

文章编号: 0253-2239(2003)04-0390-08

部分相干 X 射线衍射相位成像与相位复原的模拟研究*

喻 虹 朱频频 韩申生

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 借助于光学传递函数(OTF)概念,分析了微分相位成像过程和直接相位成像过程,讨论了通过图像处理进行相位复原的方法,得到了具有较高成像对比度和分辨率的实验参量区间,并利用数字方法模拟研究了相位成像的过程,对多种相位复原方法进行了比较。

关键词: X 射线光学; 相位成像; 相位复原; X 射线; 部分相干

中图分类号: O434.19 文献标识码: A

1 引 言

多年来,X 射线成像的研究主要集中在利用物体对 X 射线波的振幅吸收来形成对比度。但当波长位于硬 X 射线波段,几乎所有的物质均呈透明,基于光吸收的成像技术将很难得到成像对比度。与小的吸收相反,此时的相移却很大,若能对相位成像,将得到较好的对比度,从而推断物体的性质。

随着高亮度同步辐射光源及 X 射线激光的发展,X 射线相位成像引起了人们极大的兴趣,提出了许多种 X 射线相位对比成像技术^[1],包括 Bonse-Hart X 射线干涉测量仪^[2],双晶衍射设备^[3],菲涅耳或非涅耳-布拉格棱镜^[4],及用单色源的菲涅耳衍射^[5]。在硬 X 射线波段,Wilkins 等^[6,7]最近提出了一种非常简单的,仅利用菲涅耳衍射来产生对比度的相位成像方法。它只要求一个能产生足够相干的 X 射线的光源,采用类似于 X 射线同轴伽博(Gabor)全息的装置记录相位微分,在物体边界产生对比度,即成像物体的轮廓,简单易行,但存在的问题是很难绝对确定物体的相位分布。Nugent 等提出了强度透射方程(TIE)方法^[8~10],但需要以大量的计算及后处理为代价,且只能复原微分相位成像的相位分布。程静等^[11~13]进一步将这种衍射相位成像方法定量推广到具有实际意义的部分相干光情形,并对层析成像的相位复原进行了研究^[14]。

随着计算机技术的发展,用计算机进行成像后期处理,利用数学方法和软件技术来复原图像,提高图像质量,已经得到了越来越广泛的应用,提出了许多提高分辨率的图像复原法,如能量连续降减法^[15]、Bayes 分析法^[16]、凸集投影法^[17,18]。与此同时,基于多幅图像的图像融合法^[19~21]成为了人们的研究热点,它充分利用了不同图像之间的互补信息,计算消耗时间较少,简单高效。

本文从已有理论^[11~13]出发,借助于光学传递函数(OTF)概念,详细研究了 X 射线衍射相位成像方法,分析了它的基本过程,即微分相位成像过程和直接相位成像过程,讨论了通过图像处理进行相位复原的方法,获得了具有较高成像对比度和分辨率的实验参量,并利用数字方法模拟研究了相位成像的过程,对多种相位复原方法进行了研究比较。

2 成像理论模型

对于自由空间衍射的部分相干 X 射线相位成像,其成像模型如图 1 所示。图中,s 代表光源,o 代

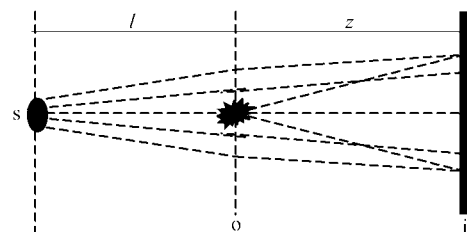


Fig.1 Schematic set-up of diffract phase-contrast imaging. l is the source-object distance, z is the object-image distance

* 国家自然科学基金(69978023)资助课题。

E-mail: yu_yuhong@163.com

收稿日期:2002-05-28; 收到修改稿日期:2002-07-15

表面, i 代表像面, 设光源与物面的距离为 l , 物面与像面的距离为 z , 直接衍射相位成像就是像面上记录到的强度分布。

设物面上的照明范围为 A , 物体局限在 A 内, 物体的透过率为 $t(x, y)$ 。若光源是非相干的, 则物

面上的光场是部分相干的。设物面上的互强度分布为 $J_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2)$, 由部分相干光的互传播理论^[22]可知, 像面上的光强分布是

$$I(x_0, y_0) = \int_A dx_1 dy_1 \int_A dx_2 dy_2 \frac{1}{\lambda^2 d_{10} d_{20}} J_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} d_{10}\right) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} d_{20}\right) t(x_1, y_1) t^*(x_2, y_2)$$

其中, d_{10} 为物面点 (x_1, y_1) 到像面点 (x_0, y_0) 的距离, d_{20} 为物面点 (x_2, y_2) 到像面点 (x_0, y_0) 的距离。

对于一维的情况, 程静等已经进行了研究^[11~13], 在这里, 讨论的是二维的情况。假设光源是波长为 λ , 半径为 ρ , 均匀分布的圆形光源, 则互强度

分布可以由范西泰特-泽尼克(Van Cittert-Zernike)定理^[24]求得。对于弱的纯相位物体, 其透过率为

$$t(x, y) = \exp[j\varphi(x, y)], \quad |\varphi(x, y)| \ll 1.$$

在傍轴近似下, 作积分近似展开, 并变换到频域, 可以得到像面光强的频谱分布为

$$I(u, v) = C \frac{\rho^2}{l^2} \left\{ \delta\left(\frac{z}{f}u, \frac{z}{f}v\right) + \frac{2J_1(\gamma)}{\gamma} 2\sin\left[\pi\lambda z \left(\frac{z}{f}u^2 + \frac{z}{f}v^2\right)\right] \Psi\left(\frac{z}{f}u, \frac{z}{f}v\right) \right\}, \quad (1)$$

其中, C 是一个常量,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l} + \frac{1}{z}, \quad \gamma = 2\pi z \frac{\rho}{l} \sqrt{u^2 + v^2}.$$

$\Psi\left(\frac{z}{f}u, \frac{z}{f}v\right)$ 表示相位物体在物面上的相位分布 $\varphi(x, y)$ 作尺度变换 z/f 后的傅里叶变换, 由此可知, 像的大小为物体大小作尺度变换 z/f 后的大小。

由(1)式可以得到, 不计背景, 不考虑常数, 在频域, 圆形光源的部分相干 X 射线衍射相位成像的光学传递函数为

$$H(u, v) = \frac{2J_1(\gamma)}{\gamma} 2\sin\left[\pi\lambda z \left(\frac{z}{f}u^2 + \frac{z}{f}v^2\right)\right], \quad (2)$$

可见, $H(u, v)$ 是一个由光源决定的降质函数与正弦函数的乘积。计算结果很容易推广到完全相干光情形, 令 $l \rightarrow \infty$, (2) 式中的降质函数成为了一个与空间频率无关的常量, 而 $f = z$, 这就得到了完全相干时的光学传递函数

$$H(u, v) = 2\sin[\pi\lambda z(u^2 + v^2)]$$

它和文献[7]的结论完全一致。但文献[7]在讨论相干性影响后, 认为部分相干光的光学传递函数是完全相干光的光学传递函数与一个降质函数的乘积, 未考虑到由部分相干性引起的正弦函数内部变化。

当物体的空间频率足够小时, 有 $\sin X \approx X$, $J_1(X) \approx X/2$, 有

$$H(u, v) = 2\pi\lambda z \frac{z}{f}(u^2 + v^2), \quad (3)$$

此时, 像面的光强分布为(推导过程见参考文献[23])

$$I(x, y) = C \frac{\rho^2}{l^2} \left[1 + \frac{\lambda f}{2\pi} \nabla^2 \varphi\left(\frac{f}{z}x, \frac{f}{z}y\right) \right], \quad (4)$$

从而, 成像对比度正比于相位的二阶导数, 将对相位物体的边缘成像, 即微分相位成像。成像对比度将随着 f 的增大而增大, 这和文献[7]的结果不同, 它基于完全相干光的理论得到的结论为对比度随着 z 的增大而增大, 没有考虑到相干性对成像对比度的影响。

当空间频率对应 $H(u, v)$ 的极值时,

$$\sin\left[\pi\lambda z \left(\frac{z}{f}u^2 + \frac{z}{f}v^2\right)\right] = \pm 1$$

则可得到

$$\gamma = 2\pi \frac{\rho}{l} \sqrt{\frac{f}{\lambda} \left(\frac{1}{2} + n\right)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

所以

$$H(u, v) = \frac{4J_1(\gamma)}{\gamma}, \quad (5)$$

$$I(x, y) = C \frac{\rho^2}{l^2} \left[1 + \frac{4J_1(\gamma)}{\gamma} \frac{f^2}{z^2} \varphi\left(\frac{f}{z}x, \frac{f}{z}y\right) \right], \quad (6)$$

此时, $H(u, v)$ 与空间频率无关, 只是实验参量的函数, 成像对比度正比于相位函数, 即直接相位成像。成像对比度和光源半径 ρ , 光源与物面的距离 l , 物面与像面的距离 z 三者都有关系, 这和文献[7]的结果也不同, 它基于完全相干光的理论得到的结论为对比度与三者无关, 虽然后来对相干性作了讨论, 也只是得出了与 z 有关, 没有全面考虑到相干性对成

像对比度的影响。

通过上面的计算,可以得到成像的区域图见图 2,图中虚线以内的区域为微分相位成像,实线则对应直接相位成像,根据光学传递函数极值的符号,图中用“+”和“-”标明了正负对比度对应的直接相位成像。对于相同的 z ,随着 l 的减小,图 2(a)中的曲线会下移,即对应的空间频率减小,分辨率提高。对于相同的 l ,随着 z 的减小,图 2(b)中的曲线会上移,即对应的空间频率增大,分辨率降低,当 z 减小为零时,就成为了接触显微的情况,此时的相位成像分辨率极低,主要为吸收成像。

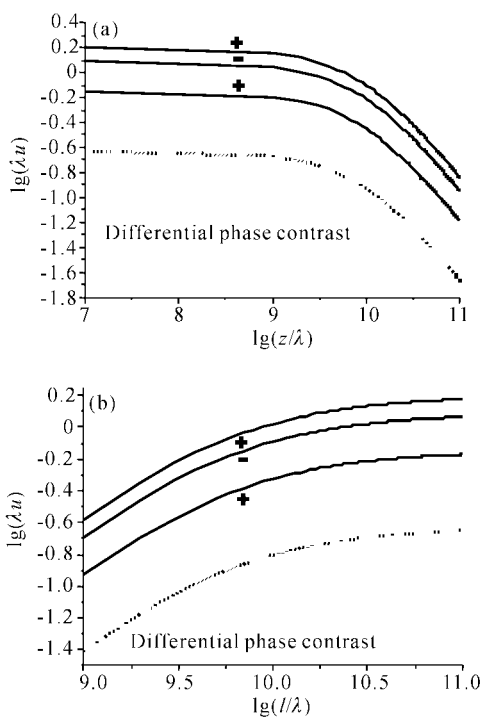


Fig. 2 Regions of visibility of a phase-contrast image (l is the source-object distance, z is the object-image distance). (a) In the $z \sim u$ plane ($\lambda = 0.1 \text{ nm}, l = 1 \text{ m}$); (b) In the $l \sim u$ plane ($\lambda = 0.1 \text{ nm}, z = 0.5 \text{ m}$)

3 相位复原方法

对于部分相干 X 射线衍射相位成像,已经得到了相应的光学传递函数,从而,可以借助于图像处理的方法,直接从记录到的光强分布复原物体的相位分布。

最直接的方法是线性 Wiener 滤波复原^[24],减去背景光的影响,可以得到复原的频域相位分布为

$$\Psi\left(\frac{z}{f}u, \frac{z}{f}v\right) = \left[\frac{1}{H(u,v)} \times \frac{|H(u,v)|^2}{|H(u,v)|^2 + K} \right] I(u,v), K \geq 0$$

其中,参量 K 通过条件

$$\| I - [H]\Psi \|^2 = \| n \|^2$$

来迭代调节。

实际上,从信息的角度来说,对特定空间频率的信息容量为

$$C(u,v) = \lg \left[1 + \frac{|H(u,v)|^2 |\Psi(u,v)|^2}{|N(u,v)|^2} \right]$$

则有

$$\Psi(u,v) = \frac{1}{H(u,v)} [1 - 2^{-C(u,v)}] I(u,v)$$

可见,对信息容量很大的频率,可用线性滤波得到复原,对信息容量很小的频率,不能作大的补偿,对信息容量为零的频率,完全不能得到任何信息。

由(2)式可以看出,得到的光学传递函数是带通函数,在频域存在很多零点,那么从频域光学传递函数的概念可知,得到的图像中将没有这些频率分量的信息,对零点周围的频域,信息容量也较小,从上面的信息容量分析可知,对应这些频率,Wiener 滤波不能作大的补偿,即不能完全复原物体相位。因此,只有进行不完全信息的图像复原,恢复出这些频率分量的信息,才能更精确的复原物体相位。

不完全信息的图像复原方法主要有两种:非线性方法和图像融合法。典型的提高图像复原质量的非线性方法有能量连续降减法, Bayes 分析法,凸集投影法,它们充分的利用了物体的约束条件和先验知识,但复原算法复杂,计算量较大。图像融合是指综合两个或多个源图像中包含的冗余信息和互补信息,以获取对同一场景的更为精确和全面的图像描述,从而得到高分辨率的单幅图像。这种方法和上面的方法相比,其优点是除了利用单幅图像的信息和物体的先验知识,还充分利用了不同图像之间的互补信息。因此,其图像质量的提高能力较强。考虑到图像融合的特点,以及微分相位成像具有对相位物体边缘成像的特点,可以将复原后的相位分布和微分相位成像得到的像进行图像融合,从而得到具有清晰边缘的相位分布。

简单的空域图像融合,不对参加融合图像进行变换和分解,直接根据图像灰度值进行处理,对图像质量通常没有大的改善,在这里采用了频域的图像融合方法。首先,将微分相位成像得到的图像变换为和物体一样的大小,再将新的图像和线性复原的相位分布变换到频域,得到相应的频谱分布。然后对于不同的空间频率采用不同的融合算子进行融合,得到融合后的相位频谱分布,最后将融合后的频

谱分布变换回空域,得到融合后的相位分布。

这种图像融合方法是针对不同空间频率来进行的,从而可以根据图像的频域特点来进行融合。微分相位成像是针对相位物体边缘成像,它具有和相位物体相似的高频特性,而线性滤波得到的物体相位分布具有原始相位物体的低频特性,因此,可以采用融合算子

$$W(u, v) = \frac{1}{1 + [d(u, v)/d_0]^{2n}}, \quad (7)$$

其中, d_0 为截止频率, n 为阶数。从而,融合后的图像频谱为

$$\Psi(u, v) = c_1 \Psi_{\text{Wiener}}(u, v)w(u, v) + c_2 f[\nabla^2 \varphi_{\text{diff}}(x, y)][1 - W(u, v)], \quad (8)$$

其中, $\Psi_{\text{Wiener}}(u, v)$ 为线性滤波得到的相位分布, C_1 为其归一化系数, $F[\nabla^2 \varphi_{\text{diff}}(x, y)]$ 为调整大小后的微分相位成像的傅里叶变换, C_2 为其归一化系数。从(8)式可以看到,融合过程相当于对线性滤波得到的相位分布采用图 3(a)所示的滤波器进行平滑低通滤波,对微分相位分布采用图 3(b)所示的滤波器进行平滑高通滤波,即分别取得了相位物体的低频和低频特性后,再加以组合利用,从而对成像过程中失去的部分高频信息加以补偿,提高图像质量。

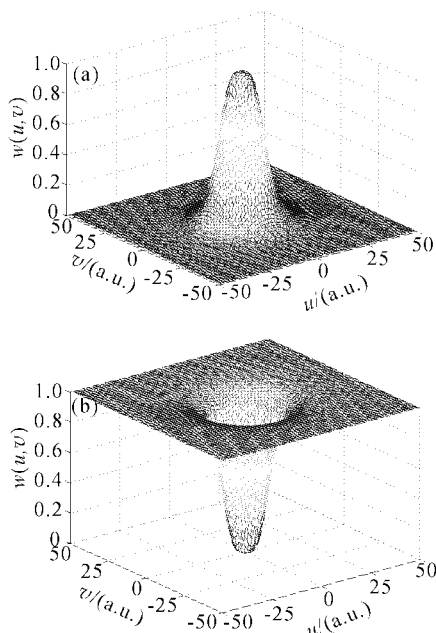


Fig. 3 Weight operators of image fusion. (a) Low-pass filter; (b) High-pass filter

可以采用通用的图像评价标准,即均方根误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)、熵(Entropy)、交叉熵(Cross entropy)来评价所得到的相位分布^[25]。一般来说,均方根误差越小,峰值信噪比越高,熵越大,

交叉熵越小的图像,质量就越高。在这里,也就是得到的相位分布越接近于原始相位分布,即物体的相位分布。

4 数字模拟

4.1 实验参量分析

对于微分相位成像,由(4)式可以知道,实验参量对成像质量的影响较易确定。在满足微分相位成像条件,即保证空间频率较小,在图 2 所限定的范围内变化时,成像对比度随 f 的增大而增大,即当 z 一定时, l 越大,相干性越好,对比度越高,当 l 一定时, z 越大,对比度越高。可以看到,这种成像方法的一个重要特点,即对比度随像与物体的距离增大而增大,而在传统的强度对比度成像方法中,对比度是随像与物体的距离的增大而减小的。考虑到前面对图 2 的分析,可以得出结论,对于微分相位成像,要提高对比度,就要增大 l 和 z ,但要提高分辨率,就要减小 l ,增大 z 。因此,在具体实验中,可以增大 z ,并适当选择 l 来得到需要的分辨率和对比度。

对于直接相位成像,通过式(2)可以研究相干性的影响,对于波长一定的 X 射线源,相干性由光源半径 ρ 和光源与物面的距离 l 决定, ρ 越小, l 越大,相干性越好。首先对 ρ 进行分析,取 $l=10$ m, $z=1$ m, $\lambda=0.1$ nm,从图 4 中可以看到,若增大 ρ ,相干性变差, $H(u, v)$ 的强度减小,由于背景光不变,对比度将减小,同时, $H(u, v)$ 的第一极大值对应的空间频率减小,即分辨率将提高。反之,减小 ρ ,相干性变好,对比度增强,分辨率将降低。

下面分析 l ,取 $\rho=30$ μm , $z=0.5$ m, $\lambda=0.5$ nm,从图 5 中可以看到,若增大 l ,相干性变好, $H(u, v)$ 的强度增大,由于背景光不变,对比度将增大,同时, $H(u, v)$ 的第一极大值对应的空间频率增大,即分辨率将降低。反之,减小 l ,相干性变差,对比度减小,分辨率将提高。

前面分析了相干性对成像质量的影响,在成像过程中,还有一个重要的参量就是物面到像面的距离 z ,它对成像对比度和分辨率也有较大影响。取 $\rho=30$ μm , $l=10$ m, $\lambda=0.1$ nm,从图 6 中可以看到,若增大 z , $H(u, v)$ 的强度减小,由于背景光不变,对比度将减小,同时, $H(u, v)$ 的第一极大值对应的空间频率减小,即分辨率将提高。反之,减小 z ,对比度增大,分辨率将降低。

在具体的实验中,对比度和分辨率都是需要的,

因此,要选择合适的参量。从上面的分析可以看到,对于光源半径 ρ ,光源到物面的距离 l 和物面到像面的距离 z ,不能一味增大或减小,应考虑到对比度和

分辨率两方面,综合选取恰当值。要增强对比度,就要减小 ρ ,增大 l ,减小 z ;要提高分辨率,就要增大 ρ ,减小 l ,增大 z 。

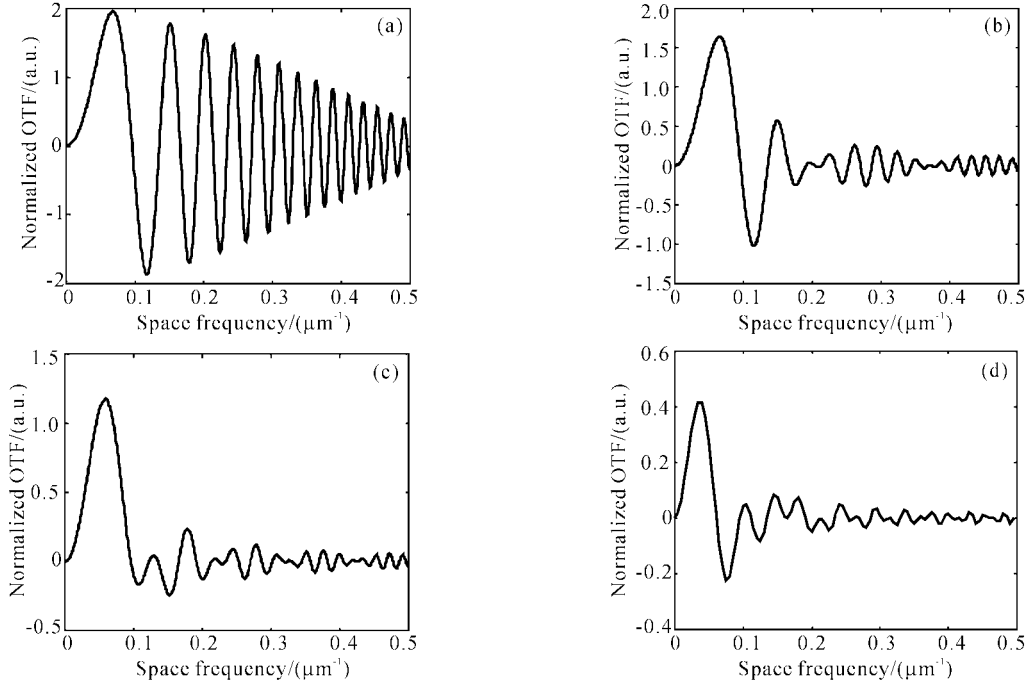


Fig. 4 Normalized optical transfer function (OTF) of different ρ . (a) $\rho=10 \mu\text{m}$; (b) $\rho=20 \mu\text{m}$; (c) $\rho=50 \mu\text{m}$; (d) $\rho=100 \mu\text{m}$

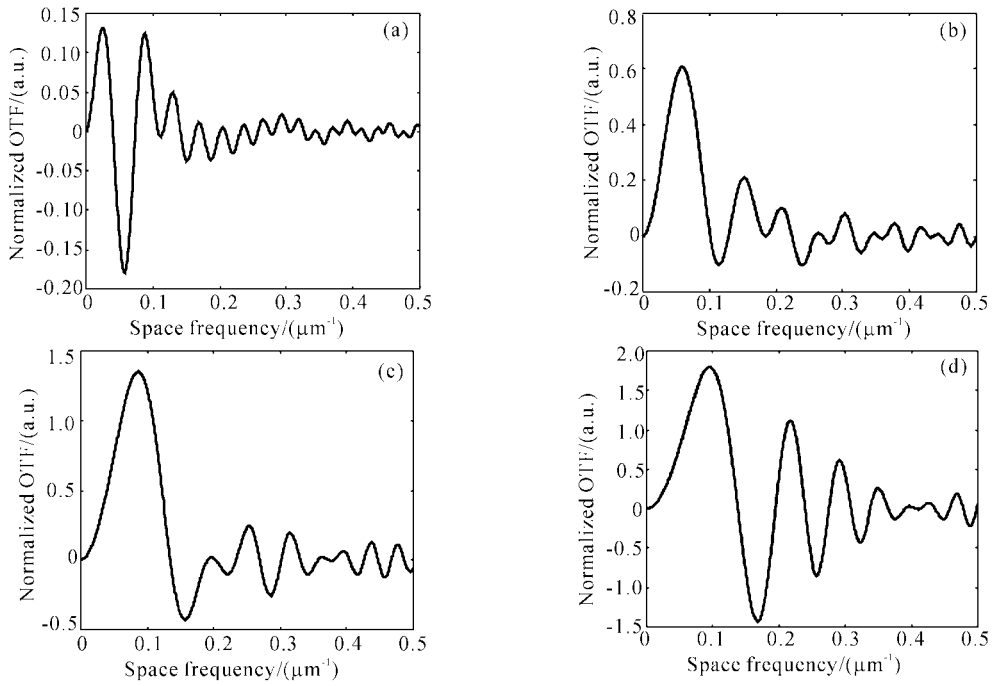


Fig. 5 Normalized optical transfer function (OTF) of different l . (a) $l=1 \text{ m}$; (b) $l=2.5 \text{ m}$; (c) $l=5 \text{ m}$; (d) $l=10 \text{ m}$

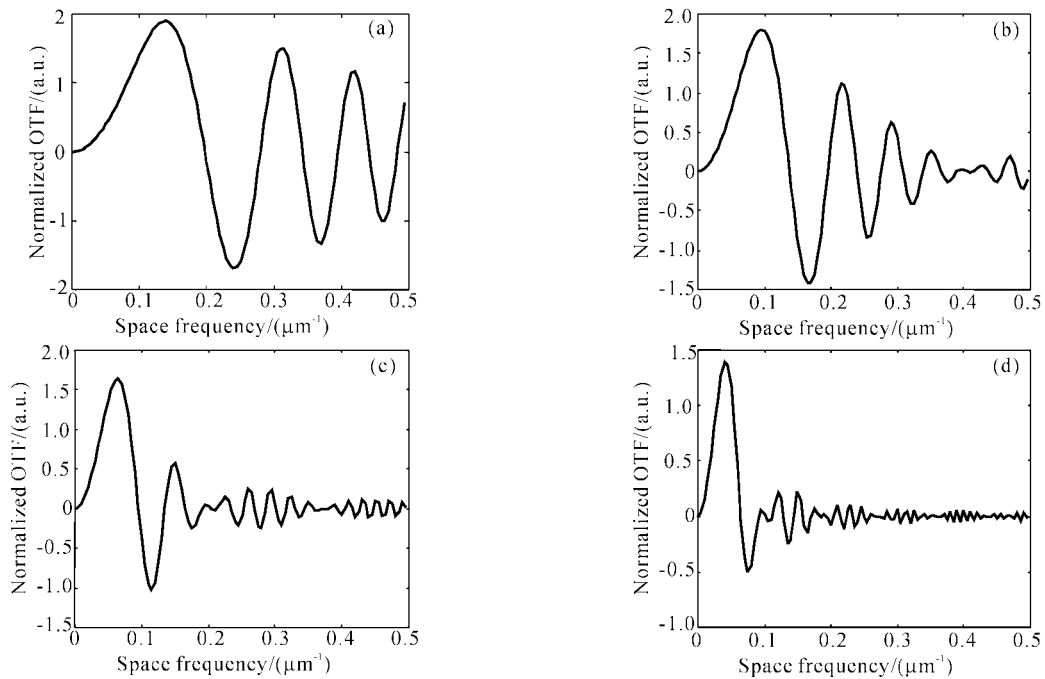


Fig. 6 Normalized optical transfer function (OTF) of different z . (a) $z=0.25$ m; (b) $z=0.5$ m; (c) $z=1$ m; (d) $z=2$ m

4.2 数字模拟结果

利用快速傅里叶变换算法,可以模拟出二维平面相位物体的部分相干 X 射线衍射相位成像及其相位复原过程。

对于同步辐射光源,在现有实验条件下,光源半径一般为 $30 \mu\text{m}$,光束的水平发散度为 0.1 mrad ,垂直发散度为 3 mrad ,像面的分辨率为 $50 \mu\text{m}$,即截止频率为 $0.02 \mu\text{m}^{-1}$ 。根据前面的讨论,选取 $\rho=30 \mu\text{m}$,

$l=1 \text{ m}$, $z=0.01 \text{ m}$, $\lambda=0.1 \text{ nm}$,来模拟微分相位成像过程。所用的相位物体如图 7(a)所示,大小为 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$,不考虑噪声的因素,可以得到几乎同样大小的像,从图中可以看到显著的边缘增强效应,即对相位的变化成像,如图 7(b),相应的光学传递函数如图 7(d)。实际物体的相位不会只具有单一的空间频率,所以,在实际中,不可能得到纯粹的直接相位成像过程,但可以得到包含直接相位成

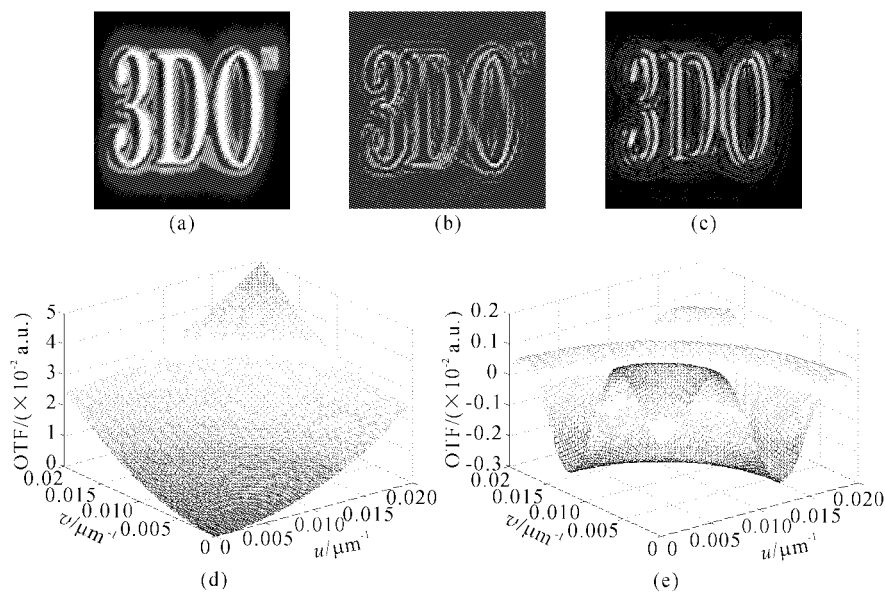


Fig. 7 (a) Original phase on the object plane; (b) Differential phase-contrast image; (c) Non-differential phase-contrast image; (d) Normalized OTF of differential image; (e) Normalized OTF of non-differential phase-contrast image

像的过程。根据前面的讨论,取参量 $\rho=30 \mu\text{m}$, $l=3 \text{ m}$, $z=7 \text{ m}$, $\lambda=0.1 \text{ nm}$,模拟非微分相位成像过程。所用的相位物体仍然是图 7(a),此时得到的像大小为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,从图像上可以看到,像和物体很相似,即对相位直接成像,但由于微分相位成像仍然存在,图像有一定的边缘增强效应,如图 7(c),相应的光学传递函数如图 7(e)。

利用图 7(c)的像,可以通过 Wiener 滤波复原得到相位分布如图 8(a)所示,可以看到,和原物体[图 7(a)]有一定的差别,主要是边缘不够清晰锐利,对比度不够高。将复原后的相位分布和微分相位成像得到的像[图 7(b)]分别进行简单图像融合和频域图像融合,从而得到相位分布,图 8(b)和图 8(c)。从图上可以看到,简单融合后的相位分布

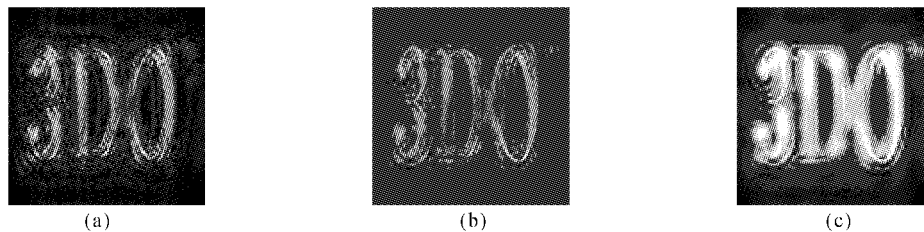


Fig. 8 (a) Restored phase of Wiener filter; (b) Restored phase of simple image fusion; (c) Restored phase of frequency image fusion

Table 1. Quality of phase of different schemes

Scheme	MSE	PSNR	Entropy	Cross entropy
Differential image	0.4020	7.9147	0	0.8739
Non-differential image	0.3830	8.3359	1.0289	0.5528
Linear filter	0.2583	11.7565	1.9351	0.3854
Simple fusion	0.2441	12.2495	1.8142	0.5353
Frequency fusion	0.1938	14.2538	2.2294	0.2973

结论 本文从已有理论出发,借助于光学传递函数概念,对基于菲涅耳衍射的相位成像方法进行了定量研究,分析了它的基本过程,即微分相位成像过程和直接相位成像过程,讨论了两种过程中实验参量对成像对比度和分辨率的影响,提出了线性滤波法和图像融合法相结合的相位复原方法,并通过模拟研究对各种相位复原方法进行了比较。

对于微分相位成像,要提高对比度,就要增大 l 和 z ,但要提高分辨率,就要减小 l ,增大 z 。对于直接相位成像,要增强对比度,就要减小 ρ ,增大 l ,减小 z ;要提高分辨率,就要增大 ρ ,减小 l ,增大 z 。因此,在具体实验中,要适当选择实验参量,来获得需要的分辨率和对比度。

对于相位复原,通过线性滤波,可以得到相位分

比直接 Wiener 滤波得到的相位分布边缘清晰,尤其是上下边缘部分,但对比度有一定下降,而频率域图像融合得到的相位分布边缘得到了增强,对比度也得到了提高。

通过对均方根误差,峰值信噪比、熵、交叉熵等图像评价标准的计算(结果列于表 1),可以对各种相位成像及相位复原方法进行定量的比较。从表 1 可以看出,对于未经相位复原的像,其各项指数均偏低,显然图像质量不如复原后的图像。对于各种复原方法,线性 Wiener 滤波和简单图像融合各有优劣,简单融合的均方根误差和峰值信噪比优于线性方法,线性方法的熵值以及与参考图像(即原始相位)的交叉熵则优于简单融合,而频域图像融合方法则明显优于前面多种方法。

布的基本信息。但由于成像的光学传递函数在频域存在很多零点,对零点及其周围的频域,信息容量为零或较小,线性滤波不能作大的补偿。综合考虑计算时间和复原效果,以及微分相位成像具有对相位物体边缘成像的特点,提出了将复原后的相位分布和微分相位成像得到的像进行频域图像融合的相位复原方法,并通过与其它方法的比较,证明了其提高复原相位的分辨率和对比度的有效性。

参 考 文 献

- 1 Fitzgerald R. Phase-sensitive X-ray imaging. *Phys. Today*, 2000, (7):23~26
- 2 Momose A. Demonstration of phase-contrast X-ray computed tomography using an X-ray interferometer. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (A)*, 1995, **352** (2):622~628

- 3 Davis T J, Gao D, Gureyev T E. Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays. *Nature*, 1995, **373**(6515):595~598
- 4 Schmahl G, Rudolph D, Schneider G. Phase contrast X-ray microscopy studies. *Optik*, 1994, **97**(4):181~182
- 5 Cloetens P, Barrett R, Baruchel J. Phase objects in synchrotron radiation hard X-ray imaging. *J. Phys. (D): Appl. Phys.*, 1996, **29**(1):133~146
- 6 Wilkins S W, Gureyev T E, Gao D. Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays. *Nature*, 1996, **384**(6607):335~338
- 7 Pogany A, Gao D, Wilkins S W. Contrast and resolution in imaging with microfocus X-ray source. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(7):2774~2782
- 8 Gureyev T E, Roberts A. Phase retrieval with the transport-of-intensity equation (1). *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1995, **12**(9):1932~1941
- 9 Gureyev T E, Nugent K A. Phase retrieval with the transport-of-intensity equation (2). *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1996, **13**(8):1670~1682
- 10 Gureyev T E, Wilkins S W. On X-ray phase imaging with a point source. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1998, **15**(3):579~585
- 11 Cheng Jing, Han Shensheng, Shao Wenwen *et al.*. Study of partial coherent X-ray phase imaging. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(5):596~603 (in Chinese)
- 12 Cheng J, Han S. On X-ray in-line Gabor holography with a partially coherent source. *Opt. Commun.*, 1999, **172**(12):17~24
- 13 Cheng J, Han S. Phase imaging with partially coherent X rays. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4):175~177
- 14 Cheng J, Han S. Diffraction tomography reconstruction algorithms for quantitative imaging of phase objects. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2001, **18**(7):1460~1464
- 15 Rusforth C K. *In Image Reconstruction, Theory and Application*. New York: Academic Press, 1987
- 16 Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration. *J. Opt. Soc. (A)*, 1972, **62**(1):55~60
- 17 Stark H, Oskoui P. High-resolution Image recovery from image plane arrays, using convex projections. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1989, **6**(11):1715~1726
- 18 Patti A J, Altunbasak Y. Artifact reduction for set theoretic super resolution image reconstruction with edge adaptive constraints and higher-order interpolants. *IEEE Trans. IP.*, 2001, **10**(1):179~186
- 19 Elad M, Feuer A. Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy and undersampled Measured images. *IEEE Trans. IP.*, 1997, **6**(12):1646~1658
- 20 Hunt B R. Super-resolution of images; algorithms, principles, performance, international. *J. Imaging Systems and Technology*, 1995, (6):297~304
- 21 Greenspan H, Anderson C H, Akber S. Image enhancement by nonlinear extrapolation in frequency space. *IEEE Trans. IP.*, 2001, **9**(6):1035~1048
- 22 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. 7th ed. Cambridge, 1999, Chapter 10
- 23 Cowley J M. *Diffraction Physics*. 3rd ed. North Holland: Amsterdam, 1995, Appendix
- 24 Castleman K R. *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, 1996, Chapter 16
- 25 Liu Guixi, Yang Wanhai. A multiscale contrast-pyramid-based image fusion scheme and its performance evaluation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11):1336~1342 (in Chinese)

A Study of Diffractive Phase Imaging and Phase Restoration with Partially Coherent X-ray

Yu Hong Zhu Pinpin Han Shensheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 28 May 2002; revised 15 July 2002)

Abstract: Phase imaging with partially coherent X-ray is analyzed in terms of the optical transfer function (OTF). Differential phase-contrast imaging and direct phase-contrast imaging are discussed, and the proper experiment parameters with good image contrast and resolution are obtained. The phase restoration using image processing method, such as image fusion is discussed. The process of phase imaging and phase restoration is simulated, and different methods of phase restoration are compared.

Key words: X-ray optics; phase imaging; phase restoration; X-ray; partially coherent