

## 衍射增强成像提取多种信息的简便方法研究\*

赵雪娇<sup>1)</sup> 张凯<sup>1)</sup> 洪友丽<sup>1)</sup> 黄万霞<sup>1)</sup> 袁清习<sup>1)†</sup> 朱佩平<sup>1)‡</sup> 吴自玉<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

2) (中国科学技术大学, 国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

(2013年2月4日收到; 2013年3月6日收到修改稿)

衍射增强相位衬度成像中的信息分离研究一直以来都是相关研究人员重点关注的方向之一. 本文在利用余弦函数拟合衍射增强成像中的摇摆曲线的基础上, 推导出了峰位像、左腰像和右腰像的余弦函数表达式以及吸收像、折射角像和散射角方差像的解析表达式, 形成了一种基于衍射增强成像的简便信息分离方法. 该方法只需利用摇摆曲线左腰、右腰和峰位三幅图像, 就能提取出样品的吸收、折射和散射信息, 具有方法简便、样品所受辐射剂量低等优点. 对模型样品和真实样品的实验结果表明, 本文所提方法可成功对样品进行信息分离, 并且所获得的信息分离结果可以和目前常用的多图统计方法 (至少需要 7 张图像) 获得的实验结果相比较.

**关键词:** 衍射增强成像, 相位衬度成像, 样品信息提取

**PACS:** 42.30.Va, 42.30.-d, 42.25.Fx

**DOI:** 10.7498/aps.62.124202

## 1 引言

X 射线相衬成像方法可以对主要由碳、氢、氧等轻元素构成的软组织结构进行清晰成像<sup>[1-3]</sup>, 是近年来相关研究的重点之一. 在多种 X 射线相衬成像方法中, 衍射增强成像 (diffraction enhanced imaging, DEI) 是一种可以获取样品的微分相位信息的成像方法<sup>[4-7]</sup>, 在生物、医学、材料科学等学科的研究中获得了非常好的实验结果<sup>[2,6-13]</sup>.

自 DEI 方法建立以来<sup>[4]</sup>, 对其成像结果进行信息分离以获取样品的吸收、折射等信息的研究一直是人们关注的热点之一. 在众多的信息分离方法中<sup>[4,11-28]</sup>, 具有代表意义的信息分离方法有: 摇摆曲线腰位成像方法、多图统计方法 (multiple-image radiography, MIR)<sup>[17-22]</sup> 和摇摆曲线泰勒展开并做二阶或高阶导数近似方法<sup>[23-26]</sup>. 这些方法各有优缺点, 例如摇摆曲线腰位成像方法是目前最简便的相位信息提取方法, 但是它不能提取散射信息; MIR 方法虽然能够提取样品的吸收、折射和散射

信息图像, 具有较强的抗噪声能力, 但是 MIR 方法需采集多张 (通常为 21 张以上, 最少需要 7 张) 图像, 算法复杂并且增加了样品的曝光时间和辐射剂量; 摇摆曲线二阶或高阶泰勒展开方法至少需要拍摄三张以上的图像才能分离出吸收、折射和散射信息图像, 且该方法进行了高斯曲线拟合和泰勒展开两次近似. 基于前期对于 X 射线相位衬度成像技术的研究<sup>[29]</sup>, 本文提出了摇摆曲线定位成像方法, 该算法采用余弦函数拟合摇摆曲线, 仅需要对样品进行三次曝光便可以分离出吸收、折射和小角散射角宽度信息. 本文首先对所提出摇摆曲线定位方法的原理进行阐述, 然后介绍用该方法开展的实验验证工作, 对该方法信息分离结果与 MIR 方法获得的结果进行比较.

## 2 摇摆曲线定位成像方法原理

## 2.1 基本原理

在衍射增强成像中, 摇摆曲线反映光强随光线角度的变化关系. 摇摆曲线是一条单峰曲线, 此前

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB930804, 2012CB825800)、国家自然科学基金重大项目 (批准号: 10734070, 10774144)、国家自然科学基金 (批准号: 11205189, 10979055, 31071909) 和中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (批准号: KJCX2-YW-N42) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yuanqx@ihep.ac.cn

‡ 通讯作者. E-mail: zhupp@ihep.ac.cn

国内外学者一般采用高斯曲线拟合摇摆曲线来获得摇摆曲线的数学表达,但是高斯函数涉及复杂的指数和对数计算,很难推导出相位信息的解析表达式,发展出来的提取相位信息的算法一般都比较麻烦,需要大量的计算量<sup>[16-28]</sup>.相比较而言,余弦函数仅仅涉及三角函数计算,余弦曲线的峰位和谷位之间、腰位之间具有多种对称性质,若能用余弦函数拟合摇摆曲线,则有可能发展出相位信息数学表达简单、实验数据采集方法简便、提取相位信息算法计算量小的快速方法.虽然摇摆曲线和余弦曲线从整体上来看根本不同,摇摆曲线是一条单峰曲线.余弦曲线是一条周期性的多峰曲线,但是若把注意力仅仅集中在曲线的腰位和峰位,就会发现两条曲线具有大致相同的行为.北京同步辐射装置成像组此前成功地将摇摆曲线腰位成像方法推广到光栅剪切成像之中,就是利用了单峰摇摆曲线和多峰位移曲线在腰位都具有直线性质的特点<sup>[30]</sup>.基于这个思路,第2节理论推导的顺序是:先利用余弦函数拟合 DEI 的摇摆曲线,并根据拟合摇摆曲线的余弦函数建立成像方程,再根据成像方程表达样品的峰位像、左腰位像和右腰位像,最后从峰位像、左腰位像和右腰位像中提取样品的吸收像、折射角像和散射角方差像.

## 2.2 成像方程

图 1 为北京同步辐射衍射增强成像装置光路图.根据 1997 年 Chapman 等<sup>[4]</sup>发展的衍射增强成像方法,无样品时探测器上光强可以表达为

$$I_{\theta_A} = I_0 R(\theta_A), \quad (1)$$

其中  $I_0$  为无样品时, X 射线光束经过单色器晶体反射后入射在分析晶体上的光强,  $\theta_A$  为分析晶体晶面相对单色器晶体晶面的摇摆角,  $R(\theta_A)$  为摇摆曲线,如图 2 所示,其中  $\theta_D$  为达尔文宽度.为了用余弦曲线拟合摇摆曲线,首先要为单峰的摇摆曲线定义等效可见度,令

$$V_0 = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}}, \quad (2)$$

为摇摆曲线的等效可见度,其中  $R_{\max}$  为摇摆曲线最大值,  $R_{\min}$  为摇摆曲线最小值.再令

$$R = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2}, \quad (3)$$

图 3 为显示了余弦曲线拟合摇摆曲线的结果.于是方程 (1) 可以用拟合摇摆曲线的余弦曲线表示为

$$I(\theta_A) = I_0 R \left[ 1 + V_0 \cos \left( \frac{\pi}{\theta_D} \theta_A \right) \right]. \quad (4)$$

由图 3 可知,对摇摆曲线上半部分而言,方程 (3) 对摇摆曲线拟合得相当好,具有很高的准确性.

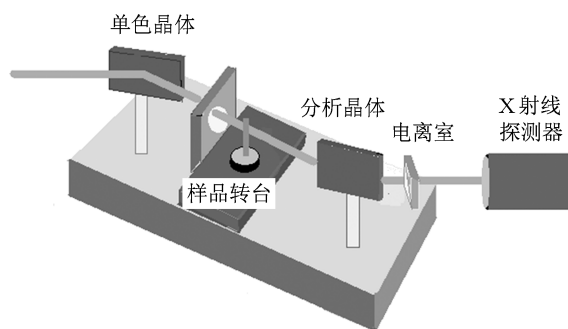


图 1 北京同步辐射衍射增强成像装置示意图

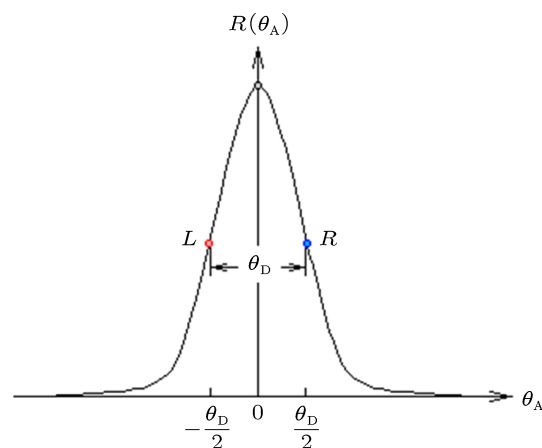


图 2 北京同步辐射衍射增强成像装置上采集的摇摆曲线,其中  $\theta_D$  为达尔文宽度

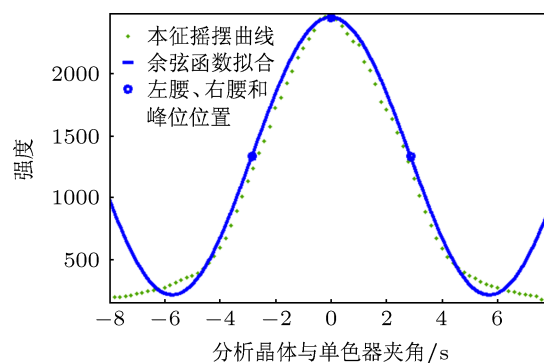


图 3 余弦曲线拟合摇摆曲线示意图

当样品放入单色器晶体和分析晶体之间时,样品会吸收、折射和散射 X 射线:样品吸收的数学表

达和传统吸收成像一样; 样品折射改变光线在分析晶体上的入射角, 而这和分析晶体改变摇摆角等价; 样品散射主要是小颗粒多次折射引起的散射<sup>[31]</sup>, 样品散射会降低摇摆曲线的等效可见度, 其具体表现为摇摆曲线幅度降低 (参考 (2) 式). 因为摇摆曲线是一条宽度很窄的单峰曲线, 所以在幅度降低的同时其宽度有少许增加. 在弱散射条件下, 摇摆曲线幅度降低有限, 摇摆曲线宽度增加很小, 可以忽略. 本文仅研究弱散射条件下的情况, 因此可得衍射增强成像方程为

$$\begin{aligned}
 & I_{\theta_A}(x, y) \\
 &= I_0 R \exp[-M(x, y)] \\
 & \times \left[ 1 + V(x, y) \cos\left(\frac{\pi}{\theta_D}(\theta_A - \theta_x(x, y))\right) \right], \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中  $M(x, y)$  是样品中一点  $(x, y)$  对 X 射线的吸收, 其表达式为

$$M(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(x, y, z) dz, \quad (6)$$

式中  $\mu(x, y, z)$  是线性吸收系数;  $\theta_x(x, y)$  是样品中一点  $(x, y)$  对 X 射线的折射角; 其表达式为

$$\theta_x(x, y) = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial x} dz, \quad (7)$$

其中  $\delta(x, y, z)$  是折射率实部衰减率;  $V(x, y)$  是经过样品中一点  $(x, y)$  散射后的摇摆曲线的可见度, 其表达式为<sup>[29]</sup>

$$V(x, y) = V_0 \exp\left[-\left(\frac{\pi}{\theta_D}\right)^2 \frac{\sigma^2(x, y)}{2}\right], \quad (8)$$

其中  $\sigma^2(x, y)$  是样品中一点  $(x, y)$  的散射角方差.

### 2.3 峰位像、左腰像和右腰像的数学表达

根据图 2 和图 3, 分析晶体和单色器晶体之间夹角  $\theta_A$  在摇摆曲线峰位、左腰位和右腰位分别为

$$\theta_A = 0, \quad \theta_A = -\frac{\theta_D}{2}, \quad \theta_A = \frac{\theta_D}{2}. \quad (9)$$

分别代入 (5) 式, 可得峰位像的表达式为

$$\begin{aligned}
 & I_P(x, y) \\
 &= I_0 R \exp[-M(x, y)] \\
 & \times \left[ 1 + V(x, y) \cos\left(\frac{\pi}{\theta_D}\theta_x(x, y)\right) \right], \quad (10)
 \end{aligned}$$

左腰像的表达式为

$$\begin{aligned}
 & I_L(x, y) \\
 &= I_0 R \exp[-M(x, y)]
 \end{aligned}$$

$$\times \left[ 1 - V(x, y) \sin\left(\frac{\pi}{\theta_D}\theta_x(x, y)\right) \right], \quad (11)$$

右腰像的表达式为

$$\begin{aligned}
 & I_R(x, y) \\
 &= I_0 R \exp[-M(x, y)] \\
 & \times \left[ 1 + V(x, y) \sin\left(\frac{\pi}{\theta_D}\theta_x(x, y)\right) \right]. \quad (12)
 \end{aligned}$$

### 2.4 吸收像、折射像和散射角方差像的数学表达

根据 (11) 和 (12) 式, 吸收像的表达式为

$$\exp[-M(x, y)] = \frac{I_R(x, y) + I_L(x, y)}{2I_0 R}. \quad (13)$$

为了能简化折射角像和散射角方差像的数学推导, 引入衍射增强成像中摇摆曲线上不存在、但余弦函数拟合曲线上存在的“谷位像”, 令“谷位像”为

$$\begin{aligned}
 & I_V(x, y) \\
 &= I_0 R \exp[-M(x, y)] \\
 & \times \left[ 1 - V(x, y) \cos\left(\frac{\pi}{\theta_D}\theta_x(x, y)\right) \right], \quad (14)
 \end{aligned}$$

根据 (10)—(14) 式, 得由峰位像、左腰像和右腰像表达的折射角像

$$\theta_x(x, y) = \frac{\theta_D}{\pi} \arctan\left(\frac{I_R(x, y) - I_L(x, y)}{2I_P(x, y) - I_R(x, y) - I_L(x, y)}\right), \quad (15)$$

和由峰位像、左腰像和右腰像表达的散射角方差像

$$\begin{aligned}
 \sigma^2(x, y) &= 2 \left(\frac{\theta_D}{\pi}\right)^2 \ln \frac{V_0}{V(x, y)} \\
 &= 2 \left(\frac{\theta_D}{\pi}\right)^2 \ln V_0 \left[ \left(\frac{2I_P(x, y)}{I_R(x, y) + I_L(x, y)} - 1\right)^2 \right. \\
 & \quad \left. + \left(\frac{I_R(x, y) - I_L(x, y)}{I_R(x, y) + I_L(x, y)}\right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

由以上理论推导可以看出, 利用余弦曲线拟合摇摆曲线, 可以用余弦函数表达摇摆曲线上三个定位像, 即峰位像、左腰像和右腰像, 并可以利用余弦函数的对称性质, 通过简单推导获得样品吸收像、折射角像和散射角方差像的解析表达式. 基于这个理论研究成果, 只需在摇摆曲线上三个固定位置拍摄三幅图像, 便可以从中提取出样品的吸收像、折射角像和散射角方差像.

### 3 实验数据采集

为了对上述理论研究结果进行实验验证,我们开展了相关实验工作. 实验数据采集在北京同步辐射装置 4W1A 形貌成像实验站衍射增强成像装置上进行. 实验样品为两种: 一种是由塑料圆棒和不同厚度的纸张组成的模型样品, 其中塑料棒是主要的折射物体, 纸张是主要的散射体; 另一种是吸收、折射和散射信息复杂组合的小鼠爪生物样品. 如图 1 所示实验装置, 分析晶体和单色器晶体均选用 Si(111) 晶体, X 射线探测器像素大小为  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ , 在分析晶体和探测器之间放置电离室用以进行光强测量, 实验 X 射线能量为 14 keV, 分析晶体转台旋转角度精度为 0.1 s.

实验过程中, 放入样品前需要先测量摇摆曲线, 转动分析晶体相对于单色器晶体的角度, 利用 Keithley 6512 型弱电流计读取电离室信号强度, 可测得无样品的摇摆曲线 (当分析晶体与单色器晶体平行时, 电离室显示强度最大, 此时分析晶体转角  $\theta_A = 0$ ). 图 3 中虚线为利用电离室记录的摇摆曲线, 其中分析晶体角度旋转步长为 0.2 s.

根据所测得的摇摆曲线, 当把分析晶体定位在不同位置后, 放入样品就可以拍摄到与摇摆曲线不同位置对应的样品图像. 图 4 所示的由塑料棒和层数不同的纸是验证本文理论研究成果的模型样品,

其中的塑料棒直径为 0.506 mm, 纸的叠放如图 4 所示, 纸张厚度递增梯度为 1 张.

实验数据采集步骤为: 转动分析晶体, 从摇摆曲线左侧开始采集图像, 分析晶体转动步长为 0.2 s, 分析晶体每转动一次采集一张图像, 共采集了 67 张图像; 在放入样品之前, 按照上述方法采集一套背景图像; 然后放入样品, 按同样方法采集一套样品图像; 67 幅图像构成一套多图方法的实验数据, 然后从 67 幅图像中, 选取峰位像、左腰像和右腰像, 就构成一套满足本文提出方法要求的实验数据. 这样做的目的是为了将本文提出方法的结果和多图统计方法的结果进行比较. 图 5 为实验拍摄的模型样品和生物样品的峰位像、左腰像和右腰像. 从中可以看出, 峰位像明显含有吸收和散射信息, 左腰像和右腰像含有明显的折射信息.

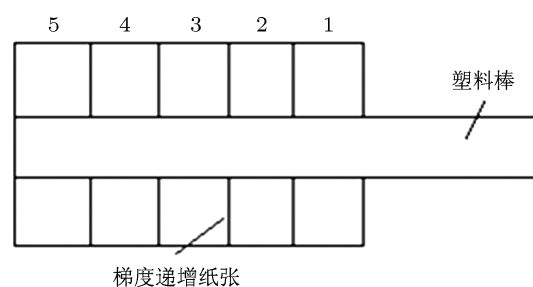


图 4 模型样品结构示意图

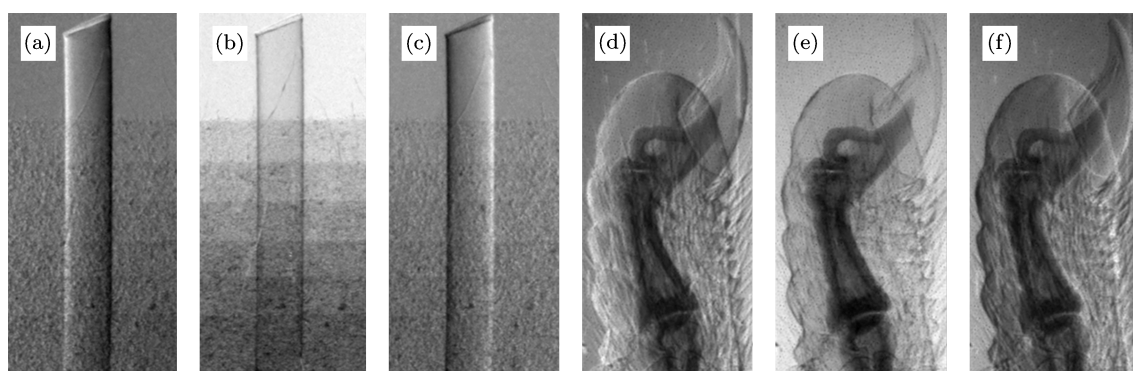


图 5 样品左腰、右腰和峰位图像 (a) 模型样品左腰图像; (b) 模型样品左腰图像; (c) 模型样品右腰图像; (d) 小鼠爪子左腰图像; (e) 小鼠爪子左腰图像; (f) 小鼠爪子左腰图像

### 4 数据处理与分析

利用所采集的实验数据, 采用 MIR 方法提取出背景图像和样品图像相同位置像素的强度值绘制背景和样品的摇摆曲线如图 6 所示. 图中的“.”线是背景和样品的摇摆曲线, 实线是北京摇摆曲线的余弦函数拟合曲线, 虚线是样品余弦函数的拟合曲线. 从拟合参数可以看出, 放入样品后拟合的余弦

函数周期因子  $\alpha$  没有改变; 发生变化的是吸收参数 (由  $I_0$  变为  $I_0 \exp(-M)$ )、对比度参数  $V$  和折射角参数  $\theta_A$ .

根据第 2.4 节推导出的吸收像、折射角像和散射角宽度方差像的解析表达式 (12), (15) 和 (16) 式, 将左腰、右腰和峰位三张图像进行简单矩阵计算, 分别获得了模型样品和小鼠爪样品的吸收、折射和散射角宽度方差图像. 根据 Wernick 等<sup>[21]</sup> 在

2003 年提出的 MIR 方法对采集到的 67 套背景和样品数据进行信息分离, 分别获得了模型样品和小鼠爪样品的吸收、折射和散射角宽度方差信息图像. 下面对这两种样品分别使用本文提出的信息分离方法和 MIR 方法的信息分离结果进行分析.

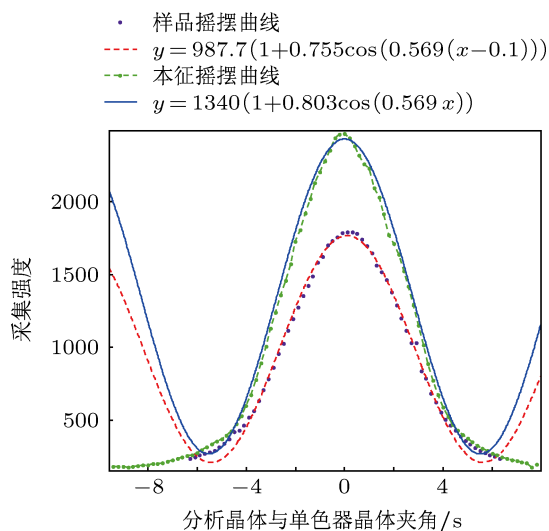


图 6 背景和样品的摇摆曲线及其对应的余弦拟合曲线

如图 7(a)—(c) 是利用本文提出方法获得的结果. 在吸收像中, 随纸张层数增加, 吸收差异明显, 分层清晰; 在折射角像中, 塑料棒边缘折射信息明显, 单层纸张区域对塑料棒边缘折射衬度几乎没有影响, 随着纸张层数递增纸张散射对背景影响逐渐加强, 但对于塑料棒边缘折射衬度的影响不大; 在散射角方差像中, 单层纸张区域散射明显, 随着纸张层数递增散射角方差依次递增, 且具有较好的分层. 图 7(d)—(f) 是多图统计方法获得的结果. 将图 7(a)—(c) 与 (d)—(f) 进行比较, 可以看出本文提出的方法的吸收像衬度低于 MIR 方法, 两种方法的折射角像几乎完全一致, 本文方法的散射角方差衬度略高于多图统计方法. 模型样品信息分离结果说明本文采用的余弦函数拟合信息分离方法能够将吸收、折射和散射角方差从混合的图像中分离出来.

图 8(a)—(c), (d)—(f) 分别是采用本文提出的方法和 MIR 方法对生物样品 - 小鼠爪子某一趾部进行信息分离的结果, 两种方法分离的吸收图像骨骼结构明显, 没有包含弱吸收的小鼠爪子茸毛和肌肉

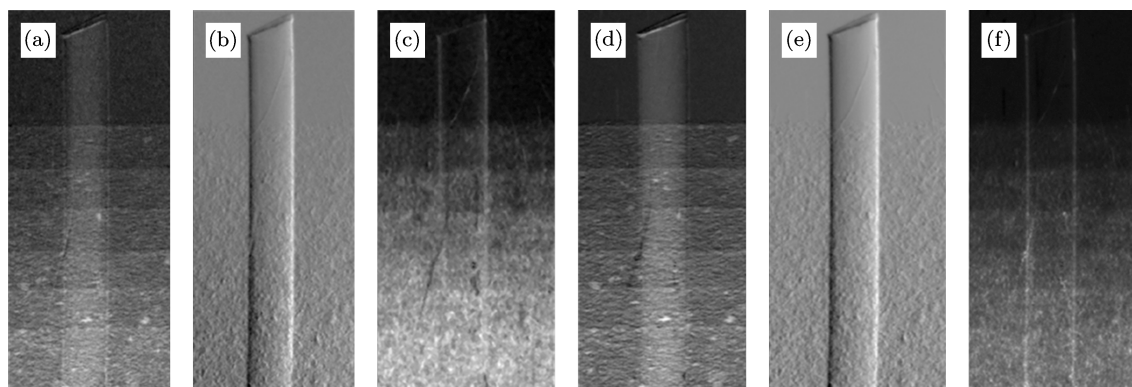


图 7 模型样品成像信息分离结果 (a), (b), (c) 分别为本文提出方法分离的吸收信息图像、折射角信息图像和散射角方差图像; (d), (e), (f) 分别为 MIR 方法分离的吸收信息图像、折射角信息图像和散射角宽度方差图像

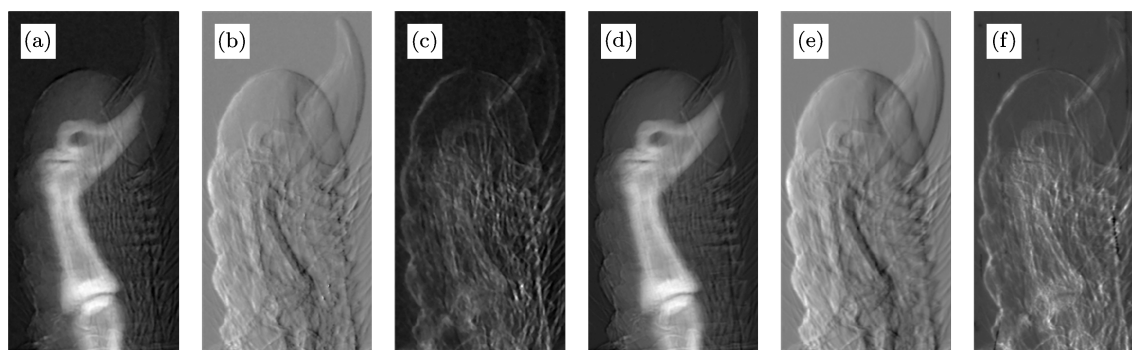


图 8 小鼠爪生物样品成像信息分离结果 (a), (b), (c) 分别为本文提出方法分离的吸收信息图像、折射角信息图像和散射角方差图像; (d), (e), (f) 分别为 MIR 方法分离的吸收信息图像、折射角信息图像和散射角宽度方差图像

分布细节信息; 本文提出方法分离出的折射信息图像指甲部分和趾部顶端的区域细节明显, 图像中部骨骼和肌肉纹理清楚. 散射角方差图像中能够观察到老鼠爪子上细微的茸毛分布, 骨骼轮廓明显, 不含有在折射角图像中明显的肌肉皮肤褶皱部分信息. 说明了本文提出信息分离算法能够有效地分离出吸收、折射和散射信息, 验证了该算法在具有复杂结构的生物样品信息分离应用中同样能够获得很好的信息分离结果.

## 5 结论

利用余弦曲线对摇摆曲线进行拟合, 本文提出

了一种衍射增强成像中提取样品吸收、折射和散射信息的简便方法——摇摆曲线定位成像方法, 只需要在摇摆曲线的峰位和腰位采集三张图像即可利用本文给出的解析表达式获得样品的吸收、折射和散射信息图像. 利用由塑料棒和不同厚度纸组成的模型样品以及小鼠爪生物样品对所提出的信息分离方法进行了实验, 同时将本文提出方法的信息分离结果和 MIR 方法相关结果进行了比较. 实验结果证明, 本文提出的方法可以获得样品的吸收、折射和散射信息, 所获得的结果可以和 MIR 算法获得的结果相比较. 与 MIR 方法相比, 本文提出的信息分离方法具有简便快速、样品所受辐射剂量低、算法简单等优点, 具有一定的实用化意义.

- [1] Fitzgerald R 2000 *Phys. Today* **53** 23
- [2] Huang W X, Yuan Q X, Tian Y L, Zhu P P, Jiang X M, Wang J Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 677 (in Chinese) [黄万霞, 袁清习, 田玉莲, 朱佩平, 姜晓明, 王嵩越 2005 物理学报 **54** 677]
- [3] Pfeiffer F, Bech M, Bunk O, Kraft P, Eikenberry E F, Bronnimann C, Grunzweig C, David C 2008 *Nat. Mater.* **7** 134
- [4] Chapman D, Thomlinson W, Johnston R E, Washburn D, Pisano E, Gmur N, Zhong Z, Menk R, Arfelli F, Sayers D 1997 *Phys. Med. Biol.* **42** 2015
- [5] Stevenson A W, Gureyev T E, Paganin D, Wilkins S W, Kamp T W, Snigirev A, Rau C, Snigireva I, Youn H S, Dolbnya I P, Yun W, Lai B, Garrett R F, Cookson D J, Hyodo K, Ando M 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **199** 427
- [6] Wagner A, Aurich M, Sieber N, Stoessel M, Wetzl W D, Schmuck K, Lohmann M, Reime B, Metge J, Coan P, Bravin A, Arfelli F, Rigon L, Menk R H, Heitner G, Irving T, Zhong Z, Muehleman C, Mollenhauer J A 2005 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **548** 47
- [7] Pagot E, Fiedler S, Cloetens P, Bravin A, Coan P, Fezzaa K, Baruchel J, Härtwig J 2005 *Phys. Med. Biol.* **50** 709
- [8] Li H, Wang T L, Wang X Y, Zhao T, Hu C H, Lu W A, Wang B E, Zhao X Y, Zhu P P, Huang W X, Yuan Q X, Wang J Y, Luo S 2008 *Nuclear Techniques* **31** 81 (in Chinese) [李辉, 王泰龄, 王雪艳, 赵涛, 胡春红, 鲁玮瑗, 王宝恩, 赵新颜, 朱佩平, 黄万霞, 袁清习, 王嵩越, 罗述 2008 核技术 **31** 81]
- [9] Sun Y, Zhu P P, Yu J, Chen X 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 8 (in Chinese) [孙怡, 朱佩平, 于健, 陈欣 2007 光学学报 **27** 8]
- [10] Pisano E D, Johnston R E, Chapman D, Geradts J, Iacocca M V, Livasy C A, Washburn D B, Sayers D E, Zhong Z, Kiss M Z, Thomlinson W C 2000 *Radiology* **214** 895
- [11] Sun Y, Zhu P P, Liu M H, Yu J 2006 *CT Theor. Appl.* **15** 13 (in Chinese) [孙怡, 朱佩平, 刘明贺, 于健 2006 CT 理论与应用研究 **15** 13]
- [12] Zhu P P, Yuan Q X, Huang W X, Wang J Y, Shu H, Wu Z Y, Xian D C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1089 (in Chinese) [朱佩平, 袁清习, 黄万霞, 王嵩越, 舒航, 吴自玉, 洗鼎昌 2006 物理学报 **55** 1089]
- [13] Liu L, Zhu P P, Shu H, Zhang K 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1942 (in Chinese) [刘力, 朱佩平, 舒航, 张凯 2008 光学学报 **28** 1942]
- [14] Kiss M Z, Sayers D E, Zhong Z 2003 *Phys. Med. Biol.* **48** 325
- [15] Zhu P, Yuan Q, Huang W, Wang J, Shu H, Chen B, Liu Y, Li E, Wu Z 2006 *J. Phys. D* **39** 4142
- [16] Khelashvili G, Brankov J G, Chapman D, Anastasio M A, Yang Y, Zhong Z, Wernick M N 2006 *Phys. Med. Biol.* **51** 221
- [17] Muehleman C, Li J, Zhong Z, Brankov J G, Wernick M N 2006 *J. Anat.* **208** 115
- [18] Oltulu O 2003 Ph. D. Dissertation (Chicago: the Graduate College of Illinois Institute of Technology)
- [19] Oltulu O, Zhong Z, Hasnah M, Wernick M N, Chapman D 2003 *J. Phys. D* **36** 2152
- [20] Pagot E, Cloetens P, Fiedler S, Bravin A, Coan P, Baruchel J, Hartwig J, Thomlinson W 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3421
- [21] Wernick M N, Wirjadi O, Chapman D, Zhong Z, Galatsanos N P, Yang Y, Brankov J G, Oltulu O, Anastasio M A, Muehleman C 2003 *Phys. Med. Biol.* **48** 3875
- [22] Chen B, Shu H, Zhu P P, Chen C C, Wang J Y, Yuan Q X, Jiang F, Chen J, Wu Z Y, Ming H 2006 *High Energy Phys. Uncl. Phys.* **30** 587 (in Chinese) [陈博, 舒航, 朱佩平, 陈春翀, 王嵩越, 袁清习, 江帆, 陈捷, 吴自玉, 明海 2006 高能物理与核物理 **30** 587]
- [23] Chou C Y, Anastasio M A, Brankov J G, Wernick M N, Brey E M, Connor D M, Zhong Z 2007 *Phys. Med. Biol.* **52** 1923
- [24] Hu C H, Li H, Zhang L, Wang X Y, Luo S Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2403 (in Chinese) [胡春红, 李辉, 张璐, 王雪艳, 罗述谦 2009 物理学报 **58** 2403]
- [25] Rigon L, Besch H J, Arfelli F, Heitner G, Plathow B H 2003 *J. Phys. D* **36** A107
- [26] Rigon L, Arfelli F, Menk R H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 114102
- [27] Nesterets Y I, Gureyev T E, Paganin D, Pavlov K M, Wilkins S W 2004 *J. Phys. D* **37** 1262
- [28] Paganin D, Gureyev T E, Pavlov K M, Lewis R A, Kitchen M 2004 *Opt. Commun.* **234** 87
- [29] Wang Z T 2010 Ph. D. Dissertation (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [王振天 2010 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [30] Zhu P, Zhang K, Wang Z, Liu Y, Liu X, Wu Z, McDonald S A, Marone F, Stamparoni M 2010 *The 10th International Conference on X-ray Microscopy AIP Conf. Proc.* Chicago, Illinois, USA August 15–20, 2010 p332
- [31] Vorgelegt V 2005 Ph. D. Dissertation (Marburg: University of Siegen)



# A simple method of extracting multiple-information with diffraction enhanced imaging \*

Zhao Xue-Jiao<sup>1)</sup> Zhang Kai<sup>1)</sup> Hong You-Li<sup>1)</sup> Huang Wan-Xia<sup>1)</sup>  
Yuan Qing-Xi<sup>1)†</sup> Zhu Pei-Ping<sup>1)‡</sup> Wu Zi-Yu<sup>1)2)</sup>

1) (Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China)

2) (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 4 February 2013; revised manuscript received 6 March 2013)

## Abstract

Sample information-extracting with diffraction enhanced imaging (DEI) has been one of the interesting areas for many years. Using cosine curve to fit rocking curve in DEI, we deduce the equations described by cosine functions for peak-position image, low- and high-angle image. The analytical expressions of absorption image, refractive angle image and scattering image are also developed. Then a simple method is proposed for sample information-extracting with DEI based on those deductions. This method can extract the absorption information, refractive angle information and scattering information of a sample using only three images, i.e. one peak-position, one low-angle image and one high-angle image, resulting in simple experimental process and low radiation dose introduced to sample by imaging process. The experiments are carried out on a standard sample and a real biological sample. For comparison, experiments are also carried out on the same two samples using the common multiple-image radiography (MIR) method, in which at least seven images should be used to extract sample information. Experimental results show that our new method does extract sample information successfully, and the results from our new method are comparable to those from the MIR method.

**Keywords:** diffraction enhanced imaging, phase contrast imaging, sample information-extraction

**PACS:** 42.30.Va, 42.30.-d, 42.25.Fx

**DOI:** 10.7498/aps.62.124202

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2009CB930804, 2012CB825800), the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10734070, 10774144), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11205189, 10979055, 31071909), and the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJCX2-YW-N42).

† Corresponding author. E-mail: yuanqx@ihep.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhupp@ihep.ac.cn