

# 基于反射型物体的高阶非相干热光源关联成像性能研究

杨 贺 赵生妹

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要** 现有基于热光源的关联成像主要是针对透射型物体, 这样可简化关联成像分析过程。然而对于成像的实际应用, 比如遥感技术, 反射型物体将具有更大的实用价值。基于非相干均亮的热光源, 对反射型物体的高阶关联成像进行了研究, 推导出其高阶反射关联成像的关联函数、可见度及信噪比的解析式; 对比二阶反射关联成像, 讨论阶数对关联成像性能的影响。研究结果表明, 对于反射型物体的关联成像, 随着阶数的增加, 成像的可见度得到提高, 但信噪比下降, 同时能够通过增加测量次数增加成像的信噪比。

**关键词** 量子光学; 关联成像; 反射型物体; 可见度; 信噪比

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1127002

## Study on High-Order Reflective Ghost Imaging with Incoherent Thermal Light

Yang He Zhao Shengmei

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract** Most ghost imaging experiments and theories have addressed the transmissive object, which simplifies the procedure of imaging analysis. However, reflective ghost imaging is more valuable in application, such as in the remote sensing technology. The high-order reflective ghost imaging with an incoherent, uniformly bright thermal light is studied. The expressions of the cross-correlation function, image visibility, and signal-to-noise ratio for the high-order reflective ghost imaging is presented. Compared with the results of the second-order reflective ghost imaging, the effect of the order number on the performance of high-order reflective ghost imaging is discussed. The results show that the visibility of high-order reflective ghost imaging is enhanced while the signal-to-noise ratio decreases with the bigger order. And the signal-to-noise ratio can be improved by increasing the measurements in implementation.

**Key words** quantum optics; ghost imaging; reflective object; image visibility; signal-to-noise ratio

**OCIS codes** 110.3010; 290.5880; 010.7295; 030.4280; 270.0270

## 1 引 言

关联成像, 或者称为鬼成像, 是近些年来量子光学领域的前沿和热点之一<sup>[1~7]</sup>。它是在 20 世纪 80 年代兴起的在光学成像方面的一个新领域, 其奇特之处在于成像的非定域性。与传统成像不同, 该成像系统包括两支光路, 其中一支光路经过待测物

体, 由桶探测器收集信息(称为信号光路), 另一支光路由具有空间分辨率的点探测器收集信息(称为参考光路), 通过两支光路的符合测量, 能够在没有物体的参考光路中获得物体清晰的像, 因而被称为“鬼”成像。作为一种新型成像技术, 它得到了广泛的关注<sup>[8~15]</sup>。

**收稿日期**: 2012-05-06; **收到修改稿日期**: 2012-06-25

**基金项目**: 国家自然科学基金(61271238)、江苏省高校自然科学基金(11KJA510002)、江苏省留学人员科技活动项目(NJ210002)和固体微结构物理国家重点实验室开放课题(M25020, M25022)资助课题。

**作者简介**: 杨 贺(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事热光源关联成像方面的研究。E-mail: jueying2@126.com

**导师简介**: 赵生妹(1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事量子信息技术和无线通信与信号处理技术等方面的研究。

E-mail: zhaosm@njupt.edu.cn

关联成像的思路源于量子纠缠。1988年, Klyshko<sup>[1]</sup>根据自发参量下转换光子对的纠缠行为提出了关联成像方案。1995年, Pittman等<sup>[3]</sup>利用自发参量下转换产生的纠缠光子对,完成了基于量子纠缠的关联成像实验。2002年,人们在实验上实现了基于经典热光源的关联成像<sup>[4]</sup>。在此基础上,人们完成了基于赝热光源和真正热光源的关联成像实验<sup>[15,16]</sup>。与量子关联成像相比,热光源关联成像的光源更易获取,因而具有更广泛的应用前景。

现有的绝大多数的热光源关联成像理论和实验报道中被成像物体是透射型物体。如文献<sup>[17~20]</sup>分别讨论了基于透射型物体的二阶关联成像可见度及信噪比的解析表达式。文献<sup>[21~23]</sup>将二阶关联推广到基于透射型物体的高阶关联成像。然而对于透射型物体的关联成像,桶探测器必须位于被成像物体的后侧,这将或多或少地限制关联成像的应用前景。相对于透射型物体的关联成像,基于反射型物体的关联成像原则上光源和探测器可以任意地远离被成像物体,因而也将更适用于远程感知应用。目前,已有实验完成了基于反射型物体的关联成像<sup>[24~26]</sup>,同时,文献<sup>[27,28]</sup>基于高斯态分析了反射型物体的二阶关联成像。然而对于非相干均亮的热光源,它的高阶反射关联成像的研究却很少。本文采用类似于透射型物体的热光关联成像的分析手段,对反射型物体的关联成像进行理论分析,推导出其关联强度的解析表达式,获得其成像的可见度及信噪比。并在此基础上,将其推广到高阶关联。研究表明,在较大的反射关联阶数下,成像的可见度较高,但信噪比将较低,通过增大测量次数可明显提高信噪比,改善成像性能。

## 2 基于反射物体的二阶热光源关联成像

图1是基于反射物体的二阶热光源关联成像的物理模型示意图。在图1中,利用非相干热光源(ITL)作为系统光源,使其通过一个分光镜(BS),将其分为两束完全一致的光。这两束光分别经过不同

的光学系统,其中一束光经  $L$  距离的自由空间传播后,遭遇物体被反射,其反射光由距离物体  $L$  处的桶探测器测得其光强度,这条光路被称为信号光路;另一束光在传播  $L$  距离后由电荷耦合器件(CCD)测得其各点光强度分布,其经过的光路被称为参考光路。将桶探测器与 CCD 测得的光强度进行关联计算,可在参考光路中重现物体的信息。

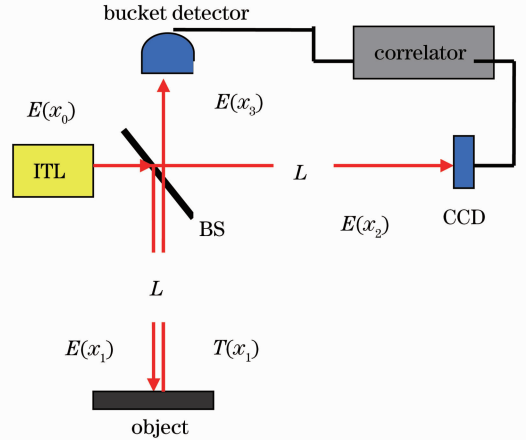


图1 基于反射物体的二阶热光源关联成像  
Fig.1 Second-order reflective ghost imaging with thermal light

为了便于分析且不失一般性,假定光场的横向分布都是一维的。 $x_0, x_1, x_2, x_3$  分别是光源所在平面、物体所在平面、CCD 探测平面和桶探测器探测平面上的横向坐标。此时,待测物体的空间分布信息可以通过下面的二阶强度关联函数得到:

$$\langle C(x_2) \rangle = \langle SI_2(x_2) \rangle = \int_{-A/2}^{A/2} \langle I(x_3) I_2(x_2) \rangle dx_3, \quad (1)$$

式中  $S$  为桶探测器接收光的总强度,  $A$  为桶探测器的探测区域,  $I(x_i)$  为  $x_i$  位置处的光强度 ( $i=2,3$ ) 且在桶探测器平面处的光场为

$$E(x_3) = \int E(x_1) t(x_1) h(x_3, x_1) dx_1, \quad (2)$$

式中  $E(x_1)$  为物体平面处热光源的光场,  $t(x_1)$  为物体的光场反射系数,  $h(x_3, x_1)$  为光场自由传播的脉冲响应函数。于是, (1) 式中的积分项可计算为

$$\langle I(x_3) I(x_2) \rangle = \langle E^*(x_3) E(x_3) I(x_2) \rangle = \iint \langle E^*(x_{10}) E(x_{11}) I(x_2) \rangle \times \langle t^*(x_{10}) t(x_{11}) \rangle h^*(x_3, x_{10}) h(x_3, x_{11}) dx_{10} dx_{11}. \quad (3)$$

入射光经物体表面反射,这一光学过程可表示为

$$\langle t^*(x_1) t(x'_1) \rangle = \lambda_0 T(x_1) \delta(x_1 - x'_1), \quad (4)$$

式中  $\lambda_0$  为照射光的中心波长,  $\delta(x_1 - x'_1)$  为脉冲函数,  $T(x_1)$  是  $x_1$  位置处的均方光斑反射系数,也就是被成

像的物体信息。另外,在非涅耳衍射近似下,光场自由传播的脉冲响应函数为

$$h(x, x_0) = \frac{1}{\sqrt{i\lambda L}} \exp\left[\frac{i2\pi L}{\lambda} + \frac{i\pi}{\lambda L}(x - x_0)^2\right]. \quad (5)$$

将(4)式和(5)式代入(3)式中,可以得到

$$\langle I(x_3)I(x_2) \rangle = \frac{1}{L} \int \langle I(x_1)I(x_2) \rangle T(x_1) dx_1. \quad (6)$$

假设热光源的光场服从高斯分布,满足高斯矩定理<sup>[29]</sup>,可用公式表示如下:

$$\langle I(x_1)I(x_2) \rangle = \langle E^*(x_1)E(x_1)E^*(x_2)E(x_2) \rangle = \langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle + |\langle E^*(x_1)E(x_2) \rangle|^2, \quad (7)$$

进一步考虑到热光源为非相干均亮的热光源<sup>[30]</sup>的情况,即

$$\langle E^*(x_0)E(x'_0) \rangle = G\delta(x_0 - x'_0), \quad (8)$$

式中  $G$  为归一化常数,并且热光源的尺寸为  $D$ 。则有

$$\langle I_i(x_i) \rangle = \iint \langle E^*(x_0)E(x'_0) \rangle h^*(x_i, x_0)h(x_i, x'_0) dx_0 dx'_0 = \frac{GD}{\lambda L}, \quad i = 1, 2 \quad (9a)$$

这里记  $\langle I_1 \rangle = \langle I(x_1) \rangle$ ,  $\langle I_2 \rangle = \langle I(x_2) \rangle$ , 且遍历性的热光在物体面和点探测器面的统计平均强度是常数,得到:

$$|\langle E^*(x_1)E(x_2) \rangle|^2 = \left| \iint \langle E^*(x_0)E(x'_0) \rangle h^*(x_1, x_0)h(x_2, x'_0) dx_0 dx'_0 \right|^2 = \left(\frac{GD}{\lambda L}\right)^2 \text{sinc}^2\left[\frac{\pi D}{\lambda L}(x_2 - x_1)\right]. \quad (9b)$$

若令  $|u(x_1, x_2)|^2 = \text{sinc}^2\left[\frac{\pi D}{\lambda z}(x_2 - x_1)\right]$ , 其值仅与  $x_1, x_2$  的距离  $\Delta x = x_2 - x_1$  有关,可写为

$$|u(\Delta x)|^2, u(\Delta x) = \frac{\langle E^*(x_1)E(x_2) \rangle}{\sqrt{\langle I(x_1) \rangle \langle I(x_2) \rangle}}$$
 为光场在物体面与点探测面处的复相干系数。

定义热光源的相干区域为

$$A_{\text{coh}} = \int |u(\Delta x)|^2 d\Delta x = \int \text{sinc}^2\left(\frac{\pi D}{\lambda z}\Delta x\right) d\Delta x = \frac{\lambda L}{D}, \quad (9c)$$

此时(9b)式可简化为

$$|\langle E^*(x_1)E(x_2) \rangle|^2 = \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle A_{\text{coh}} \gamma(\Delta x), \quad (9d)$$

式中  $\gamma(\Delta x) = \frac{|u(\Delta x)|^2}{A_{\text{coh}}}$ 。

将(9a)式和(9d)式代入(7)式中,有

$$\langle I(x_1)I(x_2) \rangle = \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle + \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle A_{\text{coh}} \gamma(\Delta x). \quad (10)$$

结合(1), (6), (10)式,可得到用来恢复成像信息的二阶强度关联函数:

$$\langle C(x_2) \rangle = \frac{A}{L} \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \int T(x_1) dx_1 + \frac{A}{L} A_{\text{coh}} \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \int T(x_1) \gamma(\Delta x) dx_1. \quad (11)$$

这里  $\gamma(\Delta x)$  可以假设为点扩展函数,关联成像的分辨率由  $\gamma(\Delta x)$  函数的横向宽度决定<sup>[31]</sup>,即可由横向相干尺寸  $A_{\text{coh}}$  表示。其中  $A_{\text{coh}}$  的值越小,则成像分辨率越高。反射关联成像与传统的透射关联成像<sup>[31]</sup>有着相同的分辨率,其关联强度表达式有两处不同:透射关联成像中,光经物体透射后直接被桶探测器接收,而在反射关联成像中,光经物体反射被远处的桶探测器接收,产生了固定的参数因子  $A/L$ ; 强度反射系数  $T(x_1)$  代替了物体透射系数。

反射关联成像的可见度定义为

$$V = \frac{\langle C \rangle_{\text{max}} - \langle C \rangle_{\text{min}}}{\langle C \rangle_{\text{max}} + \langle C \rangle_{\text{min}}} = \frac{1}{1 + \frac{2 \int T(x_1) dx_1}{A_{\text{coh}}}}. \quad (12)$$

因此,反射关联成像的可见度随物体的反光长度  $\int T(x_1) dx_1$  的增大而减小,随相干区域  $A_{\text{coh}}$  的增大而增大。

进一步分析二阶关联强度的表达(11)式,可以发现其关联函数是有两部分组成,前者是背景项,后者是信息项。在分析信噪比时,可以通过直流滤波器将背景项去除<sup>[17,18]</sup>,简化整个分析过程。此时

(11)式将变为

$$\langle C(x_2) \rangle = \frac{A}{L} A_{\text{coh}} \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \int T(x_1) \gamma(\Delta x) dx_1 \approx \frac{A}{L} A_{\text{coh}} \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle T(x_2). \quad (13)$$

由于光在理想空间传播,噪声主要来自于光的强度涨落,因而随机变动的  $C(x_2)$  产生的噪声为

$$\langle \Delta C^2(x_2) \rangle = \langle \Delta S^2 \Delta I^2(x_2) \rangle - \langle \Delta S \Delta I(x_2) \rangle^2. \quad (14)$$

此式将涉及到了四阶强度关联的计算,然而,热光源的光场服从高斯统计分布,此时噪声可简化为<sup>[18,20]</sup>

$$\langle \Delta C^2(x_2) \rangle = \langle \Delta S^2 \rangle \langle \Delta I^2(x_2) \rangle, \quad (15)$$

式中  $\Delta S = S - \langle S \rangle$ , 是桶探测器接收到的光强度的涨落,  $\Delta I(x_2) = I(x_2) - \langle I(x_2) \rangle$ , 是点探测器  $x_2$  处接收的光强度的涨落. 结合(2),(4),(7)式,可计算出

$$\begin{aligned} \langle \Delta S^2 \rangle &= \langle S^2 \rangle - \langle S \rangle^2 = \\ &= \iint \langle I(x_{30}) I(x_{31}) \rangle dx_{30} dx_{31} - \iint \langle I(x_{30}) \rangle \langle I(x_{31}) \rangle dx_{30} dx_{31} = \iint | \langle E^*(x_{30}) E(x_{31}) \rangle |^2 dx_{30} dx_{31} = \\ &= \iint \left| \iint \langle E^*(x_{10}) E(x_{11}) \rangle \langle T^*(x_{10}) T(x_{11}) \rangle h^*(x_{30}, x_{10}) h(x_{31}, x_{11}) dx_{10} dx_{11} \right|^2 dx_{30} dx_{31} = \\ &= \left( \frac{A}{L} \right)^2 A_{\text{coh}} \langle I_1 \rangle^2 \iint T(x_{10}) T(x_{11}) \gamma(\Delta x) dx_{10} dx_{11} \approx \left( \frac{A}{L} \right)^2 A_{\text{coh}} \langle I_1 \rangle^2 \int T^2(x_1) dx_1, \end{aligned} \quad (16)$$

又由(7)式计算得到

$$\langle \Delta I_2^2(x_2) \rangle = \langle I_2^2(x_2) \rangle - \langle I_2(x_2) \rangle^2 = \langle I_2 \rangle^2, \quad (17)$$

因此,二阶反射关联成像的噪声为

$$\langle \Delta C^2(x_2) \rangle \approx \left( \frac{A}{L} \right)^2 A_{\text{coh}} \langle I \rangle^2 \langle I_2 \rangle^2 \int T^2(x_1) dx_1. \quad (18)$$

经过  $m$  次测量后,位于  $x_2$  处的图像的信噪比为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\langle C(x_2) \rangle^2}{\langle \Delta C^2(x_2) \rangle} \approx \frac{m T^2(x_2)}{\int T^2(x_1) dx_1 \cdot A_{\text{coh}}}. \quad (19)$$

由此可见,信噪比随测量次数  $m$  增加而增大,随相干区域  $A_{\text{coh}}$  的增大而增大,但是随反射强度区域  $\int T^2(x_1) dx_1$  增加而降低.

### 3 基于反射型物体的高阶热光源关联成像

参考高阶透射关联成像的理论模型<sup>[32,33]</sup>,给出高阶反射关联成像的物理模型如图2所示.在图2中,热光源通过分光镜组使其分为  $N$  束完全一致的光.其中一束光传播  $L$  距离后经物体反射,被  $L$  远处的桶形探测器接收并测得其光强度.其余  $N-1$  束光则分别在自由空间传播  $L$  距离远由  $N-1$  个 CCD 器件分别测量各点光强度值.将桶形探测器和  $N-1$  个点阵列探测器得到的光强度信息并进行高阶关联计算可以重现被成像物体.图中,  $E(x_0), E(x_1), E(x_{2,1}), \dots, E(x_{2,N-1}), E(x_3)$  分别代表光源面  $x_0$ , 物体面  $x_1, N-1$  个 CCD 探测面  $x_{2,1}, \dots, x_{2,N-1}$  和桶探测面  $x_3$  处的光场.

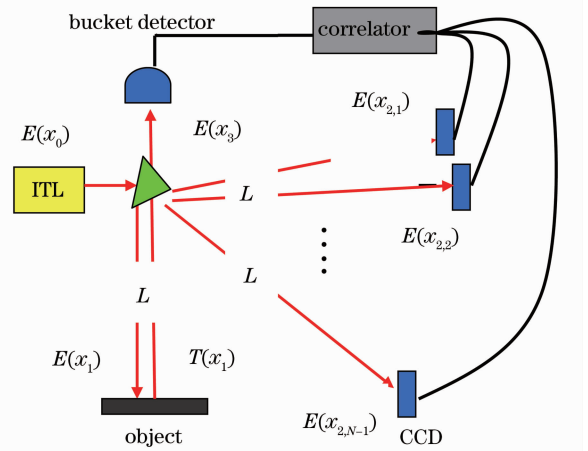


图2 基于反射物体的高阶热光源反射关联成像  
Fig. 2 High-order reflective ghost imaging with thermal light

由文献[33]可知,高阶透射关联成像是在将扫描探测器测量到的光强进行  $N-1$  次方后再参与关联计算.对比文献[33]中的高阶透射关联的原理图,可以知道图2中的高阶反射关联成像的不同之处,是将信号光路中的透射物体替换为了反射物体,其余的  $N-1$  条参考光路并未改变.因此,区别二阶反射型关联成像,高阶反射关联成像也是在将参考光路中扫描探测器测量到的光强进行  $N-1$  次方

后再参与关联计算。

因此,探测器处的高阶关联函数可表示为

$$\langle C^N(x_2) \rangle = \int \langle I(x_3) I^{N-1}(x_2) \rangle dx_3, \quad (20)$$

将(2)式和(4)式代入(20)式中,得到

$$\langle I(x_1) I^{N-1}(x_2) \rangle = (N-1)! \langle I(x_1) \rangle \langle I(x_2) \rangle^{N-1} + (N-1)! (N-1) \langle I(x_2) \rangle^{N-2} |\langle E^*(x_1) E(x_2) \rangle|^2, \quad (22)$$

结合(9),(21),(22)式,最终可得到用来恢复物体信息的高阶关联函数:

$$C^{(N)}(x_2) = \frac{A}{L} (N-1)! \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle^{N-1} + \frac{A}{L} A_{\text{coh}} (N-1)! (N-1) \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle^{N-1} \int dx_1 T(x_1) \gamma(\Delta x). \quad (23)$$

对比(11)式和(23)式,与二阶关联相比,高阶关联中的信号项相对于背景项多增大了  $N-1$  倍。

此时,高阶反射关联成像的可见度为

$$V^{(N)} = \frac{C_{\text{max}}^{(N)} - C_{\text{min}}^{(N)}}{C_{\text{max}}^{(N)} + C_{\text{min}}^{(N)}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{N-1} \times \frac{\int T(x_1) dx_1}{A_{\text{coh}}}}. \quad (24)$$

现通过数值仿真手段分析可见度  $V$  与阶数  $N$  的关系。假设待成像的反射物体是仅含 0 和 1 信息的双缝物体,其中光源的为非相干的热光源,且波长  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,横向尺寸  $D = 3 \text{ mm}$ ;光路中  $L = 120 \text{ mm}$ ;反射物体的缝宽  $w = 0.1 \text{ mm}$ ,两缝之间的距离  $d = 0.2 \text{ mm}$ 。图 3 是可见度  $V$  随关联阶数  $N$  的变化趋势图,其中横轴是高阶反射关联的阶数  $N$  的值(取值大于关联成像的最小阶数 2),纵轴是高阶反射关联的可见度  $V$  的值(取值介于 0~1 之间)。

图 3 结果表明,随着阶数  $N$  的增大,反射物体的高阶关联成像的可见度逐渐增大,当阶数  $N$  比较大时,高阶关联成像的可见度可以接近 1。

另一方面,信噪比是影响关联成像质量的更重要的因素。下面将研究反射物体的高阶关联成像的信噪比与阶数  $N$  的关系。类似于二阶关联中的处

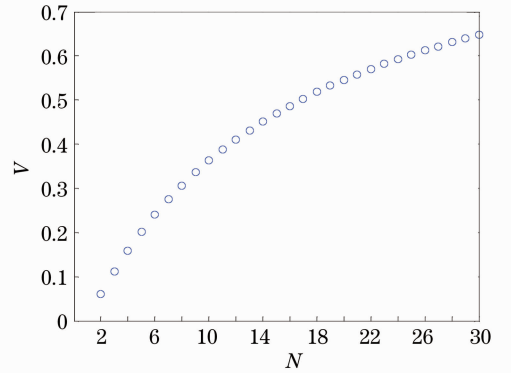


图 3 可见度  $V$  与阶数  $N$  的理论曲线图  
Fig. 3 Theoretical curves of the visibility  $V$  against order number  $N$

理办法,依然将其背景项滤除,则此时高阶关联函数将变为

$$\langle C^{(N)}(x_2) \rangle = \frac{A}{L} A_{\text{coh}} (N-1)! (N-1) \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle^{N-1} \int T(x_1) \gamma(\Delta x) dx_1 \approx \frac{A}{L} A_{\text{coh}} (N-1)! (N-1) \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle^{N-1} T(x_1). \quad (25)$$

由二阶关联成像中的(16)式和(17)式推广到高阶中有

$$\langle \Delta C^{(N)2}(x_2) \rangle = \langle \Delta S^2 \rangle \langle [\Delta I_2^{N-1}(x_2)]^2 \rangle = \{ [2(N-1)]! - [(N-1)!]^2 \} \left( \frac{A}{L} \right)^2 A_{\text{coh}} \langle I_1 \rangle^2 \langle I_2 \rangle^2 \int T^2(x_1) dx_1. \quad (26)$$

经过  $m$  次测量后,位于  $x_2$  处的图像的信噪比为

$$R_{\text{SN}^{(N)}} = \frac{\langle C^{(N)}(x_2) \rangle^2}{\langle \Delta C^{(N)2}(x_2) \rangle} \approx \frac{[(N-1)! (N-1)]^2}{\{ [2(N-1)]! - [(N-1)!]^2 \}} \frac{m T^2(x_2)}{\int T^2(x_1) dx_1}. \quad (27)$$

若记  $T = \frac{\int T^2(x_1) dx_1}{A_{\text{coh}}}$ , 且假设反射物体仅含

0,1 二位信息, 利用文献[22]中的无透镜关联成像研究方法, 即对探测器探测面上的光强进行离散化处理, 且离散化后每个像素点的面积为探测器上热光的相干面积, 那么  $T$  可以看作待成像物体的反射强度区域包含的像素点数目。图 4 是当测量次数  $m=5000$  时, 在不同的反射关联阶数  $N$  下, 成像的信噪比  $R_{\text{SN}}$  随物体反射强度区域像素点数目  $T$  的变化曲线图。其中横轴是物体反射强度区域所包含的像素点数目  $T$ , 纵轴是关联成像的信噪比  $R_{\text{SN}}$ 。

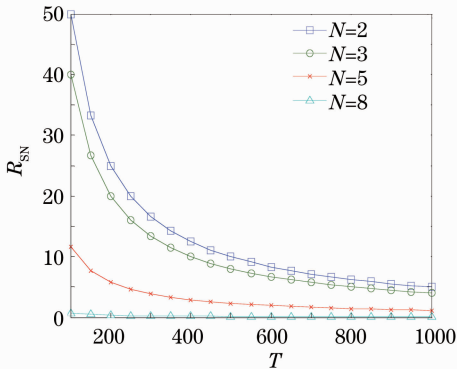


图 4 在不同阶数  $N$  下, 信噪比  $R_{\text{SN}}$  与像素点数目  $T$  的理论曲线图

Fig. 4 Theoretical curves of  $R_{\text{SN}}$  versus pixel number  $T$  with different order  $N$

图 4 结果表明: 在物体固定, 即  $T$  值一定时, 随着阶数  $N$  的增大, 其高阶关联成像的信噪比  $R_{\text{SN}}$  逐渐减小。进一步分析(27)式, 发现成像的信噪比  $R_{\text{SN}}$  与测量次数  $m$  有着线性正比关系, 此时可以通过增加测量次数来改善成像信噪比。

## 4 结 论

借鉴高阶透射型物体关联成像性能研究手段, 研究了反射型物体的完全非相干热光源的关联成像性能。通过理论推导, 获得了二阶和高阶情形下强度关联函数的表达式, 从而获得二阶和高阶情形下的成像可见度和信噪比的解析表达式。并通过数值计算方法, 分析了成像可见度和信噪比与阶数的关系。结果表明, 随着阶数  $N$  的增大, 反射物体的高阶关联成像的可见度会增大, 信噪比下降, 但是可以通过增加测量次数的方法来改善成像质量。然而增加测量次数将会增加测量时间。压缩感知是一种通过较少次数的采样来恢复物体信息的技术, 如何将压缩感知应用到高阶关联成像中将是进一步研究的重点。

## 参 考 文 献

- 1 D. N. Klyshko. Combine EPR and two-slit experiment; interference of advanced waves [J]. *Phys. Lett. A*, 1988, **132**(6): 299~304
- 2 T. B. Pittman, Y. H. Shih, A. V. Sergienko *et al.*. Experimental tests of Bell's inequalities based on space-time and spin variables[J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **51**(5): 3495~3498
- 3 R. S. Bennink, S. J. Bentley, R. W. Boyd. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(11): 113601
- 4 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
- 5 F. Ferri, D. Magatti, A. Gatti *et al.*. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(18): 183601
- 6 J. Cheng, S. Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(9): 093903
- 7 K. G. Wang, D. Z. Cao. Subwavelength coincidence interference with classical thermal light[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**(4): 041801
- 8 R. Qi, X. L. Yu, Z. B. Li *et al.*. Non-Abelian Josephson effect between two  $F=2$  spinor Bose-Einstein condensates in double optical traps[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(18): 185301
- 9 A. C. Ji, Q. Sun, X. C. Xie *et al.*. Josephson effect for photons in two weakly linked microcavities[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(2): 023602
- 10 Shen Xia, Zhang Minghui, Liu Honglin *et al.*. Research on the pulsed pseudo-thermal light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2893~2898
- 11 沈 夏, 张明辉, 刘红林 等. 脉冲式赝热光源的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2893~2898
- 12 Lin Jie, Cheng Jing. Effects of detector size and defocusing length on lensless ghost diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2912~2917
- 13 林 洁, 程 静. 探测器大小与散焦对无透镜鬼衍射的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2912~2917
- 14 A. C. Ji, W. M. Liu, J. L. Song *et al.*. Dynamical creation of fractionalized vortices and vortex lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(1): 010402
- 15 A. C. Ji, X. C. Xie, W. M. Liu. Quantum magnetic dynamics of polarized light in arrays of microcavities [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(18): 183602
- 16 Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia *et al.*. Statistical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1858~1866
- 17 张明辉, 魏 青, 沈 夏 等. 基于统计光学的无透镜关联成像数值模拟与实验验证[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1858~1866
- 18 A. Valencia, G. Scarcelli, M. D'Angelo *et al.*. Two-photon imaging with thermal light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(6): 063601
- 19 J. Xiong, D. Z. Cao, F. Huang *et al.*. Experimental observation of classical subwavelength interference with a pseudothermal light source [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(17): 173601
- 20 G. Scarcelli, V. Berardi, Y. Shih. Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuation? [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(6): 063602
- 21 B. I. Erkmen, J. H. Shapiro. Signal-to-noise ratio of Gaussian-state ghost imaging[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(2): 023833
- 22 E. F. Zhang, H. Y. Dai, P. X. Chen. Signal-to-noise ratio of lensless ghost interference with thermal incoherent light [J]. *Chinese Phys. B*, 2011, **20**(2): 024201
- 23 F. Ferri, D. Magatti, L. A. Lugiato *et al.*. Differential ghost



- imaging[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **104**(25): 253603
- 21 D. Z. Cao, J. Xiong, S. H. Zhang *et al.*. Enhancing visibility and resolution in Nth-order intensity correlation of thermal light [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(20): 201102
- 22 K. W. C. Chan, M. N. O'Sullivan, R. W. Boyd. High-order thermal ghost imaging [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3343~3345
- 23 Y. C. Liu, L. M. Kuang. Theoretical scheme of thermal-light many-ghost imaging by Nth-order intensity correlation[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(5): 053808
- 24 R. Meyers, K. S. Deacon, Y. Shih. Ghost imaging experiment by measuring reflected photons[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(4): 041801
- 25 N. S. Bisht, E. K. Sharmab, H. C. Kandpal. Experimental observation of lensless ghost imaging by measuring reflected photons[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(6): 671~675
- 26 L. Basano, P. Ottonello. Diffuse-reflection ghost imaging from a double-strip illuminated by pseudo-thermal light [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(13): 2657~2661
- 27 C. Wang, D. Zhang, Y. Bai *et al.*. Ghost imaging for reflected with a rough surface[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **82**(6): 063814
- 28 D. Y. Duan, Y. J. Xia. Reflective ghost imaging with classical Gaussian-state light[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(3): 031102
- 29 L. Mandel, E. Wolf. *Optical Coherence and Quantum Optics* [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 1995. 672~693
- 30 J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*[M]. America: Roberts and Company Publishers, 2005. 12~27
- 31 Zhang Erfeng. Study on Second-Order and High-Order Correlated Imaging [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 12~14
- 张二峰. 二阶和高阶关联成像研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010. 12~14
- 32 Q. Liu, K. H. Luo, X. H. Chen *et al.*. High-order ghost imaging with N-colour thermal light[J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(9): 094211
- 33 Q. Liu, X. H. Chen, K. H. Luo *et al.*. Role of multiphoton bunching in high-order ghost imaging with thermal light sources [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(5): 053844

栏目编辑：李文誌