

# 预放大数字全息系统的成像分辨率分析\*

王华英<sup>1,2</sup>, 王广俊<sup>1,3</sup>, 赵洁<sup>1</sup>, 谢建军<sup>1</sup>, 王大勇<sup>1</sup>

(1 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100022)

(2 河北工程大学 理学院, 邯郸 056038)

(3 河南省计量科学研究院, 郑州 450008)

**摘 要:**基于菲涅耳衍射理论,详细推导了预放大数字全息系统的点扩散函数表达式,并由此分析了该成像系统的分辨率.通过分别对整个系统、显微物镜以及 CCD 的点扩散函数幅值的计算机模拟,讨论了显微物镜与 CCD 分辨率之间的匹配问题.指明了现有文献中一些含糊说法.结果表明:恰当选择记录参量,使 MO 的成像分辨率接近于其极限分辨率,同时还要使 CCD 在满足抽样条件与再现像分离条件的情况下,再现像分辨率等于或略高于 MO 的分辨率.

**关键词:**全息术;预放大数字全息术;菲涅耳衍射;点扩散函数;分辨率

**中图分类号:**O438.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2008)04-0729-5

## 0 引言

数字全息技术的独特优势使其成为近年来国际上研究的热点<sup>[1-8]</sup>.由数字全息原理,利用无透镜傅里叶变换全息可以获得极高分辨率成像<sup>[9,10]</sup>,但需要极小的成像区域和极小的记录距离,这将对实验的实施造成一定困难.采用预放大数字全息系统既可以获得高分辨率成像,又提高了实验实施的可操作性<sup>[11-12]</sup>.因此,加有显微物镜(MO)的预放大数字全息技术成为当前微结构成像与表征的重要手段<sup>[11-15]</sup>.对于这种系统的成像分辨率,现有文献普遍认为主要由 MO 的数值孔径及照明光的波长决定,而对于 CCD 对此系统分辨率的影响从未提及,对于该系统的分辨率的详细分析未见报道.事实上,预放大数字全息成像系统是一个串级系统,根据成像系统理论,CCD 的参量以及记录条件对分辨率有至关重要的影响.因此,本文导出预放大数字全息系统的点扩散函数(PSF),并由此分析各个参量对成像分辨率的影响,对于数字全息显微成像具有重大的意义.

## 1 预放大离轴菲涅耳数字全息系统的 PSF

预放大离轴菲涅耳数字全息的记录光路如图 1.其中 MO 用单透镜来描述,  $x_0 - y_0$  平面为物平面,  $x_\varphi - y_\varphi$  平面为透镜平面,  $x - y$  平面为全息图平

面,  $x_i - y_i$  平面为透镜成像的像平面,也是系统最终的像平面,  $z$  轴垂直通过四个平面中心,  $R$  为记录平面参考光波.

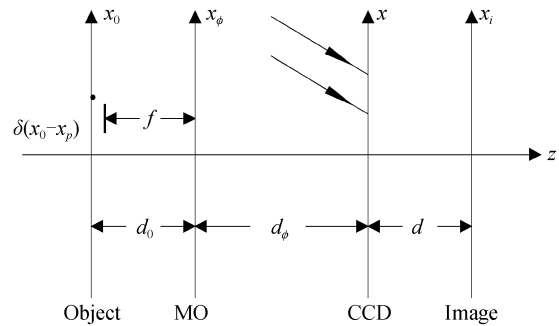


图 1 预放大离轴菲涅耳数字全息记录示意图

Fig. 1 Schematic for recording pre-magnification off-axis Fresnel digital hologram

为了简洁,下面推导中仅写出一维形式.设物位于  $x_p$  处,可表示为  $\delta(x_0 - x_p)$ ;MO 的孔径函数为  $P(x_\varphi) = \text{rect}(x_\varphi/R)$  (二维情况下为圆域函数),  $R$  表示透镜孔径的半径;  $N_x, \Delta x$  分别为 CCD 的像元数及像元尺寸.根据菲涅耳衍射公式及透镜的傅里叶变换性质,MO 前、后表面物光场复振幅分别为

$$U(x_\varphi) = \frac{\exp(jkd_0)}{j\lambda d_0} \exp\left[\frac{jk}{2d_0}(x_\varphi - x_p)^2\right] \quad (1)$$

$$U(x_\varphi) = U'(x_\varphi)P(x_\varphi)\exp\left(-\frac{jk}{2f}x_\varphi^2\right) \quad (2)$$

CCD 平面物光场复振幅为

$$O(x, y) = \frac{\exp(jkd_\varphi)}{j\lambda d_\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_\varphi) \frac{\exp(jk)}{j d_\varphi} \cdot \exp\left[\frac{jk}{2d_\varphi}(x - x_\varphi)^2\right] dx_\varphi = \frac{\exp(jkd_0 + jkd_\varphi)}{j^2 \lambda^2 d_0 d_\varphi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} P(x_\varphi) \exp\left[\frac{jk}{2d_0}(x_\varphi - x_p)^2\right] \exp\left(-\frac{jk}{2f}x_\varphi^2\right) \cdot$$

\*国家自然科学基金(60577029)、北京市优秀人才培养基金(20051D0501523)和北京市留学人员科技活动择优项目资助  
Tel:010-67396069 Email:pbxsiyngzi@126.com  
收稿日期:2007-01-10

$$\exp \left[ \frac{jk}{2d_\varphi} (x - x_\varphi)^2 \right] dx_\varphi = \frac{\exp(jkd_0 + jkd_\varphi)}{-\lambda^2 d_0 d_\varphi} \cdot \exp \left( \frac{jk}{2d_0} x_p^2 \right) \exp \left( -\frac{jk}{2d_\varphi} x^2 \right) \int_{-\infty}^{\infty} P(x_\varphi) \exp \left[ \frac{jk}{2} \left( \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_\varphi} - \frac{1}{f} \right) x_\varphi^2 \right] \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x}{\lambda d_\varphi} \right) x_\varphi \right] dx_\varphi \quad (3)$$

显微物镜所成的像为 CCD 的物, 记录距离为  $d$ , 已经证明 CCD 所成清晰实像位置位于 MO 的像平面上<sup>[9]</sup>, 因此代入物像关系  $\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$ , 并令  $\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_\varphi} - \frac{1}{f} = \frac{1}{L_\varphi}$ , 得到  $L_\varphi = \frac{d_\varphi(d_\varphi + d)}{d}$ , 其中  $d_i = d_\varphi + d$ . 于是式(3)变为

$$O(x) = \frac{\exp(jkd_0 + jkd_\varphi)}{-\lambda^2 d_0 d_\varphi} \exp \left( \frac{jk}{2d_0} x_p^2 \right) \cdot$$

$$\exp \left( -\frac{jk}{2d_\varphi} x^2 \right) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left( \frac{x_\varphi}{R} \right) \exp \left( -\frac{jk}{2L_\varphi} x_\varphi^2 \right) \cdot \exp \left( -j2\pi \left( \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x}{\lambda d_\varphi} \right) x_\varphi \right) dx_\varphi \quad (4)$$

CCD 像元的抽样作用对全息系统的 PSF 有扩展影响<sup>[16]</sup>, 但下面推导中仅考虑 CCD 的有限孔径, 暂不考虑 CCD 像元的抽样影响, 则全息图为

$$I(x) = |O + R|^2 \text{rect} \left( \frac{x}{N\Delta x} \right) = (|O|^2 + |R|^2 + O^*R + R^*O) \text{rect} \left( \frac{x}{N\Delta x} \right) \quad (5)$$

用原参考光波  $R$  再现, 则在 MO 的像面上得到原始像  $|R|^2 O$ , 为实像, 像光场复振幅分布为

$$U_i(x_i) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp \left[ \frac{jk}{2d} x_i^2 \right] \int_{-\infty}^{\infty} O(x) \text{rect} \left[ \frac{x}{N\Delta x} \right] \exp \left[ \frac{jk}{2d} (x^2) \right] \exp \left[ -jk\pi \frac{x_i}{\lambda d} x \right] dx = C \exp \left[ \frac{jk}{2d_0} x_p^2 \right] \exp \left[ \frac{jk}{2d} x_i^2 \right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ \frac{jk}{2d_\varphi} x^2 \right] \exp \left[ \frac{jk}{2d} x^2 \right] \text{rect} \left[ \frac{x}{N\Delta x} \right] \text{rect} \left[ \frac{x_\varphi}{R} \right] \exp \left[ \frac{jk}{2L_\varphi} x_\varphi^2 \right] \cdot \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x}{\lambda d_\varphi} \right) x_\varphi \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{x_i}{\lambda d} x \right] dx dx_\varphi = C \exp \left[ \frac{jk}{2d_0} x_p^2 \right] \exp \left[ \frac{jk}{2d} x_i^2 \right] \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left[ \frac{x_\varphi}{R} \right] \cdot \exp \left[ \frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} x_\varphi^2 \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{x_p x_\varphi}{\lambda d_0} \right] \int_{\square} \text{rect} \left[ \frac{x}{N\Delta x} \right] \exp \left[ \frac{jk}{2} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{d_\varphi} \right) x^2 \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{x_\varphi x}{\lambda d_\varphi} \right] \cdot \exp \left[ -j2\pi \frac{x_i x}{\lambda d} \right] dx dx_\varphi \quad (6)$$

式中  $C = \frac{\exp(jkd_0 + jkd_\varphi + jkd)}{j\lambda d_0 j\lambda d_\varphi j\lambda d}$ , 第一个积分为

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left[ \frac{x}{N\Delta x} \right] \exp \left[ \frac{j\pi d_i}{\lambda d d_\varphi} x^2 \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{x_\varphi x}{\lambda d_\varphi} \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{x_i x}{\lambda d} \right] dx = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left[ \frac{x}{N\Delta x} \right] \exp \left[ \frac{j\pi d_i}{\lambda d d_\varphi} \left( x - \frac{d_\varphi x_i}{d_i} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{j\pi d_\varphi}{\lambda d d_i} x_i^2 \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{x_\varphi x}{\lambda d_\varphi} \right] dx = \exp \left[ -\frac{j\pi d_\varphi}{\lambda d d_i} x_i^2 \right] \left[ F \left\{ \text{rect} \left[ \frac{x}{N\Delta x} \right] \right\} * F \left\{ \exp \left[ \frac{j\pi d_i}{\lambda d d_\varphi} \left( x - \frac{d_\varphi x_i}{d_i} \right)^2 \right] \right\} \right]_{f_x = \frac{x}{\lambda d_\varphi}} = C' \text{sinc} \left[ N\Delta x \frac{x_\varphi}{\lambda d_\varphi} \right] * \exp \left[ \frac{-j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x_\varphi + \frac{d_\varphi x_i}{d} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中  $C' = N\Delta x \sqrt{\frac{j\lambda d d_\varphi}{d_i}}$ , 符号  $*$  表示卷积运算. 第二个积分为

$$C' \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left[ \frac{x_\varphi}{R} \right] \exp \left[ \frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} x_\varphi^2 \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{x_p x_\varphi}{\lambda d_0} \right] \left\{ \text{sinc} \left[ N\Delta x \frac{x_\varphi}{\lambda d_\varphi} \right] * \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x_\varphi + \frac{d_\varphi x_i}{d} \right)^2 \right] \right\} dx_\varphi = C' \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left[ \frac{x_\varphi}{R} \right] \left\{ \text{sinc} \left[ N\Delta x \frac{x_\varphi}{\lambda d_\varphi} \right] * \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x_\varphi + \frac{d_\varphi x_i}{d} \right)^2 \right] \right\} \exp \left[ \frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} x_\varphi^2 \right] \exp \left[ j2\pi \frac{x_i}{\lambda d_i} x_\varphi \right] \cdot \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x_i}{\lambda d_i} \right) x_\varphi \right] dx_\varphi = C' \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d d_i} x_i^2 \right] \left[ F \left\{ \text{rect} \left[ \frac{x_\varphi}{R} \right] \right\} * F \left\{ \left[ \text{sinc} \left[ N\Delta x \frac{x_\varphi}{\lambda d_\varphi} \right] * \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x_\varphi + \frac{d_\varphi x_i}{d} \right)^2 \right] \right\} \right]_{f_x = \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x_i}{\lambda d_i}} = C' R \frac{\lambda d_\varphi d_i}{d} \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d d_i} x_i^2 \right] \cdot \text{sinc} \left[ R \left( \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x_i}{\lambda d_i} \right) \right] * H(x_i, x_p; d, d_0, d_i) \quad (8)$$

式中

$$H(x_i, x_p; d, d_0, d_i) = F \left\{ \left[ \text{sinc} \left[ N\Delta x \frac{x_\varphi}{\lambda d_\varphi} \right] * \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x_\varphi + \frac{d_\varphi x_i}{d} \right)^2 \right] \right] \exp \left[ \frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x_\varphi + \frac{d_\varphi x_i}{d} \right)^2 \right] \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc} \left[ \frac{N\Delta x}{\lambda d_\varphi} \xi \right] \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x - \xi + \frac{d_\varphi x_i}{d} \right)^2 \right] \exp \left[ \frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x_\varphi + \frac{d_\varphi x_i}{d} \right)^2 \right] \exp \left[ j2\pi \frac{x_i}{\lambda d_i} x_\varphi \right] \cdot$$

$$\begin{aligned}
& \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x_i}{\lambda d_i} \right) x_\varphi \right] dx_\varphi d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sinc} \left[ \frac{N\Delta x}{\lambda d_\varphi} \xi \right] \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \xi^2 \right] \exp \left[ -\frac{j2\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( x_\varphi + \frac{d_\varphi}{d} x_i \right) \xi \right] \cdot \\
& \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x_i}{\lambda d_i} \right) x_\varphi \right] dx_\varphi d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sinc} \left[ \frac{N\Delta x}{\lambda d_\varphi} \xi \right] \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \xi^2 \right] \exp \left[ j2\pi \frac{x_i}{\lambda d_i} \xi \right] \cdot \\
& \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x_i}{\lambda d_i} - \frac{d\xi}{\lambda d_\varphi d_i} \right) x_\varphi \right] dx_\varphi d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sinc} \left[ \frac{N\Delta x}{\lambda d_\varphi} \xi \right] \exp \left[ -\frac{j\pi d}{\lambda d_\varphi d_i} \left( \xi - \frac{d_\varphi}{d} x_i \right)^2 \right] \cdot \\
& \exp \left[ \frac{j\pi d_\varphi}{\lambda d d_i} x_i^2 \right] \delta \left[ \frac{x_p}{\lambda d_0} + \frac{x_i}{\lambda d_i} - \frac{d\xi}{\lambda d_\varphi d_i} \right] d\xi = \frac{\lambda d_\varphi d_i}{d} \operatorname{sinc} \left[ \frac{N\Delta x}{\lambda d} \left( x_i + \frac{d_i}{d_0} x_p \right) \right] \exp \left[ -\frac{j\pi d_\varphi}{\lambda d d_i} x_i^2 \right] \cdot \\
& \exp \left[ -\frac{j\pi d_\varphi d_i}{\lambda d d_0^2} x_p^2 \right]
\end{aligned} \quad (9)$$

代入式(8)和(6)得到像光场的复振幅分布,即系统的点扩散函数为

$$\begin{aligned}
U_i(x_i) = C'' \exp \left[ \frac{j\pi}{\lambda d} x_i^2 \right] \exp \left[ \frac{j\pi}{\lambda d_0} \left( 1 - \frac{d_\varphi d_i}{d d_0} \right) x_p^2 \right] \left\{ \operatorname{sinc} \left[ \frac{R}{\lambda d_i} (x_i + M x_p) \right] \right\} * \\
\left\{ \operatorname{sinc} \left[ \frac{N\Delta x}{\lambda d} (x_i + M x_p) \right] \exp \left[ \frac{j\pi d_\varphi}{\lambda d d_i} x_i^2 \right] \right\}
\end{aligned} \quad (10)$$

式中  $C'' = C'R \frac{\lambda d_\varphi d_i}{d}$ ,  $M = \frac{d_i}{d_0}$  为像的放大率.

可见,预放大数字全息系统的 PSF 等于 MO 的点扩散函数与被二次位相因子调制的以 CCD 为记录介质的全息成像系统的点扩散函数的卷积. 因此系统的分辨率将小于 MO 的成像分辨率,也将小于 CCD 的成像分辨率.

若忽略 MO 及 CCD 有限孔径的影响,这时式(10)中的两个 sinc 函数均变为  $\delta$  函数,此理想情况下所得结果与文献[11]和[14]中给出的结果完全一致,表明了上述推导的正确性.

## 2 分辨率分析

在二维情况下,PSF 表达式中的第一个 sinc 函数变为一阶贝塞尔函数,而第二个 sinc 函数形式不变,仅由一维变为二维. 由贝塞尔函数的性质,显微物镜可分辨的像平面上最近的两个点之间的距离为  $\Delta\xi' = 0.610 \frac{\lambda}{R} d_i$ , 因此它可分辨的物体上最近两点之间的距离,即分辨率为

$$\Delta\xi = 0.610 \frac{\lambda}{R} d_0 = 0.610 \frac{\lambda}{R/d_0} \quad (11)$$

可见,  $\frac{R}{d_0}$  越大,显微物镜的分辨率越高. MO 的极限分辨率为

$$\Delta\xi = 0.610 \frac{\lambda}{N.A.} \quad (12)$$

式中 N.A. 为 MO 的数值孔径.

由于上面推导中 CCD 成像的重建距离等于记录距离,物、像比为 1,所以 CCD 能够分辨 MO 所成像中最近的两个点之间的距离为

$$\Delta x_i = \frac{\lambda d}{N\Delta x} \quad (13)$$

MO 所成的像为 CCD 的物,而 MO 成的像放大了  $M$  倍,因此,若 MO 成的像中有足够精细的结构, CCD 可分辨的物体上最近两点之间的距离为

$$\Delta x_0 = \frac{\Delta x_i}{M} = \frac{d_0}{d_i} \cdot \frac{\lambda d}{N\Delta x} \quad (14)$$

可见,选用高数值孔径 MO 及大孔径 CCD,并适当减小  $d_0$  和  $d$ ,可提高预放大数字全息系统的分辨率.

## 3 MO 与 CCD 之间的匹配分析

为了优化系统配置,实现高分辨率成像,分别对系统的 PSF 及构成该系统的 MO 和 CCD 的 PSF 作了分析比较,得到的 PSF 幅值的一维分布示于图 2. 参量为: CCD 像素数 512, 像元尺寸  $6.8 \mu\text{m}$ ; MO 数值孔径  $0.65, 40\times$ , 焦距  $4.87 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 4.91 \text{ mm}$ , 照明光波长  $632.8 \text{ nm}$ . 图 2(a)、(d)、(g) 分别表示 CCD 记录距离为  $530 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm}$ 、 $401 \text{ mm}$  情况下系统的 PSF 的振幅分布曲线; 图 2(c)、(f)、(i) 是在上述三种记录距离下相应于 CCD 部分(包括指数函数)的 PSF 振幅分布曲线; 而图 2(b)、(e)、(h) 表示 MO 的 PSF 振幅分布曲线. 由于上述三种情况下 MO 的数值孔径是一定的,这三幅图是一样的. 根据瑞利判据,可知在这三种情况下系统的像面空间分辨率分别为:  $0.097 \text{ mm}$ 、 $0.074 \text{ mm}$  和  $0.074 \text{ mm}$ ; CCD 的像面空间分辨率分别为:  $0.097 \text{ mm}$ 、 $0.037 \text{ mm}$  和  $0.073 \text{ mm}$ , MO 的像面空间分辨率是  $0.073 \text{ mm}$ , 它们相应于 PSF 曲线的第一个零点值. 可见,系统的像面空间分辨率取决于 MO 与 CCD 中分辨率较低者. 此外,系统两部分之间的卷积作用对整个系统的 PSF 的扩展作用很小. 像面的空间分辨率除以像的横向放大倍率  $M$ , 即得到系统的分辨率分别为:  $0.797 \mu\text{m}$ 、 $0.608 \mu\text{m}$  和  $0.608 \mu\text{m}$ ; CCD 的成像分辨率分别为  $0.797 \mu\text{m}$ 、 $0.304 \mu\text{m}$  和  $0.600 \mu\text{m}$ ;

MO的分辨率为 $0.600\ \mu\text{m}$ .它们意味着可以分辨的物体上最近两点之间的距离.然而,由于MO所成像中已经有特定的物体精细结构,CCD的成像分辨率再高也不可能分辨物体上更为精细的结构.因此,为了实现高分辨率成像,在预放大数字全息系统

中,应尽可能选取高数值孔径的MO,并恰当选择记录条件使CCD的成像分辨率等于或略高于MO的分辨率.至于预放大数字全息系统的记录条件的详细分析将由另文给出.

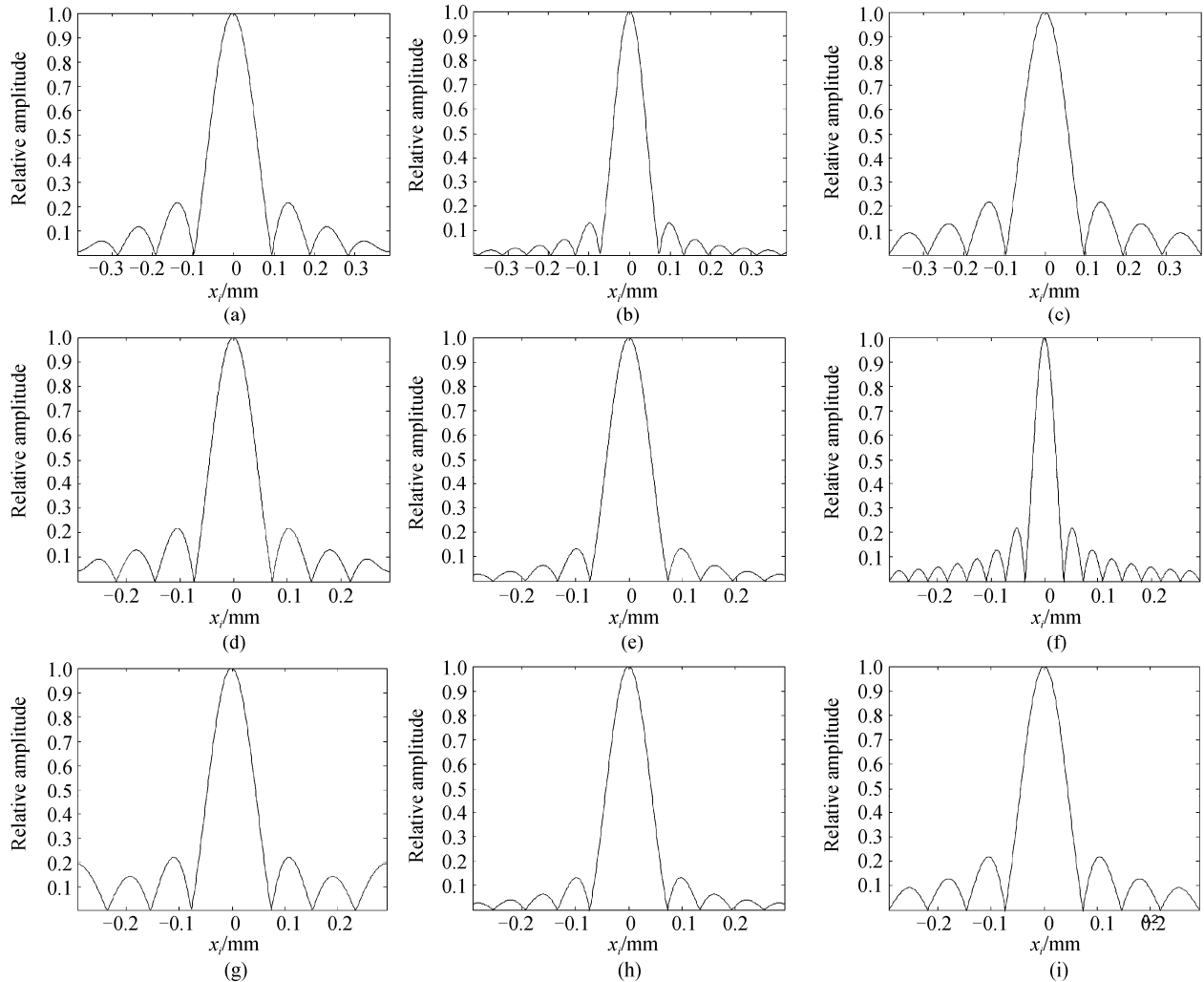


图2 系统、MO及CCD的点扩散函数的中心横截面曲线

Fig. 2 Central cross section curves of the point spread functions of the system ((a) (d) (g)), of the MO((b) (e) (h)) and of the CCD ((c) (f) (i)), with recording distance  $d=530\ \text{mm}$ ,  $200\ \text{mm}$ ,  $401\ \text{mm}$ , respectively

根据式(11)、(12)可以算得MO的极限分辨率和在上述情况下的理论分辨率分别为 $0.594\ \mu\text{m}$ 和 $0.599\ \mu\text{m}$ .由式(14)知,上述三种情况下CCD的理论成像分辨率分别为: $0.791\ \mu\text{m}$ 、 $0.299\ \mu\text{m}$ 和 $0.599\ \mu\text{m}$ .可见,模拟曲线得到的结果与理论值相一致.需要指出的是:由于sinc函数和一阶Bessel函数均为实函数,所以系统的PSF及相应于CCD部分的PSF中的指数函数对于强度分辨没有影响.

## 4 结论

详细推导了预放大离轴菲涅耳数字全息系统的点扩散函数,并对系统的成像分辨率及MO与CCD之间的匹配作了深入分析.结果表明:只有恰当选

择记录条件,一方面使MO的成像分辨率接近于其极限分辨率,同时还要使CCD在满足抽样条件与再现像的分离条件的情况下,再现像分辨率略高于MO的分辨率,才能充分利用MO和CCD的带宽,并最终获得高分辨率成像.盲目追求CCD成像的高分辨率,而忽视其基本的记录条件,反而会影响对预放大数字全息系统的成像分辨率.

## 参考文献

- [1] GUSTAFSSON M, SEBESTA M, BENGTTSSON B, *et al.* High-resolution digital transmission microscopy—a Fourier holography approach[J]. *Opt & Las Eng*, 2004, **41**(3): 553-563.
- [2] NOVAK E. MEMS metrology techniques[C]. *SPIE*, 2005, **5716**: 173-181.
- [3] VOLKER K, HANS J H, JPTNER W. Application of digital

- holographic microscopy for inspection of micro-optical components[C]. *SPIE*,2001, **4398**:189-198.
- [4] KREIS T, KAYSER D. Resolution increase by aperture synthesis in digital holography[C]. *SPIE*,2005, **5880F**:1-8.
- [5] LI Shi-yang, ZHAO Jian-lin, FAN Qi, *et al.* Experimental investigation of digital fiber holography with self-focusing lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1829-1832.  
李世扬,赵建林,范琦,等. 基于自聚焦透镜的光纤数字全息系统实验研究[J]. *光子学报*,2005, **34**(12):1829-1832.
- [6] ZHOU Can-lin, KANG Yi-lan. Deformation measurement by digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2):171-173.  
周灿林,亢一澜. 数字全息干涉法用于变形测量[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2):171-173.
- [7] FENG W, LI E P, FAN Q, *et al.* Diagnosing Microwave Plasma Thruster's Plume by Digital Holographic Interferometry[J] *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1833-1836.  
冯伟,李恩普,范琦,等. 数字全息干涉术用于微波等离子体推进器羽流场的研究[J]. *光子学报*,2005, **34**(12):1833-1836.
- [8] MA Li-hong, WANG Hui, LI Yong, *et al.* 3-D Rebuilding Based on Numerical Reconstruction of the Hologram[J] *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4):595-598.  
马丽红,王辉,李勇,等. 全息模拟再现像的三维重构[J]. *光子学报*,2006, **35**(4):595-598.
- [9] DIRKSEN D, DROSTE H, KEMPER B, *et al.* Lensless Fourier holography for digital holographic interferometry on biological samples[J]. *Opt & Las Eng*,2001, **26**(3):241-249.
- [10] WANG Hua-ying, WANG Da-yong, XIE Jian-jun. Reconstruction of object wave front in digital holography microscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):1023-1027.  
王华英,王大勇,谢建军. 显微数字全息中物光波前重建方法研究和比较[J]. *光子学报*,2007, **36**(6):1023-1027.
- [11] CUCHE E, MARQRET P, DEPEURSINGE C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis hologram[J]. *Appl Opt*,1999, **38**(34):6994-7001.
- [12] COLOMB T, CUCHE E, CHARRIERE F, *et al.* Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation [J]. *Appl Opt*,2006, **45**(5):851-863.
- [13] CARL D, KEMPER B, WERNICKE G, *et al.* Parameter-optimized digital holographic microscope for high-resolution living-cell analysis[J]. *Appl Opt*,2004, **43**(36):6536-6544.
- [14] XU L, PENG X Y, MIAO J M, *et al.* Studies of digital microscopic holography with applications to microstructure testing[J]. *Appl Opt*,2001, **40**(28):5046-5051.
- [15] LÜ Qie-ni, GE Bao-zhen, ZHANG Yi-mo. Digital microscopic image plane holography[J]. *Optoelectro Laser*, 2006, **17**(4):475-478.  
吕且妮,葛宝臻,张以谟. 数字显微像面全息技术研究[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(4):475-478.
- [16] GUO C S, ZHANG L, RONG Z Y, *et al.* Effect of the fill factor of CCD pixels on digital holograms[J]. *Opt Eng*, 2003, **46**(9):2768-2771.

## Resolution Analysis of Imaging System with Pre-magnification Digital Holography

WANG Hua-ying<sup>1,2</sup>, WANG Guang-jun<sup>1,3</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>, XIE Jian-jun<sup>1</sup>, WANG Da-yong<sup>1</sup>

(1 College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

(2 Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

(3 Henan Institute of Metrology, Zhengzhou 450008, China)

Received date:2007-01-10

**Abstract:** Based on the Fresnel diffraction theory, the point spread function of digital holographic system with pre-magnification was firstly deduced in detail. The resolution of the imaging system was analyzed. The amplitude distributions of the point spread functions of the microscopic objective, the CCD and the whole system were simulated respectively. Then, the match requirement between the microscopic objective, and the CCD was discussed. Some ambiguities in existing literatures were clarified. The results show that making the imaging resolution of MO approached the limit resolution and the imaging resolution of CCD been equal to or higher than the resolution of MO slightly by choosing the recording parameters pertinently are optimizational choices. These results will be very important in the microscopic digital holography.

**Key words:** Holography; Pre-magnification digital holography; Fresnel diffraction; Point spread function; Resolution



**WANG Hua-ying** was born in 1963. She graduated from department of physics, Hebei Teachers University in 1984. Since 2000, she has been an associate professor in Hebei University of Technology. Now she is a Ph. D. candidate of Beijing University of Technology. Her main research fields include optical information processing and digital holography measurement.