

朱孝辉,周伟平,张顺辉,等.显微鬼成像系统的分辨率研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(4):117-124.  
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.017

Zhu X H, Zhou W P, Zhang S H, et al. Study on the Resolution of Microscopic Ghost Imaging System[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology ( Natural Science Edition), 2020,35(4): 117-124. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.017

# 显微鬼成像系统的分辨率研究

朱孝辉<sup>1</sup>,周伟平<sup>1\*</sup>,张顺辉<sup>1</sup>,李静宜<sup>2</sup>,刘明伟<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学 物理与电子科学学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南科技大学 化学化工学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**传统光学显微镜的分辨率受到波长和物镜数值孔径的限制,难以再有很大的提高.近年来,逐渐发展成熟的鬼成像技术为进一步提高显微成像系统的分辨率带来了新的方法,它通过对探测光路和参考光路信号的关联运算来重建目标物体.本文分析了双臂式显微鬼成像系统各面上的二维光场分布,给出了系统的二阶关联函数并推导出了具体的分辨率公式.通过理论分析和仿真实验,发现系统相比普通光学显微镜能够显著提高成像的分辨率,并且分辨率随参考臂透镜数值孔径的增大而增大.系统可用于提高光学显微镜或数值孔径受限的光学系统的分辨率.

**关键词:**鬼成像;关联成像;分辨率;显微镜

**中图分类号:** O438.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2020)04-0117-08

## Study on the Resolution of Microscopic Ghost Imaging System

Zhu Xiaohui<sup>1</sup>, Zhou Weiping<sup>1</sup>, Zhang Shunhui<sup>1</sup>, Li Jingyi<sup>2</sup>, Liu Mingwei<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Electronics Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The resolution of the traditional optical microscope is limited by the wavelength and the numerical aperture of the objective lens, and it is difficult to improve it greatly. In recent years, the gradually developed ghost imaging technology (GIT) has brought a new method to further improve the resolution of microscopic imaging systems. GIT reconstructs the target object by means of the correlation operation between the detection and the reference optical path signals. The two-dimensional light field distribution that on each face of the two-arm microscopic ghost imaging system, was analyzed, the second-order correlation function of the system was given and the specific resolution formula was derived. Through theoretical analysis and simulation experiments, it was found that the system significantly improve the resolution of imaging compared to ordinary optical microscopes, and the resolution increases with the increase of the numerical aperture of the reference arm lens. The system can be used to increase the resolution of optical microscopes or optical systems with limited numerical aperture.

**Keywords:** ghost imaging; correlation imaging; resolution; microscope

光学显微镜是一种广泛使用的光学仪器,它将物体的细微结构放大成像在观察面上以供人眼观察<sup>[1]</sup>.

收稿日期:2020-07-06

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目资助(19C0763)

\*通信作者,E-mail: joweiping@hnust.edu.cn

作为一种重要的分析工具,它在科学研究、医疗诊断、材料制造、工业检测等领域均有着重要的应用.光学显微镜的分辨率主要由光源的波长和物镜的数值孔径所决定<sup>[2]</sup>,通常高数值孔径代表着高分辨率.随着人们对微观领域的进一步深入研究,急需更高分辨率和更好性能的光学显微镜.一方面,在某些实际应用中,高数值孔径的透镜受到实际环境的限制,成为影响系统成像质量的关键因素,例如,在使用医用内窥镜检测人体器官时,较小的透镜直径极大地限制了数值孔径,导致成像的分辨率较低;另一方面,从基本的光学原理角度出发来减小波长和增大数值孔径以提高显微镜分辨率的方式已经有了长足发展,很难再有巨大的提高,因而急需一种新的技术来提高光学显微镜或者数值孔径受限系统的分辨率.

与此同时,近几十年来逐渐发展成熟的鬼成像技术<sup>[3-5]</sup>为上述问题带来一种全新的解决方案.鬼成像又称关联成像、量子成像等,是利用光场的二阶或者更高阶关联运算来实现对目标物体图像进行重建的新型成像技术,它具有抗干扰、高分辨率、照明可控以及非局域成像等优良特性.与传统的单光路成像不同,鬼成像需要双光路或者多光路的联合探测才能够成像.鬼成像技术的基本原理:由光源发出的光经过分束器分为两束光,一束光(探测臂光)经过待成像物体后被一个没有空间分辨率的点(桶)探测器接收;另一束光(参考臂光)不放置待成像的物体,光直接被 CCD 探测器接收;最后,通过对 2 个探测器接收到的信号进行关联运算便可重建出包含有物体信息的图像.

采用鬼成像技术来提高光学显微镜或者数值孔径受限系统的分辨率已经有了一定的发展<sup>[6-7]</sup>,但是 Zhang 等<sup>[6-7]</sup>的工作仅考虑了光场的一维分布,而没有从实际的光场二维分布进行讨论和分析,这使得对分辨率的讨论存在一定误差并且缺乏深入的分析.因此,本文将从光场的二维分布出发,对双臂式的显微鬼成像系统进行分析,推导出系统的关联函数和分辨率的具体公式,并通过仿真实验对理论结果进行验证.

## 1 显微鬼成像系统的理论分析

### 1.1 系统的结构

如图 1 所示是双臂式显微鬼成像系统的示意图.赝热光源由激光打在旋转的毛玻璃上产生<sup>[8]</sup>,光源面发出的光经分束器(BS)后分成两束光.在探测光路上,距离光源  $d_0$  处放置着待成像物体,物体后  $d_1$  处放置探测臂物镜,其焦距为  $f_i$ ,口径为  $L_i$ ,物镜后方  $d_2$  处有 CCD 探测器  $D_i$ .其中  $d_1, d_2, L_i$  满足高斯薄透镜方程.在参考光路上,为便于理论分析,同样距离光源  $d_0$  处设置一虚拟平面  $s$ ,虚拟平面后  $d_3$  处放置参考臂透镜,其焦距为  $f_r$ ,口径为  $L_r$ ,透镜后  $d_4$  处放置有 CCD 探测器  $D_r$ .其中  $d_3, d_4, L_r$  依然满足高斯薄透镜方程.

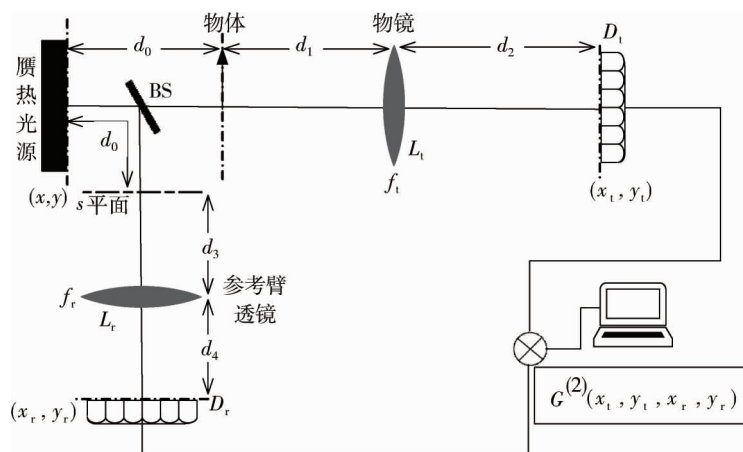


图 1 显微鬼成像系统

### 1.2 系统的二阶关联函数

设光源平面坐标为  $(x, y)$ , 物体平面为  $(x_0, y_0)$  且物体的透过率为  $t(x_0, y_0)$ , 物镜平面为  $(x_i, y_i)$ , CCD 探测器  $D_r$  平面为  $(x_r, y_r)$ . 各个平面的光场分布为  $E(x_i, y_i)$ , 其中  $x_i = x, x_0, x_f, x_t, y_i = y, y_0, y_f, y_t$ . 光场  $E(x, y)$  由光源处在自由空间传播到物体,根据菲涅尔衍射积分<sup>[9]</sup>可知,从光源到物体的脉冲响应可写为

$$h_1(x_0, y_0; x, y) = \frac{e^{jk d_0}}{j\lambda d_0} \exp\left\{ \frac{jk}{2d_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \right\}. \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为光源波长;  $k$  为波数,  $k = 2\pi/\lambda$ .

从物体到 CCD 探测器  $D_1$  平面, 物镜的二维脉冲响应函数<sup>[9]</sup>为

$$h_2(x_1, y_1; x_0, y_0) = \frac{1}{\lambda^2 d_1 d_2} \exp\left[ \frac{jk}{2d_1} (x_0^2 + y_0^2) \right] \exp\left[ \frac{jk}{2d_2} (x_1^2 + y_1^2) \right] \\ \iint P(x_1, y_1) \exp\left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda d_1} \left[ \left( x_0 + \frac{x_1}{M_1} \right) x_1 + \left( y_0 + \frac{y_1}{M_1} \right) y_1 \right] \right\} dx_1 dy_1. \quad (2)$$

式中:  $(x_1, y_1)$  为探测臂物镜所在的平面;  $P(x_1, y_1) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{L_1/2}\right)$  为物镜的圆对称形孔径函数;  $M_1 = d_2/d_1$  为物镜的垂轴放大率.

利用傅里叶-贝塞尔变换<sup>[10]</sup>计算式得

$$h_2(x_1, y_1; x_0, y_0) = \frac{1}{\lambda^2 d_1 d_2} \exp\left[ \frac{jk}{2d_1} (x_0^2 + y_0^2) \right] \exp\left[ \frac{jk}{2d_2} (x_1^2 + y_1^2) \right] \\ \pi (L_1/2)^2 \text{somb}_{2-D}[Z(x_1, y_1, x_0, y_0, L_1, M_1)]. \quad (3)$$

式中:  $Z(x_1, y_1, x_0, y_0, L_1, M_1) = 2\pi \frac{L_1/2}{\lambda d_1} \sqrt{\left(x_0 + \frac{x_1}{M_1}\right)^2 + \left(y_0 + \frac{y_1}{M_1}\right)^2}$ ;  $\text{somb}_{2-D}[Z(x_1, y_1, x_0, y_0, L_1, M_1)] = \frac{2J_1[Z(x_1, y_1, x_0, y_0, L_1, M_1)]}{Z(x_1, y_1, x_0, y_0, L_1, M_1)}$  ( $\text{somb}_{2-D}(r) = 2J_1(r)/r$  为二维的  $\text{somb}$  函数;  $J_1(r)$  为第一类贝塞尔函数).

由式(1)和式(3)以及利用光学系统的线性性质<sup>[11]</sup>, 可知探测臂总的脉冲响应为

$$h_1(x_1, y_1; x, y) = \iint h_1(x_0, y_0; x, y) t(x_0, y_0) h_2(x_1, y_1; x_0, y_0) dx_0 dy_0 = \\ \iint \frac{\pi L_1^2}{4} \frac{e^{jk d_0}}{j\lambda d_0} \frac{1}{\lambda^2 d_1 d_2} \exp\left\{ \frac{jk}{2d_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \right\} \exp\left[ \frac{jk}{2d_1} (x_0^2 + y_0^2) \right] \\ \exp\left[ \frac{jk}{2d_2} (x_1^2 + y_1^2) \right] t(x_0, y_0) \text{somb}_{2-D}[Z(x_1, y_1, x_0, y_0, L_1, M_1)] dx_0 dy_0. \quad (4)$$

设 CCD 探测器  $D_r$  所在的平面为  $(x_r, y_r)$ , 同理我们可得参考臂脉冲响应为

$$h_r(x_r, y_r; x, y) = \iint \frac{\pi L_r^2}{4} \frac{e^{jk d_0}}{j\lambda d_0} \frac{1}{\lambda^2 d_3 d_4} \exp\left\{ \frac{jk}{2d_0} [(x - x_0')^2 + (y - y_0')^2] \right\} \exp\left[ \frac{jk}{2d_3} (x_0'^2 + y_0'^2) \right] \\ \exp\left[ \frac{jk}{2d_4} (x_r^2 + y_r^2) \right] \text{somb}_{2-D}[Z(x_r, y_r, x_0', y_0', L_r, M_r)] dx_0' dy_0'. \quad (5)$$

式中:  $(x_0', y_0')$  为  $s$  平面的二维坐标;  $M_r = d_4/d_3$  为参考臂透镜的垂轴放大率.

两探测器间的二阶关联函数可定义为<sup>[12-14]</sup>

$$G^{(2)}(x_1, y_1, x_r, y_r) = \left| \iiint \langle E(x_1, y_1) E^*(x_2, y_2) \rangle h_1(x_1, y_1; x_1, y_1) h_r^*(x_r, y_r; x_2, y_2) dx_1 dx_2 dy_1 dy_2 \right|^2. \quad (6)$$

式中:  $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{N} \sum \cdot$  为统计平均( $N$  为样本总量).

若光源面积足够大并且光场均匀分布, 我们可以暂时不考虑光源线度对成像造成的影响, 则有

$$\langle E(x_1, y_1) E^*(x_2, y_2) \rangle = I_0 \delta(x_1 - x_2, y_1 - y_2). \quad (7)$$

式中:  $E(x_1, y_1)$  为光源  $(x_1, y_1)$  处的电场;  $E^*(x_2, y_2)$  为光源  $(x_2, y_2)$  处电场的复共轭;  $I_0$  为光源的平均光强;  $\delta(x_1 - x_2, y_1 - y_2)$  为二维狄拉克  $\delta$  函数.

将式(4)、式(5)和式(7)代入式(6), 并忽略无关的相位因子和常数, 可化简得系统的二阶关联函数为

$$G^{(2)}(x_1, y_1, x_r, y_r) = \left| \iint t(x_0, y_0) \text{somb}_{2-D}[Z(x_1, y_1, x_0, y_0, L_1, M_1)] \right|^2$$

$$\text{somb}_{2-D} [Z(x_r, y_r, x_0, y_0, L_r, M_r)] dx_0 dy_0|^2. \quad (8)$$

式(8)的积分核为

$$h_g(x_t, y_t, x_r, y_r) = \text{somb}_{2-D} [Z(x_t, y_t, x_0, y_0, L_t, M_t)] \text{somb}_{2-D} [Z(x_r, y_r, x_0, y_0, L_r, M_r)]. \quad (9)$$

表明在显微鬼成像系统中,待成像物体上一点的脉冲响应为探测臂和参考臂上 2 个透镜脉冲响应函数(二维 somb 函数)的乘积.

### 1.3 系统成像的分辨率

经过上节分析,我们发现透镜的脉冲响应和显微系统的二阶关联函数的积分核都与二维 somb 函数有关.同时,由于二维 somb 函数是圆对称的,因此,下文分析系统成像分辨率的时候,我们可以仅考虑一维情况.

为不失一般性且便于分析,考虑一种简单的情况:  $x_r = \frac{M_r}{M_t} x_t$ , 此时式(8)将变成:

$$G^{(2)}\left(\frac{M_t}{M_r} x_r, x_r\right) = \left| \int t(x_0) \text{somb}_{1-D} \left[ \frac{\pi L_t}{d_1 \lambda} \left( x_0 + \frac{x_r}{M_r} \right) \right] \text{somb}_{1-D} \left[ \frac{\pi L_r}{d_3 \lambda} \left( x_0 + \frac{x_r}{M_r} \right) \right] dx_0 \right|^2. \quad (10)$$

通常我们采用瑞利判据<sup>[2]</sup>来计算光学显微镜的分辨率,由此我们可得探测光路的分辨率为

$$\Delta_{x_t} = 0.61 \frac{\lambda}{NA_t} \approx 1.22 \frac{\lambda d_1}{L_t}. \quad (11)$$

式中:  $NA_t = n \sin u \approx \frac{L_t/2}{d_1}$  为探测臂物镜的数值孔径.

我们可以用数值孔径来分别表示系统的积分核和探测光路物镜的脉冲响应函数:

$$h_g\left(\frac{M_t}{M_r} x_r, x_r\right) = \text{somb}_{1-D} \left[ \frac{2\pi NA_t}{\lambda} \left( x_0 + \frac{x_r}{M_r} \right) \right] \text{somb}_{1-D} \left[ \frac{2\pi NA_r}{\lambda} \left( x_0 + \frac{x_r}{M_r} \right) \right]; \quad (12)$$

$$h_2(x_t, x_0) = \text{somb}_{1-D} \left[ \frac{2\pi NA_t}{\lambda} \left( x_0 + \frac{x_r}{M_r} \right) \right]. \quad (13)$$

式中:  $NA_r = n \sin u \approx \frac{L_r/2}{d_3}$  为参考臂透镜的数值孔径.

显然,从式(12)和式(13)可看出:单独探测臂成像的分辨率主要由探测臂物镜数值孔径所决定,而显微系统的分辨率则由探测臂物镜和参考臂透镜数值孔径共同决定.

我们定义单峰函数的半峰全宽(FWHM)为函数最大值的一半处所对应的两点之间的距离.对于一维 somb 函数来说,半峰全宽越窄,函数图形越接近理想光学系统成像的  $\delta$  函数,即函数所表征的光学系统的脉冲响应能量越集中,相应的成像分辨率也会越好.由于显微鬼成像系统的二阶关联函数的积分核是 somb 函数相乘的形式,所以它比探测臂物镜的脉冲响应应具有更小的半峰全宽,这将使显微系统的分辨率得以提高,且随着参考臂透镜直径的增加,系统的分辨率会逐步提高,即增大参考臂透镜的数值孔径能够提高系统的分辨率.

通过计算  $h_g, h_2$  半峰全宽的比值,便可计算出系统分辨率比探测臂分辨率提高的具体倍数,下面我们进行具体推导.

令  $X = \frac{2\pi}{\lambda} \left( x_0 + \frac{x_r}{M_r} \right)$ , 可将式(12)和式(13)写为

$$h_g = \text{somb}_{1-D}(NA_t X) \text{somb}_{1-D}(NA_r X); \quad (14)$$

$$h_2 = \text{somb}_{1-D}(NA_t X). \quad (15)$$

对于  $\text{somb}(X)$  易求其半峰全宽约为 4.43, 将其代入式(15)可计算得探测臂物镜脉冲响应函数  $h_2$  的半峰全宽为

$$W_t = \frac{4.43}{NA_t}. \quad (16)$$

求解式(14)中  $h_g$  的半峰全宽需要解超越方程,没有精确的解析解.我们采用泰勒多项式展开的办法来处理.

将  $\text{somb}_{1-D}(NA_l X)$ ,  $\text{somb}_{1-D}(NA_r X)$  进行泰勒展开:

$$\begin{cases} \text{somb}_{1-D}(NA_l X) = 1 - \frac{(NA_l X)^2}{8} + \frac{(NA_l X)^4}{192} + O((NA_l X)^5); \\ \text{somb}_{1-D}(NA_r X) = 1 - \frac{(NA_r X)^2}{8} + \frac{(NA_r X)^4}{192} + O((NA_r X)^5). \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14)化简得

$$h_g = 1 - \left( \frac{NA_l^2}{8} + \frac{NA_r^2}{8} \right) X^2 + \left( \frac{NA_l^4}{192} + \frac{NA_l^2 NA_r^2}{64} + \frac{NA_r^4}{192} \right) X^4 + O(X^5). \quad (18)$$

令上式等于 1/2,解此四次方程得到最小的正根为

$$X = \left[ \frac{12(NA_l^2 + NA_r^2) - 96\sqrt{(NA_l^4 + NA_r^4)/192}}{NA_l^4 + 3NA_l^2 NA_r^2 + NA_r^4} \right]^{1/2}. \quad (19)$$

在以上计算时,我们相当于在原点用四次方程展开  $\text{somb}_{1-D}(X)$ ,忽略了高阶项  $O(X^5)$ .取  $\text{somb}_{1-D}(x)$  半峰全宽处所对应的  $x$  值为  $x = 2.215$ ,将其代入  $\text{somb}_{1-D}(x)$  和四阶近似项得到其误差为 0.03.因此,利用泰勒公式对  $\text{somb}_{1-D}(x)$  近似在半峰全宽内的误差不会大于 0.03,当  $\text{somb}_{1-D}(x)$  函数相乘时,此误差会更小.通过式(19)我们可得  $h_g$  的半峰全宽:

$$W_g = 2X = 2 \left[ \frac{12(NA_l^2 + NA_r^2) - 96\sqrt{(NA_l^4 + NA_r^4)/192}}{NA_l^4 + 3NA_l^2 NA_r^2 + NA_r^4} \right]^{1/2}. \quad (20)$$

令

$$\gamma = \frac{W_l}{W_g} \approx \frac{1.1[1 + 3(NA_r/NA_l)^2 + (NA_r/NA_l)^4]^{1/2}}{[3(1 + (NA_r/NA_l)^2) - 3\sqrt{(1 + (NA_r/NA_l)^4)/3}]^{1/2}}. \quad (21)$$

因而,我们得到显微鬼成像系统的分辨率为

$$\Delta_{x_g} = \frac{\sqrt{3(1 + (NA_r/NA_l)^2) - 3\sqrt{(1 + (NA_r/NA_l)^4)/3}}}{1.1\sqrt{1 + 3(NA_r/NA_l)^2 + (NA_r/NA_l)^4}} \Delta_{x_l} = \Delta_{x_l}/\gamma. \quad (22)$$

即相比普通光学显微镜,系统的分辨率约提高了  $\gamma$  倍.

参考臂透镜的数值孔径一般小于 1,在油浸等情况下最大为 1.5 左右<sup>[2]</sup>,而探测臂物镜的数值孔径一般受到系统的限制较小.系统提高分辨率的倍数如图 2 所示,图 2 为探测臂物镜数值孔径分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1.0 时,系统分辨率提高的倍数  $\gamma$  随参考臂透镜数值孔径的变化关系.从图 2 可以看出:当探测臂物镜数值孔径不变时,系统的分辨率随着参考臂透镜数值孔径的增大而增大;当参考臂透镜数值孔径不变时,探测臂物镜的数值孔径越小(即参考臂与探测臂数值孔径的比值越大),系统提高分辨率的倍数越大.由此可知,对于实际装置,若采用双臂式显微鬼成像系统,参考臂应尽量选择大数值孔径的透镜以提高分辨率.

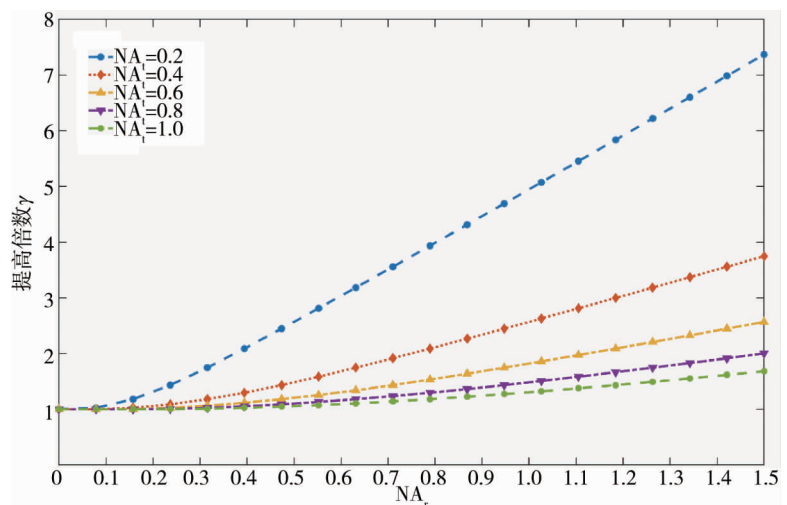


图 2 系统提高分辨率的倍数

## 2 仿真分析

我们设置仿真实验的赝热光源的波长为 532 nm,物体距离光源  $d_0 = 100$  mm,两光路透镜焦距均为250 mm,且  $d_1 = d_3 = 375$  mm,  $d_2 = d_4 = 750$  mm<sup>[6]</sup>. 探测臂物镜口径固定为6 mm,而参考臂物镜口径可变化.待成像物体为双缝和湖南科技大学校庆标识(logo)灰度图,其中双缝缝宽为 20  $\mu\text{m}$ ,中心-中心间距为 40  $\mu\text{m}$ .

根据二阶关联函数的定义,我们可得到数值模拟所用的公式为

$$T_{\text{GI}}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i^l(x, y) - \langle I_i^l(x, y) \rangle) (I_i^r(x, y) - \langle I_i^r(x, y) \rangle). \tag{23}$$

式中:  $T_{\text{GI}}(x, y)$  为最终计算得到的物体图像;  $N$  为共需采集图像的次数,仿真实验中设定  $N = 1\ 000$ ;  $I_i^l(x, y)$ ,  $I_i^r(x, y)$  为 CCD 探测器  $D_l$  和  $D_r$  在第  $i$  次探测时所采集到的图样的强度分布.

图 3 为待成像物体的双缝图.图 4 为系统探测臂单独成像时的双缝图.图 5~图 7 分别为参考臂物镜直径为 6, 10 和 15 mm 时系统成像的结果,图 5a,图 6a,图 7a 是双缝成像的图形,图 5b,图 6b,图 7b 是其对应的  $x$  轴方向中心归一化的光场强度,且图 5~图 7 中实线表示仿真实验结果,虚线表示理论计算结果.

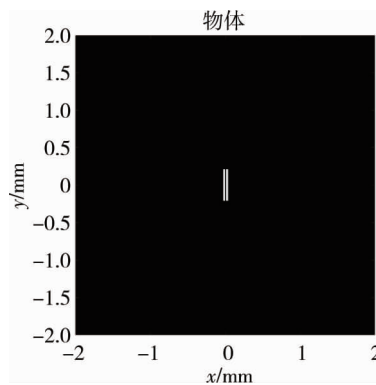


图 3 双缝物体

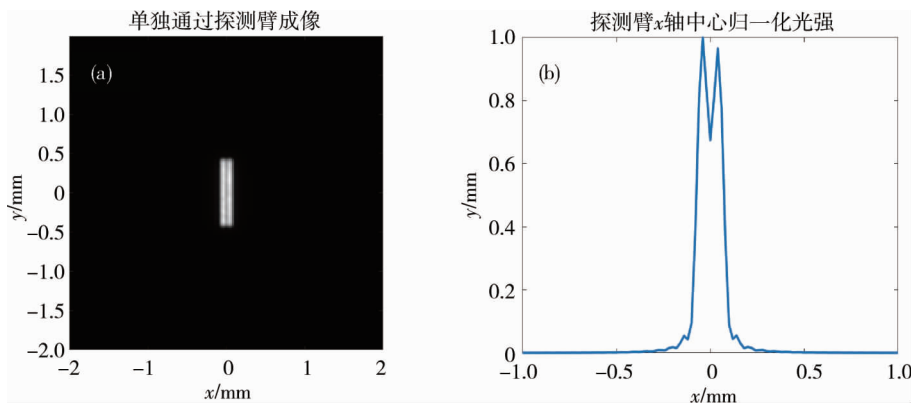


图 4 探测臂单独成像

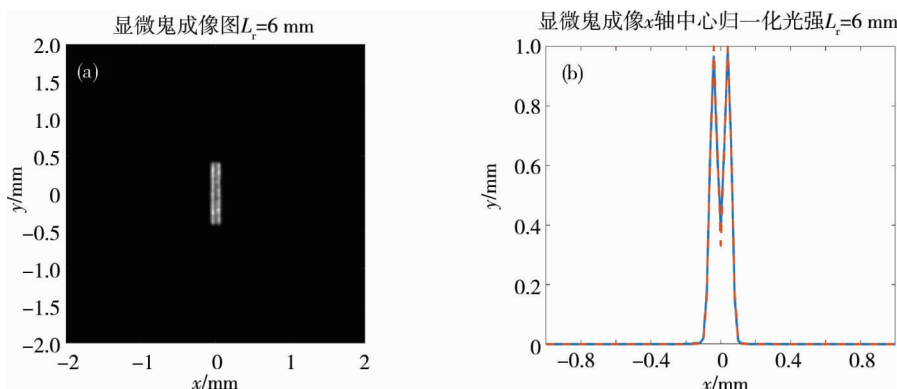
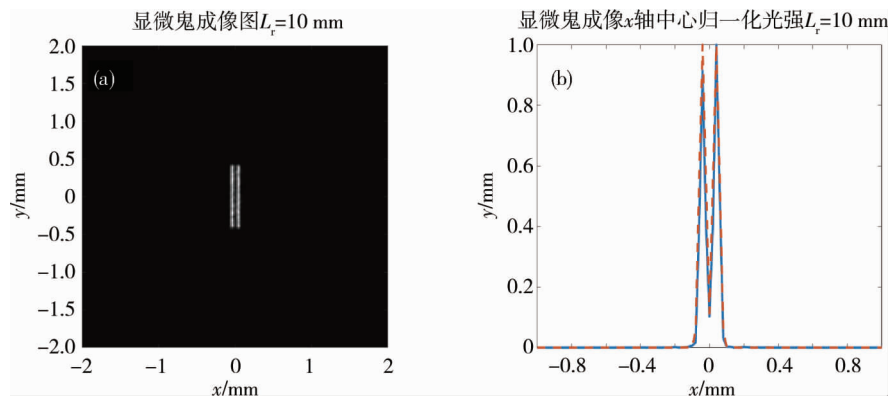
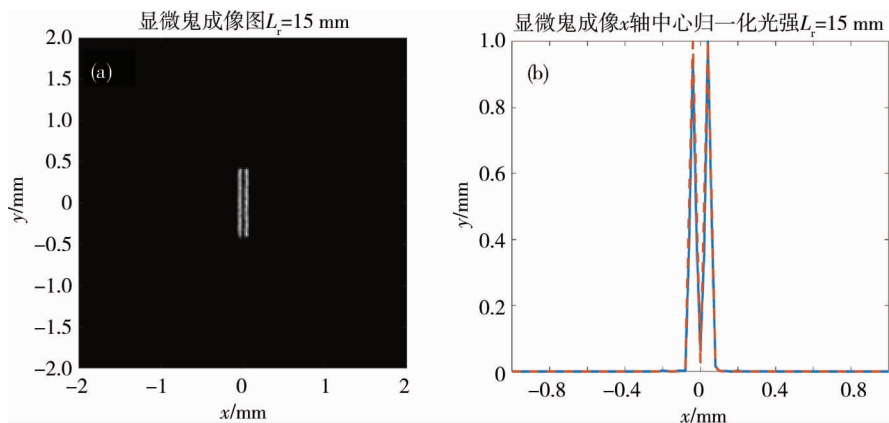


图 5 显微系统成像  $L_r = 6$  mm

图6 显微系统成像  $L_r = 10$  mm图7 显微系统成像  $L_r = 15$  mm

将相关仿真参数代入式(11),计算可得显微鬼成像系统探测臂单独成像的分辨率约为  $40.6 \mu\text{m}$ ,略大于双缝的中心宽度.因此成像必然会有些模糊,这与图4a的成像结果较为模糊是一致的.正如图5~图7所示,随着参考臂的透镜孔径的增大(即数值孔径  $\text{NA}_r$ 的增大),重建的图像越来越清晰,成像的分辨率也越来越高.根据显微鬼成像系统的分辨率公式,依次可计算出上述3种参考臂透镜孔径下显微鬼成像系统的分辨率约为  $29.3, 21.0, 14.9 \mu\text{m}$ ,均小于双缝中心宽度  $40 \mu\text{m}$ ,这从理论上说明显微系统确实是能够对双缝清晰成像的.从图5~图7可以看出:随着透镜孔径的增大, $x$ 轴中心归一化光强的原点的波谷越来越低,双缝的分辨能力也越来越强,且理论预测的结果和仿真模拟的结果高度吻合.

图8是待成像物体校庆标识的灰度图.图9为湖南科技大学校庆标识的成像图,其中图9a为系统探测臂单独成像图,图9b~图9d为参考臂透镜直径分别为6, 10和20 mm时的系统成像图.从图9可以看出:随着参考臂透镜直径的增加,系统成像清晰程度有一定提升且均好于探测臂单独成像,这与上述双缝的分析结果也是一致的.但是图9c和图9d的区别非常细微,这是由于校庆灰度图像较为复杂,成像结果不仅仅和参考臂的数值孔径有关,当数值孔径达到一定数值,光源的有限大小、图像的采样次数、待成像物体本身的缺陷等都有可能对成像结果产生较大影响,相关分辨率的详细讨论仍需进一步研究.

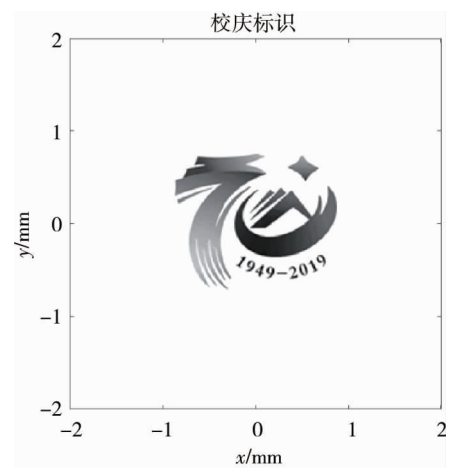


图8 湖南科技大学70周年校庆标识灰度

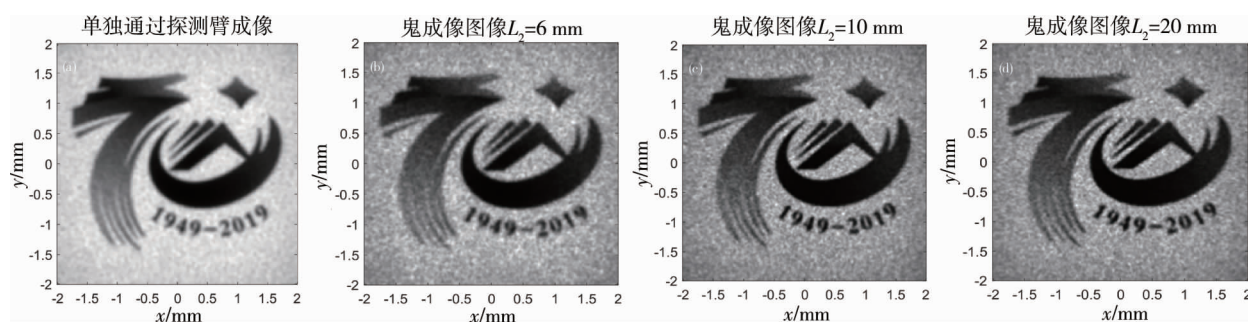


图9 校庆标识成像

### 3 结论

1) 对系统二维光场分布的理论分析与仿真实验的结果十分吻合.理论和仿真实验结果表明:增大参考臂透镜的数值孔径能够提高系统的成像分辨率.

2) 在对较为复杂的物体成像时,仍然有很多因素会影响图像质量,需要进一步研究.更细致的讨论可采用高斯-谢尔模型光束<sup>[6,15]</sup>.

#### 参考文献:

- [1] 周锐,吴梦雪,沈飞,等.基于近场光学的微球超分辨显微效应[J].物理学报,2017(14):8-25.
- [2] 梁铨廷.物理光学[M].4版.北京:电子工业出版社,2012.
- [3] 蔡阳健.关联成像及其应用研究进展[J].四川师范大学学报(自然科学版),2018,41(6):711-728.
- [4] 邵晓鹏,刘飞,李伟,等.计算成像技术及应用最新进展[J].激光与光电子学进展,2020,57(2):020001.
- [5] 吴自文,邱晓东,陈理想.关联成像技术的研究现状及展望[J].激光与光电子学进展,2020,57(6):060001.
- [6] Zhang P L, Gong W L, Shen X, et al. Improving resolution by the second-order correlation of light fields[J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1222.
- [7] Bai Y F. Improving resolution by the higher-order microscope imaging system with thermal light[C]// 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium. Beijing: IEEE,2014:1-3.
- [8] 施晓辉.光子计数条件下关联成像技术研究[D].长沙:湖南大学,2018.
- [9] 苏显渝.信息光学[M].2版.北京:科学出版社,2011.
- [10] Voelz D. Computational Fourier Optics: A MATLAB Tutorial[M]. Bellingham: SPIE Press, 2011.
- [11] 洪泽俊.热光关联成像中的分辨率研究[D].长沙:湖南师范大学,2008.
- [12] Cheng J, Han S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(9): 93903.
- [13] Cai Y J, Zhu S Y. Ghost imaging with incoherent and partially coherent light radiation[J]. Physical Review E, 2005, 71(5): 056607.
- [14] 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.
- [15] 罗志梅.鬼望远镜成像系统中噪声和分辨率的研究[D].长沙:湖南大学,2016.