

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 10 月 8 日 (08.10.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/199194 A1

(51) 国际专利分类号:
G01N 23/041 (2018.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/081508

(22) 国际申请日: 2019 年 4 月 4 日 (04.04.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 中国科学技术大学 (UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) [CN/CN]; 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。

(72) 发明人: 吴朝(WU, Zhao); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。 魏文彬(WEI, Wenbin); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。 高昆(GAO, Kun); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。 王秋平(WANG, Qiuping); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。 田扬超(TIAN, Yangchao); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。

陆亚林(LU, Yalin); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。

(74) 代理人: 中科专利商标代理有限公司 (CHINA SCIENCE PATENT & TRADEMARK AGENT LTD.); 中国北京市海淀区西三环北路 87 号 4-1105 室, Beijing 100089 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,

(54) Title: X-RAY PHASE-CONTRAST IMAGING METHOD

(54) 发明名称: 一种 X 射线相位衬度成像方法

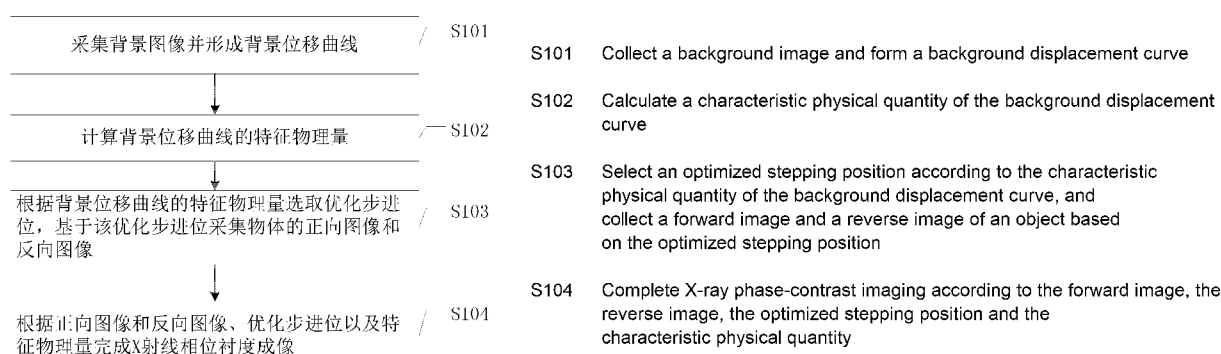


图 1

(57) Abstract: Disclosed is an X-ray phase-contrast imaging method, comprising: collecting a background image and forming a background displacement curve (S101); calculating a characteristic physical quantity of the background displacement curve (S102); selecting an optimized stepping position according to the characteristic physical quantity, and collecting a forward image and a reverse image of an object based on the optimized stepping position (S103); and completing X-ray phase-contrast imaging according to the forward image, the reverse image, the optimized stepping position and the characteristic physical quantity (S104).

(57) 摘要: 一种 X 射线相位衬度成像方法, 包括: 采集背景图像并形成背景位移曲线 (S101); 计算背景位移曲线的特征物理量 (S102); 根据特征物理量选取优化步进位, 基于优化步进位采集物体的正向图像和反向图像 (S103); 根据正向图像和反向图像、优化步进位以及特征物理量完成 X 射线相位衬度成像 (S104)。

AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种 X 射线相位衬度成像方法

技术领域

本公开涉及成像技术领域，尤其涉及一种 X 射线相位衬度成像方法，用于大视场快速成像。

背景技术

传统 X 射线吸收成像在无损检测、医学影像以及材料科学等领域得到广泛应用并发挥重要作用，然而对低原子系数物质成像图像衬度较低。X 射线相衬成像方法，通过检测物体对 X 射线波前的相位调制，可以获得低原子序数物质较高衬度图像。这是因为物体对 X 射线的作用可用复数折射率 $n=1-\delta+i\beta$ 描述，实部减小量 δ 对应相位调制，虚部 β 对应吸收，随着原子序数的减小或成像能量的增加， β 下降速度远大于 δ 的下降速度。在众多的相衬成像方法中，X 射线光栅相衬成像，由于其较大的成像视场以及常规光源较好的兼容性，被认为是一种很有可能应用于临床医学影像的相衬成像方法。X 射线光栅相衬成像经历了两次重要发展，2002 到 2003 年 X 射线 Talbot 干涉仪的提出^[1-2]，光栅相衬成像从可见光波段推广到 X 射线波段，然而仍局限于同步辐射光源或者微焦点光源。2006 年，Talbot-Lau 干涉仪的提出^[3]，大幅降低了对光源相干性要求，使得相衬成像适用于常规 X 射线源，为相衬成像的实际应用提供了基本条件。

尽管光栅相衬成像的应用前景被普遍看好，但是该方法仍然存在多方面的局限性，阻碍了其广泛应用。光栅相衬成像获得的投影像包含物体的吸收、折射以及散射。目前实验室阶段最常用的信息分离方法为相位步进方法^[4]，该方法至少需要三幅背景图像和三幅物体图像才能完成信息分离，通过等间距移动其中一块光栅获得多个位置处的背景和物体图像，再利用傅里叶分析方法获得物体的折射信息。

相位步进方法可以获得高质量图像，但是需要较长的数据采集时间和较多的投影图像。相比传统吸收成像，不仅增加了数据采集复杂度，更大的弊端是延长了曝光时间，物体受辐照剂量高。针对该问题，中科院高能物理研究所朱佩平研究员提出了一种快速低剂量的相衬成像方法^[5]。该方法利用正反投影共轭的特性，成功避免了传统信息恢复方法中光栅的复杂

步进运动，大大提高了成像速度、降低了辐射剂量，实现了与传统 CT 扫描模式兼容的相衬 CT 成像。然而，该方法基于位移曲线腰位线性近似的假设，因此要求视场内所有像素相位步进曲线同步，增加了光栅均匀性要求；利用现有光栅工艺只能制作满足正反投影方法的小面积光栅，因此正反投影方法只能对小物体成像。

- [1].David C et al. Differential x-ray phase contrast imaging using a shearing interferometer, Appl. Phys. Lett. 81:3287-3289 (2002).
- [2].Momose A et al. Demonstration of x-ray talbot interferometry, Jpn. J. Appl. Phys. 42:L866-L868 (2003).
- [3].Pfeiffer F et al. Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance x-ray sources, Nat. Phys. 2: 258-261 (2006).
- [4].Weitkamp T, et al. X-ray phase imaging with a grating interferometer, Opt. Express 13:6296-6304 (2005).
- [5]ZhuPP, etal. Low-dose, simple, and fast grating-based X-ray phase-contrast imaging, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.107,13576-13581 (2010).

公开内容

根据本公开的一个方面，提供了一种 X 射线相位衬度成像方法，包括：采集背景图像并形成背景位移曲线；计算所述背景位移曲线的特征物理量；根据所述特征物理量选取优化步进位，基于所述优化步进位采集物体的正向图像和反向图像；根据所述正向图像和所述反向图像、所述优化步进位以及所述特征物理量完成 X 射线相位衬度成像。

为使本公开的上述目的、特征和优点能更明显易懂，下文特举优选实施例，并配合所附附图，作详细说明如下。

附图说明

为了更清楚地说明本公开实施例的技术方案，下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍。应当理解，以下附图仅示出了本公开的某些实施例，因此不应被看作是对范围的限定。对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他相关的附图。

图 1 为本公开实施例 X 射线相位衬度成像方法的流程图。

图 2A-2I 分别为第一步至第九步的背景图像。

图 3A-3C 分别为平均光强、可见度和初始相位的示意图。

图 4A 为物体的正向图像；图 4B 为物体的反向图像；图 4C 为相位步进方法获得物体的折射图像；图 4D 为本公开实施例 X 射线相位衬度成像方法获得物体的折射图像；图 4E 为折射角轮廓对比图。

具体实施方式

为使本公开的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本公开进一步详细说明。其中一些但并非全部的实施例将被示出。实际上，本公开的各种实施例可以许多不同形式实现，而不应被解释为限于此数所阐述的实施例。在不冲突的情况下，本公开中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

在本公开实施例提供一种 X 射线相位衬度成像方法，用于大视场快速成像。该方法利用 X 射线相位衬度成像装置进行成像。X 射线相位衬度成像装置包括：X 射线管、源光栅、分束光栅、分析光栅、X 射线探测器。

X 射线管用于产生 X 射线。源光栅用于分光，把 X 射线管产生的大焦点光束分成狭小的线光源。分束光栅用于在分析光栅处产生自成像条纹。分析光栅用于与分束光栅在此处的自成像条纹产生摩尔条纹以放大变化的信息。X 射线探测器用于记录产生的图像。X 射线相位衬度成像装置还可包括：光学精密位移台、样品台、光学平台以及控制计算机等。源光栅、分束光栅、分析光栅均通过光学精密位移台安装于光学平台之上。

如图 1 所示，所述 X 射线相位衬度成像方法，包括：

步骤 S101，采集背景图像并形成背景位移曲线。

在本步骤中，在不放物体的情况下，控制光栅在垂直于其栅线方向等间距步进。本实施例中，光栅的步进数优选为 5-9 步；光栅每步进一步，采集一幅背景图像。背景图像包括与步进数相等的图像，背景图像每个像素点的不同步组成一条位移曲线。如图 2A-2I 所示，为第一步至第九步的 9 幅背景图像。背景图像采集完成后，将光栅移回原位置。分析背景图像的光强信息，得到背景位移曲线。

传统正反投影方法基于精确的背景位移曲线，需密采集背景图像，再通过曲线拟合获得位移曲线，在半腰位置处采集物体图像，因此数据采集相对较复杂。而本公开实施例的 X 射线相位衬度成像方法，无需密采集背

景图像，只需采集与光栅步进数相等的背景图像，通常 5-9 幅即可，因此数据采集量小，相对更简单。

步骤 S102，计算背景位移曲线的特征物理量。

所述特征物理量包括：平均光强、可见度以及初始相位。

正反投影方法需要计算每个像素的背景位移曲线腰位处斜率，涉及拟合和微分计算，不仅计算量大，而且计算精度不高。本公开实施例的 X 射线相位衬度成像方法，通过傅里叶分析方法计算背景位移曲线特征物理量，无需计算位移曲线斜率。该过程可以并行计算，简化了计算过程，加快了计算速度。

背景图像用余弦函数表示为：

$$I_b(x, y) = a(x, y) + a(x, y)V_0(x, y)\cos\left[2\pi\frac{x_g}{p_2} + \varphi(x, y)\right] \quad (1)$$

其中 $I_b(x, y)$ 为背景图像灰度值， $a(x, y)$ 为背景位移曲线的平均光强， $V_0(x, y)$ 为背景位移曲线的可见度， x_g 为光栅相对位移， p_2 为分析光栅的周期， $\varphi(x, y)$ 为背景位移曲线的初始相位。本实施例根据采集的背景图像可计算出背景位移曲线的平均光强、可见度以及初始相位三个特征物理量。

设 $I_{bn}(x, y)$ 为第 n 步采集的背景图像，其中 $1 \leq n \leq N$ ， $N \geq 3$ ， N 为步进总数，则光栅相对位移 $x_g = np_2/N$ ，则三个特征物理量可分别通过如下公式计算：

$$a(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_{bn}(x, y) \quad (2)$$

$$V_0(x, y) = \frac{2\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N I_{bn} \cos\left(2\pi\frac{n}{N}\right)\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N I_{bn} \sin\left(2\pi\frac{n}{N}\right)\right)^2}}{\sum_{n=1}^N I_{bn}(x, y)} \quad (3)$$

$$\varphi(x, y) = \arg\left[\sum_{n=1}^N I_{bn} \cos\left(2\pi\frac{n}{N}\right) - i \sum_{n=1}^N I_{bn} \sin\left(2\pi\frac{n}{N}\right)\right] \quad (4)$$

其中函数 $\arg$ 为取辐角，图 3A-图 3C 所示为三个特征物理量的示意图。

步骤 S103，根据背景位移曲线的特征物理量选取优化步进位，基于该优化步进位采集物体的正向图像和反向图像。

物体成像时，可以处于背景位移曲线的任意位置。为优化成像性能，该任意位置通常选取较接近位移曲线腰位的位置。光栅（包括分束光栅与分析光栅）相对位置固定在较接近位移曲线腰位的位置后，采集一圈物体图像完成相衬成像。

根据步骤 S102 中所计算出的初始相位，如图 3C 所示的初始相位，优化选取优化步进位 x_g^0 。本实施例中选取第 3 步进位为优化步进位。将物体置于该优化步进位，并采集物体的正向图像和反向图像，分别如图 4A 和图 4B 所示。

步骤 S104，根据正向图像和反向图像、优化步进位以及特征物理量完成 X 射线相位衬度成像。

本实施例基于背景位移曲线余弦函数模型，利用背景位移曲线三个特征物理量、优化步进位以及如下两式表示的物体正、反向图像，可进一步获得物体的相位和吸收信息。

$$I_s(x, y, \phi) = a(x, y)e^{-M(x, y, \phi)} \left\{ 1 + V_0(x, y) \cos \left[2\pi \frac{x_g^0 + d\theta(x, y, \phi)}{p_2} + \varphi(x, y) \right] \right\} \quad (5)$$

$$I_s(-x, y, \phi + \pi) = a(-x, y)e^{-M(x, y, \phi)} \left\{ 1 + V_0(-x, y) \cos \left[2\pi \frac{x_g^0 - d\theta(x, y, \phi)}{p_2} + \varphi(-x, y) \right] \right\} \quad (6)$$

其中 $I_s(x, y, \phi)$ 、 $I_s(-x, y, \phi + \pi)$ 分别为物体正、反向图像， $M(x, y, \phi)$ 、 $\theta(x, y, \phi)$ 分别为物体的吸收信号和折射信号， x_g^0 为优化步进位， d 为分束光栅与分析光栅间的间距。

定义 F 为正、反向图像投影之比，即 $F = \frac{I_s(x, y, \phi)}{I_s(-x, y, \phi + \pi)}$ ，以及

$$A(x, y) = a(x, y)V_0(x, y) \cos \left[2\pi \frac{x_g^0}{p_2} + \varphi(x, y) \right] \quad (7)$$

$$B(x, y) = a(x, y)V_0(x, y) \sin \left[2\pi \frac{x_g^0}{p_2} + \varphi(x, y) \right] \quad (8)$$

其中 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 分别定义为物体成像步进位振幅余弦量和正弦量。

即可推导出如下的信息提取公式：

当 $A(x, y) - FA(-x, y) = 0$ 且 $B(x, y) + FB(-x, y) \neq 0$ 时

$$\theta(x, y, \phi) = -\frac{p_2}{2\pi d} \sin^{-1} \left[\frac{-a(x, y) + Fa(-x, y)}{B(x, y) + FB(-x, y)} \right] \quad (9)$$

$$M(x, y, \phi) = -\ln \frac{I_s(x, y, \phi) + I_s(-x, y, \phi + \pi)}{C(x, y) + D(x, y)} \quad (10)$$

其中:

$$C(x, y) = a(x, y) + a(-x, y)V_0(x, y) \cos \left[2\pi \frac{x_s^0 + 2\pi d \theta(x, y, \phi)}{p_2} + \varphi(x, y) \right];$$

$$D(x, y) = a(-x, y) + a(x, y)V_0(-x, y) \cos \left[2\pi \frac{x_s^0 - 2\pi d \theta(x, y, \phi)}{p_2} + \varphi(-x, y) \right];$$

其中 $C(x, y)$ 为物体成像步进位加入物体折射信号的正投影光强, $D(x, y)$ 为物体成像步进位加入物体折射信号的反投影光强。

当 $A(x, y) - FA(-x, y) \neq 0$ 时,

$$\theta(x, y, \phi) = \begin{cases} \frac{p_2}{2\pi d}(\gamma_0 - \beta_0) & A(x, y) - FA(-x, y) > 0 \\ & \text{and } \beta_0 > 0 \\ \frac{p_2}{2\pi d}(-\gamma_0 - \beta_0) & A(x, y) - FA(-x, y) > 0 \\ & \text{and } \beta_0 < 0 \\ \frac{p_2}{2\pi d}(\pi - \gamma_0 - \beta_0) & A(x, y) - FA(-x, y) < 0 \\ & \text{and } \beta_0 > 0 \\ \frac{p_2}{2\pi d}(-\pi + \gamma_0 - \beta_0) & A(x, y) - FA(-x, y) < 0 \\ & \text{and } \beta_0 < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中角度 γ_0 和 β_0 为

$$\gamma_0 = \cos^{-1} \left\{ \frac{-a(x, y) + Fa(-x, y)}{\sqrt{[A(x, y) - FA(-x, y)]^2 + [B(x, y) + FB(-x, y)]^2}} \right\} \quad (12)$$

$$\beta_0 = \tan^{-1} \left[\frac{B(x, y) + FB(-x, y)}{A(x, y) - FA(-x, y)} \right] \quad (13)$$

将采集的正反向物体图像, 优化步进位以及三个特征物理量代入公式 (7) - (13), 即可得到 X 射线相位衬度成像的相位信息和吸收信息, 完成 X 射线相位衬度成像。

如图 4C-图 4E 所示, 为了验证本实施例的正确性, 采集了 9 步相位步进的物体图像, 作为对比例的相位步进方法获得物体的折射图像如图 4C 所示, 本实施例获取的折射图像如图 4D 所示。并对两种方法获得的结果

进行对比，如图 4E 所示，两种方法的结果吻合度高。

至此，已经结合附图对本公开实施例进行了详细描述。需要说明的是，在附图或说明书正文中，未绘示或描述的实现方式，均为所属技术领域中普通技术人员所知的形式，并未进行详细说明。此外，上述对各元件和方法的定义并不仅限于实施例中提到的各种具体结构、形状或方式，本领域普通技术人员可对其进行简单地更改或替换。

权利要求

- 1、一种 X 射线相位衬度成像方法，其中，包括：
采集背景图像并形成背景位移曲线；
计算所述背景位移曲线的特征物理量；
根据所述特征物理量选取优化步进位，基于所述优化步进位采集物体的正向图像和反向图像；
根据所述正向图像和所述反向图像、所述优化步进位以及所述特征物理量完成 X 射线相位衬度成像。
- 2、根据权利要求 1 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，所述采集背景图像包括：
在不放物体的情况下，控制光栅在垂直于光栅栅线方向等间距步进，所述光栅每步进一步，采集一幅背景图像；所述光栅的步进数大于等于 3 步。
- 3、根据权利要求 1 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，所述特征物理量包括：平均光强、可见度以及初始相位。
- 4、根据权利要求 1 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，利用傅里叶分析方法计算所述背景位移曲线的特征物理量。
- 5、根据权利要求 1 所述的 X 射线相位衬度成像方法，所述背景图像表示为：

$$I_b(x, y) = a(x, y) + a(x, y)V_0(x, y)\cos\left[2\pi\frac{x_g}{p_2} + \varphi(x, y)\right]$$

其中 $I_b(x, y)$ 为背景图像灰度值， $a(x, y)$ 为背景位移曲线的平均光强， $V_0(x, y)$ 为背景位移曲线的可见度， x_g 为光栅相对位移， p_2 为分析光栅的周期， $\varphi(x, y)$ 为背景位移曲线的初始相位。

- 6、根据权利要求 5 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，所述平均光强为：

$$a(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_{bn}(x, y)$$

其中 $I_{bn}(x, y)$ 为第 n 步采集的背景图像， $1 \leq n \leq N$ ， $N \geq 3$ ， N 为步进

总数。

7、根据权利要求 5 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，所述可见度为：

$$V_0(x, y) = \frac{2\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N I_{bn} \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right)\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N I_{bn} \sin\left(2\pi \frac{n}{N}\right)\right)^2}}{\sum_{n=1}^N I_{bn}(x, y)}$$

。

8、根据权利要求 5 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，所述初始相位为：

$$\varphi(x, y) = \arg\left[\sum_{n=1}^N I_{bn} \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) - i \sum_{n=1}^N I_{bn} \sin\left(2\pi \frac{n}{N}\right)\right]$$

其中，函数 $\arg$ 为取辐角。

9、根据权利要求 1 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，所述物体的正向图像和反向图像为：

$$I_s(x, y, \phi) = a(x, y) e^{-M(x, y, \phi)} \left\{ 1 + V_0(x, y) \cos\left[2\pi \frac{x_g^0 + d\theta(x, y, \phi)}{p_2} + \varphi(x, y)\right] \right\}$$

$$I_s(-x, y, \phi + \pi) = a(-x, y) e^{-M(x, y, \phi)} \left\{ 1 + V_0(-x, y) \cos\left[2\pi \frac{x_g^0 - d\theta(x, y, \phi)}{p_2} + \varphi(-x, y)\right] \right\}$$

其中 $I_s(x, y, \phi)$ 为物体的正向图像， $I_s(-x, y, \phi + \pi)$ 为物体的反向图像， $M(x, y, \phi)$ 、 $\theta(x, y, \phi)$ 分别为物体的吸收信号和折射信号， x_g^0 为所述优化步进位， d 为光束光栅与分析光栅间的间距。

10、根据权利要求 9 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，所示正向图像与所述反向图像的投影之比为 F ，即 $F = \frac{I_s(x, y, \phi)}{I_s(-x, y, \phi + \pi)}$ ，以及

$$A(x, y) = a(x, y) V_0(x, y) \cos\left[2\pi \frac{x_g^0}{p_2} + \varphi(x, y)\right]$$

$$B(x, y) = a(x, y) V_0(x, y) \sin\left[2\pi \frac{x_g^0}{p_2} + \varphi(x, y)\right]$$

其中 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 分别为物体成像步进位的振幅余弦量和正弦量。

11、根据权利要求 10 所述的 X 射线相位衬度成像方法，其中，当 $A(x, y) - FA(-x, y) = 0$ 且 $B(x, y) + FB(-x, y) \neq 0$ 时

$$\theta(x, y, \phi) = -\frac{p_2}{2\pi d} \sin^{-1} \left[\frac{-a(x, y) + Fa(-x, y)}{B(x, y) + FB(-x, y)} \right]$$

$$M(x, y, \phi) = -\ln \frac{I_s(x, y, \phi) + I_s(-x, y, \phi + \pi)}{C(x, y) + D(x, y)}$$

其中：

$$C(x, y) = a(x, y) + a(-x, y) V_0(x, y) \cos \left[2\pi \frac{x_g^0 + 2\pi d \theta(x, y, \phi)}{p_2} + \varphi(x, y) \right];$$

$$D(x, y) = a(-x, y) + a(x, y) V_0(-x, y) \cos \left[2\pi \frac{x_g^0 - 2\pi d \theta(x, y, \phi)}{p_2} + \varphi(-x, y) \right];$$

其中， $C(x, y)$ 为物体成像步进位加入物体折射信号的正投影光强，

$D(x, y)$ 为物体成像步进位加入物体折射信号的反投影光强；

当 $A(x, y) - FA(-x, y) \neq 0$ 时，

$$\theta(x, y, \phi) = \begin{cases} \frac{p_2}{2\pi d} (\gamma_0 - \beta_0) & A(x, y) - FA(-x, y) > 0 \\ & \text{and } \beta_0 > 0 \\ \frac{p_2}{2\pi d} (-\gamma_0 - \beta_0) & A(x, y) - FA(-x, y) > 0 \\ & \text{and } \beta_0 < 0 \\ \frac{p_2}{2\pi d} (\pi - \gamma_0 - \beta_0) & A(x, y) - FA(-x, y) < 0 \\ & \text{and } \beta_0 > 0 \\ \frac{p_2}{2\pi d} (-\pi + \gamma_0 - \beta_0) & A(x, y) - FA(-x, y) < 0 \\ & \text{and } \beta_0 < 0 \end{cases}$$

其中角度 γ_0 和 β_0 为：

$$\gamma_0 = \cos^{-1} \left\{ \frac{-a(x, y) + Fa(-x, y)}{\sqrt{[A(x, y) - FA(-x, y)]^2 + [B(x, y) + FB(-x, y)]^2}} \right\}$$

$$\beta_0 = \tan^{-1} \left[\frac{B(x, y) + FB(-x, y)}{A(x, y) - FA(-x, y)} \right]$$

。

1/2

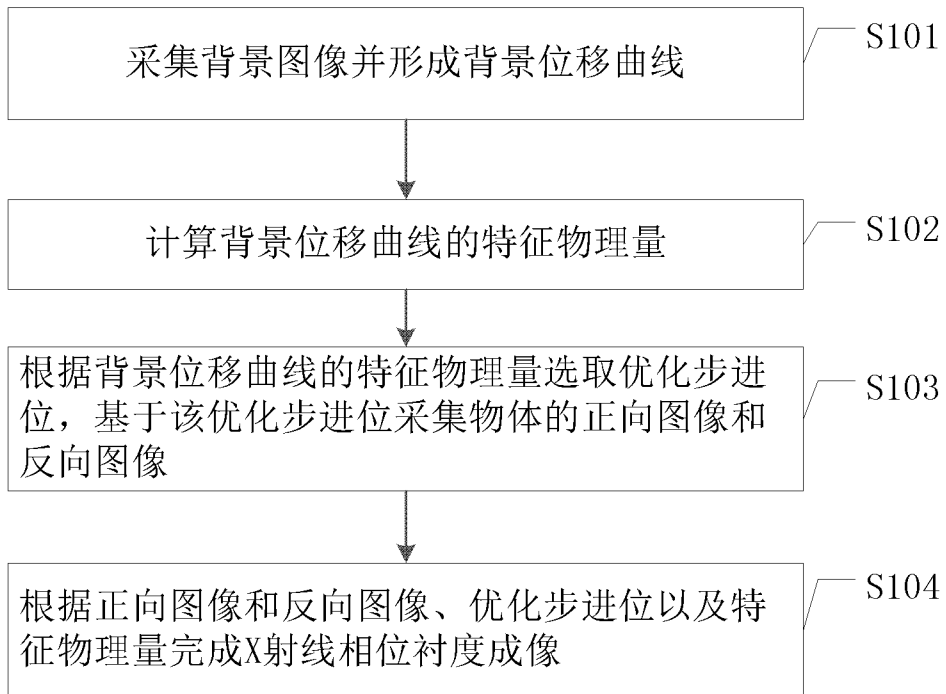
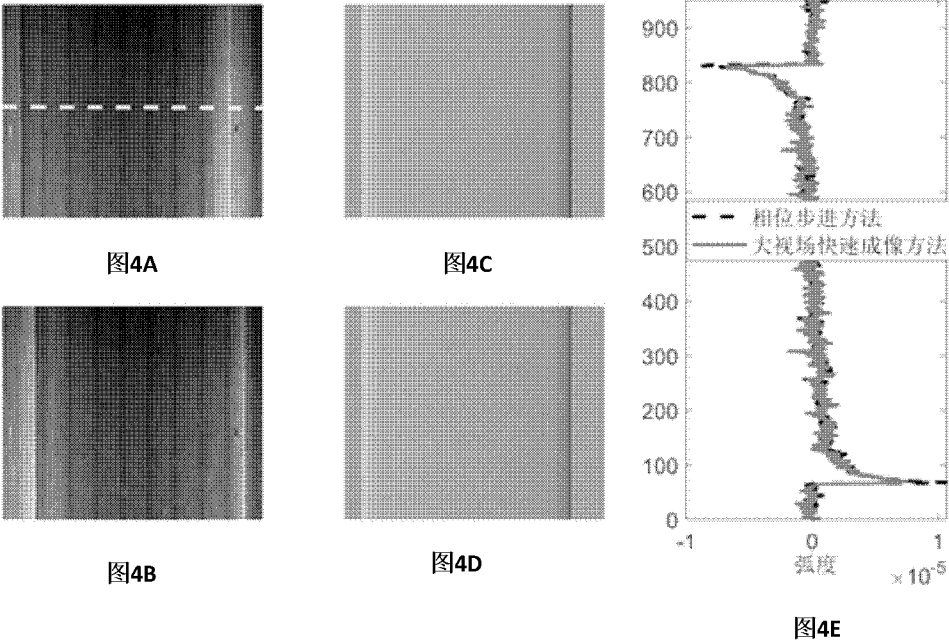
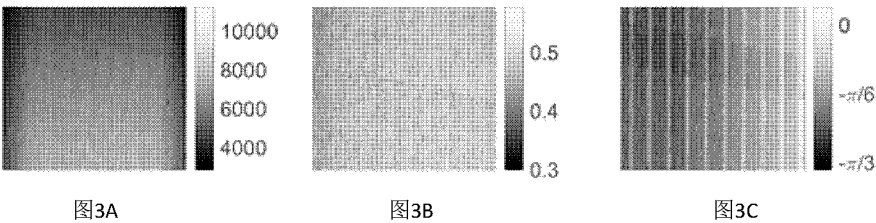
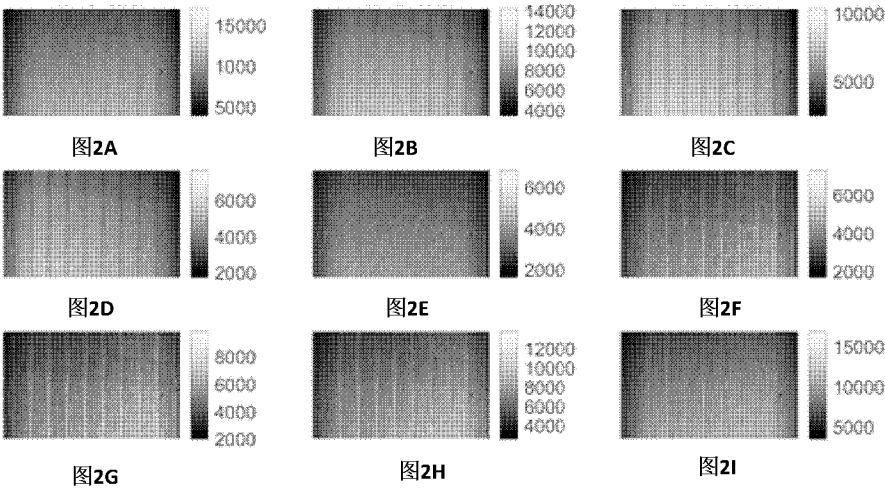


图 1



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/081508

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 23/041(2018.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N23/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 中国科学技术大学, 吴朝, X射线, 相位衬度, 相衬, 成像, 背景, 光栅, 位移, 移动, 步进, 光强曲线, 背景位移曲线, 光强, 可见度, 对比度, 衬比度, 初始相位, 傅里叶, 傅立叶, 灰度, 正, 反, 图像, x-ray, phase-contrast, phase contrast, imaging, XPCI, stepping, grating, forward image, reverse image

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 102221565 A (TSINGHUA UNIVERSITY et al.) 19 October 2011 (2011-10-19) description, paragraphs [0006]-[0024] and [0093]-[0118], and figures 1-5	1-4
Y	CN 101467889 A (INSTITUTE OF HIGH ENERGY PHYSICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 01 July 2009 (2009-07-01) description, page 4, and figures 1-5	1-4
A	CN 201191275 Y (NUCTECH CO., LTD. et al.) 04 February 2009 (2009-02-04) entire document	1-11
A	CN 105675631 A (HEFEI TAIHE OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD.) 15 June 2016 (2016-06-15) entire document	1-11
A	CN 107144581 A (BEIHANG UNIVERSITY) 08 September 2017 (2017-09-08) entire document	1-11
A	CN 102509094 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY SHENZHEN GRADUATE SCHOOL) 20 June 2012 (2012-06-20) entire document	1-11



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 December 2019

Date of mailing of the international search report

02 January 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/081508

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 9795350 B2 (CARESTREAM HEALTH, INC.) 24 October 2017 (2017-10-24) entire document	1-11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/081508

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	102221565	A	19 October 2011	JP	5462408	B2	02 April 2014
				US	9134259	B2	15 September 2015
				DE	112010005498	T5	07 February 2013
				JP	2013524897	A	20 June 2013
				CN	102221565	B	12 June 2013
				WO	2011130896	A1	27 October 2011
				US	2013094625	A1	18 April 2013
CN	101467889	A	01 July 2009	CN	101467889	B	25 August 2010
CN	201191275	Y	04 February 2009	None			
CN	105675631	A	15 June 2016	None			
CN	107144581	A	08 September 2017	CN	107144581	B	27 September 2019
CN	102509094	A	20 June 2012	None			
US	9795350	B2	24 October 2017	US	2015092916	A1	02 April 2015
				US	2017035378	A1	09 February 2017
				US	9494534	B2	15 November 2016

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/081508

A. 主题的分类

G01N 23/041(2018.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01N23/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 中国科学技术大学, 吴朝, X射线, 相位衬度, 相衬, 成像, 背景, 光栅, 位移, 移动, 步进, 光强曲线, 背景位移曲线, 光强, 可见度, 对比度, 衬比度, 初始相位, 傅里叶, 傅立叶, 灰度, 正, 反, 图像, x-ray, phase-contrast, phase contrast, imaging, XPCI, stepping, grating, forward image, reverse image

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 102221565 A (清华大学 等) 2011年 10月 19日 (2011 - 10 - 19) 说明书第[0006]-[0024]、[0093]-[0118]段, 图1-5	1-4
Y	CN 101467889 A (中国科学院高能物理研究所) 2009年 7月 1日 (2009 - 07 - 01) 说明书第4页, 图1-5	1-4
A	CN 201191275 Y (同方威视技术股份有限公司 等) 2009年 2月 4日 (2009 - 02 - 04) 全文	1-11
A	CN 105675631 A (合肥泰禾光电科技股份有限公司) 2016年 6月 15日 (2016 - 06 - 15) 全文	1-11
A	CN 107144581 A (北京航空航天大学) 2017年 9月 8日 (2017 - 09 - 08) 全文	1-11
A	CN 102509094 A (哈尔滨工业大学深圳研究生院) 2012年 6月 20日 (2012 - 06 - 20) 全文	1-11
A	US 9795350 B2 (CARESTREAM HEALTH, INC.) 2017年 10月 24日 (2017 - 10 - 24) 全文	1-11

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 12月 20日

国际检索报告邮寄日期

2020年 1月 2日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

徐锦丹

电话号码 86-(10)-53962464

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/081508

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	102221565	A	2011年 10月 19日	JP	5462408	B2	2014年 4月 2日
				US	9134259	B2	2015年 9月 15日
				DE	112010005498	T5	2013年 2月 7日
				JP	2013524897	A	2013年 6月 20日
				CN	102221565	B	2013年 6月 12日
				WO	2011130896	A1	2011年 10月 27日
				US	2013094625	A1	2013年 4月 18日
CN	101467889	A	2009年 7月 1日	CN	101467889	B	2010年 8月 25日
CN	201191275	Y	2009年 2月 4日	无			
CN	105675631	A	2016年 6月 15日	无			
CN	107144581	A	2017年 9月 8日	CN	107144581	B	2019年 9月 27日
CN	102509094	A	2012年 6月 20日	无			
US	9795350	B2	2017年 10月 24日	US	2015092916	A1	2015年 4月 2日
				US	2017035378	A1	2017年 2月 9日
				US	9494534	B2	2016年 11月 15日