

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101623201 B

(45) 授权公告日 2011. 01. 26

(21) 申请号 200910055005. 3

审查员 薛林

(22) 申请日 2009. 07. 17

(73) 专利权人 中国科学院上海光学精密机械研究所

地址 201800 上海市 800-211 邮政信箱

(72) 发明人 金晓峰 刘立人 孙建锋 职亚楠 鲁伟 严毅

(74) 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司 31213

代理人 张泽纯

(51) Int. Cl.

A61B 6/03(2006. 01)

(56) 对比文件

WO 0216865 A2, 2002. 02. 28, 全文.

US 4384209, 1983. 05. 17, 全文.

CN 101447085 A, 2009. 06. 03, 全文.

US 5159931 A, 1992. 11. 03, 全文.

US 5629773 A, 1997. 05. 13, 全文.

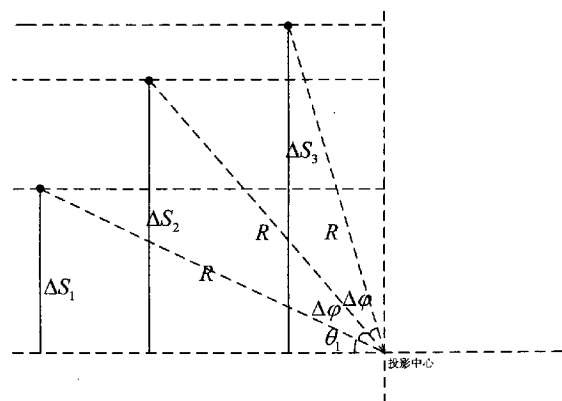
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 4 页

(54) 发明名称

反射投影成像投影图中心的对准方法

(57) 摘要

一种反射投影成像投影图中心的对准方法, 在反射投影成像系统中, 目标物体存在除转动外的其它运动方式, 导致旋转中心发生偏移, 因而存在多角度下反投影成像中心错位的问题。针对此种情况, 本发明提出基于特征点的反射投影中心对准方法。本发明方法通过观测局域角度变化产生的特征点反射信号时间延迟, 实现不同角度下反射投影的中心对准。



1. 一种反射投影成像投影图中心的对准方法,其特点在于包括以下步骤:

①激光器发出光脉冲,用会聚透镜使光脉冲会聚后再次发散,通过调节透镜的焦距改变光斑的大小,使到达探测目标的光斑外轮廓涵盖整个探测目标;

②将待测目标所对应的初始角度定义为 φ_1 ,该 φ_1 是在激光器,探测器和目标所确定平面内,激光器初始脉冲方向与水平方向的夹角,激光器发出单脉冲照射到待测目标上,探测器记录在角度 φ_1 下经过待测目标反射加宽后所对应的反射投影信息 $p_1(t, \varphi_1)$;

③待测目标旋转角度 $\Delta\varphi$ 后, $\Delta\varphi$ 称为局域角度变量,探测角度变为 $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$,激光器发出单个脉冲,探测器记录相应的反射投影信息 $p_2(t, \varphi_2)$;待测目标旋转角度 $\Delta\varphi$ 后,探测角度变为 $\varphi_3 = \varphi_1 + 2\Delta\varphi$,激光器发出单个脉冲,探测器记录相应的反射投影信息 $p_3(t, \varphi_3)$,直至获得全部共 N 次反射投影信息 $p_i(t, \varphi_i)$,其中 $i = 1, 2, 3, \dots, N$;

④观察反射投影信息,提取反射投影信息 $p_i(t, \varphi_i)$ 的特征点 A 并利用下列公式确定特征点 A 到投影图中心的距离 R 值和探测角度 φ_1 或 φ_3 对应的投影角度 θ_{th} :

$$R = \frac{c\Delta t_2}{4 \sin(\Delta\varphi/2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi})]}$$

$$\theta_{th} = \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi}) - \frac{3\Delta\varphi}{2}$$

其中, c 为光速, Δt_1 为角度 φ_1 , φ_2 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿的时间延迟, Δt_2 为角度 φ_2 , φ_3 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿的时间延迟, $\Delta\varphi$ 为局域角度变量;

⑤根据步骤④得到的特征点 A 到投影图中心的距离 R 值和探测角度 φ_1 对应的投影角度 θ_{th} ,对所得到的含有特征点 A 反射信息的反射投影角度进行调整,具体调整公式为:

$$\theta_i = \begin{cases} \varphi_i - \varphi_1 + \theta_{th} = \varphi_i - \varphi_1 + \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi}) - \frac{3\Delta\varphi}{2} & \Delta t_1 > \Delta t_2 \\ \varphi_i - \varphi_3 + \theta_{th} = \varphi_i - \varphi_3 + \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi}) - \frac{3\Delta\varphi}{2} & \Delta t_1 < \Delta t_2 \end{cases}$$

其中 $i = 1, 2, \dots, N$,特征点 A 投影到旋转中心投影之间的距离 ΔS_i :

$$\Delta S_i = \frac{c\Delta t_2}{4 \sin(\Delta\varphi/2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi})]} \sin \theta_i$$

⑥将征点 A 投影到旋转中心投影之间的距离 ΔS_i 转换为时间信息 $\Delta \tau_i$:

$$\Delta \tau_i = \frac{1}{2} \frac{\Delta t_2}{\sin(\Delta\varphi/2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi})]} \sin \theta_i$$

特征点投影和旋转中心投影的前后顺序,通过角度 θ_i 的正负来确定: θ_i 为正,旋转中心的投影在特征点投影前 $\Delta \tau_i$ 处; θ_i 为负,旋转中心投影在特征点投影之后 $\Delta \tau_i$ 处;

⑦通过观测特征点投影和角度 θ_i 对应的时间延迟 $\Delta \tau_i$ 将多角度旋转中心投影排列在同一直线上,实现投影图的对准。

2. 根据权利要求 1 所述的反射投影成像投影图中心的对准方法,其特点在于所述的特

征点是反射投影信息 $p_i(t, \varphi_i)$ 中反射强度明显高于周围区域的点或反射强度明显低于周围区域的点。

反射投影成像投影图中心的对准方法

技术领域

[0001] 本发明涉及反投影成像系统,特别是一种反射投影成像投影图中心的对准方法。在反投影成像系统中,存在目标物体平动所产生的旋转中心偏移问题,最终将导致不同角度下反射投影中心失配,重建图像发生错位。本发明方法利用特征点的投影信息可以迅速快捷的实现不同角度反射投影中心的校准,操作简单,易于实现。

背景技术

[0002] 在医学计算机辅助层析(简称为CT)中,根据一维透射投影信息实现二维图像重建已经得到广泛的应用和发展。所得到的一维透射投影信息反应的是在多个不同角度下,物体内部不同部位透射系数的差异。反投影成像的内容为重建图像某一点的光强密度值可看作这一平面内所有经过该点的射线投影值之和。

[0003] 如图1透射层析所示, $f(x, y)$ 为待建图像, $L_{r, \phi}$ 为对应的直线 $r = x \cos \phi + y \sin \phi$, $p(r, \phi)$ 为 $f(x, y)$ 沿直线 $L_{r, \phi}$ 的透射特征系数的积分,即角度 ϕ 所对应的一维透射投影:

$$[0004] \quad p(r, \phi) = \int_{L_{r, \phi}} f(x, y) ds \quad (1)$$

[0005] 用反投影成像方法重建图像 $g(x, y)$,则:

$$[0006] \quad g(x, y) = \sum_{i=1}^m p(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i, \phi_i) \Delta \phi \quad (2)$$

[0007] 其中, ϕ_i 为第*i*次投影所对应的角度, $\Delta \phi$ 为投影角度采样间隔, m 为总的投影个数。

[0008] 反射层析(基于距离)类似于上述CT反投影重建图像的操作过程,其实质是将到源点某一距离的有限表面区域反射所得的投影信息,反投影到离源点同此距离的所有区域,如图2反射层析激光雷达所示。所不同的是CT依据的透射特征系数,只需要 $0-\pi$ 的透射投影信息,而反射层析依据的是反射特征系数,需要 $0-2\pi$ 的反射投影信息。

[0009] 随着激光的出现和发展,Charles L. Matson(参见文献R. M. Marino, R. N. Capes, W. E. Keicher et al.. Tomographic image reconstruction from laser radar reflective projections[J], SPIE Laser Radar III, 1988, Vol. 999 :248-263), Parker. J. K. (参见文献 Jeffrey K. Parker, E. B. Cralg, D. I. Klick et al.. Reflective tomography: image from range resolved laser radarmearsurements[J], Applied Optics, 1988, 27(13) :2642-2643), F. K. Knight(参见文献 Frederick L. Knight, David Klick, Danette P. Ryan-Howard et al.. Laserradar reflective tomography utilizing a steak camera for precise rangeresolution[J]. Applied Optics, 1989, 28(12) :2196-2198)等很快的将反射层析算法引入到激光雷达中。在物体发生平动情况下,激光短脉冲探测和非相干接收器得到基于距离的多角度一维反射投影信息,所获得的旋转中心投影不再对应距离上同一位置。投影图对准就是将不同角度下的旋转中心投影排列在同一直线上,现有的投影图对准采用位相恢复迭代算法(参见文献 Stephen D. Ford and Charles L. Matson,

Projection registration in reflective tomography[J], SPIE, 1999, Vol. 3815 : 189-197), 存在计算量大, 操作复杂的问题。

[0010] 本方法利用特征点投影信息可以迅速的实现含有特征点旋转中心投影的对准, 可以避免复杂的数学迭代过程。

发明内容

[0011] 本发明的目的在于为反射投影成像系统提供一种反射投影成像投影图中心的对准方法, 该方法的原理可靠, 易于实现。

[0012] 本发明的技术解决方案如下:

[0013] 一种反射投影成像投影图中心对准方法, 其特点在于包括以下步骤:

[0014] ①激光器发出光脉冲, 用会聚透镜使光脉冲会聚后再次发散, 通过调节透镜的焦距来改变光斑的大小, 使到达探测目标的光斑外轮廓涵盖整个探测目标;

[0015] ②将初始待测目标所对应的角度定义为 φ_1 , 其中 φ_1 是在激光器, 探测器和目标所确定平面内, 激光器初始脉冲方向与水平方向夹角, 如图 3 所示。激光器发出单脉冲照射到待测目标上, 探测器记录在角度 φ_1 下所对应的经过目标反射加宽后的反射投影信息 $p_1(t, \varphi_1)$;

[0016] ③待测目标旋转角度 $\Delta\varphi$ 后, 探测角度变为 $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$, 激光器发出单个脉冲, 探测器记录相应的反射投影信息 $p_2(t, \varphi_2)$; 待测目标旋转角度 $\Delta\varphi$ 后, 探测角度变为 $\varphi_3 = \varphi_1 + 2\Delta\varphi$, 激光器发出单个脉冲, 探测器记录相应的反射投影信息 $p_3(t, \varphi_3)$, 直至获得全部投影 $p_i(t, \varphi_i)(i = 1, 2 \dots \dots N)$;

[0017] ④观察反射投影, 提取反射投影中的特征点。特征点可以选取反射投影中反射强度明显高于周围区域的点(对应于反射投影中的峰值), 也可以是反射强度明显低于周围区域的点(对应于反射投影中的谷值), 如图 4 所示。值得注意的是要将特征点与随机噪声点分开, 可以采用单个角度多个脉冲获得多个投影, 然后对投影取平均去除随机噪声。将所提取的特征点定义为特征点 A;

[0018] ⑤观察特征点 A 的反射投影信息, 将相邻角度投影 Δt 变化很小的角度范围定义为局域角度, 其中 Δt 为相邻角度特征点 A 反射投影信息峰值上升沿(或谷值下降沿)时间延迟。如图 5 所示, Δt_1 为角度 φ_1, φ_2 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿时间延迟, Δt_2 为角度 φ_2, φ_3 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿时间延迟;

[0019] ⑥局域角度确定特征点 A 到投影图中心的方法如图 6 所示:

[0020]

$$\frac{\Delta L_2}{\sin \alpha_2} = 2R \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

[0021]

$$\frac{\Delta L_1}{\cos \alpha_1} = 2R \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

$$\Delta L_1 = \frac{c\Delta t_1}{2} \quad (3)$$

$$\Delta L_2 = \frac{c\Delta t_2}{2} \quad (4)$$

[0024]

$$\beta_2 = \frac{180^\circ - \Delta\varphi}{2} - \alpha_2 \quad (5)$$

[0025] $\beta_1 = 90^\circ - \beta_2 \quad (6)$

[0026]

$$\alpha_1 = \frac{180^\circ - \Delta\varphi}{2} - \beta_1 \quad (7)$$

[0027] $\alpha_3 = 90^\circ - \alpha_1 \quad (8)$

[0028]

$$\theta_{th} = \alpha_4 = \frac{180 - \Delta\varphi}{2} - \alpha_3 \quad (9)$$

[0029] 其中, $\Delta L_1, \Delta L_2$ 为时间延迟 $\Delta t_1, \Delta t_2$ 所对应的距离延迟, $\Delta\varphi$ 为局域角度变量, R 为特征点到旋转中心的距离。

[0030] 由 (5) (6) (7) (8) (9) 可得到:

[0031]

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \Delta\varphi - \alpha_2 \quad (10)$$

[0032]

$$\theta_{th} = \frac{\pi}{2} - \frac{3}{2}\Delta\varphi - \alpha_2 \quad (11)$$

[0033] 将 (10) 式代入 (2) 式,

[0034]

$$\frac{\Delta L_1}{\sin(\Delta\varphi + \alpha_2)} = 2R \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (12)$$

[0035] 比较 (1) (12) 式, 可以得到:

[0036]

$$\frac{\Delta L_2}{\sin \alpha_2} = \frac{\Delta L_1}{\sin(\Delta\varphi + \alpha_2)} \quad (13)$$

[0037] 将 (13) 式展开可以得到:

[0038]

$$\Delta L_2 \sin(\Delta\varphi + \alpha_2) = \Delta L_1 \sin \alpha_2$$

[0039]

$$\Delta L_2 (\sin \Delta\varphi \cos \alpha_2 + \cos \Delta\varphi \sin \alpha_2) = \Delta L_1 \sin \alpha_2$$

[0040]

$$\Delta L_2 \sin \Delta\varphi \cos \alpha_2 = \Delta L_1 \sin \alpha_2 - \Delta L_2 \cos \Delta\varphi \sin \alpha_2 \quad (14)$$

[0041] 将 (14) 式两边同时除以 $(\Delta L_1 - \Delta L_2 \cos \Delta\varphi) \cos \alpha_2$, 可以得到:

[0042]

$$\tan \alpha_2 = \frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi} \quad (15)$$

[0043] 将求出的 α_2 值代入 (1), 从而可以求出特征点 A 到旋转中心距离 R 值和角度 φ_1 对应的投影角度 θ_{th} :

[0044]

$$R = \frac{c\Delta t_2}{4 \sin(\Delta\varphi/2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi})]} \quad (16)$$

[0045]

$$\theta_{th} = \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi}) - \frac{3\Delta\varphi}{2} \quad (17)$$

[0046] 其中, c 为光速, Δt_1 为角度 φ_1, φ_2 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿时间延迟, Δt_2 为角度 φ_2, φ_3 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿时间延迟;

[0047] ⑦根据步骤④得到半径 R 和对应投影中心反投影角度 θ_{th} , 对所得到的含有特征点 A 反射信息的反射投影角度进行调整, 具体调整公式为:

[0048]

$$\theta_i = \begin{cases} \varphi_i - \varphi_1 + \theta_{th} = \varphi_i - \varphi_1 + \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi}) - \frac{3\Delta\varphi}{2} & \Delta t_1 > \Delta t_2 \\ \varphi_i - \varphi_3 + \theta_{th} = \varphi_i - \varphi_3 + \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi}) - \frac{3\Delta\varphi}{2} & \Delta t_1 < \Delta t_2 \end{cases} \quad (18)$$

[0049] 其中 $i = 1, 2, \dots, N$, 根据式 (16) (18) 可以得到含有特征点 A 反射投影信息的角度 φ_i 所对应的角度 θ_i , 在各个角度含有特征点 A 反射投影信息的相应投影 $p_i(t, \theta_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), 特征点 A 反射投影信息到旋转中心投影距离 ΔS_i , 如图 7 所示:

[0050]

$$\Delta S_i = \frac{c\Delta t_2}{4 \sin(\Delta\varphi/2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi})]} \sin \theta_i \quad (19)$$

[0051] ⑧将单个角度 θ_i 特征点投影和旋转中心投影所对应的距离信息 ΔS_i 转换为时间信息 $\Delta \tau_i$:

[0052]

$$\Delta \tau_i = \frac{1}{2} \frac{\Delta t_2}{\sin(\Delta\varphi/2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta\varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta\varphi})]} \sin \theta_i \quad (20)$$

[0053] 其中 c 是光速, 由式 (20) 可以得到特征点投影和旋转中心投影的时间间隔。特征点投影和旋转中心投影的前后顺序, 可以通过角度 θ_i 的正负来确定。 θ_i 为正, 旋转中心投影在特征点投影前 $\Delta \tau_i$ 处; θ_i 为负, 旋转中心投影在特征点的后 $\Delta \tau_i$ 处, 如图 8 所示。

[0054] ⑨通过观测特征点投影和角度 θ_i 对应的时间延迟 $\Delta \tau_i$ 将多角度旋转中心投影排列在同一直线上, 实现投影图的对准, 如图 9 所示。

[0055] 本发明的技术效果:

[0056] 本发明通过观测特征点的投影信息变化, 可以实现多角度下反投影中心的对准, 从而解决了多角度反投影中心偏移所带来的重建图像错位问题。

附图说明

[0057] 图 1 透射层析示意图;

- [0058] 图 2 反射层析示意图；
 [0059] 图 3 夹角 ϕ_1 与角度间隔 $\Delta\phi$ 示意图；
 [0060] 图 4 特征点的提取（峰值或谷值）；
 [0061] 图 5 不同角度下一维反射投影特征点反射投影信息时间延迟示意图；
 [0062] 图 6 特征点确定反投影半径和角度示意图；
 [0063] 图 7 特征点投影到旋转中心投影距离示意图；
 [0064] 图 8 特征点投影和时间间隔 $\Delta\tau_i$ 确定单角度 θ_i 投影中心；
 [0065] 图 9 多角度投影图对准示意图。

具体实施方式

[0066] 下面结合附图和实施例进一步详细说明本发明，但不应以此限制本发明的保护范围。

[0067] 一种反射投影成像投影图中心对准方法，包括以下步骤：

[0068] ①激光器发出光脉冲，用会聚透镜使光脉冲会聚后再次发散，通过调节透镜的焦距来改变光斑的大小，使到达探测目标的光斑外轮廓涵盖整个探测目标；

[0069] ②将初始待测目标所对应的角度定义为 φ_1 ，其中 φ_1 是在激光器，探测器和目标所确定平面内，激光器初始脉冲方向与水平方向夹角，如图 3 所示。激光器发出单脉冲照射到待测目标上，探测器记录在角度 φ_1 下所对应的经过目标反射加宽后的反射投影信息 $p_1(t, \varphi_1)$ ；

[0070] ③待测目标旋转角度 $\Delta\varphi$ 后，探测角度变为 $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$ ，激光器发出单个脉冲，探测器记录相应的反射投影信息 $p_2(t, \varphi_2)$ ；待测目标旋转角度 $\Delta\varphi$ 后，探测角度变为 $\varphi_3 = \varphi_1 + 2\Delta\varphi$ ，激光器发出单个脉冲，探测器记录相应的反射投影信息 $p_3(t, \varphi_3)$ ，直至获得全部投影 $p_i(t, \varphi_i)(i = 1, 2 \dots \dots N)$ ；

[0071] ④观察反射投影，提取反射投影中的特征点。特征点可以选取反射投影中反射强度明显高于周围区域的点（对应于反射投影中的峰值），也可以是反射强度明显低于周围区域的点（对应于反射投影中的谷值），如图 4 所示。值得注意的是要将特征点与随机噪声点分开，可以采用的单个角度多个脉冲获得多个投影，然后对投影取平均去除随机噪声。将所提取的特征点定义为特征点 A；

[0072] ⑤观察特征点 A 的反射投影信息，将相邻角度投影 Δt 变化很小的角度范围定义为局域角度，其中 Δt 为相邻角度特征点 A 反射投影信息峰值上升沿（或谷值下降沿）时间延迟。如图 5 所示， Δt_1 为角度 φ_1, φ_2 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿时间延迟， Δt_2 为角度 φ_2, φ_3 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿时间延迟；

[0073] ⑥局域角度确定特征点 A 到投影图中心的方法如图 6 所示：

[0074]

$$\frac{\Delta L_2}{\sin \alpha_2} = 2R \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

[0075]

$$\frac{\Delta L_1}{\cos \alpha_1} = 2R \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

$$[0076] \quad \Delta L_1 = \frac{c\Delta t_1}{2} \quad (3)$$

$$[0077] \quad \Delta L_2 = \frac{c\Delta t_2}{2} \quad (4)$$

[0078]

$$\beta_2 = \frac{180^\circ - \Delta\varphi}{2} - \alpha_2 \quad (5)$$

$$[0079] \quad \beta_1 = 90^\circ - \beta_2 \quad (6)$$

[0080]

$$\alpha_1 = \frac{180^\circ - \Delta\varphi}{2} - \beta_1 \quad (7)$$

$$[0081] \quad \alpha_3 = 90^\circ - \alpha_1 \quad (8)$$

[0082]

$$\theta_{in} = \alpha_4 = \frac{180 - \Delta\varphi}{2} - \alpha_3 \quad (9)$$

[0083] 其中, ΔL_1 , ΔL_2 为时间延迟 Δt_1 , Δt_2 所对应的距离延迟, $\Delta\varphi$ 为局域角度变量, R 为特征点到旋转中心的距离。

[0084] 由 (5) (6) (7) (8) (9) 可得到:

[0085]

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \Delta\varphi - \alpha_2 \quad (10)$$

[0086]

$$\theta_{in} = \frac{\pi}{2} - \frac{3}{2}\Delta\varphi - \alpha_2 \quad (11)$$

[0087] 将 (10) 式代入 (2) 式,

[0088]

$$\frac{\Delta L_1}{\sin(\Delta\varphi + \alpha_2)} = 2R \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (12)$$

[0089] 比较 (1) (12) 式, 可以得到:

[0090]

$$\frac{\Delta L_2}{\sin \alpha_2} = \frac{\Delta L_1}{\sin(\Delta\varphi + \alpha_2)} \quad (13)$$

[0091] 将 (13) 式展开可以得到:

[0092]

$$\Delta L_2 \sin(\Delta\varphi + \alpha_2) = \Delta L_1 \sin \alpha_2$$

[0093]

$$\Delta L_2 (\sin \Delta\varphi \cos \alpha_2 + \cos \Delta\varphi \sin \alpha_2) = \Delta L_1 \sin \alpha_2$$

[0094]

$$\Delta L_2 \sin \Delta\varphi \cos \alpha_2 = \Delta L_1 \sin \alpha_2 - \Delta L_2 \cos \Delta\varphi \sin \alpha_2 \quad (14)$$

[0095] 将 (14) 式两边同时除以 $(\Delta L_1 - \Delta L_2 \cos \Delta\varphi) \cos \alpha_2$, 可以得到:

[0096]

$$\tan \alpha_2 = \frac{\Delta t_2 \sin \Delta \varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta \varphi} \quad (15)$$

[0097] 将求出的 α_2 值代入 (1), 从而可以求出特征点 A 到旋转中心距离 R 值和角度 φ_1 对应的投影角度 θ_{th} :

[0098]

$$R = \frac{c\Delta t_2}{4 \sin(\Delta \varphi / 2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta \varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta \varphi})]} \quad (16)$$

[0099]

$$\theta_{th} = \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta \varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta \varphi}) - \frac{3\Delta \varphi}{2} \quad (17)$$

[0100] 其中, c 为光速, Δt_1 为角度 φ_1, φ_2 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿时间延迟, Δt_2 为角度 φ_2, φ_3 所对应的特征点 A 反射投影信息上升沿时间延迟;

[0101] ⑦根据步骤④得到半径 R 和对应投影中心反投影角度 θ_{th} , 对所得到的含有特征点 A 反射信息的反射投影角度进行调整, 具体调整公式为:

[0102]

$$\theta_i = \begin{cases} \varphi_i - \varphi_1 + \theta_{th} = \varphi_i - \varphi_1 + \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta \varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta \varphi}) - \frac{3\Delta \varphi}{2} & \Delta t_1 > \Delta t_2 \\ \varphi_i - \varphi_3 + \theta_{th} = \varphi_i - \varphi_3 + \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta \varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta \varphi}) - \frac{3\Delta \varphi}{2} & \Delta t_1 < \Delta t_2 \end{cases} \quad (18)$$

[0103] 其中 $i = 1, 2, \dots, N$, 根据式 (16) (18) 可以得到含有特征点 A 反射投影信息的角度 φ_i 所对应的角度 θ_i , 在各个角度含有特征点 A 反射投影信息的相应投影 $p_i(t, \theta_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), 特征点 A 反射投影信息到旋转中心投影距离 ΔS_i , 如图 7 所示:

[0104]

$$\Delta S_i = \frac{c\Delta t_2}{4 \sin(\Delta \varphi / 2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta \varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta \varphi})]} \sin \theta_i \quad (19)$$

[0105] ⑧将单个角度 θ_i 特征点投影和旋转中心投影所对应的距离信息 ΔS_i 转换为时间信息 $\Delta \tau_i$:

[0106]

$$\Delta \tau_i = \frac{1}{2} \frac{\Delta t_2}{\sin(\Delta \varphi / 2) \sin[\arctan(\frac{\Delta t_2 \sin \Delta \varphi}{\Delta t_1 - \Delta t_2 \cos \Delta \varphi})]} \sin \theta_i \quad (20)$$

[0107] 其中 c 是光速, 由式 (20) 可以得到特征点投影和旋转中心投影的时间间隔。特征点投影和旋转中心投影的前后顺序, 可以通过角度 θ_i 的正负来确定。 θ_i 为正, 旋转中心投影在特征点投影前 $\Delta \tau_i$ 处; θ_i 为负, 旋转中心投影在特征点的后 $\Delta \tau_i$ 处, 如图 8 所示。

[0108] ⑨通过观测特征点投影和角度 θ_i 对应的时间延迟 $\Delta \tau_i$ 将多角度旋转中心投影排列在同一直线上, 实现投影图的对准, 如图 9 所示。

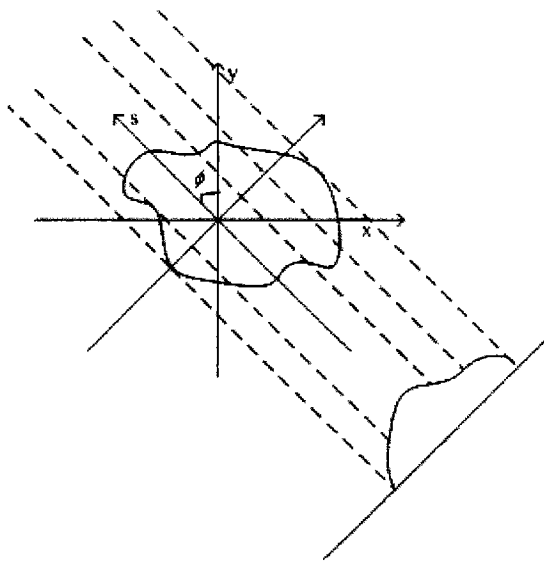


图 1

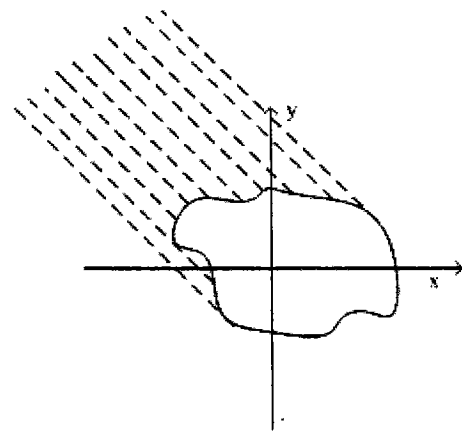


图 2

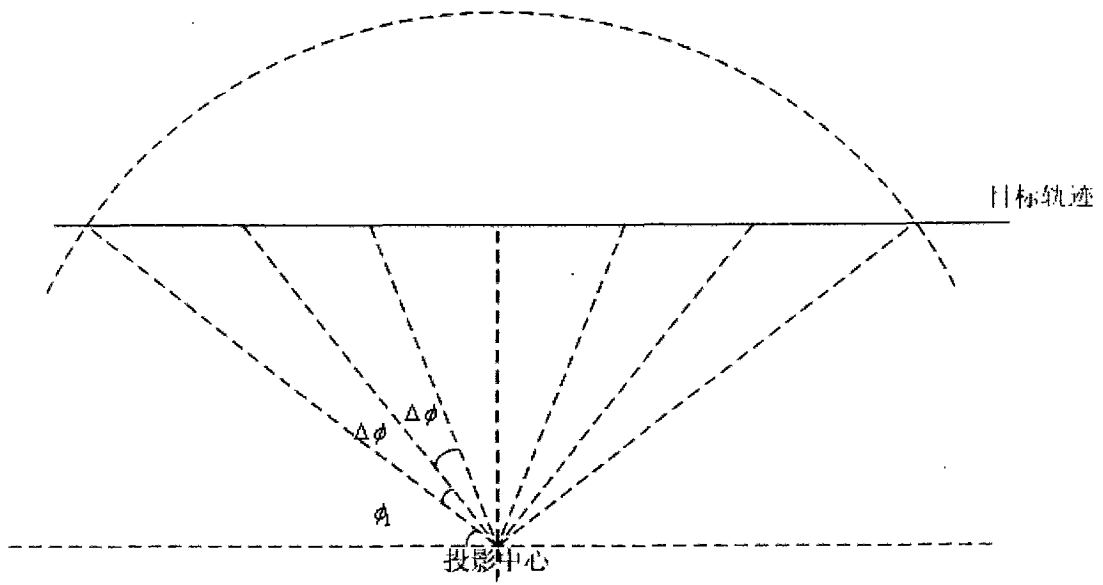


图 3

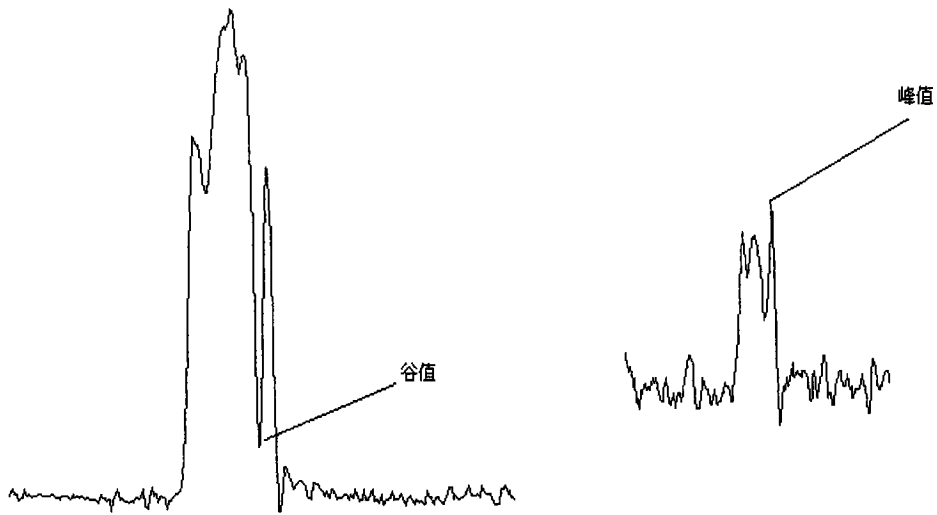


图 4

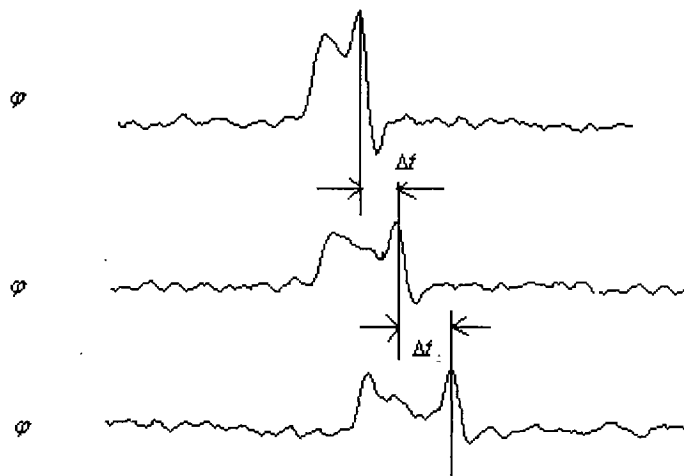


图 5

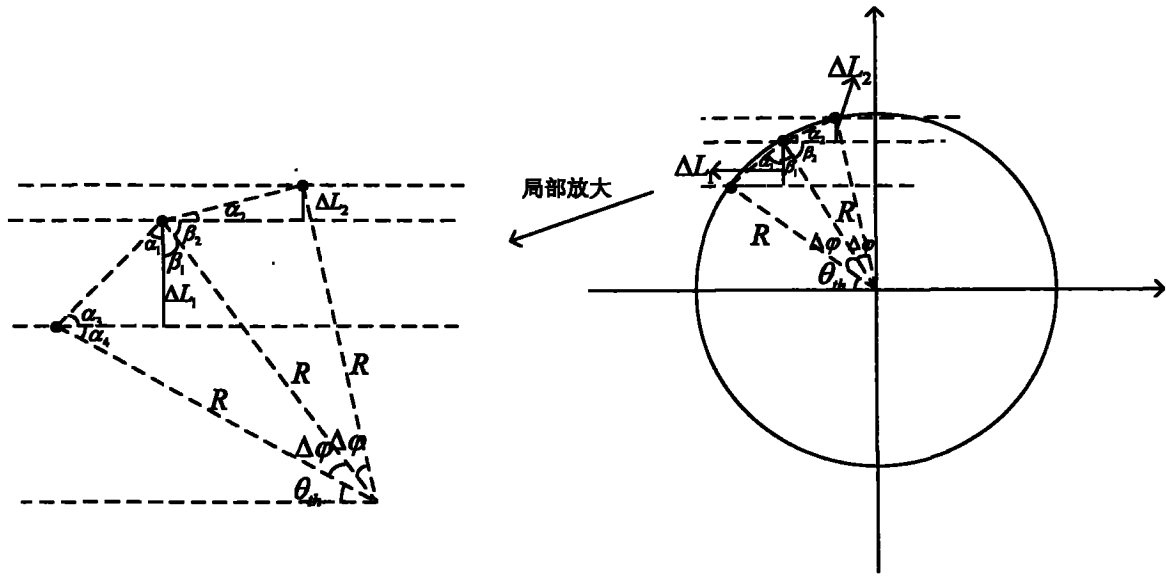


图 6

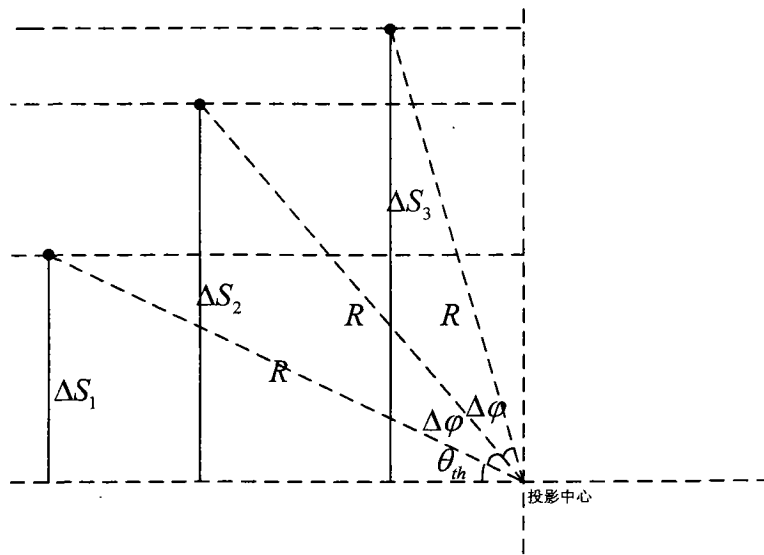


图 7

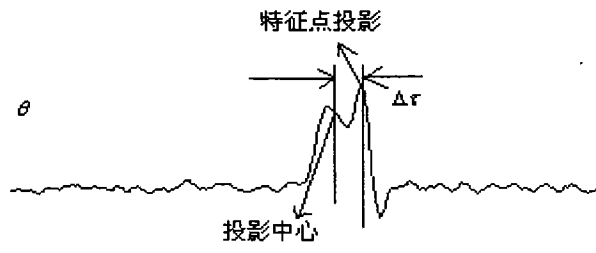


图 8

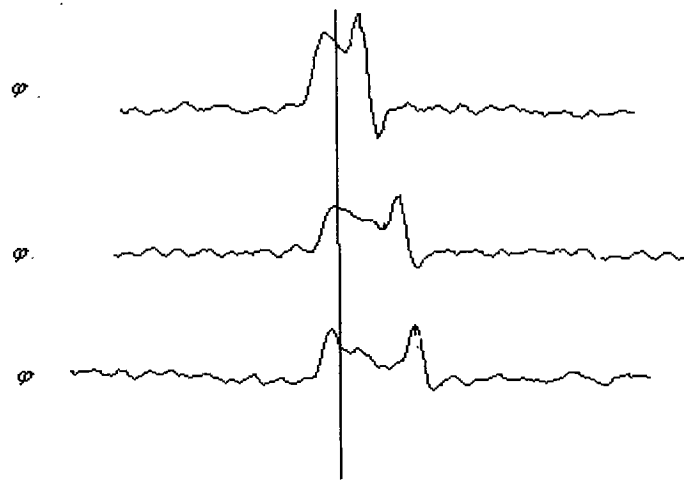


图 9