的影响。

选取 3 个典型波长的激光作为光源进行仿真(见图 4)。从结果可以看出,波长越长,成像质量越差。这与第 1 节中公式推导结论相同。但鬼像峰值的下降并不明显,主要因为激光波长均较短,且波长相近。

对成像距离的分析,选取了 10~200 m 间的 5 个不同数值进行仿真,这也是实验室内和一般室外成像的距离(见图 5)。实验结果可以看出,当成像距离小于 10 m 时,鬼像可以几乎完美地还原物体的透射函

数。但随着距离的增加,PSF 峰值迅速下降,相应鬼像的质量也迅速恶化。

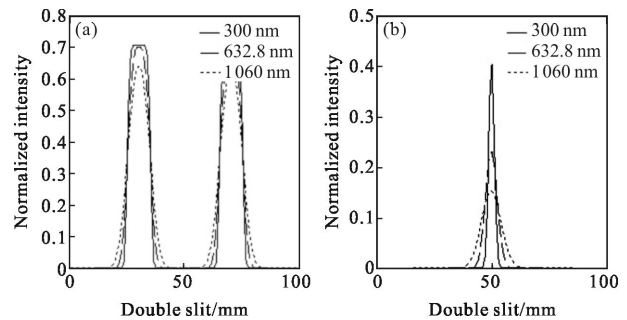


图 4 波长对鬼像质量的影响

Fig.4 Effect of wavelength on CI

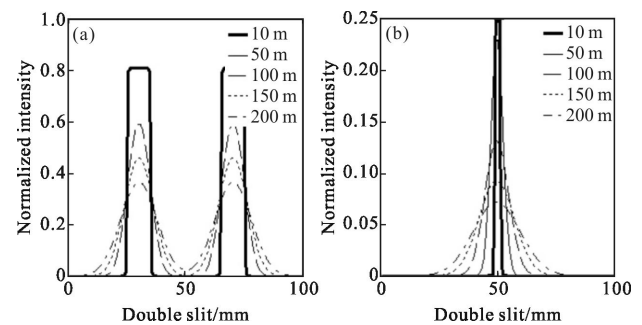


图 5 距离对鬼像质量的影响

Fig.5 Effect of distance on GI

光源大小也是影响鬼像质量的重要因素。选取了 0.5~15 mm 间的 5 个不同数值进行仿真,见图 6。从结果可以看出,光源越大,鬼像和 PSF 的峰值越高。当光源足够大时(此节所设条件下, $\rho_s=15\text{ mm}$),鬼像(粗实线)与物体透射函数几乎相同。

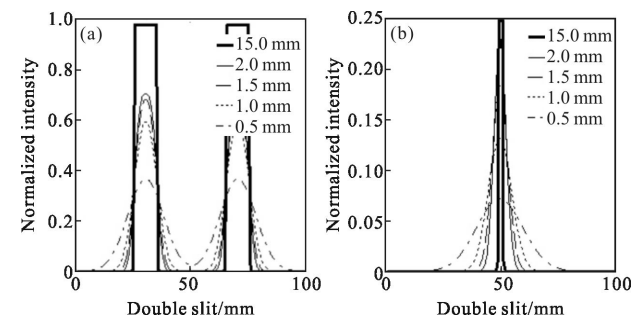


图 6 光源大小对鬼像质量的影响

Fig.6 Effect of source size on GI

经过对比分析可以看出,影响成像的主要因素是成像距离和光源大小。为达到获得较好的成像质量,应选用短波长,大光源,在近距离内进行关联成像。

3.3 有湍流时的关联成像

当成像路径中存在大气湍流时,会影响关联成像的效果。如图 2 所示,在成像所需的三条路径中,均可能存在湍流。一般认为,被测物体和桶探测器间的湍流 ϕ_2 不影响成像质量;光源和 CCD 间的湍流主要影响光源散斑场的测量,可以通过光场的预置或者前期测量来克服。影响成像的主要是光源和物体间的湍流。

根据第 2 节的推导,以成像距离 $z=50\text{ m}$ 为例,分析 ϕ_0 强度不同时对鬼像质量的影响,仿真结果如图 7 所示。

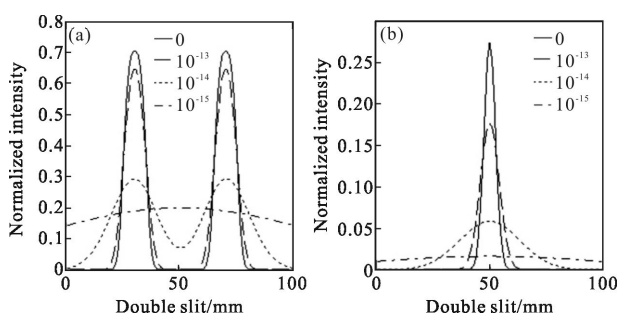


图 7 湍流强度对鬼像成像的影响

Fig.7 Effect of turbulence intensity on GI

当湍流强度 $C_n^2 < 10^{-13} \text{ m}^{\frac{2}{3}}$ 时,湍流对成像几乎没有影响;当 $C_n^2 > 10^{-14} \text{ m}^{\frac{2}{3}}$ 时,在湍流的影响下,鬼像峰值趋于平缓,成像质量急剧下降。

通过此节的仿真分析可以看出,光源波长、光源大小、成像距离和湍流强度都是影响关联成像的重要因素。为获得高质量的鬼像,应选择短波长大光源进行成像,并缩短成像距离,减小湍流干扰。

4 结论

文中借鉴传统光学中的点扩散函数分析法,对关联成像系统理论进行了重新推导,将鬼像表达式定义为物体的透射函数和 PSF 的卷积,这与传统成像理论相统一。以这一理论为基础,进一步推导出有湍流时的成像公式和 PSF 函数。最后对关联成像以及有湍流影响时的成像过程进行了仿真实验分析。结果表明,为获得高质量的鬼像,应选择短波长、大光源进行成像,并缩短成像距离,减小湍流干扰。

随着关联成像应用的推广,成像距离和应用场景也在不断增加。各种制约成像质量的因素都将不

断凸显出来。利用 PSF 函数,可以对关联成像过程中的各种影响因素进行定量分析,使得关联成像理论更加接近于传统光学成像。在便于理解的同时,也为其成像质量的分析提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] Sun Baoqing, Stephen S Welsh, Matthew P Edgar, et al. Normalized ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892–16901. (in Chinese)
- [2] Wang Minghai, Cao Junsheng, Gao Fengli. Influence of two-arm symmetry on reconstructed image of compressive sensing for ghost imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1438–1445. (in Chinese)
- [3] Guo Shuxu, Zhang Chi, Cao Junsheng, et al. Object reconstruction by compressive sensing based normalized ghost imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 287–294. (in Chinese)
- [4] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physics Review A*, 1995, 52(5): 3429–3432.
- [5] Scarcelli G, Valeencia A, Shih Y. Two-photo interference with thermal light [J]. *Europhysics Letters*, 2004, 68(5): 618–624.
- [6] Zhang Tianran, Meng Zhaokui, Sun Mingjie. Ghost imaging with pure phase object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3105–3109.
- [7] Yao Xuri, Liu Xufeng, Yu Wenkai, et al. Correspondence imaging based on correlation coefficients[J]. *Chinese Optics*, 2015, 13(1): 010301.
- [8] Jeffrey H Shapiro, Robert W Boyd. The physics of ghost imaging [J]. *Quantum Inf Process*, 2012, 11(1): 949–993.
- [9] Zhang Erfeng, Liu Weitao, Chen Pingxing. Ghost imaging with non-negative exponential speckle patterns [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(8): 085602.
- [10] Wang Wei, Wang Yanpu, Li Jiahua, et al. Iterative ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5150–5153.
- [11] Meng Wei, Jin Longxu, Li Guoning, et al. Application of MTF in remote sensing image restoration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1690–1696. (in Chinese)
- [12] Zhu Ruifei, Wei Qun, Wang Chao, et al. Adaptive restoration method of multi-frame turbulence-degraded images based on stochastic point spread fuction [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 368–377. (in Chinese)
- [13] Jing Cheng. Unified theory of thermal ghost imaging and ghost diffraction through turbulent atmosphere [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(4): 043810.