

类同轴X线相衬成像中空间相干性

张学龙^{1,2}, 杨 君¹, 夏 天^{2,3}

1. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学上海医疗器械高等专科学校, 上海 200093; 3. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

【摘要】目的:在临床应用中, X线光源是有限尺寸的多色光源。本文假定微焦点X光源是一个强度分布均匀的圆形准单色光源。基于基尔霍夫衍射理论, 且结合空间相干性, 再通过傅里叶变换, 最终计算得到吸收衰减函数和相位衰减函数, 分别代表对吸收效应和相位效应的影响, 本文就空间相干性的两个参数: 源半径和最佳成像距离在X线成像中对相衬成像的影响进行计算分析。**方法:**通过MATLAB计算得到了不同X射线源半径(a)和源-探测器距离(Source-Detector Distance, SDD)情况下的相衬效应曲线, 由此分析不同的 a 和SDD对应的最佳成像距离。**结果:**(1)SDD对于相衬效应所产生的影响: 当 a 取一定值时, SDD数值越大, 其对相衬效应产生的影响越明显;(2) a 对于相衬效应的影响: SDD取一定值, a 越小, 其相衬成像效果越好; 但当 $a < 5 \mu\text{m}$, a 继续减小, 其对相衬效应产生的影响几乎无变化。因此, 当 $a < 5 \mu\text{m}$ 时这种影响可以忽略。**结论:** a 取 $0.5 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$ 时相衬成像效果较好; 若确定了 a 的值, 适当增大SDD, 既保证了相衬成像的效果, 同时成像最佳位置也较容易确定。

【关键词】类同轴成像; 相衬效应; 源半径; 最佳成像距离

【中图分类号】R312; O434.19

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)04-0506-04

Spatial coherence in the in-line X-ray phase-contrast imaging

ZHANG Xue-long^{1,2}, YANG Jun¹, XIA Tian^{2,3}

1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Medical Instrumentation College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. School of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Objective In clinical application, X-ray source is a polychromatic source with a finite size. The microfocus X-ray source is assumed as a circular monochromatic source with uniform intensity distribution in this paper. Based on Kirchhoff diffraction theory, combined with spatial coherence, and then processed by Fourier transform, absorption attenuation function and phase attenuation function can be calculated. The two functions respectively show the influence on absorption effect and phase effect. In the X-ray imaging, the influences of two parameters of the spatial coherence, source radius (a) and source-detector distance (SDD), on the phase-contrast imaging are calculated and analyzed in this paper. **Methods** Phase-contrast effect curves of different a and different SDD were calculated by MATLAB to analyze the best imaging distance of different a and different SDD. **Results** When the a was a certain value, the influence of SDD on phase effect was getting obvious with the higher SDD. When SDD took a certain value, the phase effect was better with the smaller a . However, when the value of a was less than $5 \mu\text{m}$, the phase effect showed no differences. So the influence on phase effect was ignored when a was less than $5 \mu\text{m}$. **Conclusion** The phase-contrast imaging effect is satisfactory when a is between $0.5 \mu\text{m}$ and $20 \mu\text{m}$. When a is a certain value, SDD can be increased properly to guarantee the phase-contrast effect and more easily determine the optimal imaging position.

Key words: in-line imaging; phase-contrast effect; source radius; optimal imaging distance

【收稿日期】2015-02-08

【基金项目】上海医疗器械职教集团资助项目(SZJ12009Z)

【作者简介/通信作者】张学龙(1953-), 男, 教授。Tel: 18964622829; E-mail: zhangxl@usst.edu.cn。

前言

传统X射线医学透视成像是根据样品的密度分布、组成以及厚度的不同造成对X射线的吸收不同,获得像的衬度,也就是吸收衬度(Absorbing Contrast)成像,它主要基于X射线透过机体后强度信息的衰减变化^[1]。这种方法根据X线对重元素和轻元素的吸收差异而成像的,因此,通过传统的X线成像法可以很好的将硬组织和软组织区分开来^[2]。但是对于软组织而言,它们对于X线的吸收很少,对于软组织中不同生物组织之间的吸收系数的差异更小,那么传统的X线透视成像便不能为软组织提供足够的衬度,因此限制了X线透视成像的广泛应用^[3]。

由于传统X线成像方法的局限性,急需一种新型的方法弥补传统成像的不足。因此一种基于X射线相位衬度成像技术成为X射线成像领域的研究热点之一^[4]。德国科学家泽尼克在可见光波段发明了一种新的观察方法“相衬法”,此种方法能够将相位信息转换成强度信息。相位衬度成像技术是根据X射线穿过物体后引起的相位的改变量而形成衬度图像的技术。所谓相衬成像就是对入射的光波引起相位的改变,而不吸收光波,轻元素物质对X线的吸收很少,但是对相位的改变却很大^[5]。利用X射线的相位信息对物体进行成像,可以获得比吸收信息丰富得多的物质内部结构信息。这就体现了X线相衬在成像方面的巨大优势^[6]。目前为止,已经有4种比较成熟的X射线相位衬度成像方法:干涉成像法、光栅剪切成像法、衍射增强成像方法、同轴成像法。

X线相衬成像较传统的成像方法具有明显的优越性,但是目前还没有应用于临床,主要原因在于很多技术参数问题没有完全解决^[7]。其中有两个主要问题:一个是空间相干性;另一个是时间相干性。本文主要对类同轴相衬成像中的X射线源焦点的大小对空间相干性的影响,通过计算和实验对其进行分析和研究,从而确定相应的成像参数。

在临床应用上,X线球管是一个具有限定尺寸的多色光源,本文使用焦点的尺寸大小为 $0.5\ \mu\text{m}\sim 80\ \mu\text{m}$ 。通过计算我们做了以下几个工作:(1)相衬效应随源——探测器距离(SDD)的数值会产生相应的变化。(2)源半径(a)的大小对相衬效应产生直接的影响。

1 理论公式

生物软组织的相移数由生物组织的介质磁化率或者折射系数决定。X线折射系数简化后为:

(1)

其中, n 为折射系数衰减率, ϕ 为相移项, μ 为吸收项。其中:

(2)

其中, r_e 为电子半径, λ 为入射线真空波长, N 为原子密度, Z 为原子数, k 为不规则原子的散射系数。当入射X线光子能量小于结合能时,公式2可化为:

(3)

其中, E 为电子能量^[8]。

由图1可以看出物质对相位的改变要比对吸收的改变大1000倍以上^[9]。而相移项 ϕ , X线生物组织的相移可以表示为:

(4)

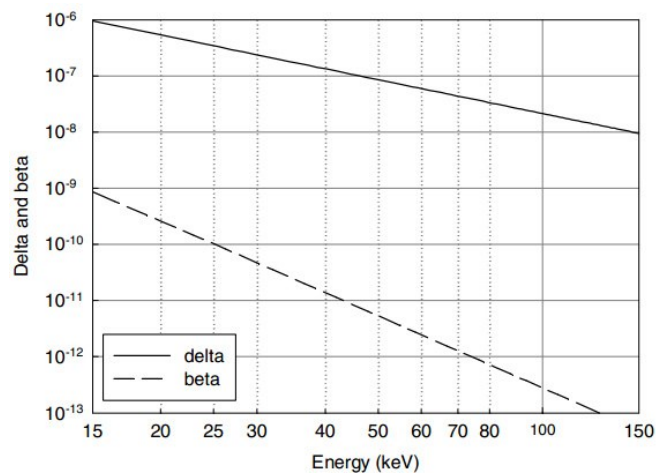


图1 胸部软组织相移项 (实线)和 吸收项(虚线)

Fig.1 Phase-contrast delta (solid line) and absorption beta (dotted line) of breast soft tissue

利用二维传递函数 $H(f)$ 模拟了生物组织的相衬和吸收效应:

(5)

其中, μ 和 ϕ 分别为 z 轴方向上的线性衰减系数和相移系数, $H(f)$ 为X线振幅传递传输。其中:

;

(6)

复相干系数(Complex Coherence Degree, CCD),根据 Van-citter-zernike定理^[10-11],可以写为:

(7)

其说明了物体平面上的不同点 和点 之间光振动的关系。约化复相干数(Reduced Complex Coherence Degree, RCCD)为^[12]:

(8)

其代表了X线源强度的相干度,其中 。因此考虑到空间相干性的影响,临床X线成像公式可以写为:

(9)

其中, 为相位衬度传递函数(Phase

Contrast Transmission Function, PCTF)。PCTF代表相衬效应,PCTF值越大,代表相衬效应越大,尽可能增大相衬效应是临床努力实现的目标之一。下面将对该传递函数进行实验讨论。

2 实验结果及讨论

2.1 SDD对相衬效应的影响

SDD分别为0.4 m、0.5 m、0.7 m和1.0 m, a 分别为0.5 μm 、10 μm 、40 μm 和80 μm ,以 R_2 为参量,进行计算分析,结果如图2所示。由图2可知, a 一定时,随着SDD的增大,PCTF值随之增大。

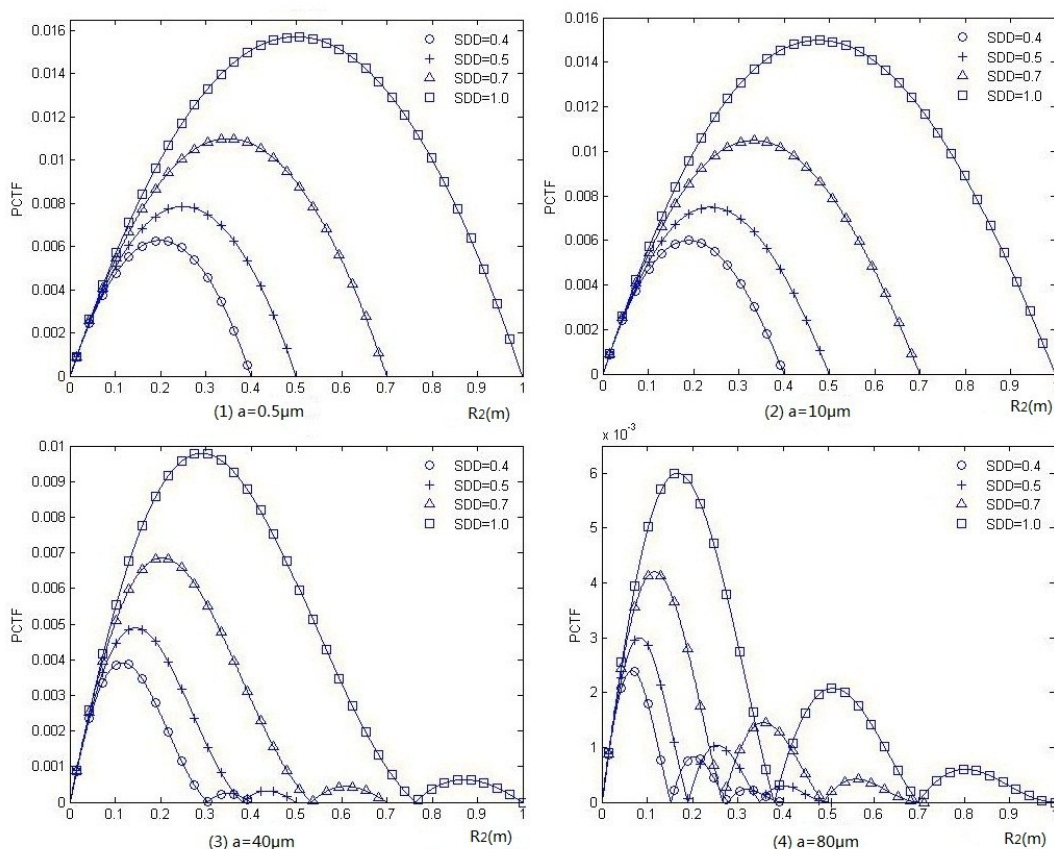


图2 相同 a 下不同SDD的相衬效应

Fig.2 Phase-contrast effects of different SDD with a certain a

2.2 a 对相衬效应的影响

首先固定多个 a 分别为0.5 μm 、1.0 μm 、5 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm 、40 μm , SDD分别取0.4 m、0.5 m、0.7 m以及1.0 m,以 R_2 为参量,进行计算分析,结果如图3所示。通过图3可以看出,SDD一定时, a 减小,PCTF增大。从图中可以看到当 a 值取1 μm 和0.5 μm 时,曲线几乎完全重合,由此可知当 a 减小到0.5 μm 时,PCTF取最大值, a 继续减小,PCTF变化不明显。

综上所述,可以得出: a 取0.5 μm ~20 μm 时为佳,

在确定 a 的情况下,适当增加SDD的值,可以有效提高相衬效应,这样既保证了相衬效应足够大,且最佳成像位置也比较容易确定。

3 结论

本文对类同轴相衬成像中的X射线源焦点大小对空间相干性的影响,通过计算和实验分析,得到以下结论:(1)类同轴相衬成像中, a 一定时,SDD增大,PCTF增大;(2) a 越小,PCTF增大,当 a 减小到0.5 μm

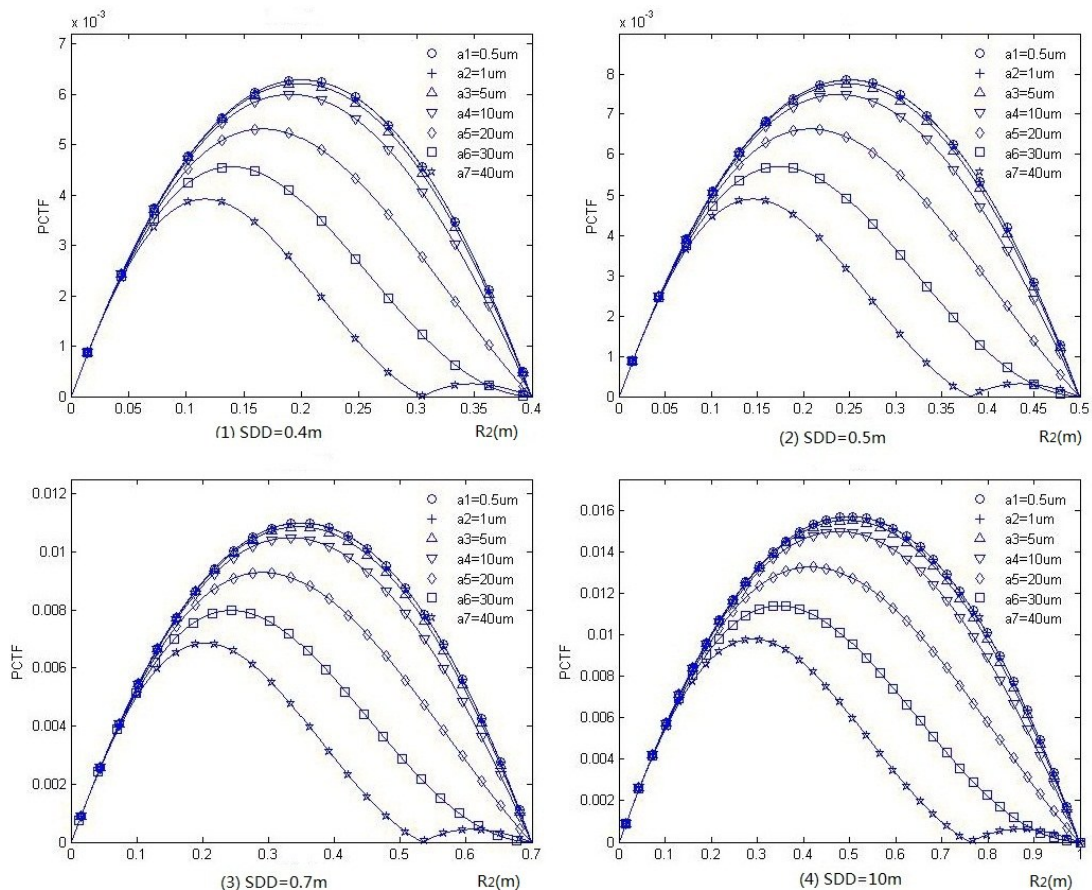


图3 相同SDD下不同a产生的相衬效应

Fig.3 Phase-contrast effects of different a with a certain SDD

时, PCTF取最大值, 且a继续减小, PCTF变化不明显, 对应的最佳成像位置为SDD的1/2; (3) a取 $0.5\ \mu\text{m}$ ~ $20\ \mu\text{m}$ 为佳, 既保证了相衬效应足够明显, 且最佳成像位置也相对容易确定。

本文讨论及分析的结论, 对于以后进行相衬成像, a大小的设置, 以及最佳成像位置的选取提供了指导的方向。

【参考文献】

- [1] 朱佩平, 吴自玉. X射线相位衬度成像[J]. 物理, 2007, 36(6): 443-451.
Zhu PP, Wu ZY. X-ray phase contrast imaging[J]. Physics, 2007, 36(6): 443-451.
- [2] Zhou SA, Brahme A. Development of phase-contrast X-ray imaging techniques and potential medical applications [J]. Phys Med, 2008, 24(3): 129-148.
- [3] 刘松, 张学龙. 临床X射线相衬成像的实现[J]. 生物医学工程与临床, 2007, 11(3): 167-170.
Liu S, Zhang XL. Clinic X-ray phase contrast imaging[J]. Biomedical Engineering and Clinical Medicine, 2007, 11(3): 167-170.
- [4] 禹爱民, 李政, 章迪, 等. 微焦点X射线源类同轴相衬成像[J]. 高能物理与核物理, 2006, 30(11): 1119-1122.
Yu AM, Li Z, Zhang D, et al. In-line phase contrast imaging using a micro-focus X-Ray source[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, 30(11): 1119-1122.
- [5] 武杰, 陈家璧, 张学龙, 等. X线相衬成像的理论及仿真实验[J]. 中国介入影像与治疗学, 2010, 7(5): 591-594.

- Wu J, Chen JB, Zhang XL. Theory and simulation experiment of X-ray phase contrast imaging[J]. Chinese Journal of Interventional Imaging and Therapy, 2010, 7(5): 591-594.
- [6] 刘鑫, 郭金川, 牛憨笨. 基于微焦斑源X射线传播的相衬成像模拟[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2007, 24(3): 261-266.
Liu X, Guo JC, Niu HB, et al. The simulation of X-ray phase-contrast imaging with partially coherence source[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2007, 24(3): 261-266.
- [7] 姜晓明, 黎刚, 陈志华, 等. X射线衍射增强成像中的折射衬度[J]. 高能物理与核物理, 2004, 28(12): 1282-1290.
Jiang XM, Li G, Chen ZH, et al. Refractive contrast in X-ray diffraction enhanced imaging [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2004, 28(12): 1282-1290.
- [8] 黄万霞, 袁清习, 田玉莲, 等. 同步辐射硬X射线衍射增强成像新进展[J]. 物理学报, 2005, 54(2): 677-681.
Huang WX, Yuan QX, Tian YL, et al. Diffraction-enhanced imaging experiments in BSRF[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(2): 677-681.
- [9] Lewis RA. Medical phase contrast X-ray imaging: Current status and future prospects[J]. Phys Med Biol, 2004, 49(16): 3573-3583.
- [10] Born M, Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[C]. CUP, 1999.
- [11] Attwood D. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation: Principles and applications[C]. CUP, 1999.
- [12] 夏天, 张学龙, 马军山, 等. 空间相干与入射光子能量对临床类同轴X射线相衬成像影响[J]. 光子学报, 2011, 40(4): 627-635.
Xia T, Zhang XL, Ma JS, et al. Effect of spatial coherence and in incident X-ray photon energies on clinical X-ray in-line phase-contrast imaging[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(4): 627-635.