

(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
2016 年 10 月 13 日 (13.10.2016)



(10) 国际公布号
WO 2016/161844 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 23/04 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/073918
- (22) 国际申请日: 2016 年 2 月 17 日 (17.02.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201510163516.2 2015 年 4 月 8 日 (08.04.2015) CN
- (71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。同方威视技术股份有限公司 (NUCTECH COMPANY LIMITED) [CN/CN]; 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层, Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人: 邢宇翔 (XING, Yuxiang); 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层由同方威视技术股份有限公司转交, Beijing 100084 (CN)。邓智 (DENG, Zhi); 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层由同方威视技术股份有限公司转交, Beijing 100084 (CN)。

(CN)。沈乐 (SHEN, Le); 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层由同方威视技术股份有限公司转交, Beijing 100084 (CN)。冯初晴 (FENG, Chuqing); 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层由同方威视技术股份有限公司转交, Beijing 100084 (CN)。沈淇 (SHEN, Qi); 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层由同方威视技术股份有限公司转交, Beijing 100084 (CN)。张丽 (ZHANG, Li); 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层由同方威视技术股份有限公司转交, Beijing 100084 (CN)。陈志强 (CHEN, Zhiqiang); 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层由同方威视技术股份有限公司转交, Beijing 100084 (CN)。康克军 (KANG, Kejun); 中国北京市海淀区双清路同方大厦 A 座 2 层由同方威视技术股份有限公司转交, Beijing 100084 (CN)。

- (74) 代理人: 北京律智知识产权代理有限公司 (BEIJING INTELLEGAL INTELLECTUAL PROPERTY AGENT LTD.); 中国北京市朝阳区慧忠路 5 号远大中心 B 座 1802, 1803, 1805, Beijing 100101 (CN)。

[见续页]

(54) Title: ENERGY-SPECTRUM CT IMAGING SYSTEM, DATA ACQUISITION METHOD AND ENERGY-SPECTRUM CT IMAGE RECONSTRUCTING METHOD

(54) 发明名称: 能谱 CT 成像系统及数据采集和重建能谱 CT 图像的方法

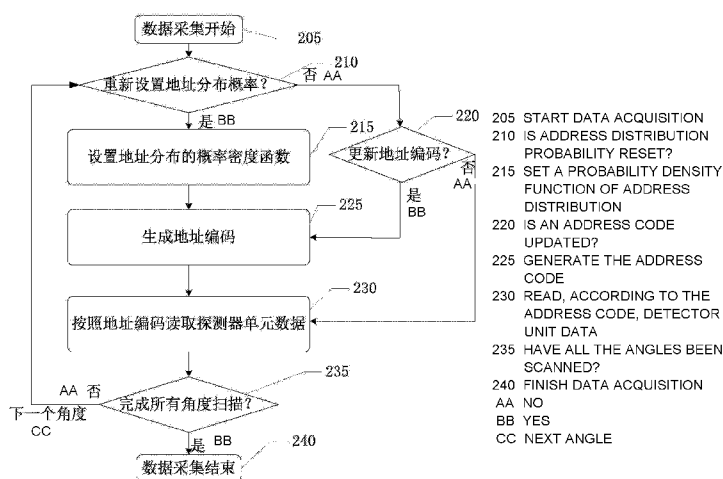


图2

(57) Abstract: An energy-spectrum CT imaging system (100), data acquisition method and energy-spectrum CT image reconstructing method thereof. The energy-spectrum CT imaging system (100) comprises: a photon detector (120) having a plurality of pixels (1202). The data acquisition method for the energy-spectrum CT imaging system (100) can comprise: performing, at a plurality of projection angles and from the photon detector (120), data acquisition on photons passing through an imaged object (115). For each of the projection angles, the data acquisition method comprises: acquiring data from the photon detector (120) according to a plurality of randomly distributed pixel address codes.

(57) 摘要: 能谱 CT 成像系统 (100) 及其数据采集方法以及重建能谱 CT 图像的方法。能谱 CT 成像系统 (100) 包括具有多个像素 (1202) 的光子探测器 (120), 用于该能谱 CT 成像系统 (100) 的数据采集方法可包括在多个投影角度从所述光子探测器 (120) 对穿过被成像物 (115) 的光子进行数据采集, 对于每一投影角度, 该数据采集方法包括按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器 (120) 获取数据。

WO 2016/161844 A1



(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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, 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, 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))。

能谱 CT 成像系统及数据采集和重建能谱 CT 图像的方法

本申请基于申请号为 201510163516.2、申请日为 2015 年 4 月 8 日的中国专利申请提出，并要求该中国专利申请的优先权，该中国专利申请的全部内容在此引入本申请作为参

技术领域

本公开涉及 CT 成像技术，具体而言涉及能谱 CT 成像系统及其数据采集方法，以及重建能谱 CT 图像的方法。

背景技术

X 射线 CT 成像技术在医疗、安检、工业无损检测等领域有着非常广泛的应用。能谱 CT 是近年来受到普遍关注和迅速发展的研究方向。目前基于光子计数探测器的能谱 CT 系统是能谱 CT 的主要实现方式之一。国际上有多家研究单位和公司致力于研究和生产适用于 X 光 CT 的光子计数探测器。

光子计数探测器对接收到的光子进行处理，按照能量阈值把接收到的光子归到相应的计数器，从而使得可以选择能量窗采集多个能量下的 X 射线穿过物体的信号数据。通过对应的能谱 CT 图像重建算法可以得到物体的三维物理信息，其中包括线性衰减系数、电子密度、等效原子序数、材料分布等等。因此，能谱 CT 相在功能上能够比传统 CT 提供被

另一方面，由于计数方式可以通过阈值方式消除电子学噪声，进一步提高数据的可靠性和信噪比。因此，能谱 CT 的图像可以具有更高的图像质量，或者在同等图像质量情况下降低剂量。

光子计数探测器的性能是影响能谱 CT 成像效果的关键因素之一。目前应用于 X 光 CT 的像素化光子计数面阵探测器的像素分辨率主要在 50-100 微米之间，光子计数率在 10^6 - $10^8/\text{mm}^2$ 之间。一方面，为了获得高质量的重建图像，需要采集足够多的光子以降低量子噪声的影响；另一方面，每个像素计数器的计数速度受电子学的硬件信号处理速度限制。由此，虽然减小像素大小有助于获得更高的每平方毫米计数率，但是减小像素使得像素之间的电荷共享问题严重化。而且，像素数目的增加对于探测器的读出速率要求也显著提高。

因此，需要对能谱 CT 进行改进或开发新的能谱 CT 系统。

在所述背景技术部分公开的上述信息仅用于加强对本公开的背景的理解，因此它可以包括不构成对本领域普通技术人员已知的现有技术的信息。

发明内容

本申请公开一种能谱 CT 成像系统及其数据采集方法，以及重建能谱 CT 图像的方法，

能够克服上述问题中的一个或多个。

本公开的其他特性和优点将通过下面的详细描述变得显然,或部分地通过本公开的实践而习得。

根据本公开的一个方面,提供一种能谱 CT 成像系统的数据采集方法,所述能谱 CT 成像系统包括具有多个像素的光子探测器,所述数据采集方法包括在多个投影角度从所述光子探测器对穿过被成像物的光子进行数据采集,对于每一投影角度,该数据采集方法包括:按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器获取数据。

根据本公开的一些实施例,所述像素地址编码利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成。

10 根据本公开的一些实施例,对于第一个投影角度,所述像素地址编码利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成;对于除第一个投影角度外的其余投影角度,所述像素地址编码或者利用为前一投影角度设定的像素地址分布的概率密度函数而生成、或者利用重新设定的像素地址分布的概率密度函数而生成、或者与用于前一投影角度的所述像素地址编码相同。

15 根据本公开的一些实施例,所述按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器采集数据包括:从自所述光子探测器获得的全部数据中按照多个随机分布的像素地址编码选取数据。

根据本公开的一些实施例,所述按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器采集数据包括:从所述光子探测器的全部像素中按照多个随机分布的像素地址编码实时选择

20 像素来获取数据。

根据本公开的另一发明,提供一种能谱 CT 成像系统的数据采集方法,所述能谱 CT 成像系统包括具有多个像素的光子探测器,所述数据采集方法包括在多个投影角度从所述光子探测器对穿过被成像物的光子进行数据采集,对于每一投影角度,该数据采集方法包括:从按照多个随机分布的像素地址编码设置的所述多个像素采集数据。根据本公开的一些实

25 施例,所述光子探测器为面阵探测器或环形探测器。

根据本公开的另一方面,提供一种重建能谱 CT 图像的方法,包括:设置数据采集的多个能量窗;利用如前所述的任一数据采集方法从所述多个能量窗进行数据采集;利用所述像素地址编码生成对应的系统矩阵;将采集到的数据在投影域进行能谱信息分解,得到分解系数投影;通过迭代方法,利用所述分解系数投影进行分解系数的空间分布重建,得到

30 分解系数;根据重建的分解系数进行合成,得到单能量的衰减系数和/或估算被成像物的电子密度和/或等效原子序数分布图。

根据本公开的一些实施例,所述系统矩阵的维度是 $M \times N$, 其中 N 是被重建的图像域像素数目, M 是投影角度数与所述像素地址编码的数量之积。

根据本公开的一些实施例,根据如下公式求分解系数投影:

$$-\ln \int w_k(E) \exp \left(- \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} \phi_\tau(E) \mathbf{A}_\tau \right) dE = \mathbf{p}_k, \quad \mathbf{A}_\tau = \{A_{1,\tau}, A_{2,\tau}, \dots, A_{L,\tau}\}$$

其中 τ 为整数，对应第 τ 个分解项， $w_k(E)$ 为归一化的第 k 个能量窗下的X光能谱分布， $\mathbf{p}_k$ 为对应于光子探测器上采集的数据的 M 维向量， $\phi_\tau(E)$ 为第 τ 个分解基函数， $\mathbf{A}_\tau$ 为第 τ 个分解系数投影， $k=1, 2, \dots, K$ ， K 为能量窗数目， E 是光子能量。

5 根据本公开的一些实施例，根据如下公式通过迭代进行分解系数的空间分布重建：

$$\mathbf{a}_\tau = \underset{\mathbf{a}_\tau}{\operatorname{argmin}} \left\| \operatorname{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mathbf{a}_\tau \right\|_1, \quad s.t. \quad \left\| \mathbf{H} \mathbf{a}_\tau - \mathbf{A}_\tau \right\|_2 \leq \varepsilon$$

其中 ε 为根据数据噪声确定的阈值， $\Phi(i, j, z)$ 为关于成像视野的像素位置 (i, j, z) 的先验函数， $\mathbf{a}_\tau$ 为分解系数， $\mathbf{H}$ 是所述系统矩阵。

根据本公开的一些实施例，根据重建结果通过下式计算单能量的衰减系数：

$$10 \quad \mu(E) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} \mathbf{a}_\tau \phi_\tau(E)。$$

根据本公开的一些实施例，在两个能量窗的情况下， $K=2$ ， $\tau \in [1, 2]$ ， $\phi_\tau(E)$ 分别取为光电效应系数、康普顿散射系数。

根据本公开的一些实施例，等效原子序数分布图、电子密度分布图分别通过下式估算：

$$\mathbf{Z}^{\text{eff}} = \left(\operatorname{diag} \left(\frac{1}{\mathbf{a}_2} \right) \mathbf{a}_1 \right)^{\frac{1}{\lambda-1}}, \quad \lambda \approx 4$$

$$\rho_e = 2\mathbf{a}_2$$

15 其中 $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 对应于 τ 分别为1和2时的 $\mathbf{a}_\tau$ 值。

根据本公开的另一方面，提供一种重建能谱CT图像的方法，包括：设置数据采集的多个能量窗；利用如前所述的任一数据采集方法从所述多个能量窗进行数据采集；利用所述像素地址编码生成对应的系统矩阵；通过迭代方法，对每个能量窗下采集到的数据进行衰减系数的空间分布重建，得到衰减系数；利用衰减系数的重建结果，对被重建的图像域像素逐个进行能谱信息分解，得到分解系数；估算被成像物的电子密度和/或等效原子序数分布图。

20 根据本公开的一些实施例，所述系统矩阵的维度是 $M \times N$ ，其中 N 是被重建的图像域像素数目， M 是投影角度数与所述像素地址编码的数量之积。

根据本公开的一些实施例，根据如下公式通过迭代进行衰减系数重建：

$$25 \quad \mathbf{g}_k = -\log \left(\frac{\mathbf{p}_k}{\mathbf{p}_k^{\text{air}}} \right), \quad \text{及}$$

$$\mu_k = \underset{\mu_k}{\operatorname{argmin}} \left\| \operatorname{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mu_k \right\|_1, \quad s.t. \quad \left\| \mathbf{H} \mu_k - \mathbf{g}_k \right\|_2 \leq \varepsilon$$

其中 k 表示第 k 个能量窗， $\mathbf{g}_k$ 为对采集到的数据进行归一化和负对数处理得到的投影值， μ_k 为衰减系数， $\mathbf{p}_k$ 为对应于光子探测器上采集的数据的 M 维向量， ε 为根据数据噪声确定的阈值， $\Phi(i, j, z)$ 为关于成像视野的像素位置 (i, j, z) 的先验函数， $\mathbf{H}$ 是所述系统矩阵。

根据本公开的一些实施例，根据重建结果 μ_k ，通过求解如下线性方程组对被重建的图像域像素逐个进行能谱信息分解而得到分解系数：

$$\begin{cases} \mu_1(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_{\tau}(i, j, z) \phi_{\tau}(E_1) \\ \dots \\ \mu_k(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_{\tau}(i, j, z) \phi_{\tau}(E_k) \\ \dots \\ \mu_K(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_{\tau}(i, j, z) \phi_{\tau}(E_K) \end{cases}$$

其中 τ 为整数，对应第 τ 个分解项， $k=1, \dots, K$ ， K 为能量窗数目， $\phi_{\tau}(E)$ 为第 τ 个分解基函数，

5 $a_{\tau}(i, j, z)$ 为第 τ 个分解系数， E_k 表示第 k 个能量窗的等效光子能量。

根据本公开的一些实施例，在两个能量窗的情况下， $K=2$ ， $\tau \in [1, 2]$ ， $\phi_{\tau}(E)$ 分别取为光电效应系数、康普顿散射系数。

根据本公开的一些实施例，等效原子序数分布图、电子密度分布图分别通过下式估算：

$$\mathbf{Z}^{\text{eff}} = \left(\text{diag} \left(\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{a}_2} \right) \mathbf{a}_1 \right)^{\frac{1}{\lambda-1}}, \lambda \approx 4$$

$$\rho_e = 2\mathbf{a}_2$$

10 其中 $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 对应于 τ 分别为1和2时的 $\mathbf{a}_{\tau}$ 值。

根据本公开的另一方面，提供一种能谱CT成像系统，包括：射线发生装置，包括射线源；光子探测器，包括多个像素；及数据采集系统，从所述光子探测器对穿过被成像物的光子进行数据采集，其特征在于，所述数据采集系统按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器获取数据。

15 根据本公开的一些实施例，所述像素地址编码利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成。

根据本公开的一些实施例，所述数据采集系统从所述光子探测器输出的全部数据中按照多个随机分布的像素地址编码选取数据。

20 根据本公开的一些实施例，所述数据采集系统包括电子学系统，所述电子学系统配置为从所述光子探测器的全部像素中按照多个随机分布的像素地址编码实时选择像素来读取数据。

根据本公开的一些实施例，能谱CT成像系统还包括数据处理系统，用于根据前述的任一项重建能谱CT图像的方法利用所述数据采集系统获取的数据重建能谱CT图像。根据本公开的一些实施例，所述光子探测器为面阵探测器或环形探测器。

25 根据本公开的另一方面，提供一种能谱CT成像系统，包括：射线发生装置，包括射线源；光子探测器，包括多个像素；及数据采集系统，从所述光子探测器对穿过被成像物的

光子进行数据采集。按照多个随机分布的像素地址编码设置所述光子探测器的所述多个像素。

根据本公开的一些实施例,所述像素地址编码利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成。

- 5 根据本公开的一些实施例,能谱CT成像系统还包括数据处理系统,用于根据前述任一重建能谱CT图像的方法利用所述数据采集系统获取的数据重建能谱CT图像。根据本公开的一些实施例,所述光子探测器为面阵探测器或环形探测器。

根据本公开的一些实施例的能谱CT成像系统及其数据采集方法以及重建能谱CT图像的方法,能够有效控制电荷共享效应,并提高CT系统处理速度,以及降低系统成本。

10

附图说明

通过参照附图详细描述其示例实施例,本公开的上述和其它特征及优点将变得更加明显。

图1示意性示出根据本公开一些示例实施例的能谱CT成像系统的系统结构示意图;

15

图2示意性示出根据本公开一些示例实施例的数据采集流程图;

图3a和图3b示意性示出根据本公开一些示例实施例的随机分布或随机选择的探测器像素,其中图3a为随机均匀分布模式,图3b为按照特定概率密度例如中间概率大、边缘概率小的随机分布模式;

- 20 图4a和图4b示意性示出根据本公开一些示例实施例的投影数据比较,其中图4a示出普通能谱CT采集到的一个能量窗的投影数据,图4b示出根据随机分布的像素地址编码采集前者十分之一数据得到的一个能量窗下的投影数据;

图5a和图5b示出根据本公开一些示例实施例进行能谱CT重建的结果示例,其中图5a是电子密度分布图,图5b是等效原子序数分布图;及

- 25 图6示出根据本公开一实施例的能谱CT结构示意图,其包括具有预定义的随机分布像素的探测器。

具体实施方式

- 30 现在将参考附图更全面地描述示例实施例。然而,示例实施例能够以多种形式实施,且不应被理解为限于在此阐述的实施例;相反,提供这些实施例使得本公开将全面和完整,并将示例实施例的构思全面地传达给本领域的技术人员。在图中相同的附图标记表示相同或类似的部分,因而将省略对它们的重复描述。

- 35 此外,所描述的特征、结构或特性可以以任何合适的方式结合在一个或更多实施例中。在下面的描述中,提供许多具体细节从而给出对本公开的实施例的充分理解。然而,本领域技术人员将意识到,可以实践本公开的技术方案而没有所述特定细节中的一个或更多,或者可以采用其它的方法、组元、材料、装置、步骤等。在其它情况下,不详细示出或描

述公知结构、方法、装置、实现、材料或者操作以避免模糊本公开的各方面。

附图中所示的方框图仅仅是功能实体，不一定必须与物理上独立的实体相对应。即，可以采用软件形式来实现这些功能实体，或在一个或多个硬件模块或集成电路中实现这些功能实体，或在不同网络和/或处理器装置和/或微控制器装置中实现这些功能实体。

5 附图中所示的流程图仅是示例性说明，不是必须包括所有的步骤。例如，有的步骤还可以分解，而有的步骤可以合并或部分合并，因此实际执行的顺序有可能根据实际情况改变。

10 图1示意性示出根据本公开一些示例实施例的能谱CT成像系统100的系统结构示意图。

如图1所示，能谱CT成像系统100可包括射线发生装置105、机械运动系统110、光子探测器120、以及数据采集系统130。根据本公开的系统可以通过圆轨道扫描实现，也可以通过螺旋轨迹扫描实现，可用于三维能谱CT成像。

射线发生装置105可包括射线源，用于发射例如X射线。

15 机械运动系统110用于使被成像物与所述射线源发生相对运动。机械运动系统110可例如包括机械运动装置和对应的控制系统（未示出）。可以是被成像物体115运动而射线源和/或探测器120保持静止（图1所示方式），也可以是射线源和/或探测器运动，而物体保持静止。一般在医疗领域中避免转动病人，可通过转动源和/或探测器实现。在工业无损检测中，转动和平移物体的方式比较常见。对于CT成像，起作用的是相对运动，所以两

20 种方式等效。

光子探测器120可包括多个像素1202（如图3a所示），用于接收并处理穿过物体的光子。

数据采集系统130从所述光子探测器120对穿过被成像物115的光子进行数据采集。根据本公开的发明构思，数据采集系统130按照多个随机分布的像素地址编码从光子探测器

25 120获取数据，如下面将要详细描述。

根据本公开的一些实施例，光子探测器120包括电子学系统125。数据采集系统130从电子学系统125输出的全部数据中按照多个随机分布的像素地址编码选取数据。

根据本公开的另一些实施例，数据采集系统130包括电子学系统125。电子学系统125配置为从光子探测器120的全部像素中按照多个随机分布的像素地址编码实时选择像素来

30 读取数据。

根据本公开的另一些实施例，如图3a、图3b和图6所示，可按照多个随机分布的像素地址编码设置光子探测器120的多个像素1205。另外，如图3a、图3b和图6所示，光子探测器120可为例如面阵探测器或环形探测器。

能谱CT成像系统100还可包括主控制器140及数据处理装置135。主控制器140负责能

35 谱CT系统运行过程的主控制，包括机械转动、电气控制、安全连锁控制等。数据处理装

置135对由数据采集系统130获得的数据进行处理，获得能谱CT任意能量下的衰减系数图像。另外，也可由此计算等效原子序数和电子密度分布图。这些图可通过断层或者三维可视化方式在显示器上显示。主控制器140及数据处理装置135可以是单个PC，也可以是工作站或计算机集群。

5

图2示意性示出根据本公开一些示例实施例的数据采集流程图。下面参照图2、图3a和图3b描述根据本公开的从光子探测器120获取数据的方法。

根据本公开的发明构思的数据采集方法，对于每一投影角度，该方法包括：按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器获取数据。

10 根据本公开的一些实施例，光子探测器120包括电子学系统125，该方法包括从自所述光子探测器获得的全部数据中按照多个随机分布的像素地址编码选取数据。

根据本公开的另一些实施例，数据采集系统130包括电子学系统125。电子学系统125配置为从光子探测器120的全部像素中按照多个随机分布的像素地址编码实时选择像素来读取数据。该方法包括从所述光子探测器的全部像素中按照多个随机分布的像素地址编码
15 实时选择像素来获取数据。

参照图2，在各个投影角度，可以按照一定的概率产生 N_s 个随机分布的像素地址编码，按照这些地址编码从探测器读取数值。这 N_s 个探测器像素的地址可以通过参数设置来控制其在整个探测器上的分布模式，即设置像素地址的概率密度函数。

随机分布的被读取像素的具体示例如图3a和3b所示。虚线网格表示实际的探测器单元
20 矩阵，深灰色小方格表示在某一角度数据采集过程中选择的数据输出像素。图3a为按照均匀分布随机采样。图3b为按照特定概率密度，例如中间概率大、边缘概率小的方式进行的随机采样。

记探测器的总像素单元数目为 N_{det} ，数据采集过程中每个视角读取的数据数目为 $N_s \leq N_{\text{det}}$ 。根据本公开的技术方案， N_s 可远小于 N_{det} ，例如小于 N_{det} 的50%，或更进一步地，小于
25 N_{det} 的20%。

如图2所示，根据本公开一些实施例的方法包括如下处理。

数据采集开始 205 之后，判断是否重新设置地址分布概率 210。

如果为是，则设置地址分布的概率密度函数 215，并进行生成地址编码 225，然后按照地址编码读取探测器单元数据 230。

30 如果为否，则判断是否更新地址编码 220。如果为是，则转到 225，否则转到 230。例如，对于除第一个投影角度外的其余投影角度，像素地址编码可以利用为前一投影角度设定的像素地址分布的概率密度函数而生成（转到 225）；或者，与用于前一投影角度的所述像素地址编码相同（转到 230）。

在按照地址编码读取探测器单元数据 230 之后，判断是否完成所有角度扫描。如果为
35 否，则对下一个角度判断是否重新设置地址分布概率 210。如果为是，则完成数据采集 240。

下面说明根据本公开的利用通过前述方法采集的数据进行能谱 CT 图像重建的方法。

设采集数据的多个能量窗（或谱） $w_k(E)$, $k=1,2,\dots,K$ 。K 为 能量窗数目, $K=2$ 时为双能成像系统。各个 $w_k(E)$ 覆盖的能量范围可以有重叠部分也可以完全分开。多能 CT 的数据
5 分别为用 $\mathbf{p}_k$ 表示:

$$-\ln \int w_k(E) \exp(-\mathbf{H}\boldsymbol{\mu}(E)) dE = \mathbf{p}_k \quad (1)$$

其中, E 是光子能量。 $w_k(E)$ 为归一化的第 k 个能量窗下的 X 光能谱分布, 可以是多种方式产生, 例如设置光子计数探测器的能窗阈值, 或者在光源处使用不同的滤光片等。 $\boldsymbol{\mu}(E)$ 是物体的衰减系数, $\mathbf{H}$ 是 $M \times N$ 维投影矩阵, $\mathbf{p}_k$ 为 M 维向量, 即从光子计数探测器的随机
10 分布的像素上采集 M 条射线的的数据。在本公开中, 这样的光子计数探测器可称为随机地址编码的光子计数探测器 Coded-PCD。

能谱 CT 的重建从框架上可以有三种方式（参见 Y. Xing, *et al.*, "A Reconstruction Method for Dual High-Energy CT With MeV X-Rays," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 537-546, 2011）: （1）预处理方式: 首先把采集到的数据在投影域进行能谱
15 信息分解, 然后通过迭代进行空间信息重建, 再根据重建的空间信息进行合成; （2）后处理方式: 首先对于每一个能谱下的数据进行空间信息重建, 然后在图像域进行能谱信息分解; （3）综合处理方式: 建立综合的数据模型, 通过迭代重建, 同时获得能谱相关和空间位置相关信息。

根据本公开的能谱 CT 重建可以在预处理和后处理方法框架下完成。其中的能谱信息
20 分解方式以及合成可以使用领域内现有的技术完成（参见 G. Zhang, *et al.*, "A practical reconstruction method for dual energy computed tomography," *Journal of X-ray Science and Technology*, vol. 16, pp. 67-88 2008 以及 Y. Xing, *et al.*, "A General Adaptive Decomposition method for Multi-Energy Spectral CT," in *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE*, Seoul, Korea, 2013, pp. M12-15）。

25 空间信息重建方法可结合光子探测器的数据分布情况针对性地如下进行处理。

记空间信息分布的投影数据为 $\mathbf{y}$, 待重建的空间信息为 $\mathbf{x}$, 根据光子探测器的数据采集方式, 有:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (2)$$

此处 $\mathbf{H}$ 的维度是 $M \times N$, M =投影角度数 $\times N_s$, N 是被重建的图像域像素数目。（2）式
30 异于常规 CT 的空间信息重建之处在于系统矩阵 $\mathbf{H}$ 对应的是随机分布的探测器单元位置, 而且可以是稀疏采样, 即 $M \ll N$ 。即, 每个角度下数据采集的探测器单元数目可以远小于总的探测器单元数目 N_{det} 。当 $M \ll N$ 时, (2) 是一个不定方程组求解问题。在本公开中, 通过稀疏条件限制求解:

$$\mathbf{x} = \arg \min \left(\left| \text{diag}(\boldsymbol{\Phi}(i, j, z)) \nabla \mathbf{x} \right| \right), \quad s.t. \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|_2 < \varepsilon \quad (3)$$

ε 为由数据噪声情况确定的常数, (i, j, z) 为被重建像素的三维位置坐标, $\Phi(i, j, z)$ 是与成像视野的像素位置 (i, j, z) 有关的先验函数, 可以预先设定或者通过探测器数据采样分布的概率密度函数计算得到 (参见 E. Y. Sidky, et al., "Accurate image reconstruction from few-views and limited-angle data in divergent-beam CT," *Journal of X-Ray Science and Technology*, vol. 14, pp. 119-139, 2006)。

$|\cdot|$ 为 1 阶范数: $|\mathbf{x}| = \sum |x_i|$ 。

$$\|\nabla \mathbf{x}\|_1 = TV(\mathbf{x}) = \sum_{s,t} \sqrt{(x_{s,t} - x_{s,t-1})^2 + (x_{s,t} - x_{s-1,t})^2}$$

根据拉格朗日乘子法, (3) 可以通过下式求解:

$$\mathbf{x} = \arg \min \left(|\text{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mathbf{x}| + \lambda \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|_2 \right) \quad \lambda > 0 \quad (4)$$

此处 λ 是调节稀疏条件作用和数据保真性的因子, 可以根据经验设置为一个常数。当 N_s 与 N_{det} 接近时可以提高 λ 的取值。公式 (3) 和 (4) 的数值求解可以通过使用本领域公知的数值优化方法如 ART-TV (参见 Y. Sidky, et al., "Accurate image reconstruction from few-views and limited-angle data in divergent-beam CT," *Journal of X-Ray Science and Technology*, vol. 14, pp. 119-139, 2006) 或者 ADMM (参见 J. Yang and Y. Zhang, "Alternating Direction Algorithms for l1-problems in Compressive Sensing," *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 33, pp. 250-278, 2011) 的方法迭代完成。

下面说明根据本公开一些实施例的利用通过前述方法采集的数据进行能谱 CT 图像重建的方法。

根据一些实施例, 采用图 1 所示的能谱 CT 系统架构, 使用普通 X 光机, 采集 2 个能量窗的数据, 一圈采集 N_θ 个角度, 每个角度使用同样参数的高斯分布的概率密度函数, 但生成不同的样本, 即不同的地址编码, 进行探测器读数, 且 $N_s = N_{\text{det}}/10$ 。

图 4a 和图 4b 示意性示出根据本公开一些示例实施例的投影数据比较, 其中图 4a 示出普通能谱 CT 采集到的一个能量窗的投影数据, 图 4b 示出根据随机分布的像素地址编码采集前者十分之一数据得到的一个能量窗下的投影数据。图 5a 和图 5b 示出根据本公开一些示例实施例进行能谱 CT 重建的结果示例, 其中图 5a 是电子密度分布图, 图 5b 是等效原子序数分布图。

下面分别以预处理能谱 CT 重建的方法框架、及后处理能谱 CT 重建的方法框架为例进行说明。

预处理方式进行能谱 CT 重建

1) 按照概率密度函数生成地址编码, 按照地址编码进行数据采集。记录地址编码, 生成对应的系统矩阵 $\mathbf{H}$ 。但本公开不限于此, 例如, 也可以根据记录的地址编码, 在重建过

程中实时计算系统矩阵的元素值。系统矩阵 $\mathbf{H}$ 的生成为本领域所公知，此处不再赘述。

2) 计算 $\Phi(i, j, z)$ 。假设定义各个投影角度 θ 下探测器数据读取的采样点分布的概率密度函数为 $\text{pdf}(u, v, \theta)$ ， u, v 表示探测器位置， θ 表示投影角度，可以设（但是不限于）

$$\Phi(i, j, z) = [\mathbf{H}_0^T \times \text{pdf}(u, v, \theta)]^{-p}, \quad 1/3 < p < 3,$$

- 5 其中 $\mathbf{H}_0$ 为采集全部探测器数据情况下的系统矩阵。此步骤通过一次反投影和结果求幂次运算完成。特殊情况下，例如无任何先验知识且均匀分布随机采样的情况下，可以设 $\Phi(i, j, z) = 1$ 。

3) 从 2 个能量窗的所有探测器数据进行解析得到分解系数投影。记得到的分解系数投影为 $\mathbf{A}_\tau$ 。

- 10 用公式表示为根据下式求 $\mathbf{A}_\tau$ ：

$$-\ln \int w_k(E) \exp \left(- \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} \phi_\tau(E) \mathbf{A}_\tau \right) dE = \mathbf{p}_k,$$

$$\mathbf{A}_\tau = \{A_{1,\tau}, A_{2,\tau}, \dots, A_{L,\tau}\}.$$

τ 为整数，对应第 τ 个分解项，在 2 个能量窗的情况下 $\tau \in [1, 2]$ 。 $\phi_\tau(E)$ 为第 τ 个分解基函数， $\mathbf{A}_\tau$ 为第 τ 个分解系数投影。该步骤可以使用本领域内现有的方法完成，例如双效应分解或者基材料分解。此处可选择 $\phi_{1,2}(E)$ 为光电效应系数、康普顿散射系数，但本公开不限于此。

- 15 4) 使用 3) 得到的结果进行分解系数重建，得到分解系数图像，即对所有 $\mathbf{A}_\tau$ ，使用如下方式重建获得 $\mathbf{a}_\tau$ ：

$$\mathbf{a}_\tau = \underset{\mathbf{a}_\tau}{\text{argmin}} \left\| \text{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mathbf{a}_\tau \right\|_1, \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{H} \mathbf{a}_\tau - \mathbf{A}_\tau\|_2 \leq \varepsilon$$

- 20 此处 ε 为一个小的阈值。此处给出一种具体实现过程示例，但不排斥其它迭代方法实现这一步骤。因为对每个 $\mathbf{a}_\tau$ 均使用下面的过程得到，所以在下面的叙述中省略了下标 τ 。

a. 设定迭代初值为 $\mathbf{a}^0$ ；

b. 进行保真项更新，即计算

$$\mathbf{a}_{\text{fit}}^{n+1} = \mathbf{a}_{\text{fit}}^n + \frac{\mathbf{A}_m - \mathbf{H}_m \mathbf{a}_{\text{fit}}^n}{\|\mathbf{H}_m\|^2} (\mathbf{H}_m)^T \quad m = 1, 2, \dots, M$$

- 25 c. 非负性约束更新(这一步根据能谱分解方法而定，例如基材料分解，也可以省略)

$$\mathbf{a}_{\text{pos}}^{n+1} = \max(\mathbf{0}, \mathbf{a}_{\text{fit}}^{n+1})$$

d. 先验约束更新：

$$\text{i) } \mathbf{a}_{\text{cons}}^0 = \mathbf{a}_{\text{pos}}^{n+1}$$

ii) 进行 Q 次全变分最小化迭代（此处可以使用梯度下降法，但不限于这个方法），

- 30 Q 可为自行选择的整数，例如在 5 至 100 之间。

$$\mathbf{a}_{\text{cons}}^{q+1} = \mathbf{a}_{\text{cons}}^q + \alpha \nabla \left(\left\| \text{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mathbf{a}_{\text{cons}}^q \right\|_1 \right), \quad q = 1, \dots, Q$$

e. 令 $\mathbf{a}_{\text{fit}}^{n+1} = \mathbf{a}_{\text{cons}}^Q$, 再进行 b-e 步, 直到满足收敛条件停止迭代。

5) 根据上述重建结果 $\mathbf{a}_\tau, \tau=1, \dots, \Gamma$, 合成计算单能量的 $\mu(E)$,

$$\mu(E) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} \mathbf{a}_\tau \phi_\tau(E),$$

也可由 $\mu(E)$ 、 $\mathbf{a}_\tau, \tau=1, \dots, \Gamma$ 估计被成像物的电子密度、等效原子序数分布图。在使用光

5 电效应系数、康普顿散射系数作为 $\phi(E)$ 的情况下,

$$\mathbf{Z}^{\text{eff}} = \left(\text{diag} \left(\frac{1}{\mathbf{a}_2} \right) \mathbf{a}_1 \right)^{\frac{1}{\lambda-1}}, \lambda \approx 4$$

$$\rho_e = 2\mathbf{a}_2$$

后处理方式进行能谱 CT 重建

1) 按照概率密度函数生成地址编码, 按照地址编码进行数据采集。记录地址编码, 生成对应的系统矩阵 $\mathbf{H}$ 。但本公开不限于此, 例如, 也可以根据记录的地址编码, 在重建过程中实时计算系统矩阵的元素值。系统矩阵 $\mathbf{H}$ 的生成为本领域所公知, 此处不再赘述。

2) 计算 $\Phi(i, j, z)$ 。例如定义各个投影角度 θ 下探测器数据读取的采样点分布的概率密度函数为 $\text{pdf}(u, v, \theta)$, 可以设 (但是不限于)

$$\Phi(i, j, z) = [\mathbf{H}_0^T \times \text{pdf}(u, v, \theta)]^p, \quad 1/3 < p < 3,$$

15 其中 $\mathbf{H}_0$ 为采集全部探测器数据情况下的系统矩阵。此步骤通过一次反投影和结果求幂次运算完成。特殊情况下, 例如无任何先验知识且均匀分布随机采样的情况下, 可以设 $\Phi(i, j, z) = 1$ 。

3) 从 2 个能量窗的所有探测器数据进行两个线衰减系数的空间分布重建。记对采集到的数据进行归一化和负对数处理得到的投影值为:

$$20 \quad \mathbf{g}_k = -\log \left(\frac{\mathbf{p}_k}{\mathbf{p}_k^{\text{air}}} \right).$$

对所有 $\mathbf{g}_k$, 使用如下方式重建获得 μ_k :

$$\mu_k = \underset{\mu_k}{\text{argmin}} \left\| \text{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mu_k \right\|_1, \quad \text{s.t.} \quad \left\| \mathbf{H} \mu_k - \mathbf{g}_k \right\|_2 \leq \varepsilon$$

其中 ε 为一个小的阈值。此处给出一种具体实现过程示例, 但不排斥其它迭代方法实现这一过程。因为对每个 μ_k 均使用下面的过程得到, 所以在下面的叙述中省略了下标 k 。

25 a. 设定迭代初值为 μ^0 ;

b. 进行保真项更新, 即计算

$$\mu_{\text{fit}}^{n+1} = \mu_{\text{fit}}^n + \frac{\mathbf{g}_m - \mathbf{H}_m \mu_{\text{fit}}^n}{\left\| \mathbf{H}_m \right\|^2} (\mathbf{H}_m)^T \quad m = 1, 2, \dots, M$$

c. 非负性约束更新

$$\mu_{\text{pos}}^{n+1} = \max(0, \mu_{\text{fit}}^{n+1})$$

d.先验约束更新:

$$i) \mu_{\text{cons}}^0 = \mu_{\text{pos}}^{n+1}$$

ii) 进行 Q 次全变分最小化迭代 (此处可以使用梯度下降法, 但不限于这个方法), Q 可为自行选择的整数, 例如在 5 至 100 之间。

5

$$\mu_{\text{cons}}^{q+1} = \mu_{\text{cons}}^q + \alpha \nabla \left(\left\| \text{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mu_{\text{cons}}^q \right\|_1 \right), \quad q = 1, \dots, Q$$

e. 令 $\mu_{\text{fit}}^{n+1} = \mu_{\text{cons}}^Q$, 再进行 b-e 步, 直到满足收敛条件停止迭代。

4) 根据上述重建结果 μ_k , $k=1, \dots, K$, 对被重建的图像域像素逐个像素点进行能谱信息分解得到分解系数 $a_\tau(i, j, z)$, 即求解线性方程组:

$$\begin{cases} \mu_1(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_\tau(i, j, z) \phi_\tau(E_1) \\ \dots \\ \mu_k(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_\tau(i, j, z) \phi_\tau(E_k) \\ \dots \\ \mu_K(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_\tau(i, j, z) \phi_\tau(E_K) \end{cases}$$

10 τ 为整数, 对应第 τ 个分解项。 E_k 表示第 k 个能量窗的等效光子能量。对所有像素点完成求解后, 得到 a_τ 。 $\phi_\tau(E)$ 为第 τ 个分解基函数。在使用 (但不限于) 光电效应系数、康普顿散射系数作为 $\phi_\tau(E)$ 的情况下, 可以得到等效原子序数和电子密度分布图:

$$\mathbf{Z}^{\text{eff}} = \left(\text{diag} \left(\frac{1}{\mathbf{a}_2} \right) \mathbf{a}_1 \right)^{\frac{1}{\lambda-1}}, \quad \lambda \approx 4$$

$$\rho_e = 2\mathbf{a}_2$$

15 图6示出根据本公开一实施例的能谱CT结构示意图, 其包括具有预定义的随机分布像素的探测器。

根据本公开的发明构思, 可以采用具有预定义的随机分布像素的探测器。例如, 参照图3a和3b, 虚线网格处可不设置探测器单元 (或像素), 仅在深灰色小方格处设置探测器单元 (或像素)。即, 可按照多个随机分布的像素地址编码设置光子探测器的多个像素。

20 像素地址编码可利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成, 如前所述。

参照图 6, 该示例中没有采用一块完整的面阵光子计数探测器进行 CT 扫描实时编码采样的方式, 而是采用另一种方式实现对投影数据的编码采集。如图 6 所示的 CT 系统结构, 光子计数探测器以预先确定好的采样模式, 例如利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成的采样模式, 分布在一个环形探测器 605 的支架上。此外还有一与该环形探测器支架同轴的环形 X 射线源 610。其中, 环形 X 射线源 610 可以使用多个普通 X 射线源沿圆环排列的方式, 也可以采用第五代电子束 CT 的环形靶组成。这种系统结构没有旋转

25

结构，可以使用更高的速率采集投影数据，克服物体运动的模糊，提高 CT 重建图像的时间分辨率。

对于这种结构，其数据处理方式基本与上述方式相同，只有在计算 $\Phi(i, j, z)$ 时，由于探测器环上光子计数像素已经是预先定义好的，所以可以提前计算好存储下来，在重建时直接使用。

通过以上的详细描述，本领域的技术人员易于理解，根据本公开实施例的系统和方法具有以下优点中的一个或多个。

本公开通过一种新的探测器设计方式和对应的能谱 CT 重建方法，提出了一种新的能谱 CT 成像系统。通过低采样率随机编码方式读取光子计数探测器的像素数据，降低探测器的电荷共享效应和探测器的数据读取速率需求。

可以通过优化的能谱 CT 重建方法，获得常规系统固有的分辨率。

可以同时实现高分辨率、小数据量和大成像视野。

可以通过调整探测器数据采样分布的概率函数，灵活实现扫描视野内差异分辨率成像。

通过以上的实施例的描述，本领域的技术人员易于理解，本公开实施例可以通过硬件实现，也可以通过软件结合必要的硬件的方式来实现。因此，本公开实施例的技术方案可以以软件产品的形式体现出来，该软件产品可以存储在一个非易失性存储介质（可以是 CD-ROM，U 盘，移动硬盘等）中，包括若干指令用以使得一台计算设备（可以是个人计算机、服务器、移动终端、或者网络设备等）执行根据本公开实施例的方法。

本领域技术人员可以理解，附图只是示例实施例的示意图，附图中的模块或流程并不一定是实施本公开所必须的，因此不能用于限制本公开的保护范围。

本领域技术人员可以理解上述各模块可以按照实施例的描述分布于装置中，也可以进行相应变化位于不同于本实施例的一个或多个装置中。上述实施例的模块可以合并为一个模块，也可以进一步拆分成多个子模块。

以上具体地示出和描述了本公开的示例性实施例。应该理解，本公开不限于所公开的实施例，相反，本公开意图涵盖包含在所附权利要求的精神和范围内的各种修改和等效布置。

权利要求

1、一种能谱 CT 成像系统的数据采集方法,所述能谱 CT 成像系统包括具有多个像素的光子探测器,所述数据采集方法包括在多个投影角度从所述光子探测器对穿过被成像物的光子进行数据采集,其特征在于,对于每一投影角度,该数据采集方法包括:

5 按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器获取数据。

2、如权利要求1所述的数据采集方法,其中所述像素地址编码利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成。

3、如权利要求1所述的数据采集方法,其中对于第一个投影角度,所述像素地址编码利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成;对于除第一个投影角度外的其余投影角度,所述像素地址编码或者利用为前一投影角度设定的像素地址分布的概率密度函数而生成、或者利用重新设定的像素地址分布的概率密度函数而生成、或者与用于前一投影角度的所述像素地址编码相同。

4、如权利要求1所述的数据采集方法,其中所述按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器采集数据包括:从自所述光子探测器获得的全部数据中按照多个随机分布的像素地址编码选取数据。

5、如权利要求1所述的数据采集方法,其中所述按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器采集数据包括:从所述光子探测器的全部像素中按照多个随机分布的像素地址编码实时选择像素来获取数据。

6、一种能谱 CT 成像系统的数据采集方法,所述能谱 CT 成像系统包括具有多个像素的光子探测器,所述数据采集方法包括在多个投影角度从所述光子探测器对穿过被成像物的光子进行数据采集,其特征在于,对于每一投影角度,该数据采集方法包括:

从按照多个随机分布的像素地址编码设置的所述多个像素采集数据。

7、如权利要求6所述的数据采集方法,其中所述光子探测器为面阵探测器或环形探测器。

8、一种重建能谱CT图像的方法,其特征在于包括:

设置数据采集的多个能量窗;

利用如权利要求1-7中任一项所述的数据采集方法从所述多个能量窗进行数据采集;

利用所述像素地址编码生成对应的系统矩阵;

将采集到的数据在投影域进行能谱信息分解,得到分解系数投影;

30 通过迭代方法,利用所述分解系数投影进行分解系数的空间分布重建,得到分解系数;根据重建的分解系数进行合成,得到单能量的衰减系数和/或估算被成像物的电子密度和/或等效原子序数分布图。

9、如权利要求8所述的方法,其中所述系统矩阵的维度是 $M \times N$,其中 N 是被重建的图像域像素数目, M 是投影角度数与所述像素地址编码的数量之积。

35 10、如权利要求9所述的方法,其中根据如下公式求分解系数投影:

$$-\ln \int w_k(E) \exp \left(- \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} \phi_\tau(E) \mathbf{A}_\tau \right) dE = \mathbf{p}_k, \quad \mathbf{A}_\tau = \{A_{1,\tau}, A_{2,\tau}, \dots, A_{L,\tau}\}$$

其中 τ 为整数，对应第 τ 个分解项， $w_k(E)$ 为归一化的第 k 个能量窗下的X光能谱分布， $\mathbf{p}_k$ 为对应于光子探测器上采集的数据的 M 维向量， $\phi_\tau(E)$ 为第 τ 个分解基函数， $\mathbf{A}_\tau$ 为第 τ 个分解系数投影， $k=1,2,\dots,K$ ， K 为能量窗数目， E 是光子能量。

- 5 11、如权利要求10所述的方法，其中根据如下公式通过迭代进行分解系数的空间分布重建：

$$\mathbf{a}_\tau = \underset{\mathbf{a}_\tau}{\operatorname{argmin}} \left\| \operatorname{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mathbf{a}_\tau \right\|_1, \quad \text{s.t.} \quad \left\| \mathbf{H} \mathbf{a}_\tau - \mathbf{A}_\tau \right\|_2 \leq \varepsilon$$

其中 ε 为根据数据噪声确定的阈值， $\Phi(i, j, z)$ 为关于成像视野的像素位置 (i, j, z) 的先验函数， $\mathbf{a}_\tau$ 为分解系数， $\mathbf{H}$ 是所述系统矩阵。

- 10 12、如权利要求11所述的方法，其中根据重建结果通过下式计算单能量的衰减系数：

$$\mu(E) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} \mathbf{a}_\tau \phi_\tau(E)$$

13、如权利要求10所述的方法，其中，在两个能量窗的情况下， $K=2$ ， $\tau \in [1, 2]$ ， $\phi_\tau(E)$ 分别取为光电效应系数、康普顿散射系数。

- 15 14、如权利要求13所述的方法，其中等效原子序数分布图、电子密度分布图分别通过下式估算：

$$\mathbf{Z}^{\text{eff}} = \left(\operatorname{diag} \left(\frac{1}{\mathbf{a}_2} \right) \mathbf{a}_1 \right)^{\frac{1}{\lambda-1}}, \quad \lambda \approx 4$$

$$\rho_e = 2 \mathbf{a}_2$$

其中 $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 对应于 τ 分别为1和2时的 $\mathbf{a}_\tau$ 值。

15、一种重建能谱CT图像的方法，其特征在于包括：

设置数据采集的多个能量窗；

- 20 利用如权利要求1-7中任一项所述的数据采集方法从所述多个能量窗进行数据采集；

利用所述像素地址编码生成对应的系统矩阵；

通过迭代方法，对每个能量窗下采集到的数据进行衰减系数的空间分布重建，得到衰减系数；

- 25 利用衰减系数的重建结果，对被重建的图像域像素逐个进行能谱信息分解，得到分解系数；

估算被成像物的电子密度和/或等效原子序数分布图。

16、如权利要求15所述的方法，其中所述系统矩阵的维度是 $M \times N$ ，其中 N 是被重建的图像域像素数目， M 是投影角度数与所述像素地址编码的数量之积。

17、如权利要求16所述的方法，其中根据如下公式通过迭代进行衰减系数重建：

$$\mathbf{g}_k = -\log \left(\frac{\mathbf{p}_k}{\mathbf{p}_k^{\text{air}}} \right), \quad \text{及}$$

$$\mu_k = \underset{\mu_k}{\operatorname{argmin}} \left\| \operatorname{diag}(\Phi(i, j, z)) \nabla \mu_k \right\|_1, \quad s.t. \quad \left\| \mathbf{H} \mu_k - \mathbf{g}_k \right\|_2 \leq \varepsilon$$

其中 k 表示第 k 个能量窗， $\mathbf{g}_k$ 为对采集到的数据进行归一化和负对数处理得到的投影值， μ_k 为衰减系数， $\mathbf{p}_k$ 为对应于光子探测器上采集的数据的 M 维向量， ε 为根据数据噪声确定的阈值， $\Phi(i, j, z)$ 为关于成像视野的像素位置 (i, j, z) 的先验函数， $\mathbf{H}$ 是所述系统矩阵。

- 5 18、如权利要求17所述的方法，其中根据重建结果 μ_k ，通过求解如下线性方程组对被重建的图像域像素逐个进行能谱信息分解而得到分解系数：

$$\begin{cases} \mu_1(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_\tau(i, j, z) \phi_\tau(E_1) \\ \dots \\ \mu_k(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_\tau(i, j, z) \phi_\tau(E_k) \\ \dots \\ \mu_K(i, j, z) = \sum_{\tau \in [1, \Gamma]} a_\tau(i, j, z) \phi_\tau(E_K) \end{cases}$$

其中 τ 为整数，对应第 τ 个分解项， $k=1, \dots, K$ ， K 为能量窗数目， $\phi_\tau(E)$ 为第 τ 个分解基函数， $\mathbf{a}_\tau(i, j, z)$ 为第 τ 个分解系数， E_k 表示第 k 个能量窗的等效光子能量。

- 10 19、如权利要求18所述的方法，其中，在两个能量窗的情况下， $K=2$ ， $\tau \in [1, 2]$ ， $\phi_\tau(E)$ 分别取为光电效应系数、康普顿散射系数。

20、如权利要求19所述的方法，其中等效原子序数分布图、电子密度分布图分别通过下式估算：

$$\mathbf{Z}^{\text{eff}} = \left(\operatorname{diag} \left(\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{a}_2} \right) \mathbf{a}_1 \right)^{\frac{1}{\lambda-1}}, \quad \lambda \approx 4$$

$$\rho_e = 2 \mathbf{a}_2$$

- 15 其中 $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 对应于 τ 分别为1和2时的 $\mathbf{a}_\tau$ 值。

21、一种能谱CT成像系统，包括：

射线发生装置，包括射线源；

光子探测器，包括多个像素；及

数据采集系统，从所述光子探测器对穿过被成像物的光子进行数据采集，

- 20 其特征在于，所述数据采集系统按照多个随机分布的像素地址编码从所述光子探测器获取数据。

22、如权利要求21所述的能谱CT成像系统，其中所述像素地址编码利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成。

- 25 23、如权利要求21所述的能谱CT成像系统，其中所述数据采集系统从所述光子探测器输出的全部数据中按照多个随机分布的像素地址编码选取数据。

24、如权利要求21所述的能谱CT成像系统，其中所述数据采集系统包括电子学系统，

所述电子学系统配置为从所述光子探测器的全部像素中按照多个随机分布的像素地址编码实时选择像素来读取数据。

25、如权利要求21所述的能谱CT成像系统，还包括数据处理系统，用于根据权利要求8-20中任一项所述的方法利用所述数据采集系统获取的数据重建能谱CT图像。

5 26、如权利要求21所述的能谱CT成像系统，其中所述光子探测器为面阵探测器或环形探测器。

27、一种能谱CT成像系统，包括：

射线发生装置，包括射线源；

光子探测器，包括多个像素；及

10 数据采集系统，从所述光子探测器对穿过被成像物的光子进行数据采集，

其特征在于，按照多个随机分布的像素地址编码设置所述光子探测器的所述多个像素。

28、如权利要求27所述的能谱CT成像系统，其中所述像素地址编码利用设定的像素地址分布的概率密度函数而生成。

15 29、如权利要求27所述的能谱CT成像系统，还包括数据处理系统，用于根据权利要求8-20中任一项所述的方法利用所述数据采集系统获取的数据重建能谱CT图像。

30、如权利要求 27 所述的能谱 CT 成像系统，其中所述光子探测器为面阵探测器或环形探测器。

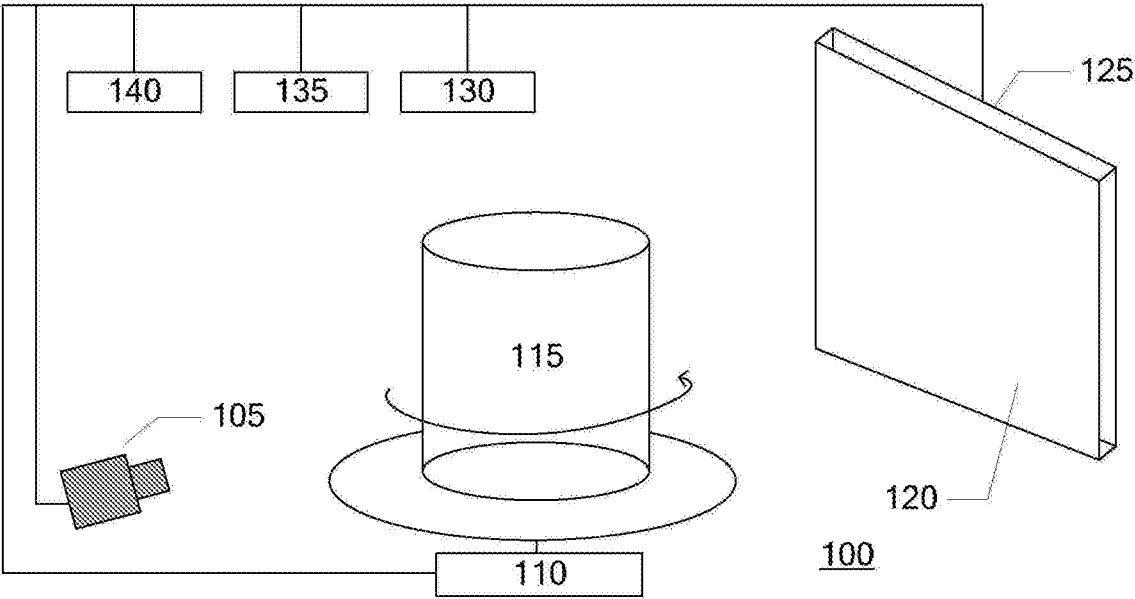


图1

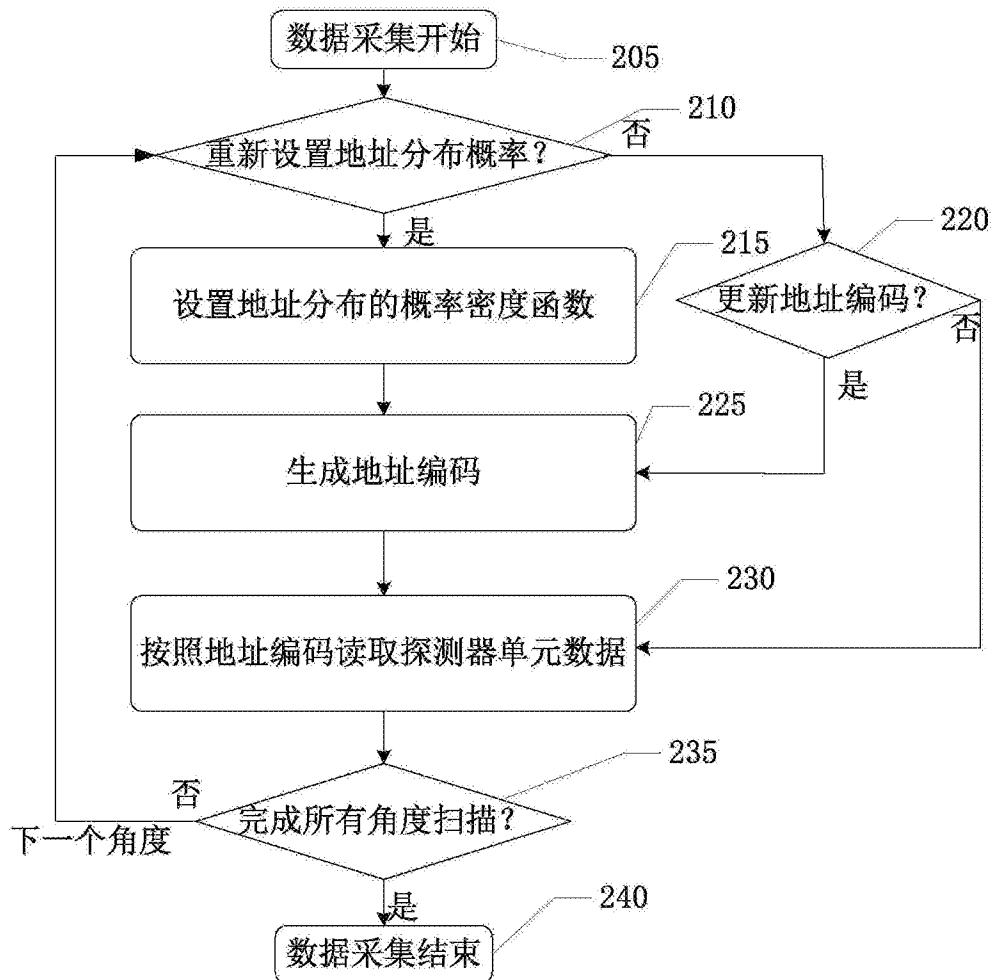


图2

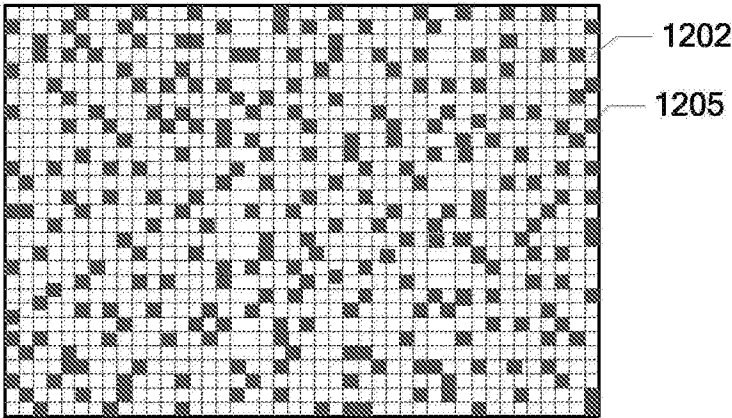


图3a

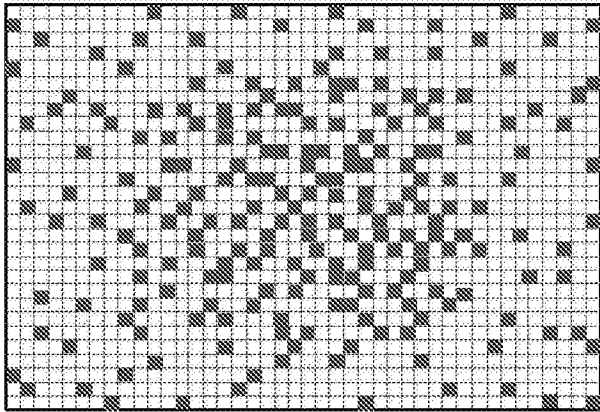


图3b

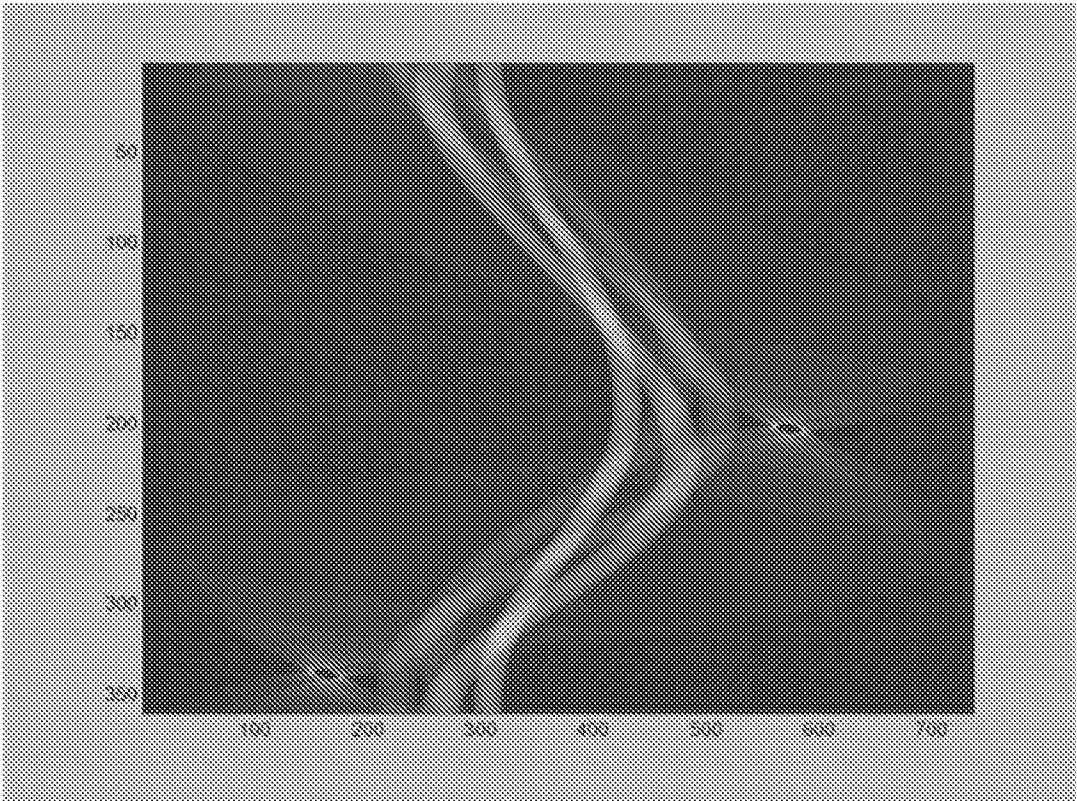


图4a

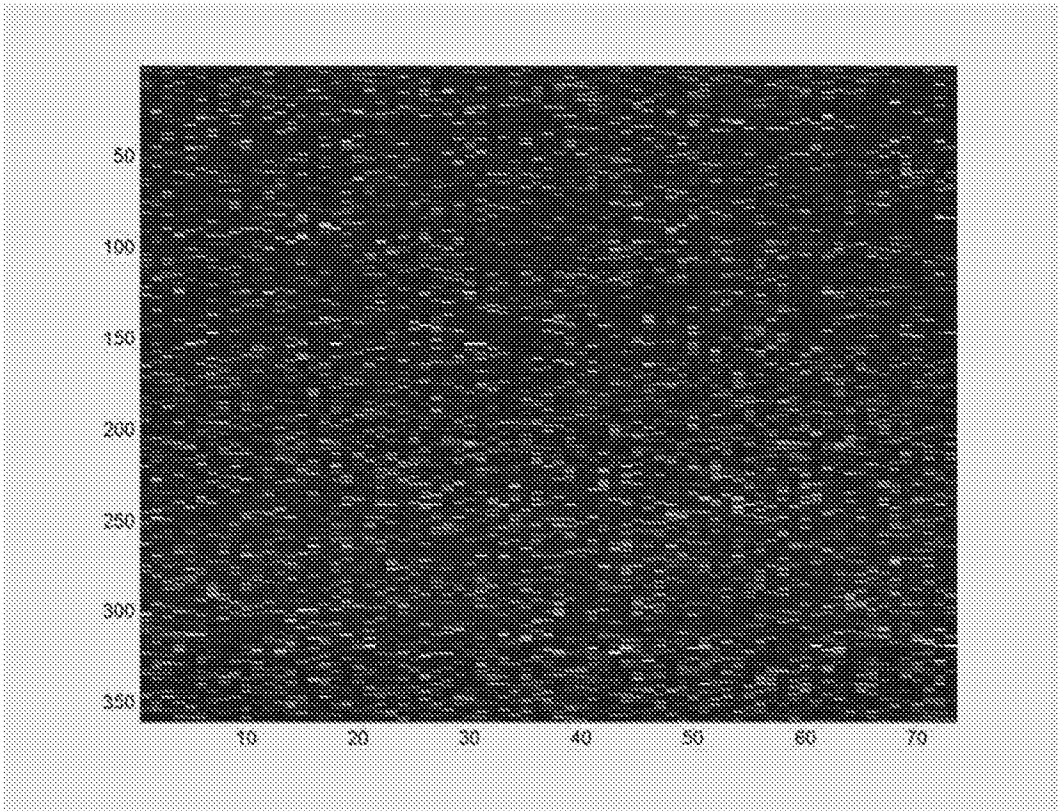


图4b

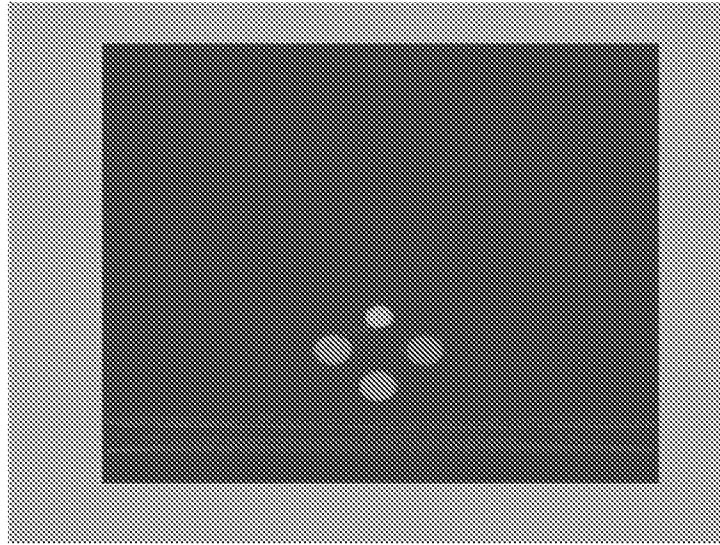


图5a

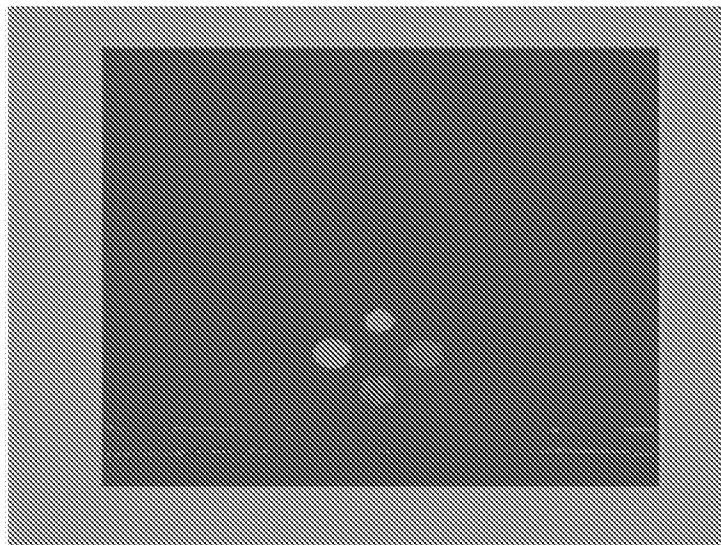


图5b

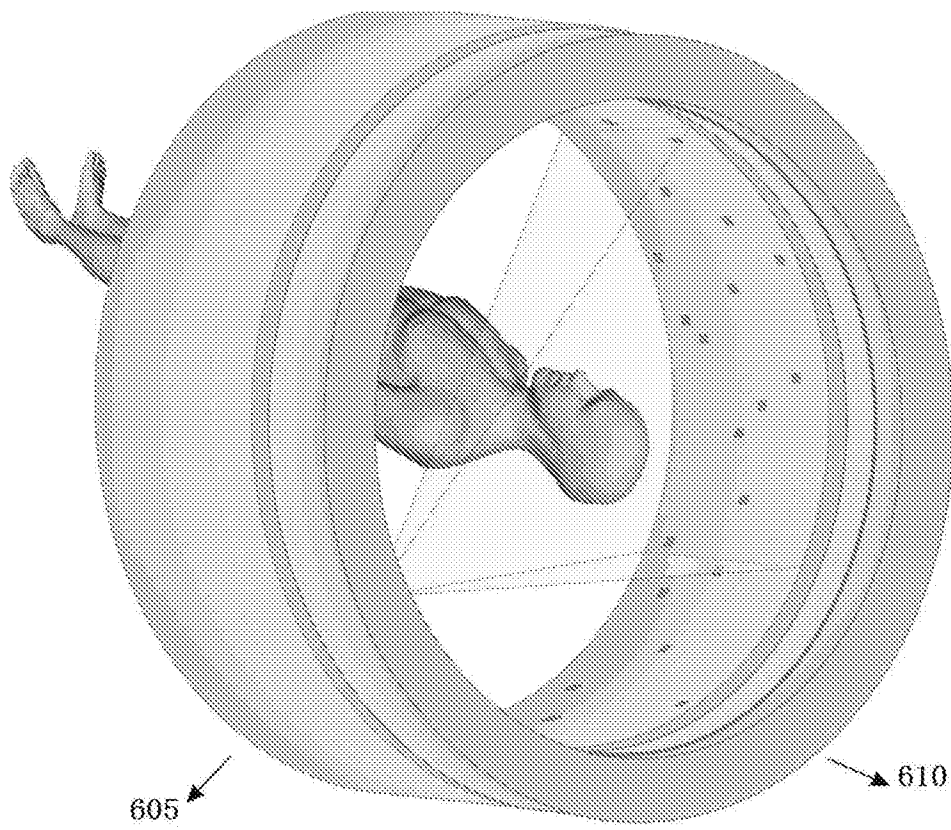


图6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/073918

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 23/04 (2006.01) 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)

G01N 23/-; G06T 3/-

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)

CNKI, CNPAT, WPI, EPODOC: obtain, extract, select, sample, analysis efficiency, random, address, image, decomposition, decrease, photon, coding, pixel, scan, detection, count, distribution, energy spectrum, incomplete, part+, data, gather+, acquisit+, collect+, angle, CT, multi, dual, energy, comput +, tomography, reconstruction, project+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 203149136 U (TSINGHUA UNIVERSITY et al.), 21 August 2013 (21.08.2013), description, paragraphs [0010]-[0024], and figures 1 and 4	1-30
Y	CN 102695074 A (QINGDAO HISENSE ELECTRIC CO., LTD.), 26 September 2012 (26.09.2012), description, paragraphs [0025]-[0027], [0031] and [0046]	1-30
Y	CN 103472074 A (TSINGHUA UNIVERSITY et al.), 25 December 2013 (25.12.2013), description, paragraphs [0034]-[0037], [0056]-[0066] and [0073]-[0090]	8-20
A	CN 103900931 A (CAPITAL NORMAL UNIVERSITY et al.), 02 July 2014 (02.07.2014), the whole document	1-30
A	CN 103559699 A (CAPITAL NORMAL UNIVERSITY et al.), 05 February 2014 (05.02.2014), the whole document	1-30
A	US 2004101087 A1 (HSIEH, J. et al.), 27 May 2004 (27.05.2004), the whole document	1-30

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search 13 April 2016 (13.04.2016)	Date of mailing of the international search report 12 May 2016 (12.05.2016)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer JIN, Weihua Telephone No.: (86-10) 010-82245800

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/073918**C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2005271293 A1 (YING, Zhengrong et al.), 08 December 2005 (08.12.2005), the whole document	1-30
A	HAO, Jia et al., "Multi-energy X-ray Imaging Technique and Its Application in Computed Tomography", CT THEORY AND APPLICATIONS, vol. 20, no. 1, 31 March 2011 (31.03.2011), the whole document	1-30
A	SHEN, Le et al., "Structural Prior Enhanced Compressed Sensing for CT Reconstruction with Incomplete Data", IEEE, 31 December 2013 (31.12.2013), the whole document	1-30
A	XING, Yuxiang et al., "A General Adaptive Decomposition Method for Multi-Energy Spectral CT", IEEE, 31 December 2013 (31.12.2013), the whole document	1-30

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2016/073918

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 203149136 U	21 August 2013	HK 1199762 A1	17 July 2015
		CN 103913779 A	09 July 2014
		EP 2749219 A1	02 July 2014
		WO 2014101285 A1	03 July 2014
		US 2014185741 A1	03 July 2014
CN 102695074 A	26 September 2012	CN 102695074 B	25 February 2015
CN 103472074 A	25 December 2013	CN 103472074 B	20 January 2016
CN 103900931 A	02 July 2014	None	
CN 103559699 A	05 February 2014	None	
US 2004101087 A1	27 May 2004	DE 10352645 A1	16 September 2004
		JP 2004174264 A	24 June 2004
		JP 4361778 B2	11 November 2009
		US 7031425 B2	18 April 2006
US 2005271293 A1	08 December 2005	US 7415147 B2	19 August 2008

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2016/073918

A. 主题的分类

G01N 23/04(2006.01)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/-;G06T3/-

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))

CNKI, CNPAT, WPI, EPODOC: 取得, 提取, 获取, 采集, 选取, 部分, 数据, 采样, 分析效率, 随机, 地址, 图像, 角度, 多, 抽样, 分解, 减小, 光子, 编码, 像素, 断层成像, 断层, 扫描, 计算机, 探测, 计数, 分布, 重建, 能谱, incomplete, part+, data, gather+, acquisit+, collect+, angle, CT, multi, dual, energy, comput+, tomography, reconstruction, project+

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 203149136 U (清华大学 等) 2013年 8月 21日 (2013 - 08 - 21) 说明书10-24段, 附图1, 4	1-30
Y	CN 102695074 A (青岛海信电器股份有限公司) 2012年 9月 26日 (2012 - 09 - 26) 说明书25-27, 31, 46段	1-30
Y	CN 103472074 A (清华大学 等) 2013年 12月 25日 (2013 - 12 - 25) 说明书34-37, 56-66, 73-90段	8-20
A	CN 103900931 A (首都师范大学 等) 2014年 7月 2日 (2014 - 07 - 02) 全文	1-30
A	CN 103559699 A (首都师范大学 等) 2014年 2月 5日 (2014 - 02 - 05) 全文	1-30
A	US 2004101087 A1 (HSIEH, JIANG 等) 2004年 5月 27日 (2004 - 05 - 27) 全文	1-30

☒ 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

2016年 4月 13日

国际检索报告邮寄日期

2016年 5月 12日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(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

金伟华

电话号码 (86-10)010-82245800

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
A	US 2005271293 A1 (YING, ZHENGRONG 等) 2005年 12月 8日 (2005 - 12 - 08) 全文	1-30
A	郝佳 等. "多能谱X射线成像技术及其在CT中的应用" CT理论与应用研究, 第20卷, 第1期, 2011年 3月 31日 (2011 - 03 - 31), 全文	1-30
A	SHEN, Le 等. "Structural Prior Enhanced Compressed Sensing for CT Reconstruction with Incomplete Data" IEEE, 2013年 12月 31日 (2013 - 12 - 31), 全文	1-30
A	XING, Yuxiang 等. "A General Adaptive Decomposition method for Multi-Energy Spectral CT" IEEE, 2013年 12月 31日 (2013 - 12 - 31), 全文	1-30

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/073918

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	203149136	U	2013年 8月 21日	HK	1199762	A1	2015年 7月 17日
				CN	103913779	A	2014年 7月 9日
				EP	2749219	A1	2014年 7月 2日
				WO	2014101285	A1	2014年 7月 3日
				US	2014185741	A1	2014年 7月 3日
CN	102695074	A	2012年 9月 26日	CN	102695074	B	2015年 2月 25日
CN	103472074	A	2013年 12月 25日	CN	103472074	B	2016年 1月 20日
CN	103900931	A	2014年 7月 2日	无			
CN	103559699	A	2014年 2月 5日	无			
US	2004101087	A1	2004年 5月 27日	DE	10352645	A1	2004年 9月 16日
				JP	2004174264	A	2004年 6月 24日
				JP	4361778	B2	2009年 11月 11日
				US	7031425	B2	2006年 4月 18日
US	2005271293	A1	2005年 12月 8日	US	7415147	B2	2008年 8月 19日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)