

文章编号: 0253-2239(2007)09-1600-5

干涉型计算层析成像光谱仪的图像重建^{*}

王新全 黄庆梅 廖宁放 林 宇

(北京理工大学信息科学技术学院颜色科学与工程国家实验室, 北京 100081)

摘要: 针对干涉型计算层析成像光谱仪(CTII)提出了一种光谱图像数据立方体的重建方法。干涉型计算层析成像光谱仪是一种将空间调制傅里叶变换成像光谱仪(FTIS)的原理与计算层析成像光谱仪(CTIS)的原理相结合的一种新型成像光谱仪,具有高通量、高光谱分辨力以及高空间分辨力的特点。分析和讨论了干涉型计算层析成像光谱仪的工作原理以及获取图像的特征,介绍了光谱图像数据立方体的重建方法。根据多角度投影数据的特点提出采用卷积反投影计算层析成像图像重建算法,给出了图像重建步骤以及相应的数学表达式。对 D65 光源照明条件下的 396×396 像素目标进行了仿真实验,投影角度为 $0 \sim 180^\circ$,步长为 0.5° ,列出了仿真实验部分结果。实验结果验证了干涉型计算层析成像光谱仪及其图像重建算法的可行性。

关键词: 成像光谱仪; 图像重建; 卷积反投影; 干涉型计算层析成像光谱仪; 傅里叶变换成像光谱仪; 数据立方体重建

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

Image Reconstruction for the Computed-Tomography Imaging Interferometer

Wang Xinquan Huang Qingmei Liao Ningfang Lin Yu

(National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: An algorithm of image spectral data cube reconstruction for the computed-tomography imaging interferometer (CTII) is presented. Computed-tomography imaging interferometer combines advantages of both conventional spatially modulated Fourier transformation imaging spectrometer (FTIS) and computed-tomography imaging spectrometer (CTIS) such as high through put, high spectral resolution and high spatial resolution. The working principle of computed-tomography imaging interferometer and the characteristics of the images acquired from computed-tomography imaging interferometer are analyzed, and the method of data cube reconstruction is given. The convolution back-projection (CBP) is used in computed-tomography (CT) reconstruction, which is suitable for multiangular projection. The steps of image reconstruction and corresponding mathematical expression are introduced in detail. The simulations are carried out under the illumination of D65, a target of 396×396 pixels is projected at the range of $0 \sim 180^\circ$, and the projection interval is 0.5° . Part of the reconstructed images is displayed. The experimental results prove that the method is feasible.

Key words: imaging spectrometer; image reconstruction; convolution back projection; computed-tomography imaging interferometer; Fourier transform imaging spectrometer; data cube reconstruction

1 引 言

干涉型计算层析成像光谱仪(CTII)^[1]把计算层析成像光谱仪(CTIS)原理与传统空间调制傅里叶变换成像光谱仪(FTIS)原理相结合,可以实现高通量、高光谱分辨力以及高空间分辨力的要求。与

大孔径空间调制成像光谱仪相比,它能够直接获得投影景物干涉条纹,而不需要进行条纹重组,同时采用凝视的方式采集图像,光能利用率更高,能够实现真正意义上的大孔径;与计算层析成像光谱仪相比,它解决了“锥失”现象,提高了图像重建效果,提高了

^{*} 国家自然科学基金(60377042)和国家 863 计划(2006AA12Z124)资助课题。

作者简介: 王新全(1982—),男,陕西汉中,人,硕士研究生,主要从事成像光谱技术、高光谱技术等方面的研究。

E-mail: wangxinquan651@sohu.com

导师简介: 黄庆梅(1963—),女,河北人,副教授,主要从事数字颜色技术、光谱技术等方面的研究。

E-mail: huangqm@bit.edu.cn

收稿日期: 2006-12-13; 收到修改稿日期: 2007-03-21

空间分辨力和光谱分辨力。因此,干涉型计算层析成像光谱仪综合了计算层析成像光谱仪与空间调制傅里叶变换成像光谱仪的优点,具有很高的研究价值。

文献[1]中给出了相应的光谱图像重建方案,并没有给出具体算法,其中在傅里叶空间插值目前还没有实际可行的算法。因此本文针对多角度投影数据的特点在计算层析成像(CT)重建过程中采用通用的卷积反投影的算法,并对整个图像数据立方体重建过程进行了仿真实验,得出一个完整的针对该成像光谱仪光谱数据立方体的重建算法。

2 图像重建原理

计算层析成像光谱仪的基本原理可以概括为:一个沿三维方向分布(二维空间和一维光谱)的多光谱图像数据立方体,可以压缩或投影成沿二维方向分布(一维空间和一维光谱)的多光谱图像序列,再采用计算层析成像重建算法可将压缩的二维多光谱

图像序列重建为原始目标的光谱数据立方体^[1~3]。

干涉型计算层析成像光谱仪采用干涉结构取代了普通计算层析成像光谱仪中的色散结构,因此整个系统是在普通计算层析成像光谱仪的基础上增加了一个干涉环节,系统获得的是投影干涉图案序列,通过傅里叶逆变换就可以把干涉图案序列转换为投影光谱图案序列^[1]。采用计算层析成像重建算法就可以将这些投影光谱图案序列重建为原始目标的光谱图像数据立方体。

2.1 图像特征

图1为干涉型计算层析成像光谱仪在目标旋转角度为 0° 时获取图像的特征。焦平面探测器上获得的图像在 x 方向为目标沿 y 方向的投影, δ 方向为该投影经过干涉仪的干涉条纹, δ 代表光程差。由于是双边采集数据,光程差为零的位置处在图像的中间,干涉条纹呈对称分布,如图1(b)所示。

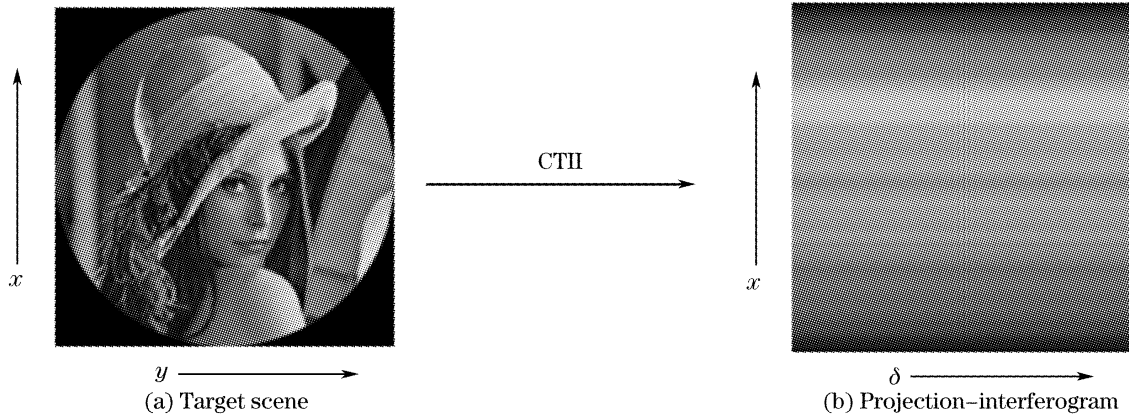


图1 干涉型计算层析成像光谱仪图像获取。(a) 目标景物, (b) 投影干涉图

Fig. 1 Image acquisition of computed-tomography imaging interferometer. (a) Target scene, (b) projection interferogram

假定干涉型计算层析成像光谱仪系统得到的输入图像信息为 $f(x, y, \nu)$,如图1(a)所示,其中 x, y 表示图像平面,垂直于光轴方向, ν 表示图像的光谱分布($\nu=1/\lambda$ 代表波数,单位为 cm^{-1}),垂直于 x, y 平面。投影方向平行于 y 轴方向,则旋转过 θ 角度的二维图像的 $f_\theta(x, y, \nu)$ 在 x 方向的一维投影为(对于某一个旋转角度 θ, ν 可以看作固定参量)

$$p_\theta(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_\theta(x, y, \nu) d\nu, \quad (1)$$

其中

$$f_\theta(x, y, \nu) = f(x \cos \theta - y \sin \theta, \sin \theta + y \cos \theta, \nu).$$

2.2 数据立方体重建原理

目标在 $0 \sim \pi$ 角度范围内以等角度间距旋转 n 个角度,在干涉型计算层析成像光谱仪焦平面探测器上就能采集到对应于 $p_\theta(x, \nu)$ 的 n ($n = \pi/\Delta\theta, \Delta\theta$

为旋转步长)组分布为 $I_\theta(x, \delta)$ 的投影干涉图案,将这一系列图案按角度顺序排列在一起就得到一个投影干涉数据立方体,如图2(a)所示。根据干涉光谱学原理,对 $I_\theta(x, \delta)$ 图案序列进行沿 δ 方向的一维傅里叶逆变换,就可以还原到光谱投影图案的 $p_\theta(x, \nu)$ 序列,分别对投影干涉数据立方体中的每一幅图案进行一次这样的操作就可以得到相应的投影光谱数据立方体,如图2(b)所示。此时,数据立方体中所有图案的一个波数 ν_0 对应的列就是原始目标的波数为 ν_0 的旋转角度为 θ 的投影值,针对每一个波数 ν_0 就能通过计算层析成像重建得到波数为 ν_0 的光谱图像切片,如图2(b)、图2(c)所示。对所有的波数都进行相同操作就能得到所有波数的切片,从而获得光谱数据立方体,数据立方体由二维的图像和一维光谱组成,如图2(c)所示。

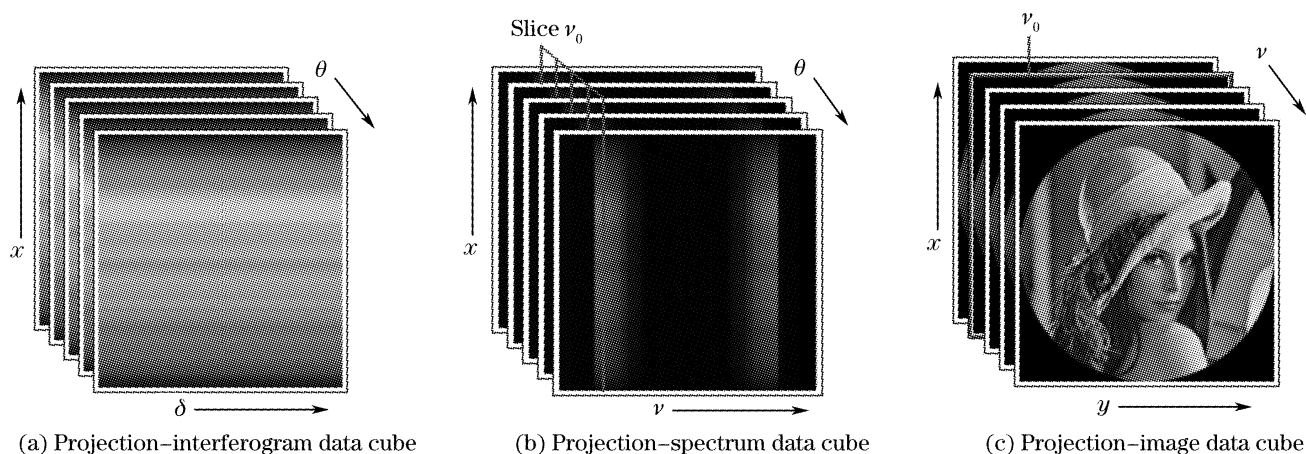


图 2 干涉型计算层析成像光谱仪图像重建图示。(a) 投影干涉数据立方体, (b) 投影光谱数据立方体, (c) 光谱图像数据立方体

Fig. 2 Graphical demonstration of image reconstruction for computed-tomography imaging interferometer. (a) Projection-interferogram data cube, (b) projection-spectrum data cube, (c) spectrum-image data cube

3 图像重建算法的仿真实现

干涉型计算层析成像光谱仪图像重建的过程包括投影干涉图获取、频谱变换和计算层析成像重建三个步骤。

3.1 投影干涉图获取

获得投影干涉图的仿真过程按照干涉型计算层析成像光谱仪的成像原理进行。首先将目标图像旋转,然后沿水平方向上依次进行投影和反投影,最后叠加干涉条纹。投影的过程为将图像每一列上的所有像素值累加到第一列上,反投影则为将第一列的累加值在平均分布到每一列中。干涉条纹的仿真采用 D65 光源数据,每一行的幅度由投影值的亮度来控制,干涉数据采用双边采集方式。

3.2 频谱变换

频谱变换基于干涉光谱学基本方程^[4]:

$$B(\nu) = \int_{-L}^L I(\delta) \cos(2\pi\nu\delta) d\delta, \quad (2)$$

式中 $B(\nu)$ 表示光谱分布, $I(\delta)$ 表示干涉分布, ν 表示波数, δ 表示光程差, L 表示最大光程差。

频谱变换的过程就是将一维投影一维干涉的二维投影干涉图沿 δ 方向进行一维傅里叶变换得到一维投影一维光谱的二维投影光谱图,得到的投影光谱图中的每一列就对应一个波数的投影图,过程如图 3(a)、图 3(b)所示,图 3(c)、图 3(d)分别为图 3(a)、图 3(b)对应一行的干涉曲线和光谱曲线。

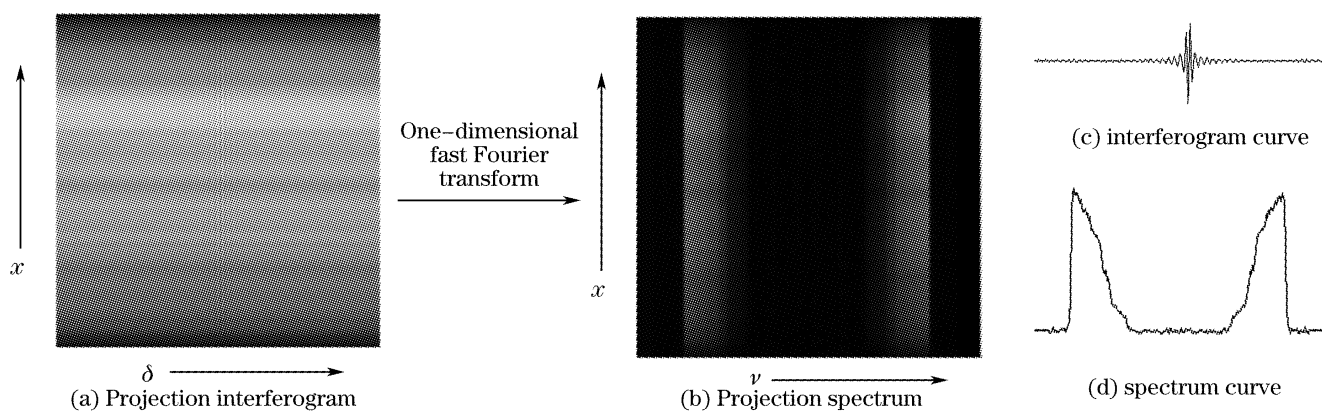


图 3 频谱变换过程。(a) 投影干涉图, (b) 投影光谱图, (c) 干涉曲线, (d) 光谱曲线

Fig. 3 Process of frequency spectrum transformation. (a) Projection interferogram, (b) projection spectrum, (c) interferogram curve, (d) spectrum curve

3.3 计算层析成像重建^[5]

计算层析成像重建过程是利用该重建算法将获得的投影光谱重建为光谱图像切片的过程。计算层

析成像重建过程主要基于中心切片定理,通常有直接傅里叶变换求逆法、滤波(卷积)反投影法以及代数重建算法等。在投影角度较多、投影数据较充足

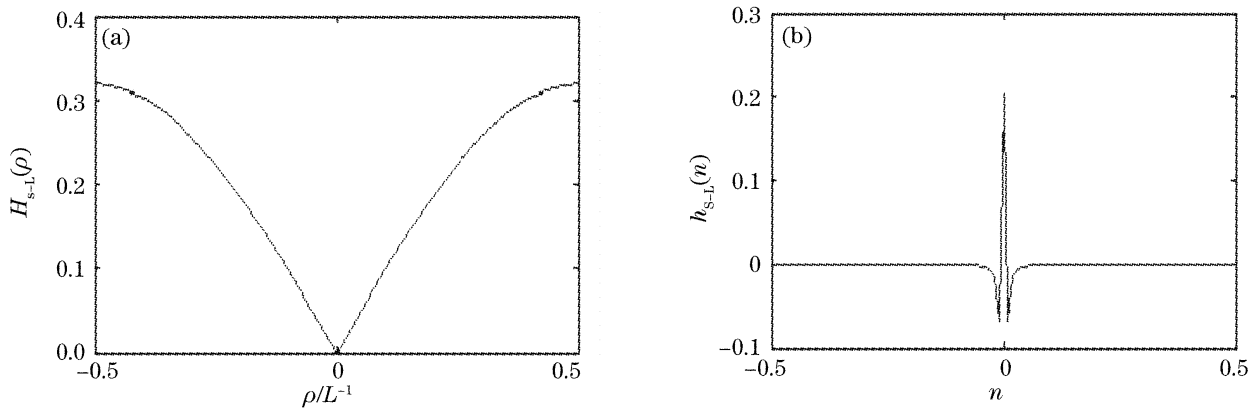


图 4 S-L 滤波函数特性。(a) 频域特性，(b) 时域特性

Fig. 4 Characteristic of S-L filter. (a) Characteristic in frequency, (b) characteristic in time domain

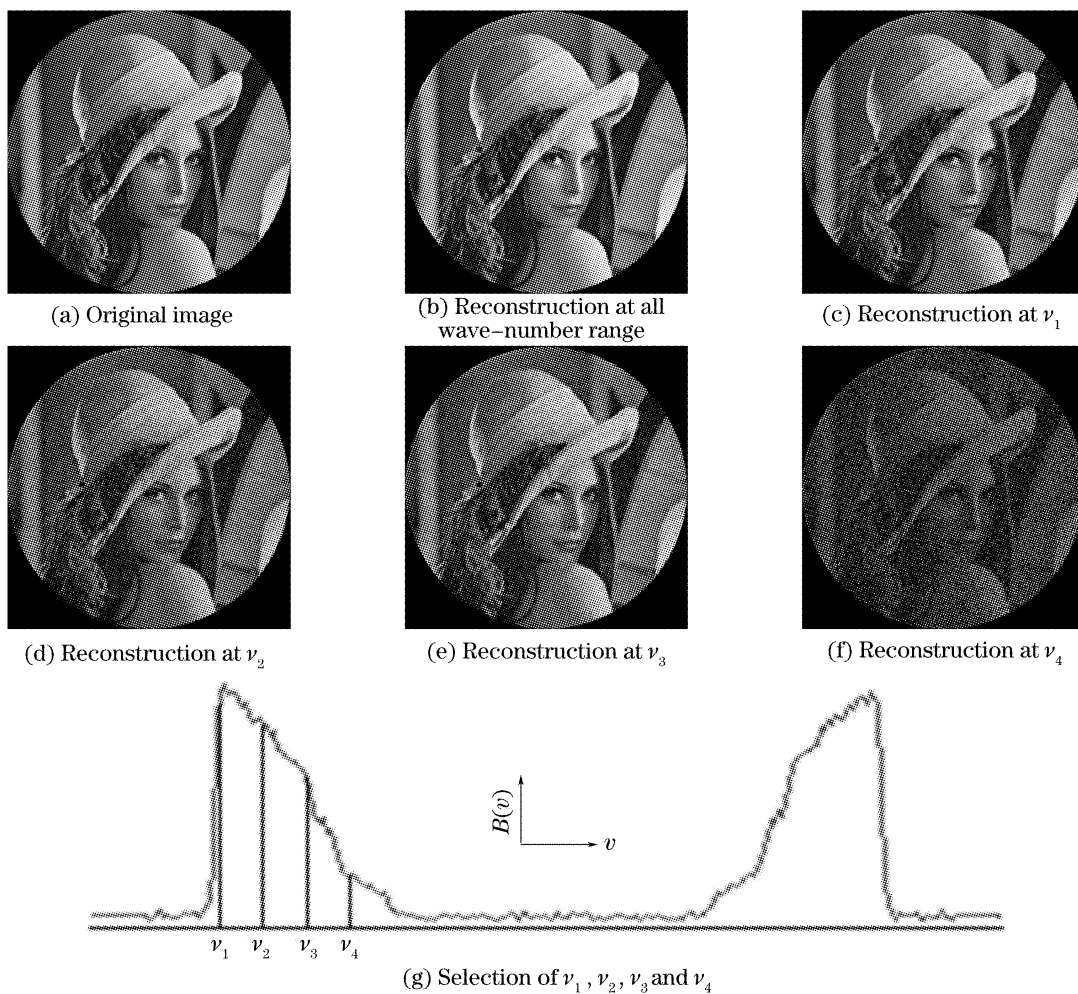


图 5 原图像和重建图像的比较。(a) 原图像，(b) 全波段重建，(c) ν_1 波数重建，(d) ν_2 波数重建，(e) ν_3 波数重建，(f) ν_4 波数重建，(g) ν_1, ν_2, ν_3 和 ν_4 的选择

Fig. 5 Comparison between original target and the reconstructed image. (a) Original image, (b) reconstruction at all wave-number range, (c) reconstruction at ν_1 , (d) reconstruction at ν_2 , (e) reconstruction at ν_3 , (f) reconstruction at ν_4 , (g) selection of ν_1, ν_2, ν_3 and ν_4

的情况下，卷积反投影算法具有重建速度快、重建质量好以及易于硬件实现的优点，因此文中采用了卷积反投影重建算法，其数学表达式为

$$f(x, y, \nu) = \int_0^\pi h(x) * p_\theta(x, \nu) d\theta, \quad (3)$$

式中 $f(x, y, \nu)$ 为波数为 ν 的重建图像切片； $h(x)$ 为卷积函数； $p_\theta(x, \nu)$ 为旋转角度为 θ ，波数为 ν 时的投影值。

卷积反投影算法的实现步骤为

- 1) 把每一个旋转角 θ 下的测得的投影 $p_\theta(x, \nu)$

与卷积函数 $h(x)$ 进行卷积, 得到卷积后的投影 $g_\theta(x, \nu)$;

2) 对每一个旋转角 θ , 把 $g_\theta(x, \nu)$ 进行反投影得到 $g_\theta(x, y, \nu)$;

3) 将每一个 $g_\theta(x, y, \nu)$ 旋转对应的 θ 角度后进行累加, 得到重建图像。

卷积反投影算法中, 卷积函数的选取是十分重要的, 它直接影响到重建图像的质量。常用的卷积函数有 R-L 卷积函数和 S-L 卷积函数, 其中 R-L 卷积函数会导致重建图像出现Gibb's现象, 表现为明显的振荡响应, 若反投影数据有噪声, 重建效果会比较差。而用 S-L 卷积函数重建图像, 其振荡响应减小, 对含有噪声的投影数据, 它的重建效果也会比 R-L 更好一些, 所以, 文中将采用 S-L 滤波函数。

S-L 滤波函数的频域响应及时域离散表达式分别为^[6]

$$H_{S-L}(\rho) = \left| \frac{1}{\pi} \sin(\pi\rho) \right| \text{rect } \rho, \quad (4)$$

$$h_{S-L}(n) = \frac{2}{\pi^2(1-4n^2)}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (5)$$

S-L 滤波器的频域及时域特性如图 4 所示。

假定在 D65 光源照明条件下, 在 $0 \sim \pi$ 角度范围内旋转 360 次, 每次旋转 0.5° , 分别对原始图像进行了全谱段的重建仿真和四个单一波段的重建仿真, 仿真结果如图 5 所示。

4 结 论

本文针对干涉型计算层析成像光谱仪提出了一

种光谱图像数据立方体的重建方法, 通过详细的理论推导得出具体的重建实现过程, 并对该算法进行了仿真实验。仿真实验结果表明这种重建算法实际可行, 可以应用于实用的光谱图像数据立方体重建。下一步的工作是解决光谱能量较低时信噪比提高的问题, 以及将算法应用到实际的光谱数据立方体的重建中去。

参 考 文 献

- 1 Liao Ningfang, Lin Jun, Wu Wenmin *et al.*. Principle and realization of the computed-tomography imaging interferometer [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 351~353 (in Chinese)
廖宁放, 林 军, 吴文敏 等. 干涉型计算层析成像光谱仪的实现方法[J]. *光学技术*, 2005, **31**(3): 351~353
- 2 Ningfang Liao, Shufang He, Jun Lin *et al.*. Research of a computed-tomography imaging interferometer[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6031**: 60310A-1~60310A-4
- 3 Liu Liangyun, Yuan Yan, Xiangli Bin *et al.*. High-throughput computed-tomography imaging spectrometer and its simulated experiment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 198~201 (in Chinese)
刘良云, 袁 艳, 相里斌 等. 高通量层析成像光谱仪的仿真研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 198~201
- 4 Xiangli Bin. Spectral technique for interference imaging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6): 116~119 (in Chinese)
相里斌. 干涉成像光谱技术[J]. *光电工程*, 1998, **25**(6): 116~119
- 5 Zhuang Tiange. *CT Principle and Algorithm* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992. 37~48 (in Chinese)
庄天戈. *CT原理与算法* [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 37~48
- 6 Yang Min, Lu Hongnian, Fu Jian. A new function based on convolutional back-projection CT reconstruction[J]. *CT Theory and Applications*, 2000, **9**(Supplement): 29~32 (in Chinese)
杨 民, 路宏年, 傅 健. 基于卷积反投影 CT 重建的一种新型实用滤波函数[J]. *CT理论与应用研究*, 2000, **9**(增刊): 29~32