

## 富含高频的截面精确重建

韩彦<sup>1</sup>, 宋一中<sup>2</sup>

(1. 山东财经大学实验中心, 山东 济南 250014; 2. 山东德州学院物理系, 山东 德州 253000)

**摘要:**应用非线性自适应自动追踪目标的迭代重建算法(NAIRT)重建富含高频的截面。选用圆柱形PVC管材模拟轴对称场,法向截面是PVC圆环,对于截面场来说,PVC材质圆环即是矩形脉冲信号。X-ray对PVC管法向透射,采集透射影像。对PVC法向切片,从透射影像中提取切片的投影信息,应用NAIRT反投影迭代重建。结果发现,PVC材质对X-ray的吸收系数大约是2.2~2.6;重建PVC环厚度是8个像素;外直径是96个像素;根据PVC管材的参数,计算的重建PVC环厚度相对于管直径误差为0.46%。对重建数据灰度化,结果发现,不论灰度级怎么量化,PVC环厚度均匀、恒定;边缘清晰、分明。意味着重建结果PVC材质环的数据十分陡峭,从信号角度分析,矩形脉冲信号得以精确重建。综合分析发现,NAIRT能够精确重建富含高频成分的截面。

**关键词:**X射线透射;吸收谱;投影;滤波;层析

**中图分类号:**0434.19 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.017

## A field rich in high-frequency components being accurately reconstructed with our tomography algorithm

HAN Yan<sup>1</sup>, SONG Yi-zhong<sup>2</sup>

(1. Experimental Teaching Center, Shandong University of Finance and Economics, Ji'nan 250014, China;  
2. Physical Department, Dezhou University, Dezhou 253000, China)

**Abstract:** Our home-made nonlinear auto-adjusting iterative reconstruction technique (NAIRT) was used to reconstruct a field rich in high-frequency components. A piece of cylindrical PVC pipe was selected to simulate axisymmetric fields. Its normal cross sections are PVC rings. As far as reconstructed fields are concerned, PVC rings are their rectangular pulse signals. The PVC pipe was normally transmitted by X-rays, and the transmitting image, called projection, was recorded. The PVC pipe was sliced by normal direction. The relative projection data of each slice could be extracted out from the projection image easily. One slice's projection data were directly inverse-projected for iterating reconstruction. The iterating algorithm used here is our home-made NAIRT. As results, the absorption coefficient of PVC to X-ray is about 2.2~2.6. The thickness of each PVC ring is 10 pixels, and its external diameter is 96 pixels. Based on PVC pipe parameters, the error of the reconstructed PVC ring's thickness is about 0.46% relative to the pipe external diameter. The reconstruction data were transformed into grayscale image. As results, no matter how to quantize grayscales, the thickness of the PVC ring kept uniform and constant. The edges of rings show clear and distinct. This means that the reconstructed PVC rings are very steep in signal data. As far as signal analysis is concerned, the rectangular pulse signals of PVC rings were accurately reconstructed. Based on analysis above, we considered that, NAIRT could be competent to reconstructing a field rich in high-frequency components.

**Key words:** X-ray transmission; absorption spectra; projections; filtering; tomography

基金项目:国家自然科学基金项目(No.11604040)资助。

作者简介:韩彦(1976-),女,副教授,硕士,主要从事光学信息处理算法研究。E-mail:yanhan2019@126.com

通讯作者:宋一中(1971-),男,副教授,博士,主要从事光学计量技术研究。E-mail:yizhongsong@126.com

收稿日期:2018-12-27

## 1 引言

矩形脉冲的频谱是 sinc 函数,其频率成分在频域分布在  $-\infty \sim +\infty$  上<sup>[1-2]</sup>。如果采用余弦函数合成矩形脉冲,则将出现吉布斯现象<sup>[2-3]</sup>。如果将其频谱主瓣加窗截断,则将泄露许许多多的高频成分而使波形失真<sup>[3-4]</sup>。这就是说,矩形脉冲含有丰富的高频成分,将其重建,难度较大<sup>[2,4]</sup>。在 CT 技术上,常采用滤波反投影算法重建截面,反投影是逆光路求解光媒质组相分布<sup>[5-6]</sup>。在迭代过程中,线性迭代可能不收敛,为了提高迭代过程的收敛性,常常采用滤波方法,抑制迭代偏聚<sup>[7-8]</sup>。但是,滤波同时会滤掉高频有效信号,如果截面含有矩形脉冲成分,那么由于滤波滤掉了高频成分,矩形脉冲将出现失真<sup>[9-10]</sup>,映射到 CT 影像上,则图像各组织间的界限模糊,尤其高频成分的边缘不能清晰显现。图像的后处理可以使边缘锐化,但可能改变了组织的边界,导致阅片误诊,危害甚大。所以提高 CT 影像质量,改进重建算法一直是医疗设备研发工作者的研究热点<sup>[11-12]</sup>。

本文采用圆柱形 PVC 管模拟含矩形脉冲成分的截面。PVC 管法向截面是 PVC 圆环,截面组织分布,PVC 材质环即是矩形脉冲信号,任向纵切面都含有一个或两个矩形脉冲。X-ray 对 PVC 管法向投影,反投影重建截面。在反投影时,开发新的算法,尝试关闭滤波器,精确重建 PVC 材质环。

## 2 PVC 管 X 射线透射实验

层析算法要求对层析对象空间全向投影,而且要求每一方向的投影条件完全相同,否则很可能迭代不收敛,即使收敛也不能正确重建目标。如果层析对象具有轴对称性,理论上,任意方向的投影都是相同的。圆柱状 PVC 管材,是标准的圆柱形管,其法向截面是圆环,是一种标准的轴对称场。本工作就是选用 PVC 管模拟轴对称场,如图 1 所示。



图 1 圆柱形 PVC 管

Fig. 1 Cylindrical PVC pipe

图 1 给出了实验用圆柱形 PVC 管材,直径 20.5 mm,壁厚 1.7 mm。将 PVC 管直接做 X 射线透

射实验,在 X 光透射机上,X 射线穿过 PVC 管后的透射影像在图 2 给出。

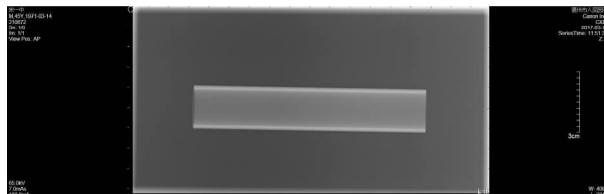


图 2 PVC 管的 X 射线投影

Fig. 2 X-ray projection of the PVC pipe

图 2 是 PVC 管的 X 射线透射影像,对 PVC 管横向切片,提取切片的透射信息。当切片足够薄时,切片可近似为截面。截面的透射信息,层析算法上,称为投影,如图 3 所示。

## 3 PVC 管 X 射线吸收谱分析

图 3 给出的是 PVC 管的 X 射线截面投影。该投影曲线是 X 射线穿过 PVC 管时,经 PVC 管吸收后的强度灰度补值(下文称“强补”)分布曲线,所以从谱线的成因来说,是 PVC 材质对 X 射线的吸收谱,而且这种强补值直接映射着吸收强度,本文就是将这种强补值直接反投影重建截面吸收影像。

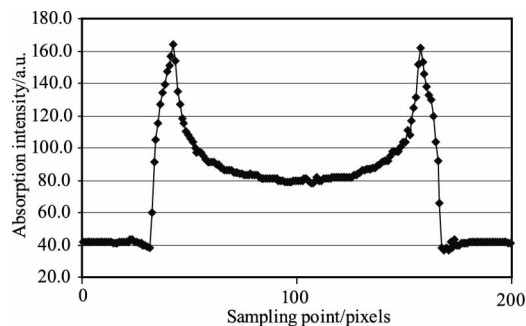


图 3 PVC 管 X 射线投影的横截面数据

Fig. 3 The cross section data of the X-ray projection

由图 3 可见,截面投影曲线可分为 3 部分:左振荡、凹弧门、右振荡。左振荡、右振荡是背景 X 射线透射强补,即 PVC 管外的透射强补。强补值大约 42,即投影信息背底约 42。背底的振荡是光源不均一的体现,振荡幅度反映了噪声的强度。该噪声信号虽然较凹弧门信息强度小的多,但也体现在凹弧门曲线的振荡上。凹弧门是投影信息,携带着 X 射线穿过 PVC 管时被吸收的信息。

在凹弧门与左、右振荡连接处,强补曲线明显下陷。我们认为是 X 射线衍射的结果。在 PVC 管边缘发生了 X 射线衍射现象,即靠近棒材边缘的 X 射线没有穿过管壁,而是绕过了管壁,发生了衍射,导

致管壁边沿透射光线增多,透射光强增大,透射光强补减小,曲线出现下陷。因此,管壁边沿出现的强补曲线下陷是 X 光衍射的结果。

#### 4 PVC 管截面重建

将图 3 所示投影去除背底,直接迭代。重建算法采用我们的最新算法:

$$f[i] [j]^{time+1} = f[i] [j]^{time} + \omega \cdot \lambda \cdot \frac{P_{a_0k} - P_{a_0k}^{time}}{\sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J A_{a_0-k}[i,j]^2} \cdot A_{a_0-k}[i,j] \quad (1)$$

(1)式算法,我们称为“非线性自适应自动追踪目标的智能迭代重建算法(NAIRT)”,关于 NAIRT,在我们的相关工作中已经给出详尽描述<sup>[13-14]</sup>,此处不再赘述。简单地说,关闭了滤波器、非线性修正、自适应追踪目标,迭代稳定、校正收敛,重建精度高。在光学相干层析、Moire 偏折层析等截面重建中均给出强有力的收敛特性和出色的重建精度<sup>[15-16]</sup>。根据式(1),迭代 30 次的结果在图 4 给出。

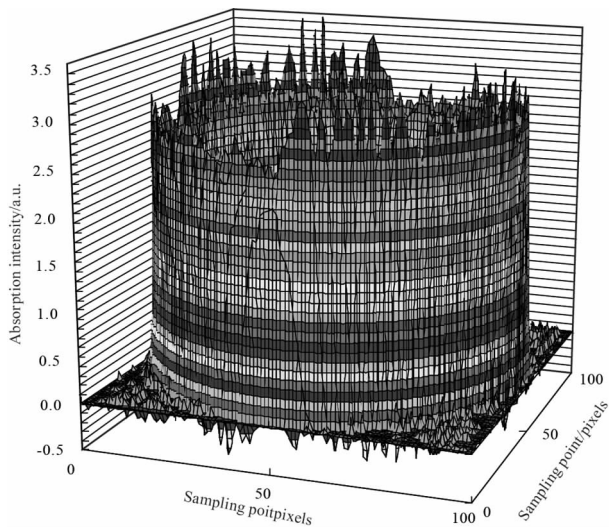


图 4 根据图 3 投影数据重建结果

Fig. 4 The reconstruction result based on the projection data shown in Fig. 3

由图 4 可见,PVC 管的断层结构十分明确;顶端噪声较大,主要原因是图 3 所示的凹弧门曲线叠加的噪声,经迭代放大,出现了偏聚现象所致。由图 4 还可以看出,截面的强补值基础在 2.2 ~ 2.6。PVC 环厚度是 8 个像素,外直径 96 个像素。根据图 1PVC 管参数,重建 PVC 环厚度相对管直径误差为 0.49%。

图 4 是三维网格数据图,Mesh figure,主要呈现

数据的分布特征。传统的 CT 片是灰度图像, Grayscale images,主要呈现重建截面数据的视觉效果。将图 4 网格数据图转换为灰度图像,量化方法采用 256 级量化、线性映射算法,结果在图 5 给出。

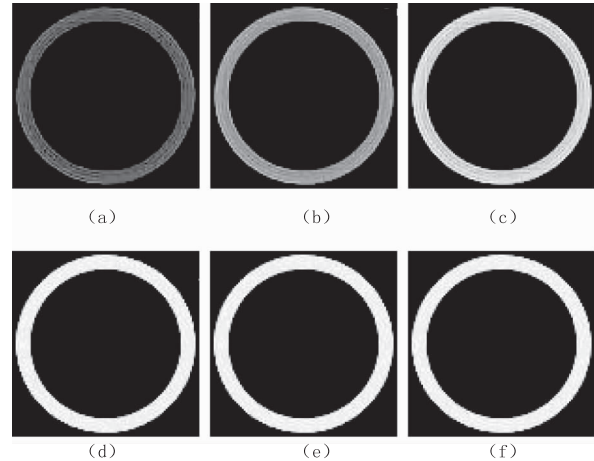


图 5 将图 4 三维网格数据图转换成灰度图像

Fig. 5 Grayscale images transformed from the mesh figure shown in Fig. 4

图 5 是 PVC 管截面的灰度图像,由图 4 的网格数据经灰度量化所得。各分图 255 阶量化阈值及 0 阶量化阈值分别如表 1 所示。255 阶和 0 阶之间,线性映射。

表 1 图 5 中量化阈值

Tab. 1 Quantization thesold in Fig. 5

	图 5(a)	图 5(b)	图 5(c)	图 5(d)	图 5(e)	图 5(f)
255 阶量化阈值	6.0	4.0	2.8	2.0	2.0	2.0
0 阶量化阈值	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0.0

由图 5 可见,PVC 管的管壁异常清晰,不论灰度级怎样选择,管壁都很明晰。而且管壁的厚度各子图基本一致,视觉上没有明显的变化,即使 255 阶量化阈值设置为 2.0,管壁也没有明显增厚。意味着,管壁的重建数据含有丰富的高频成分,图 4 的网格数据图中管壁数据突起的部分十分陡峭。这说明目标的高频成分被精确重建。

图 5 还显示,腔内空如背景。但随着 0 阶阈值的减小,腔内出现了微弱的晕轮,但并不明显,意味着假信号比较微弱,即使 0 阶阈值设置在 0.0,晕轮也相当模糊,这说明图 4 的重建精度非常高。

#### 5 结果和讨论

图 3 的投影曲线映射着 X 射线穿过 PVC 管被吸收后的强补信息,并且叠加着微弱的噪声信号。应用该投影数据重建的结果图 4 顶端噪声较大,底

端出现了丰富的负向假信号,而且还比较强。负向信号可以屏蔽。因为真空或空气对 X 射线的吸收率是最小的,所以,测试目标的强补值不应该出现负值。迭代过程,加入场控,即迭代重建约束条件,  $f[x,y] \geq 0$ ,便可以屏蔽负向假信号。加入场控,按照与图 4 相同的重建算法迭代 30 次后的重建结果在图 6 给出。

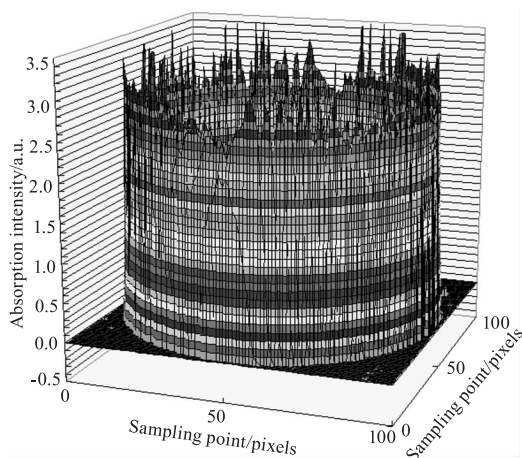


图 6 加入场控  $f[x,y] \geq 0$  的重建结果

Fig. 6 The reconstruction result with restriction  $f[x,y] \geq 0$

由图 6 可见,底端负向假信号被屏蔽,但顶端噪声有所增强,截面的基础信号强度平均约为 2.3 ~ 2.8。PVC 环厚度 8 个像素。按照相同的方法,将图 6 网格数据图转换为灰度图像,结果在图 7 给出。

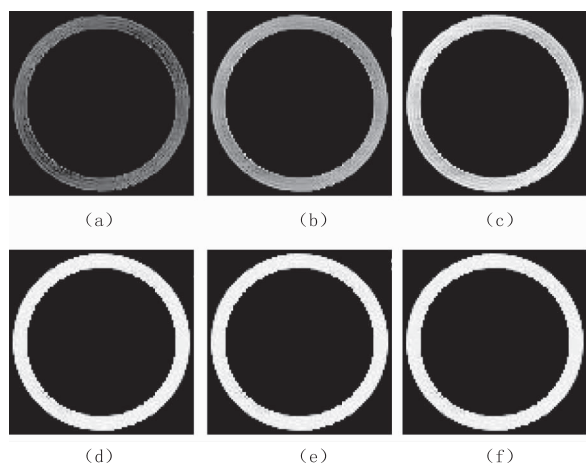


图 7 将图 6 三维网格数据图转换成灰度图像

Fig. 7 Grayscale images transformed from the mesh figure shown in Fig. 6

图 7 是 PVC 管截面的灰度图像,各分图的灰度量化阈值与图 5 各分图对应相等。由图 7 可见,PVC 管的管壁异常清晰,而且是恒定不变的;腔内被清空,图 5 中腔内的微弱晕轮假信号被清除,但内壁出现许多齿形缺口。这就是说,图 5 重建管壁的

光滑内壁结构被破坏。我们认为,主要原因是场控条件,在迭代过程中,约束条件干预了重建算法的自适应灵活性,导致结果失真。

比较图 5、图 7 可知,提高 CT 成像质量,关键还是截面重建算法。通过场控约束条件,虽然能够有效屏蔽负向假信号,但约束条件干预了重建算法的自适应灵活性,导致结果失真。而且高端噪声明显增强,这是对负向信号的约束造成了正向信号的偏聚现象。提高图 4 的层析质量,提高光源质量是关键;采集全向投影;设计更精确的重建算法,这是我们今后研究的重要方向。

## 6 结论

实验选用圆柱形 PVC 管材模拟轴对称场,采用先进的医用 X 光机透射,采集透射影像。提取 PVC 管对 X 射线的吸收信息,分析 PVC 管对 X 射线的吸收特性。结果发现,PVC 管对 X 射线的吸收是相对光程线性的。于是可以对 PVC 材质断层成像,即 CT。通过对 PVC 管材切片,从 X 光透射影像中提取切片的投影数据,按照轴对称场重建算法,采用非线性自适应自动追踪目标迭代算法,重建 PVC 管截面吸收 X 光信息,结果发现,重建截面准确显示了管材截面结构。因此,我们自开发的 NAIRT 算法能够精确重建富含高频成分的 PVC 截面。

## 参考文献:

- [1] ZHENG Junli, YING Qihang, YANG Weili. Signals and Systems[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)  
郑君里,应启珩,杨为理. 信号与系统[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [2] Oppenheim A V, Willsky A S, Hamid N S. Signals and Systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [3] Lee E A, Varaiya P. Structure Analyzing of Signals and Systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [4] WANG Lijuan, JIA Yongxing, WANG Youjun, et al. Signals and Systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 18. (in Chinese)  
王丽娟,贾永兴,王友军,等. 信号与系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 18-90.
- [5] Saxenhuber Daniela, Auzinger Günter, Louam Miska Le, et al. Comparison of methods for the reduction of recon-

- structed layers in atmospheric tomography [J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2621 – 2629.
- [6] Faiza Mekhalfa, Adabi Saba, Daoud Berkani, et al. High-resolution wavelet-fractal compressed optical coherence tomography images [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 1119 – 1123.
- [7] Chen Xingsu, Wang Xuefeng, SU Jinshan, et al. Research status and development of diffuse optical tomography system [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(6): 653 – 658. (in Chinese)  
陈兴稣, 王雪峰, 苏金善, 等. 扩散光层析成像系统研究现状及发展 [J]. 激光与红外, 2016, 46(6): 653 – 658.
- [8] Gu Yu, Hu Yihua, Hao Shiqi, et al. Study on influence of filter back-projection on laser reflective tomography [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1500 – 1504. (in Chinese)  
谷雨, 胡以华, 郝士琦, 等. 激光反射层析成像中滤波反投影算法特性研究 [J]. 激光与红外, 2015, 45(12): 1500 – 1504.
- [9] Liu Xuan, Zaki Farzana, Wang Yahui, et al. Secure fingerprint identification based on structural and microangiographic optical coherence tomography [J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2255 – 2259.
- [10] Park Kibeom, Cho Nam Hyun, Jang Jeong Hun, et al. In vivo 3D imaging of the human tympanic membrane using a wide-field diagonal-scanning optical coherence tomography probe [J]. Applied Optics, 2017, 56(9): D115 – D119.
- [11] Jin Ying, Song Yang, Qu Xiangju, et al. Three-dimensional dynamic measurements of CH<sup>\*</sup> and C<sub>2</sub><sup>\*</sup> concentrations in flame using simultaneous chemiluminescence tomography [J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4640 – 4654.
- [12] Gross, M. Selection of the tagged photons by off axis heterodyne holography in ultrasound-modulated optical tomography [J]. Applied Optics, 2017, 56(7): 1846 – 1854.
- [13] Qu Peishu, Song Yizhong. Diagnosing thermal flow field with non-linear auto-adjusting iterative reconstruction technique [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(8): 1641 – 1646. (in Chinese)  
曲培树, 宋一中. 应用非线性自适应迭代重建算法层析热流场 [J]. 光电子 · 激光, 2014, 25(8): 1641 – 1646.
- [14] Yizhong Song, Tao Sun, Peishu Qu. Nonlinear auto-adjusting iterative reconstruction technique for interferometric tomography [J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 074107.
- [15] Qu Peishu, Song Yizhong. Simulation on anti-noise performance of nonlinear auto-adjusting iterative reconstruction technique used in interferometric tomography [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(8): 1644 – 1650. (in Chinese)  
曲培树, 宋一中. 非线性自适应迭代重建算法用于相干层析抗噪仿真 [J]. 光电子 · 激光, 2013, 24(8): 1644 – 1650.
- [16] Sun Tao, Song Yizhong. Analyzing Moire pattern spectra based on the mutual transform between signals' waveform in time domain and their spectra in frequency space [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(11): 2886 – 2890. (in Chinese)  
孙涛, 宋一中. 基于时频波谱对易原理分析莫尔条纹谱 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(11): 2886 – 2890.