



核科学与工程

基于 Si-PM 阵列的辐射作用位置定位方法研究*

刘 鑫^{1,2}, 袁永刚¹, 吴 健¹, 何敬涛¹, 冯 鹏², 瞿金辉¹,
刘易鑫¹, 钱易坤², 张 颂², 赵先圣²

(1. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 在辐射成像中准确估计射线与探测器相互作用的空间位置是保障成像质量的关键步骤。为进一步提升辐射作用事件的定位效果, 有效抑制重心法在辐射事件作用位置靠近探测器边缘时造成的定位偏移, 针对 Si-PM 阵列构成的位置灵敏探测系统建立了基于响应函数的定位算法。搭建了基于 CsI 阵列与 Si-PM 阵列构成的位置灵敏探测器和基于 ASIC 的电子学读出系统, 使用等效电阻网络简化了 Si-PM 阵列的输出信号数量, 通过实验获得了辐射事件在 Si-PM 阵列上的响应函数。实验结果表明, 在同一条件下使用响应函数法在最边缘像素散点的 FWHM 仅为使用重心法获得 FWHM 的 46.2%, 与中央像素散点的 FWHM 相当, 基于响应函数的辐射事件方法定位效果明显优于传统重心法的定位效果, 可有效克服重心法的边缘效应。

关键词: 辐射成像; 位置灵敏探测器; Si-PM; 重心法

中图分类号: TL816

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210363

Research on location method of radiation action based on Si-PM array

Liu Xin^{1,2}, Yuan Yonggang¹, Wu Jian¹, He Jingtao¹, Feng Peng², Qu Jinhui¹,
Liu Yixin¹, Qian Yikun², Zhang Song², Zhao Xiansheng²

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems (Chongqing University) Ministry of Education, Chongqing 400044, China)

Abstract: Accurately estimating the spatial position of the interaction between the ray and the detector in radiation imaging is a key step to ensure the imaging quality. To further improve the position effect of radiation events and effectively suppress the position shift caused by the center of gravity method when radiation events are close to the edge of the detector, a response function-based position algorithm is established for the position-sensitive detection system composed of Si-PM arrays. A position-sensitive detector based on CsI array and Si-PM array and an ASIC-based electronic readout system were built, and the equivalent resistance network was used to simplify the number of output signals of Si-PM array, then the response functions of radiation events on Si-PM arrays were obtained experimentally. The experimental results show that under the same conditions, the FWHM of the scatter points of the most edge pixels using the response function method is only 46.2% of the FWHM obtained by using the center of gravity method, which is comparable to the FWHM of the scatter points of the central pixels, the localization effect of the radiation event method based on the response function is obviously better than that of the traditional center of gravity method, which can effectively overcome the edge effect of the center of gravity method.

Key words: radiography, position sensitive detector, Si-PM, center of gravity method

射线成像技术在医疗卫生、国民经济、科学研究等领域有广泛的应用前景^[1-2]。在 X/γ 射线成像中准确估计射线与物质的相互作用的空间位置是辐射图像重建过程中的关键环节^[3-6]。重心法是由于辐射位置定位的经典方法, 通过配合适当的编码电路, 可以用较少的读出通道获得高分辨的位置定位结果^[7-9]。然而重心法读出方法存在的问题是算法结果会相对于真实作用位置向探测器中心聚集, 且这种偏离越靠近边缘越严重^[10], 不利于事件的准确定位, 影响位置分辨率, 不利于后续图像重建^[11-12]。本文建立了基于响应函数的定位方法, 构建了基于 Si-PM 阵列构

* 收稿日期: 2021-08-24; 修订日期: 2022-02-17
基金项目: 国防科工局基础科研项目 (2018-1521)
联系方式: 刘 鑫, liuxin_shijiu@163.com。
通信作者: 吴 健, caepwujian@163.com。

成的位置灵敏探测系统^[7-9, 13-14],通过实验获得辐射事件在 Si-PM 阵列上的响应函数,从而可对任意位置处的辐射事件进行匹配,获取定位信息。该方法有效抑制了重心法向中心聚集导致的失真问题^[15-16]。

1 定位原理

核辐射进入闪烁体后,使原子或分子激发,受激粒子在退激过程中发出荧光,荧光光子在输运过程中,经晶体表面的反光层反射,并通过光导玻璃进入 Si-PM(Si-PM,一种新型的光电探测器件,由雪崩二极管阵列组成,这些雪崩二极管工作在盖革模式,且在其动态范围内,输出电流大小与发生雪崩的微元数成正比^[17-19]),并输出电流信号,每次辐射事件将反映到 Si-PM 的输出信号分布。

针对基于 Si-PM 阵列的位置灵敏探测器,重心法是一种较为常用的估计辐射事件在探测器中作用位置的方法。典型的闪烁探测器结构如图 1 所示。通常,为了获得更高的位置分辨率,晶体的像素数会大于 Si-PM 的像素数。

1.1 重心算法

对由 Si-PM 组成的探测系统而言,重心法的定位公式如下

$$C_x = \frac{\sum_i^n D_{ix} V_{ix}}{\sum_i^n V_{ix}} \quad (1)$$

$$C_y = \frac{\sum_i^n D_{iy} V_{iy}}{\sum_i^n V_{iy}} \quad (2)$$

式中: C_x 、 C_y 分别为重心法估计的 x 、 y 坐标; n 为 x 或 y 方向上 Si-PM 的总输出通道数; D_{ix} 、 D_{iy} 分别为第 i 个 Si-PM 的 x 、 y 坐标; V_{ix} 、 V_{iy} 分别为第 i 个 Si-PM 的输出脉冲幅度。

理想情况下,当辐射事件作用位置在探测器中央时,重心法可以很好地估计辐射事件作用的真实位置;但当作用位置靠近探测器边缘时,因辐射信号收集不完整等原因,重心法的定位结果会相对真实位置沿探测器中心方向聚集,出现失真。

1.2 响应函数算法

Si-PM 对探测器的响应函数反映了辐射信号在 Si-PM 阵列上的分布情况^[16,20-21]。探测器辐射信号在 Si-PM 阵列上的特征分布,如图 2。

采用高斯分布进行简化拟合。其遵循两个标准高斯分布的叠加^[16,22]。

$$G(P_x, P_y, x, y) = G_1(P_x, P_y, x, y) + G_2(P_x, P_y, x, y) \quad (3)$$

$$G_1(P_x, P_y, x, y) = A_1 \exp\left[-\frac{(x-P_x)^2 + (y-P_y)^2}{2\sigma_1^2}\right] \quad (4)$$

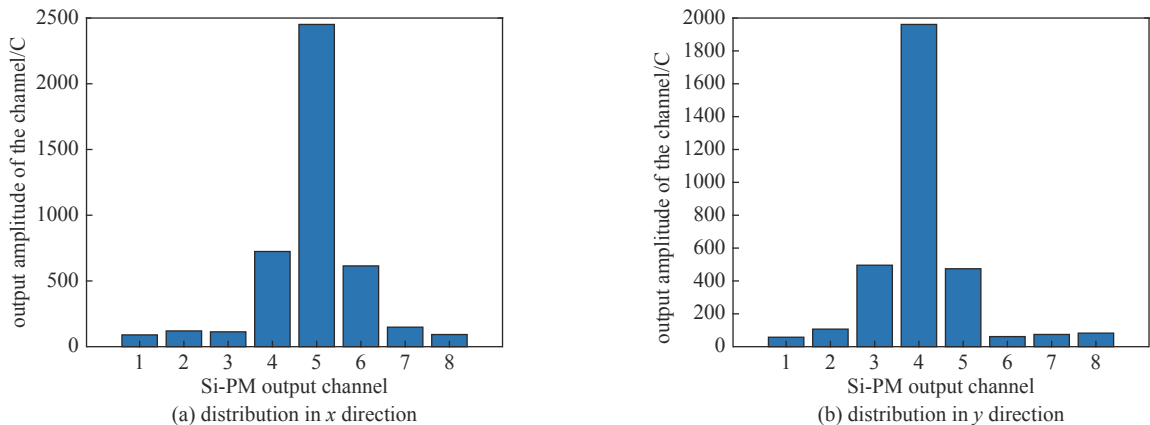


Fig. 2 Charge distribution of radiation events

图 2 辐射事件的电荷分布

$$G_2(P_x, P_y, x, y) = A_2 \exp \left[-\frac{(x - P_x)^2 + (y - P_y)^2}{2\sigma_2^2} \right] \quad (5)$$

式中：参数 $(A_1, A_2, \sigma_1, \sigma_2)$ 是辐射事件在闪烁体中产生的光脉冲在 Si-PM 阵列上分布的特征参数，且与辐射事件在探测器上的作用位置 (P_x, P_y) 无关。

通过使用编码电路对 Si-PM 输出信号的简化，得到 x 和 y 方向上的输出信号后，便可以通过实验测定的实际数据集获得 Si-PM 对探测器的响应函数，然后利用该响应函数对所有辐射事件数据进行拟合，得到辐射事件在探测器中的作用位置。

2 实验系统搭建

本实验搭建的探测系统主要由前端探测器、基于 VATA64HDR16 ASIC 的数字采集系统以及负责数据处理的 PC 端构成。辐射事件产生的电荷信号，通过采集系统输入到 PC 端，然后进行数据后处理，最后通过算法对辐射事件进行定位。硬件系统原理图如图 3 所示。

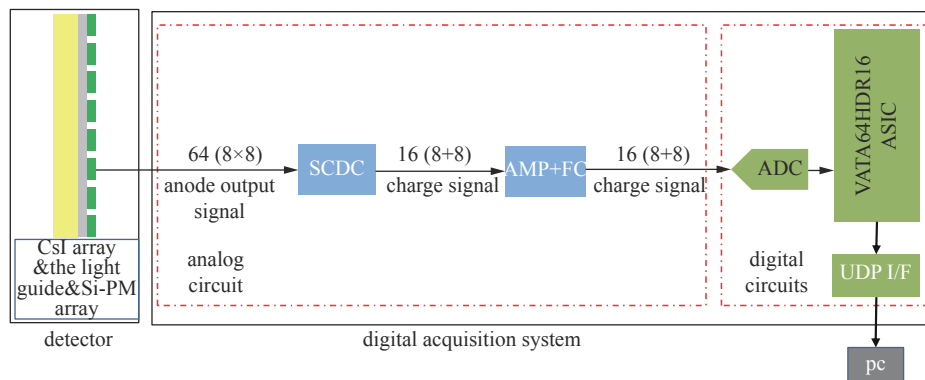


Fig. 3 Hardware system schematic diagram
图 3 硬件系统原理图

探测系统中前端探测器采用闪烁探测器，模型图如图 4 所示。每个闪烁体像素都包裹着光反射材料，由光导（光学硅油和有机玻璃）与 Si-PM 连接构成。实验采用 SensL 公司 ArrayFJ-60035-64P 8×8 Si-PM 阵列，每个 Si-PM 像素的光敏面积为 6 mm×6 mm；采用 8×8 CsI 闪烁体阵列，每个闪烁体像素的尺寸为 6 mm×6 mm×6 mm。采集系统型号为 VATA64HDR16 ASIC，它是一个 64 通道的电荷敏感放大器，可将收集到的电荷转换成比例电流或电压信号。

通过对称电荷分配电路 (SCDC) 对 Si-PM 输出信号进行简化，将 $N \times N$ 路信号简化成 $N+N$ 路。对于一个 8×8 的 Si-PM 阵列探测器，通过使用 SCDC，可以将 64 个阳极信号减少到 16 路信号 (X 方向 8 路，Y 方向 8 路，共 16 路)。16 路信号先通过放大器 (AMP) 放大，再经过滤波电路 (FC) 滤波后，共 16 个电荷信号被 ASIC 数字电路采集。SCDC 原理如图 5 所示。

实验采用 ^{137}Cs 点源作为放射源，其中 ^{137}Cs 活度为 2000 Bq，源与阵列探测器间距是 30 cm，放射源为半径 5 mm、高 1 mm 的圆柱体，故可视其为点源，然后使用搭建的采集系统进行采集，如图 6 所示。

3 结果分析

3.1 单个点的信号分布

如图 7 所示，(a) 为辐射事件发生在探测器边缘时重心

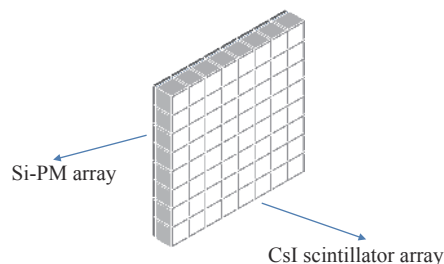


Fig. 4 Scintillation detector model
图 4 闪烁探测器模型

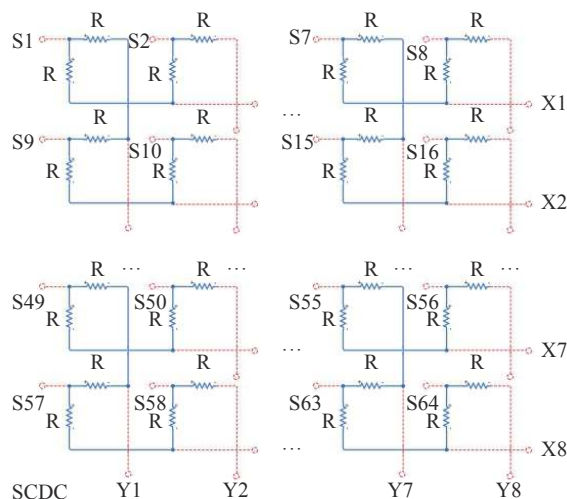


Fig. 5 SCDC schematic
图 5 SCDC 原理图

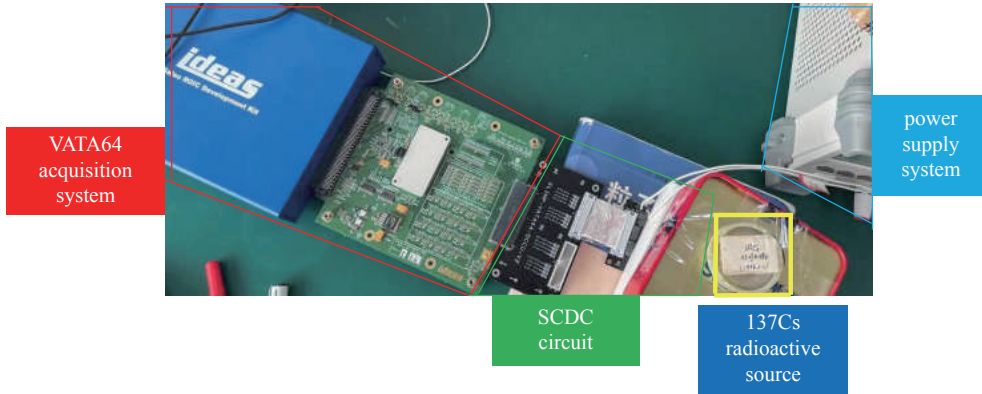


Fig. 6 Experimental system diagram

图 6 实验系统图

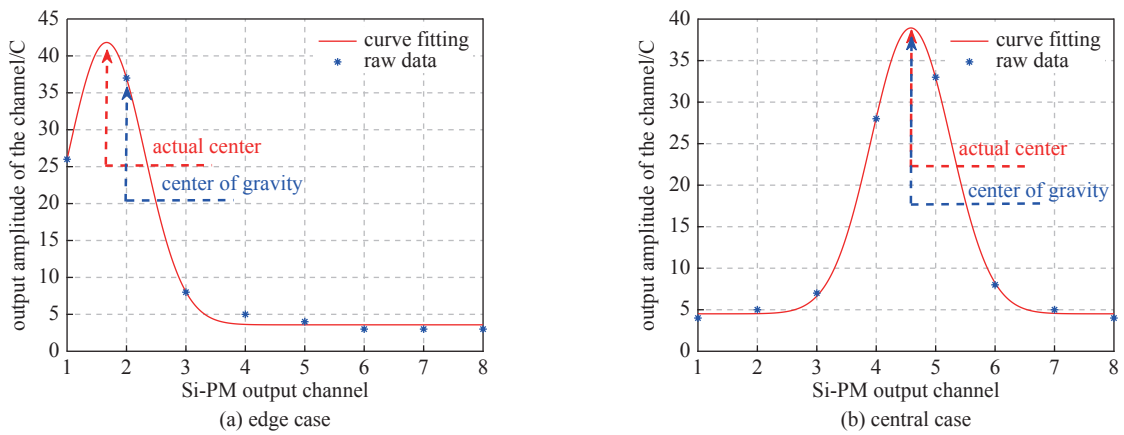


Fig. 7 Positioning situation of the center of gravity method and the response function method when the radiation event occurs at different positions of the detector

图 7 辐射事件发生在探测器不同位置时重心法与响应函数法的定位情况

法和响应函数法的定位情况, (b)为在探测器中心时的定位情况。当辐射事件发生在中心时,重心法和响应函数法的定位重合,然而在边缘情况时,因电荷收集不完全,重心法的定位结果会向探测器中心偏移。且在硬件电路中,采集得到的电脉冲信号会在 Si-PM 输出信号的基础上叠加难以去除的电子学噪声,加剧重心法的边缘效应,重心法的定位结果会显著偏离辐射事件的真实作用位置。而响应函数方法是通过对 x 、 y 方向上离散电荷分布进行拟合,电子学噪声仅仅会对响应函数的参数产生影响,故而响应函数法可以准确获取作用位置。

3.2 响应曲线

辐射事件发生在探测器中央像素时重心法的定位结果与响应函数法重合,故可先依据重心法对探测器中央像素的数据进行定位,由此得到响应函数法的模型参数计算的初始数据集。因各个输出通道电子学噪声具有随机性,需要在训练分布模型参数时设置合适的均方根误差上限。通过实验,得到了拟合曲线如图 8 所示。通过对初始数据集拟合,得到每个辐射事件的模型参数并取平均,最终得到了响应函数法的模型参数。

3.3 辐射事件定位

确定响应函数法的模型后对辐射事件进行定位,得到响应函数法的定位散点图如图 9(a)所示。为了便于对比响应函数法和重心法的定位效果,使用重心法对同一组数据进行定位,得到重心法定位散点图如图 9(b)所示。由图 9 对比可知,响应函数法获得的定位散点围绕像素中心呈均匀分布,符合物理规律;而重心法仅在图像中心位置达到了响应函数法的效果,越靠近图像边缘,偏移越明显。

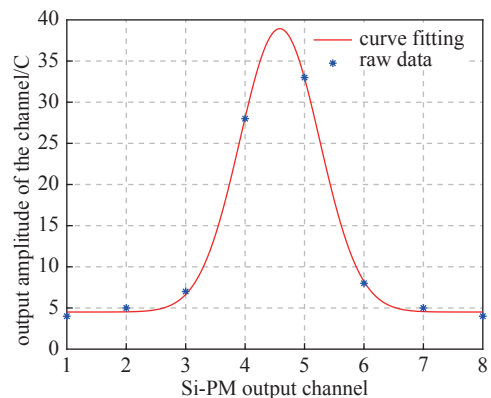


Fig. 8 Fitting result of central pixel

图 8 中央像素的拟合结果

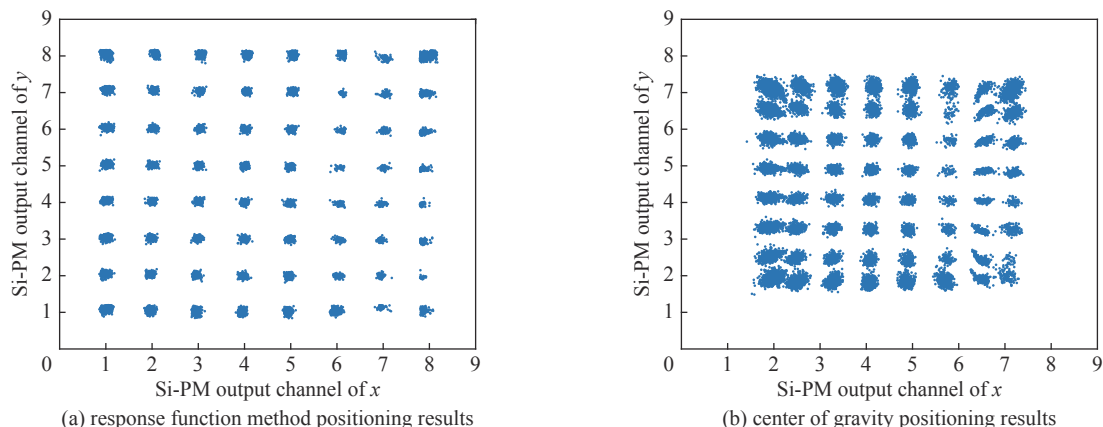


Fig. 9 Comparison of results between response function method and center of gravity method

图 9 响应函数法与重心法的结果对比

为了对重心法和响应函数法进行定量对比分析,我们将辐射事件的中心及边缘散点进行对比。图 10 和图 11 为使用响应函数法和重心法分别得到的中央像素和最边缘像素的半高全宽 (FWHM) 散点图(基于搭建的实验平台采集的同一组数据)。图 10 为中心位置时定位结果,响应函数法的 x 方向、 y 方向的 FWHM 分别为 0.085、0.09,重心法的 x 方向、 y 方向的 FWHM 分别为 0.115、0.14,二者无显著差别。图 11 为在图像最边缘位置时定位结果,响应函数法的 x 方向、 y 方向的 FWHM 分别为 0.12、0.11,重心法的 x 方向、 y 方向的 FWHM 分别为 0.26、0.24,响应函数法所得定位 FWHM 显著优于重心法所得结果。

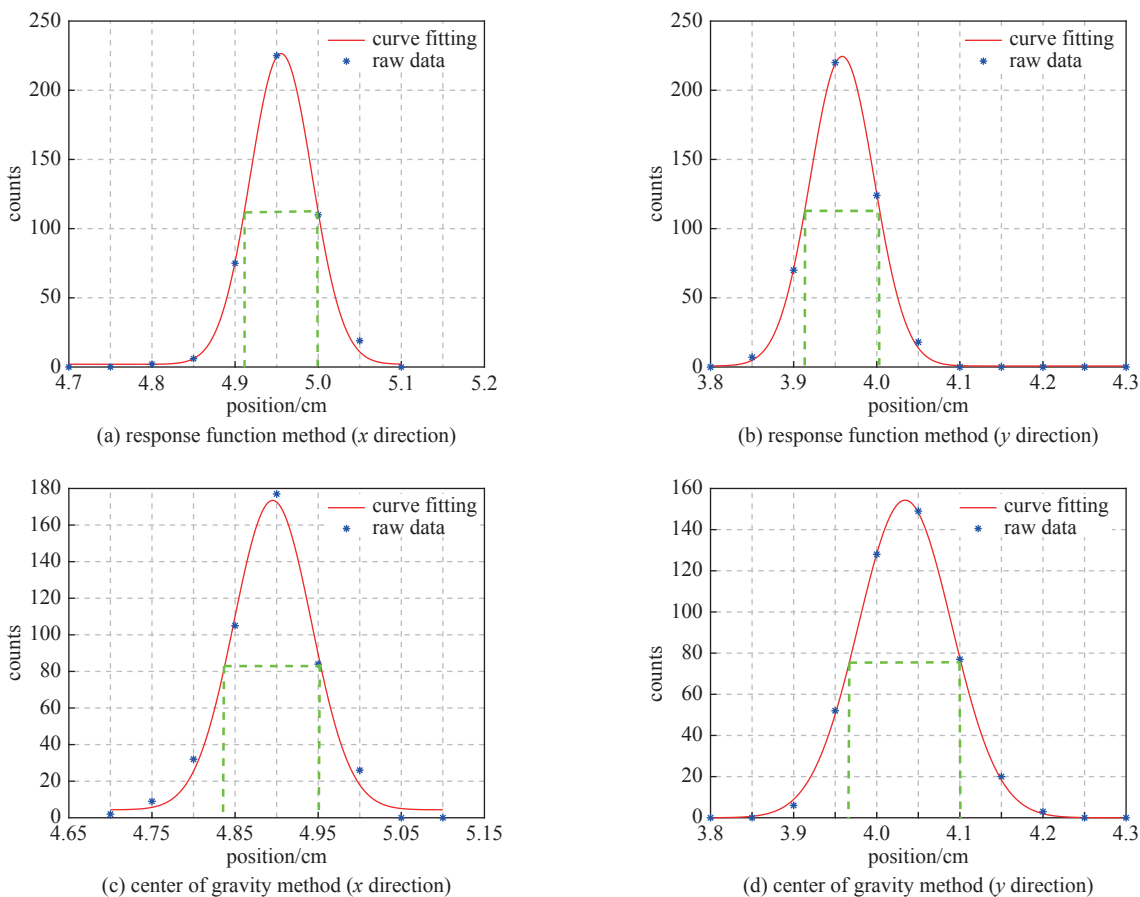


Fig. 10 FWHM comparison of the response function method and the center-of-gravity method of the scatter plot at the central pixel

图 10 中央像素处响应函数法与重心法的散点图的 FWHM 对比

4 结 论

本文根据光由晶体像素输运到 Si-PM 阵列上呈现的分布特征,建立了基于响应函数的定位算法,构建了基于

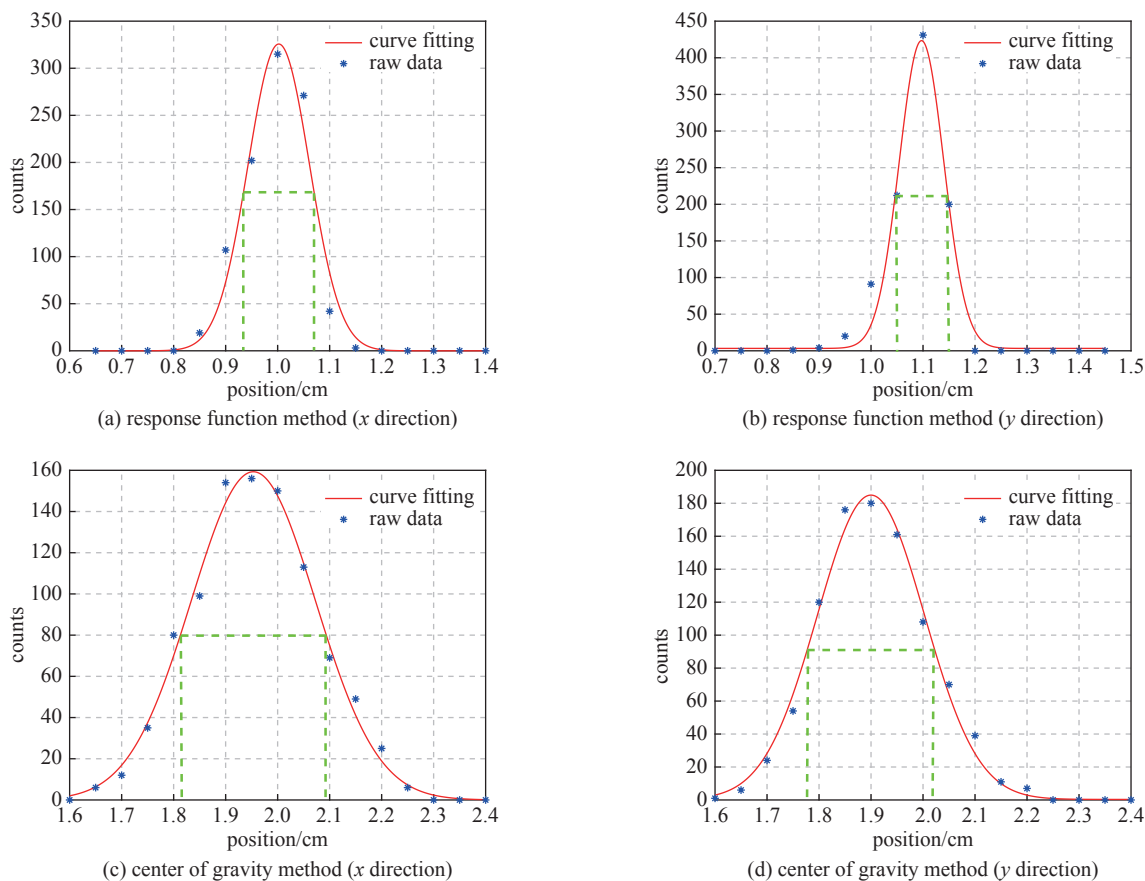


Fig. 11 Comparison of FWHM between the response function method and the center of gravity method at the edge pixels

图 11 最边缘像素处响应函数法与重心法的散点图的 FWHM 对比

Si-PM 阵列构成的位置灵敏探测系统, 通过实验获得了辐射事件在 Si-PM 阵列上的响应函数。研究表明, 在同一条件下使用响应函数法在最边缘像素散点的 FWHM 仅为使用重心法获得 FWHM 的 46.2%, 与中央像素散点的 FWHM 相当。响应函数法有效抑制了传统重心算法中向中心聚集导致的失真问题, 消除了辐射成像应用中射线作用位置定位过程中的边缘效应, 该方法提高了定位精度, 可用于 SPECT、 γ 等成像应用方面的图像重建优化。

参考文献:

- [1] Hu Yifan, Fan Peng, Lyu Zhenlei, et al. Design and performance evaluation of a 4π -view gamma camera with mosaic-patterned 3D position-sensitive scintillators[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1023: 165971.
- [2] 周伟, 方方, 周建斌, 等. 辐射成像技术的初步应用研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2011, 31(2): 235-238. (Zhou Wei, Fang Fang, Zhou Jianbin, et al. Preliminary research of radiography technique[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2011, 31(2): 235-238)
- [3] Wen Jiaying, Zheng Xutao, Gao Huaizhong, et al. Optimization of Timepix3-based conventional Compton camera using electron track algorithm[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1021: 165954.
- [4] 王利民, 邹海峰, 蔡庆胜. 数字式 X 射线辐射扫描成像系统及其应用[J]. *物理*, 1999, 28(4): 222-226. (Wang Limin, Wu Haifeng, Cai Qingsheng. X-ray digital radiography and its applications[J]. *Physics*, 1999, 28(4): 222-226)
- [5] 许祖润. X 和 γ 射线成像阵列探测器——基本问题、发展和前瞻[J]. *核电子学与探测技术*, 2000, 20(1): 62-65. (Xu Zurun. The imaging detector arrays for X and γ rays[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2000, 20(1): 62-65)
- [6] 武传鹏, 李亮. 康普顿相机成像技术进展[J]. *核技术*, 2021, 44(5): 43-54. (Wu Chuanpeng, Li Liang. Review of Compton camera imaging technology development[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, 44(5): 43-54)
- [7] 牛德芳. 基于位置灵敏探测器的电子学系统的研制[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020. (Niu Defang. Development of electronic system based on position sensitive detector[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020)
- [8] 陈陶, 李智焕, 叶沿林, 等. 二维位置灵敏硅探测器的应用研究[J]. *高能物理与核物理*, 2003, 27(1): 72-75. (Chen Tao, Li Zhihuan, Ye Yanlin, et al. Study of two-dimensional position sensitive silicon detector[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2003, 27(1): 72-75)
- [9] 王英杰. 基于硅光电倍增管的位置灵敏探测器技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013. (Wang Yingjie. Study of position sensitive detector technologies

- based on silicon photomultipliers[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013)
- [10] Thanasis D, Georgiou E, Giokaris N, et al. A correction method of the spatial distortion in planar images from γ -Camera systems[J]. *Journal of Instrumentation*, 2009, 4: P06012.
- [11] 王薇, 李传龙, 吴建华, 等. 康普顿成像系统角分辨率影响因素的理论及模拟研究[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(12): 2471-2477. (Wang Wei, Li Chuanlong, Wu Jianhua, et al. Theoretical and simulation study on factor affecting angular resolution of Compton imaging system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(12): 2471-2477)
- [12] van der Meulen N P, Strobel K, Lima T V M. New radionuclides and technological advances in SPECT and PET scanners[J]. *Cancers*, 1800, 13: 6183.
- [13] Lisi E, Colonna N. Position reconstruction in two-dimensional position-sensitive silicon detectors: a new analytical method[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1994, 348(2/3): 703-706.
- [14] 谭继廉, 靳根民, 段利敏, 等. 硅多条二维位置灵敏探测器的研制[J]. *核电子学与探测技术*, 2006, 26(6): 703-705. (Tan Jilian, Jin Genmin, Duan Limin, et al. Development of Si multi-strip Bi-dimension position sensitive detectors[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2006, 26(6): 703-705)
- [15] Zhang Jipeng, Liang Xiuzuo, Cai Jiale, et al. Prototype of an array SiPM-based scintillator Compton camera for radioactive materials detection[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2019, 3: 17.
- [16] Mikeli M, Polychronopoulou A, Gektin A, et al. A new position reconstruction method for position sensitive photomultipliers[C]//Proceedings of 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2008.
- [17] Behera A, Acerbi F, Gola A, et al. Performance of a 6×6 mm² SiPM module for time-domain diffuse optics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28: 3802910.
- [18] Duan Heying, Baratto L, Hatami N, et al. ⁶⁸Ga-PSMA11 PET/CT for biochemically recurrent prostate cancer: Influence of dual-time and PMT-vs SiPM-based detectors[J]. *Translational Oncology*, 1800, 15: 101293.
- [19] Ma Cong, Dong Xue, Yu Li, et al. Design and evaluation of an FPGA-ADC prototype for the PET detector based on LYSO crystals and SiPM arrays[J]. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 2022, 6(1): 33-41.
- [20] Lerche C W, Benlloch J M, Sanchez F, et al. Depth of λ -ray interaction within continuous crystals from the width of its scintillation light-distribution[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, 52(3): 560-572.
- [21] Lerche C W, Benlloch J M, Sánchez F, et al. Depth of interaction detection with enhanced position-sensitive proportional resistor network[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 537(1/2): 326-330.
- [22] Lee S J, Chung Y H, An S J. Monte Carlo modeling of a novel depth-encoding PET detector with DETECT2000[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, 69(8): 1356-1361.