

doi:10.3788/gzxb20154403.0311004

偏离中心入射的 γ 针孔成像系统点扩展函数

马庆力¹, 唐世彪², 吴彦华¹

(1 电子工程学院 404 室, 合肥 230038)

(2 中国科学技术大学 近代物理系, 合肥 230026)

摘要:基于蒙特卡罗方法,对 γ 射线针孔成像系统进行了点扩展函数的模拟研究.采用高斯拟合法比较了入射点中心入射及分别偏离 0.5 像素、1 像素、1.5 像素和 2 像素五种条件下 γ 射线针孔成像系统的点扩展函数,得出相应系统的调制传递函数,并对空间分辨率进行比较.研究结果表明,当偏离量较小时,利用高斯拟合方法得到的 γ 针孔成像系统的点扩展函数误差较小,能够满足精度要求;当偏离量较大时拟合误差较大.另外,在针孔与探测器之间加一层理想挡板来减少散射,可以显著地减少拟合误差,提高其空间分辨率.

关键词:针孔成像;点扩展函数;调制传递函数;Geant4

中图分类号:TN25;TP751

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0311004-5

Point Spread Function of Pinhole Imaging System for Deviating from Center of Incident γ -Ray

MA Qing-li¹, TANG Shi-biao², WU Yan-hua¹

(1 Lab 404, Electronic Engineering Institute, Hefei 230038, China)

(2 Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The Point Spread Function (PSF) of a pinhole imaging system for γ -Ray has been studied through Monte Carlo method. The PSFs under 0, 0.5, 1, 1.5 and 2 pixel bias five different conditions have been obtained and analyzed by fitting the simulating data with Gauss function, the corresponding Modulation Transfer Function (MTF) can be obtained, and the spatial resolutions under these five conditions are compared. As the results show, when the excursion is little, the PSF' deviation obtained by Gauss function fitting will be less and can meet the requirement of accuracy, but when the excursion is larger, the fitting deviation will be more. In addition, a ideal baffle between pinhole and detector will reduce the error and improve the spatial resolution remarkably.

Key words: Pinhole imaging; Point spread function; Modulation transfer function; Geant4

OCIS Codes: 110.1220; 110.4100; 170.2670; 060.2350; 160.2290

0 引言

γ 射线针孔成像作为核物理、激光惯性约束聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 以及核医学等实验中的重要诊断手段,能够直观反映视场内物体的几何形状和强度分布^[1]. 对不同的待测对象,成像系统设计难易程度相去甚远,最后的成像质量也大相径庭. 如果针孔屏蔽体足够薄,孔径足够小,准直系统足够完美,它的系统点扩展函数 (Point Spread Function, PSF) 计

算就很简单,因针孔设计也很容易;但在实际工作中针孔成像系统设计很复杂,例如,当待测物发出的是较高能量的 γ 射线时,为了使成像有足够的信噪比,针孔必须有一定的厚度或采用挡板,在这种情况下针孔成像系统的几何设计、屏蔽材料的选择、厚度的确定、点扩展函数的计算等问题,都将涉及到粒子输运过程的复杂计算^[2].

空间分辨率和密度分辨率是评定针孔成像系统成像质量的重要指标,而系统点扩展函数是表征成像系

基金项目:国家自然科学基金 (Nos. 11375263, 11105143) 资助

第一作者:马庆力 (1975-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为核信息处理及物理电子学. Email: maql@ustc.edu.cn

收稿日期:2014-10-08; **录用日期:**2014-11-17

<http://www.photon.ac.cn>

统空间分辨率和密度分辨率的重要参量之一. 在射线成像领域, 一般通过针孔照相机、台阶照相机、狭缝照相机等实验方法测量点扩展函数、线扩展函数 (Line Spread Function, LSF) 或调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 对系统成像的质量进行评定, 但是实验测量不仅比较复杂, 成本高, 而且会有测量误差. 因此有必要建立一套射线成像系统的理论分析方法对成像质量进行评估, 此时就需要建立反映成像系统空间分辨率质量的理论数学模型. 本文针对 γ 射线针孔成像系统的结构特点, 搭建系统模型, 建立了系统的点扩展函数的数学模型, 采用欧洲核子研究中心 (CERN) 开发的基于蒙特卡罗方法的模拟软件包 Geant4 搭建实验装置并对粒子进行跟踪计算, 评定了不同入射条件下, 系统成像质量的优劣. 同时, 通过对系统的评定也反过来验证了采用高斯拟合的分析手段得到点扩展函数的方法在一定条件下是完全可行的并且满足一定的精度要求.

1 成像系统点扩展函数的数学模型

理想的一个点源通过成像系统成像后, 其所成的点源图像是一个被扩展的模糊、变大了的面源像. 若能求出此成像系统的点扩展函数, 就可以根据此函数来衡量该成像系统质量的高低. 扩展到射线成像领域中, 还可以根据点扩展函数得到射线源 (中子源或 γ 射线源) 的能量分布函数.

对于针孔成像, 实验测量可以直接测定成像系统的点扩展函数, 间接得到系统的调制传递函数. 点扩展函数和调制传递函数都可以独自表征成像系统质量, 它们之间可以通过对方的傅里叶变换或反傅里叶变换相互转换, 即

$$h \xleftrightarrow{F[h]} M \xleftrightarrow{F^{-1}[M]} h$$

式中 h 为 PSF, M 为 MTF^[3].

对任意一个成像系统, 只要确定了它的点扩散函数, 就可以根据以上变换确定对于任意输入信号的输出信号, 从而得到系统的 MTF^[4]. 为了在实验中测量成像系统的点扩散函数, 理论上需要一个理想的点源被测物体, 然而实际上不可能有这样无限小的点源物体存在, 因此任何通过实际测量得到的成像系统点扩散函数总是有一定误差的.

在射线成像领域, 针对成像质量的分析方法都是根据实验测量或计算机模拟得到的退化图像 $f(x, y)$ 来估算点扩展函数 $h(x, y)$ ^[5-6]. 这种方法很适合被测物中含有点源的情况. 如果确知在被测物中存在一个点源, 那么当噪声干扰忽略不计时, 该点源的影像便是点扩展函数, 此时, 只要找出对应于该点源的局部图像函数 $f(x, y)$, 便可以得到 $h(x, y)$ ^[3]. 本文采用高斯拟合法来对系

统点扩展函数进行近似. 拟合公式为

$$\text{PSF}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

σ 为高斯函数的方差, 又称为平滑因子^[7-8].

根据成像系统的实际要求, 需要测得点源经过针孔后的点扩展函数, 采用高斯函数拟合法, 所得的点扩展函数一维表达式为

$$\text{PSF}(x, 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/(2\sigma^2)} \quad (2)$$

从式(1)和式(2)可以看出, 只要知道高斯函数的方差, 即平滑因子, 就可以近似得到系统点扩展函数. 因此, 平滑因子实际上是衡量成像系统点扩展函数的指标, 即为高斯函数的半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM). 对于偏离针孔中心的点源, 要获得点扩展函数还需要得到中心偏离量 Δx .

2 成像系统 Geant4 模型的建立

建立成像系统模型时采用的模拟软件包 Geant4 是由欧洲核子研究中心开发的一个可以做粒子探测器描述和提供大量射线模拟工具的软件系统. 它是基于蒙特卡罗法模拟计算粒子与探测器的相互作用. Geant4 主要应用在两个方面: 1) 对穿越实验装置的粒子径迹进行跟踪, 并模拟粒子与探测器的相互作用过程; 2) 给出实验装置的几何描述和粒子径迹的图形表述^[9-10].

在 Geant4 中搭建的模拟实验装置是由塑料闪烁光纤 (Plastic Scintillating Fiber, PSF) 组成的 21×21 阵列的成像探测器. 光纤的物理化学特征参量均取自美国 Bicron 公司生产的 BCF-20 闪烁光纤资料^[11]. 模拟的装置模型如图 1. 光纤长度为 40 cm, 射线源到针孔前端的距离为 10 cm, 针孔后端面到探测器前端的距离也为 10 cm; 光纤半径为 2 mm, 其包层厚 0.1 mm; 选取的针孔为长直孔类型, 其长度为 20 cm, 外半径为 5 cm, 内半径为 0.5 cm; 为了避免有较多次级粒子产生, 针孔材料采用吸收能力较高的铅; 每根光纤可以视为一个探测单元, 即一个像素单元 (1 个像素 = $2 \times (\text{光纤半径} + \text{包层厚}) = 4.2 \text{ mm}$). 入射 γ 射线的

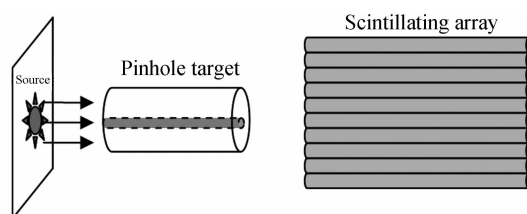


图 1 针孔成像模拟分析模型

Fig. 1 Pinhole imaging model in Geant4

能量假定都是 6 MeV. 为了减少随机误差, 每次随机模拟的粒子数设定为 1 000 000 个. 理论与实验已经表明闪烁光纤输出的可见光子数目与光纤沉积能量成正比, 因此只需要知道光纤阵列中每根光纤所得到的能

量沉积即可. 取出二维阵列中某一列光纤的能量沉积数据, 通过高斯函数拟合得到的函数可以看作是成像系统的点扩展函数.

3 模拟结果及分析

3.1 不同入射偏离量的模拟结果

入射点在对准针孔中心时, 系统的点扩展函数很

容易由高斯函数拟合得到. 下文研究入射点偏离针孔中心时的点扩展函数.

模拟中选择五种入射情况, 即中心入射、分别偏离 0.5、1、1.5、2 像素, 用高斯函数拟合这五组数据, 获得的点扩展函数分别如图 2(a)~(e) 所示.

为了更清晰地比较分析, 把五种情况下拟合的高斯函数参量列于表 1.

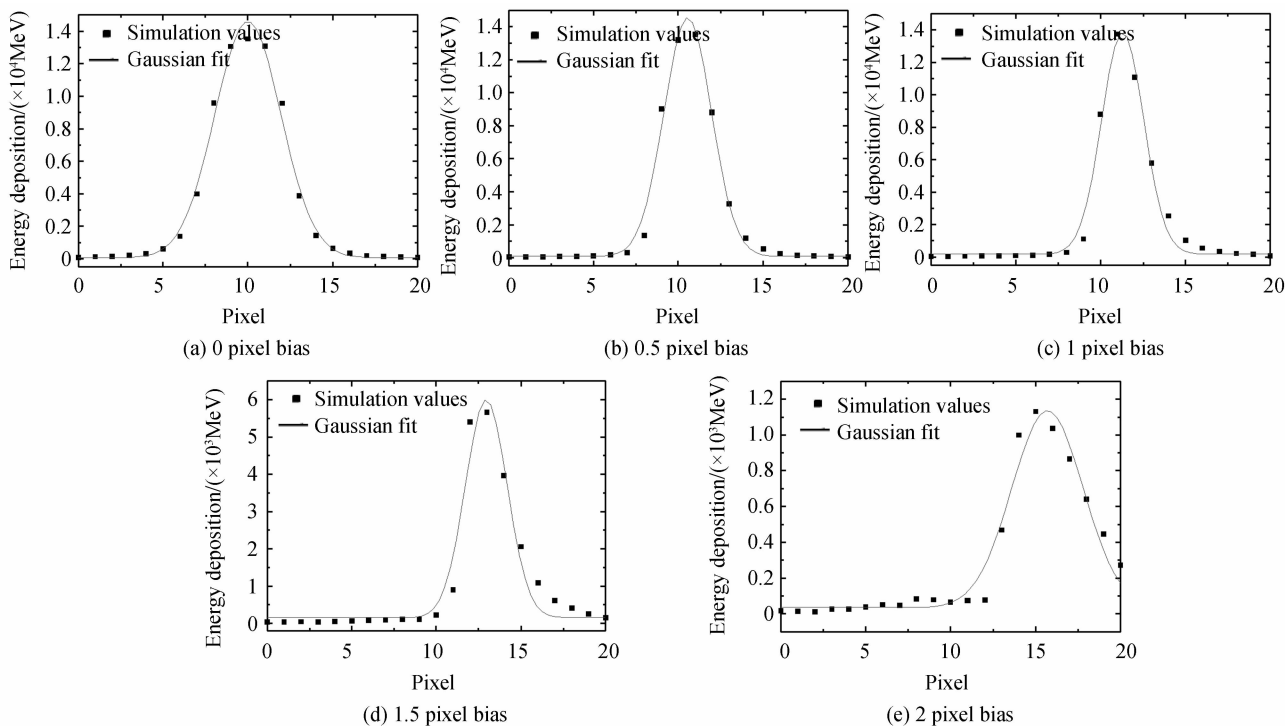


图 2 不同偏离中心入射情况下的高斯拟合点扩展函数

Fig. 2 PSF Gauss fit curves for different pixel off-axis sources

表 1 不同入射情况下高斯拟合函数的参量比较

Table 1 PSF Gauss fit parameters for different off-axis sources

Pixel off-axis/pixel	0	0.5	1	1.5	2
Energy deposition/MeV	14 479.41	14 493.57	13 679.32	5 956.02	1 134.81
FWHM/pixel	3.899 4	2.802 9	2.486 9	2.477 1	4.207 4
Center position/pixel	9.995 8	10.561 5	11.304 6	12.959 3	15.705 2

把以上五组拟合的点扩展函数进行反傅里叶变换得到对应的系统调制传递函数 MTF, 如图 3.

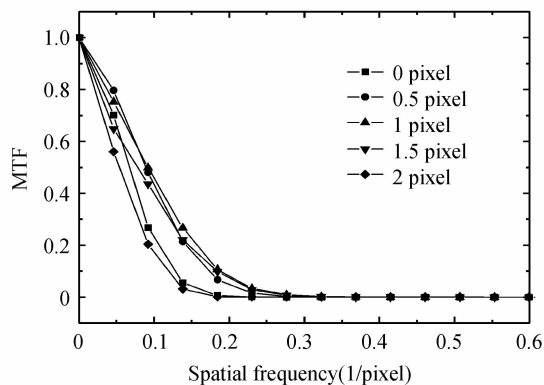


图 3 不同偏离中心位置入射情况下的 MTF

Fig. 3 MTF curves for different off-axis sources

由图 3 可以看出, γ 射线针孔成像系统的点扩展函数在满足一定的条件下可以用高斯函数较精确地表示. 在针孔中心入射情况下其精度较高, 拟合效果较好, 但在偏离针孔中心越远则精度越低, 拟合效果较差. 这主要由两方面引起: 1) 针孔本身孔径较小, 当 γ 射线偏离中心入射时, 出射的角度范围非常小, 这对射线成像质量有很大的影响; 2) 当 γ 射线偏离中心入射时, 一部分 γ 射线会在针孔的末端产生强烈的散射, 对成像质量造成严重的损坏.

结合本系统可以看到, 当偏离量小于 1.5 像素时, 用高斯函数拟合能够得到精确的点扩展函数, 并且在此基础上可以得到对应的点扩展函数二维表达式. 同时由图 3 可以看出, 当偏离量较小时, 入射偏离量越大其空间分辨反而越好, 这是由上述第一个原因引起的.

而在偏离量较大时(如 2 像素),由于上述第二个原因,MTF 开始变差;此时用高斯拟合已经不够准确,需要采用其他的修正方法。

3.2 减少次级粒子散射的修正方法

偏离针孔中心入射会造成点扩展函数较大的误差,但针孔本身孔径较小, γ 射线偏离中心入射是绝对不可避免的,因此只有通过针孔与探测器之间加一层理想挡板来减少部分 γ 射线在针孔的末端产生的强烈散射。另外,减少次级粒子在光纤阵列之间的串扰也可以减小系统点扩展函数误差,这在之前的工作中已经有过讨论^[12],这里不再赘述。

在 Geant4 中,对理想挡板的定义描述为:只要有次级粒子与此挡板发生接触,Geant4 则停止跟踪该粒子,以此来表示粒子能够被挡板完全吸收。这里只模拟偏离中心 1 像素的情况,其他偏离情况类似。图 4 是成像系统加理想挡板前后高斯拟合情况的比较,图 5 则是它们前后对应的调制传递函数比较。从这两图均可以很清晰地看到,加入理想挡板后,拟合的高斯函数与数据进一步吻合,减小了系统误差;同时也能够提高成像系统的空间分辨率。

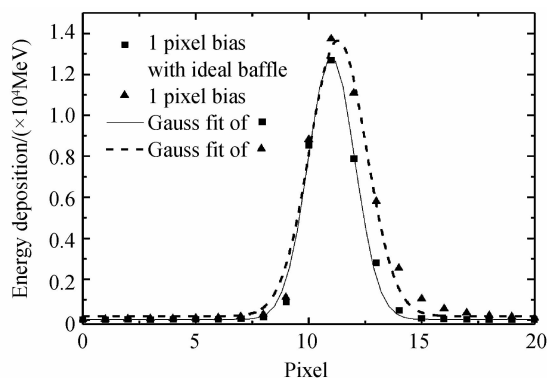


图 4 加理想挡板前后高斯拟合的比较

Fig. 4 Comparison of Gauss fit curves with/without ideal baffle

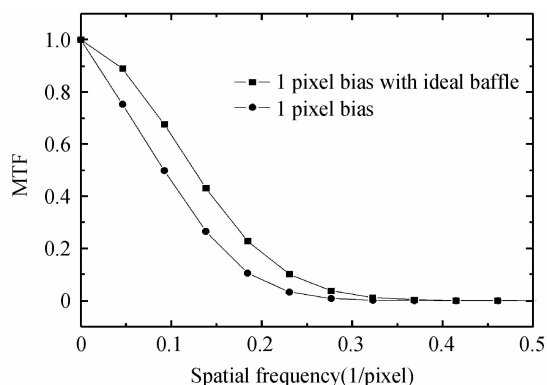


图 5 加理想挡板前后 MTF 的比较

Fig. 5 Comparison of MTF curves with/without ideal baffle

另外,根据二维光纤阵列的能量沉积进行二维的灰度绘图,如图 6。它给出了更为直观的能量沉积分布

情况。从图中可以直观地看到,加了理想挡板后,减少了部分次级粒子的散射效应,使得成像系统的能量沉积分布范围更小,提高了系统点扩展函数精度。

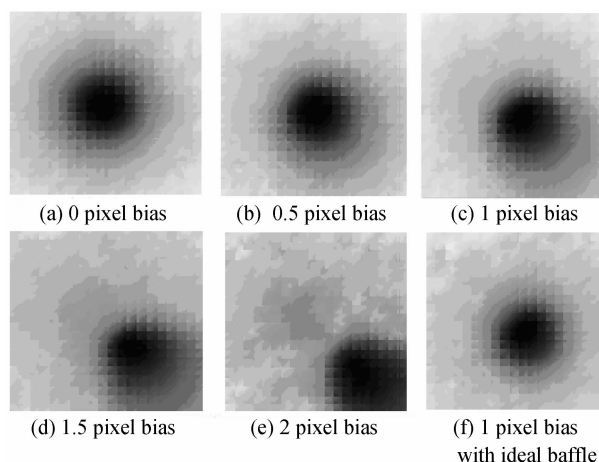


图 6 各种不同情况下的能量沉积分布

Fig. 6 Energy deposition distribution for different off-axis sources

4 结论

本文给出了在几种不同入射点偏离情况下, γ 射线针孔成像过程的蒙特卡罗模拟过程和结果。通过模拟得到能量沉积数据,采用高斯函数拟合计算出针孔成像系统的点扩展函数和对应的调制传递函数。对不同入射位置射线源的成像质量对比分析发现:当入射偏离量较小时,利用高斯拟合方法得到 γ 针孔成像系统的点扩展函数误差较小,能够满足精度要求,当偏离量较大时则拟合误差较大;在针孔与探测器之间加一层理想挡板来消除散射,这样可以显著地减少拟合误差并提高空间分辨率。

参考文献

- [1] XIA Tian, ZHANG Xue-long, MA Jun-shan, *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.
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.
- [2] ZHENG Zhi-jie. Conditional probability statistical distributions in variant measurement simulations [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1662-1666.
郑智捷. 在变量测量模拟中的条件概率统计分布[J]. 光子学报, 2011, **40**(11): 1662-1666.
- [3] 赵荣椿. 数字图像处理导论[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1996, 35-43.
- [4] MA Qing-li, TANG Shi-biao, XU Shi-min, *et al.* Cross-talk in scintillating fiber array detector irradiated by high-nergy X-ray[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1751-1754.
马庆力, 唐世彪, 许士敏, 等. 塑料闪烁光纤阵列成像探测器在高能 X 射线辐照下的串扰分析[J]. 光子学报, 2011, **40**(11): 1751-1754.
- [5] BEKAERT V, BRASSE D. Determination of the analytical point spread function of a pinhole aperture SPECT system[J].

- IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2004, 2565-2569.
- [6] LIU Shi-tao, XU Zi-zong, WANG Zhao-min, *et al.* Point spread functions for a small gamma camera with pinhole collimator[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2003, **14**(3): 195-198.
- [7] JAMES H, ELDER Z, STEVER W. Local scale control for edge detection and blur estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(7): 699-716.
- [8] MARK B, WILLIAMS. Investigation of efficiency and spatial resolution using pinholes with small pinhole angle[J]. *IEEE Transactions on nuclear science*, 2003, **50**(5): 1562-1568.
- [9] AGOSTINELLI S. Geant4-a simulation toolkit[J]. *Nuclear Instrument and Method A*, 2003, **506**: 250.
- [10] Physics Reference Manual at the Geant4. available from: <http://geant4.web.cern.ch/geant4>.
- [11] Bicon Corporation web site, 2003. available from: <http://www.bicon.com>.
- [12] NASSERI M M, MA Qing-li, *et al.* Low energy X-ray imaging using plastic scintillating fiber: A simulation study [J]. *Nuclear Instrument and Method B*, 2005, **234**: 362-368.