

微焦点X射线源类同轴相衬成像*

禹爱民¹⁾ 李政 章迪 黄志峰

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 微焦点X射线源相衬成像是利用微焦点X射线源透过样品后携带的相位信息对样品内部结构成像. 通过获取相面上的强度信息利用相位复原方法可以得到物体内部的相位信息. 获取了不同放大倍数下的蚂蚁图像, 通过强度传播方程(Transport of Intensity Equation, TIE)方法得到了蚂蚁的相衬图像, 采用边缘可见度(Edge Visibility)方法和熵法比较了不同放大倍数下的成像效果以及复原前后图像质量.

关键词 相衬成像 相位恢复 强度传播方程 边缘可见度

1 引言

微焦点X射线源相衬成像是利用X射线透过样品后携带的相位信息对样品内部结构成像. 对轻元素而言, 典型的硬X射线通过样品时, 相位变化要比吸收变化大3个数量级左右^[1]. 随着高亮度同步辐射光源及X射线激光的发展, X射线相衬成像越来越受到人们的重视, 提出了许多种相衬成像技术, 最早由Bonse和Hart提出利用干涉法实现相位成像^[1], 后人利用其理论得到了很好的结果^[2]. 利用晶体衍射效应的衍射增强法也得到了广泛的关注, 并在信息分离方面取得了较好的结果^[3-5]. 而类同轴法是一种不需要通过光学仪器直接成像经过相位复原即可得到物体内部的相位信息的相衬成像方法, 在90年代中期同样成为研究的热点^[6], 并在同步光源与微焦点源上展开了各种实验^[7-9].

在类同轴相衬成像技术中, 由强度测量来恢复物体相位信息问题(即相位恢复问题)成为关键的技术问题, 成为人们研究的热点. Nugent等人^[10-13]提出基于强度传播方程(Transport of Intensity Equation, TIE)的多种方法, 在近场区获得了成功的应用. 程静等人^[14]进一步将这种方法定量推广到具有实际意义的部分相干光情形. 本文从点源球形X射线束相衬成像理论出发, 详细研究了微焦点源X射线同轴相衬成

像方法, 获取了不同位置的蚂蚁图像, 通过直接复原方法(TIE)得到了蚂蚁的相衬图像, 并通过定量的分析, 比较了不同位置、原图像和复原后的图像的效果.

2 微焦点源相衬成像理论

对于自由空间衍射的硬X射线类同轴相衬成像, 在单色球面波入射的情形下, 其成像模型如图1所示,

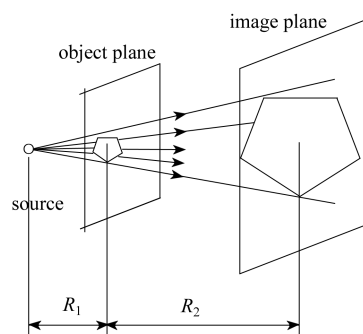


图1 微焦点源相衬成像示意图

图中源到物面的距离为 R_1 , 像面与物面的距离为 R_2 , 传播方向为源物面中心所在直线. 当X射线沿着 z 方向传播时, X射线的衰减系数和相位可以用一复数传播函数 $F(x, y)$ 来表示^[15]

$$F(x, y) = e^{-k\mu(x, y) + ik\varphi(x, y)}, \quad (1)$$

2005-12-20 收稿

* 国家自然科学基金(10475044)资助

1) E-mail: yam04@mails.tsinghua.edu.cn

相位变化

$$\varphi(x, y) = - \int_D \delta(x, y, z'; k) dz', \quad (2)$$

衰减系数的变化

$$\mu(x, y) = \int_D \beta(x, y, z'; k) dz', \quad (3)$$

其中物体的折射率 $n = (1 - \delta) + i\beta$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为 X 射线波长.

以物面前端为坐标面, X 射线传播方向为 z 轴方向, 源位于点 $(x_0, y_0, -R_1)$, 像平面位于 $z = R_2$, 物面上任何一点 (x, y) 复振幅可以表示为^[15]

$$\bar{u}(x, y; x_0, y_0, -R_1) = \frac{e^{ik\sqrt{R_1^2 + (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}}{\sqrt{R_1^2 + (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} F(x, y). \quad (4)$$

当 $R_1 \gg \lambda$ 并且 $R_1 \gg D$ (D 为物体的尺寸), 上式可以近似为

$$\bar{u}(x, y; x_0, y_0, -R_1) \approx \frac{e^{ik\left[R_1 + \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2R_1}\right]}}{R_1} F(x, y). \quad (5)$$

X 射线衍射可以用 Rayleigh-Sommerfeld 积分来表示^[16]

$$u(x', y', z'; x, y) = - \frac{ik}{2\pi} \iint \frac{e^{ikr}}{r} \frac{z'}{r} \bar{u}(x, y; x_0, y_0, -R_1) dx dy, \quad (6)$$

其中 $r \approx \sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + z'^2}$ 是物面上一点 (x, y) 到相面上一点 (x', y') 的距离, $\bar{u}(x, y; x_0, y_0, -R_1)$ 为物平面上一点复振幅, $u(x', y', z'; x, y)$ 为相平面上一点复振幅. 相面上和物面上强度之比^[15]

$$\frac{I(x', y', R_2; x_0, y_0, -R_1)}{I_o(x, y, R_2; x_0, y_0, -R_1)} = \frac{e^{-2k[\mu(x_s, y_s) - \mu_o]}}{\sqrt{\left| 1 + \frac{R_2}{M} \nabla^2 \varphi_s + \frac{R_2^2}{M^2} \left(\frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial x \partial y} \right) \right) \right|}}. \quad (7)$$

其中 $M = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$, φ_s 为物面的相位变化, $I_o(x, y, R_2; x_0, y_0, -R_1)$ 为物平面上的强度值, $I(x', y', R_2; x_0, y_0, -R_1)$ 为相平面上的强度值, 当 $\nabla^2 \varphi \ll 1$, $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \ll 1$,

$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \ll 1$, $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \ll 1$ 时, 上式可以简化为

$$\frac{I(x', y', R_2; x_0, y_0, -R_1)}{I_o(x, y, R_2; x_0, y_0, -R_1)} = 1 - \frac{R_2}{M} \nabla^2 \varphi_s, \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 强度和相位的拉普拉斯变化有直接的关系, 测得相面上的强度信息通过相位复原即可得到物面上的相位分布.

3 试验装置及试验结果

采用德国 Feinfocus FXS 160 光机作为微焦点源, 最大电压为 160keV, 最小焦点为 $5\mu\text{m}$. 定位系统为一旋转平台, 有 5 个自由度, 可以上下前后左右移动, 并且可以 360° 转动, 整个平台还可以 180° 倾斜转动. 移动最小的分辨率为 $10\mu\text{m}$, 转动最小分辨率为 0.01° . 样品为干蚂蚁, 尺寸大概为 $5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 4\text{mm}$. 采用 Kodak AA400 胶片成像, 将其装在暗盒中固定在平台上, 从而可以在不同位置成像. 成像冲洗出胶片然后用 IMACON848 扫描仪进行数字化并存入电脑进行处理. 成像时电压为 30keV, 电流为 $200\mu\text{A}$.

为比较在不同位置 and 不同曝光时间下相衬成像效果, 获取了不同位置的图像, 曝光时间分别为 51s, 86s, 220s 的图像, 如图 2 所示. 图中 A 点是为了定量比较不同放大倍数下的相衬对比度.

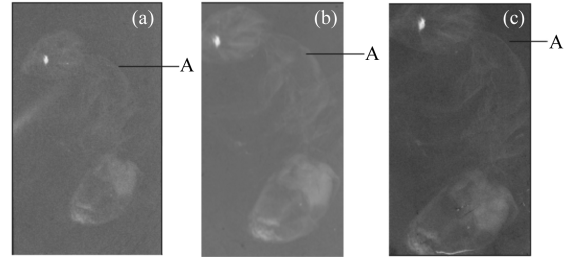


图 2 不同放大倍数下蚂蚁相衬图像

- (a) $R_1=0.06\text{m}$, $R_2=0.18\text{m}$, 曝光时间=51s;
 (b) $R_1=0.05\text{m}$, $R_2=0.25\text{m}$, 曝光时间=86s;
 (c) $R_1=0.06\text{m}$, $R_2=0.42\text{m}$, 曝光时间=220s.
 点 A 为比较不同放大倍数下相衬效果参考点.

4 相位复原

由强度测量来恢复物体相位信息即相位恢复, 目前主要有两种复原方法, 即直接法和迭代法. 其中直接法是用强度和相位的二阶拉普拉斯变换直接的关系(见式(8))来求解, 实际上就是求解一个泊松方程. 而迭代法主要有 G-S 迭代法和其他在 G-S 迭代法基础上发展的迭代算法. 由式(8)可知, 得到相面上的强度通过解方程即可得到物面上的相面分布. 式中 I_o , M , R_2 皆已知, 强度传输方程(TIE)即为一泊松方程. 解这一方程, 得到物面的相位分布. 对 $R_1=0.1\text{m}$, $R_2=0.3\text{m}$, 曝光时间=100s 的图像进行了相位复原, 复

原后的结果如图 3 所示. 从图中可以看出, 复原后的相位衬度要比原来的图像更加明显. 需要注意的是蚂蚁眼睛部分含有水分较多, 吸收信息较多故比较亮, 如果采用干燥的蚂蚁效果将变好.

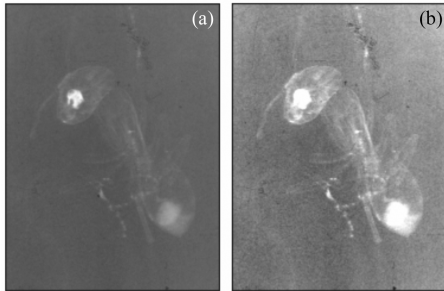


图 3 TIE 方法相位复原结果

(a) $R_1=0.1\text{m}$, $R_2=0.3\text{m}$, 曝光时间=100s; (b) 用 TIE 方法相位复原(a)图的结果.

5 结果对比分析

5.1 不同位置下相衬成像效果分析

定义物体的边缘可见度 (Edge Visibility) 为^[17]

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (9)$$

其中 I_{\max} , I_{\min} 为考察区域内强度最大值和最小值. 由式(9)求得不同放大倍数 $M = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ 下的边缘可见度, 计算过程中取的小区域为 20×20 像素, 结果如图 4

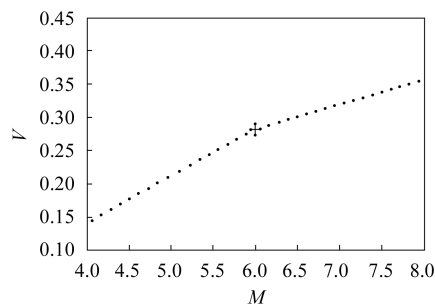


图 4 边缘可见度 (V) 与放大倍数 (M) 的关系图

所示. 从图中可以看出, 在近场范围内, 随着放大倍数 M 增大, 边缘可见度增大, 说明相衬效果增强.

5.2 采用熵法比较相位复原前后图像信息

熵值的大小表示图像所包含的平均信息量的多少, 熵值越大, 含的信息越多, 图像效果好. 图像的熵 H 定义为

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log p_i,$$

其中 L 为图像的总的灰度级, p_i 表示灰度值为 i 的像素数 D_i 与图像总像素数 D 之比, 即:

$$p_i = D_i / D$$

$P = \{p_0, p_1, \dots, p_{L-1}\}$ 反映了图像中具有不同灰度值像素的概率分布, $i-D_i$ 间的关系图即为图像的灰度直方图, 由于 $D = \sum_{i=0}^{L-1} D_i$, 所以 $i-p_i$ 间的关系图可以看作是图像的归一化灰度直方图. 经过计算, 得到原始图像熵值为 3.6175, 复原后图像熵值为 4.6086, 由此可见, 复原后图像信息更多, 复原后图像质量好于原始图像.

6 结论

微焦点源 X 射线相衬成像对低吸收物质有很好的相衬成像效果. 通过对理论的分析, 得到了强度和相位之间的关系. 在不同放大倍数下得到了蚂蚁的相衬图像, 用 TIE 方法得到了物体的相位分布. 采用边缘可见度和熵法对不同放大倍数和相位复原前后的图像进行了定量对比, 验证了理论的正确性. 进一步研究将采用不同相位复原方法(迭代算法)对图像进行复原并做出对比评价.

参考文献(References)

- Momose A. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1995, **A352**: 622—628
- Bonse U, Hart M. Appl. Phys. Lett., 1965, **6**: 155—157
- Momose A, Fukuda J. Med. Phys., 1995, **22**: 375—380
- Chapman D, Thomlinson W, Johnston R E. Phys. Med. Biol., 1997, **42**: 2015—2025
- Oral Oltulu, Zhong Zhong, Moumen Hasnah et al. Phys. D: Appl. Phys., 2003, **36**: 2152—2156
- Lagomarsino S, Cedola A, Cloetens P et al. Appl. Phys. Lett., 1997, **71**: 18
- Cloetens P, Ludwig W, Baruchel J et al. Appl. Phys. Lett., 1999, **75**: 19
- Hwu et al. Appl. Phys. Lett., 1999, **75**(16): 2377
- Mayo S C, Miller P R, Wilkins S W. Journal of Microscopy, 2002, **207**: 79—96
- Nugent K A et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 2961
- Gureyev T E, Wilkins S W J. Opt. Soc. Am., 1998, **A15**: 579
- Gureyev T E. Optics Communications, 2003, **220**: 49
- Gureyev T E, Pogany A. Optics Communications, 2004, **231**: 53
- CHENG Jing, HAN Shen-Sheng, SHAO Wen-Wen et al.

- Acta Optica Sinica, 1999, **19**(5): 596—603 (in Chinese) 132
(程静, 韩申生, 邵雯雯等. 光学学报, 1999, **19**(5): 596—603) 16 Batterman B W, Cole H. Mod. Phys., 1964, **36**: 681—717
15 Rokhlin S I, Kim J Y, Zoofan B. Proc. of SPIE, 2003, **5045**: 17 Elodie Pagot. Phys. Med. Biol., 2005, **50**: 709—724

In-Line Phase Contrast Imaging Using a Micro-focus X-Ray Source*

YU Ai-Min¹⁾ LI Zheng ZHANG Di HUANG Zhi-Feng

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In-line Phase Contrast Imaging using a micro-focus X-ray source enables weakly absorbing specimens to be imaged successfully with X-rays and enhances the visibility of fine scale structure in more strongly absorbing specimens greatly. Getting the intensity on the image plane, we can get the phase contrast of an object by phase retrieval method. We got phase contrast of a black ant in different position and obtained the phase retrieval result by Transport of Intensity Equation method. On the base of edge visibility formula and entropy method, we quantitatively compare different edge visibility results of the images in different position and the differences between original phase contrast image and phase retrieval image.

Key words phase-contrast, phase retrieval, transport of intensity equation, edge visibility

Received 20 December 2005

* Supported by NSFC (10475044)

1) E-mail: yam04@mails.tsinghua.edu.cn