

面向核退役场景的阵列式康普顿相机成像系统研制

刘鑫^{1,2}, 冯鹏^{1*}, 姚志阳³, 张颂^{1,2}, 钱易坤^{1,2}, 刘易鑫², 吴健², 袁永刚², 瞿金辉², 白彦君¹¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;²中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900;³清华大学工程物理系, 北京 100084

摘要 基于 23×23 阵列 GAGG(Ce) 探测器以及行/列读出电路设计并研制了适用于核退役场景的康普顿相机系统, 探测器由阵列式掺铈钆铝镓石榴石 [GAGG(Ce)] 耦合硅光电倍增管 (Si-PM) 而成; 开发了基于 GPU 加速的 SOE (subset-driven origin ensemble iteration) 算法, 用于加速重建过程。完成研制后, 评估了探测器及系统性能: 探测器性能方面, 所研制相机的能量分辨率为 $6\% \pm 0.6\%$ @ 662 keV (半峰全宽), 位置分辨率为 2.2 mm, 探测器能量线性度良好 (线性拟合优度 $R^2=0.991$); 成像性能方面, 对于活度为 1.11×10^7 Bq 的 ^{137}Cs 点源, 将其放置在成像系统正前方 3.4 m 处的初步成像时间仅需 20 s, 成像系统角分辨率为 7° @ JND (just noticeable difference)。最后针对应用场景进行了模拟, 结果表明: 本文研制的康普顿相机可在 π 视场范围内同时对多个放射源进行成像定位, 可用于核退役放射性测量过程, 减少作业人员受照剂量。

关键词 成像系统; 核退役; 放射性测量; 康普顿相机; 掺铈钆铝镓石榴石

中图分类号 TL812+.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2411002

Development of Imaging System of Array Compton Camera for Nuclear Decommissioning Scenarios

Liu Xin^{1,2}, Feng Peng^{1*}, Yao Zhiyang³, Zhang Song^{1,2}, Qian Yikun^{1,2}, Liu Yixin², Wu Jian², Yuan Yonggang², Qu Jinhui², Bai Yanjun¹¹Key Laboratory of Opto-Electronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;²Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;³Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract This paper designs and develops a Compton camera system suitable for nuclear decommissioning scenarios with a detector containing a 23×23 array of cerium-doped gadolinium aluminum gallium garnet [GAGG(Ce)] and row/column readout circuits. The detector is composed of an array of GAGG(Ce) coupled with silicon photomultipliers (Si-PMs). A subset-driven origin ensemble iteration (SOE) algorithm based on graphics processing unit (GPU) acceleration is developed to accelerate the reconstruction process. After development is completed, the detector performance and system performance are evaluated. In terms of detector performance, the energy resolution and position resolution of the developed camera are $6\% \pm 0.6\%$ at 662 keV (full width at half maximum) and 2.2 mm, respectively. The detector also exhibits favorable energy linearity (goodness of linear fit $R^2=0.991$). Regarding imaging performance, the initial imaging of a ^{137}Cs point source with an activity of 1.11×10^7 Bq takes only 20 s when it is placed at 3.4 m in front of the imaging system. The angular resolution of the imaging system is 7° @ JND (just noticeable difference). Finally, a simulation is carried out in the application scenario. The results show that the Compton camera developed in this paper can simultaneously image and position multiple radioactive sources within the π field of view. It can be used in radioactivity measurement in nuclear decommissioning to reduce the exposure dose of operators.

收稿日期: 2022-09-05; 修回日期: 2022-09-28; 录用日期: 2022-10-27

基金项目: 核退役治理科研项目(科工二司【2018】1521号)、重庆市研究生科研创新项目(CYB21059, CYS22111)、重庆市科委基础研究及前沿探索专项(cstc2020jcyj-msxmX0899)

通信作者: *coe-fp@cqu.edu.cn

Key words imaging systems; nuclear decommissioning; radioactivity measurement; Compton camera; cerium-doped gadolinium aluminum gallium garnet

1 引言

随着我国在役核设施与在建核设施数量的不断增加,核设施退役工作已成为核工业发展中的重点工作。放射性测量贯穿退役的全过程,它是退役工作的前提,是实现安全退役的保障。康普顿相机具有灵敏度高、能量范围广、空间分辨率高、视野宽广等优点^[1-4],可用于核设施退役的放射性测量过程^[5-6],从而缩短建立核设施源项基础数据的时间,提高采集效率,减少放射性物质对人员的辐射照射和环境污染。

目前国外康普顿成像技术已经实现商业化应用^[7],如 H3D 公司的 H100 相机可在 4π 视场(FOV)范围内对 γ 放射源成像,角分辨率约为 20° ,成像时间约为 1 min。H100 角分辨率偏大,无法用于核设施退役场景等放射源分布复杂的情况,且成像时间较长。国内康普顿成像技术正处于发展阶段,Liu 等^[8]基于 4×4 像素的 3D CZT 探测器构建了康普顿相机,探测器的位置分辨率不高,经 MLEM (maximum likelihood expectation maximization) 算法迭代后角分辨率为 $9.5^\circ @ 662 \text{ keV}$;张济鹏^[9]基于闪烁体搭建了双层架构康普顿相机,半峰全宽(FWHM)处的角分辨率约为 7° ,初步成像需要 6 min。当前,核设施退役存在场景范围广、放射性核素类别复杂、放射源分布复杂等特性,上述康普顿相机均无法满足要求。因此,考虑到探

测器的位置分辨率、多普勒展宽效应以及无效事件等对成像角分辨率的影响^[10-13],本文基于 23×23 阵列 GAGG(Ce) 探测器以及行/列读出电路设计并研制了适用于核退役场景的康普顿相机系统,开发了基于 GPU 加速的 SOE (subset-driven origin ensemble iteration) 算法,实现了辐射场的快速重建,为国内核退役应用领域的放射性测量过程提供了新的技术手段。

2 康普顿相机的研制

2.1 康普顿成像原理及系统构成

康普顿成像基于康普顿散射原理。当发生康普顿效应、入射光子能量一定且已知被散射光子能量时,康普顿散射角是唯一确定的^[3,14]。如图 1(a)所示, γ 光子首先与散射层发生相互作用,若 γ 光子在散射层 (x_1, y_1, z_1) 处发生康普顿散射,沉积部分能量 E_1 ,被散射的 γ 光子进入吸收层被完全沉积,相互作用位置为 (x_2, y_2, z_2) ,这个过程称为一次完整的康普顿事件。根据两层探测器中 γ 光子与散射层的相互作用位置以及沉积能量并基于康普顿散射原理,便可唯一确定一个重建圆锥体,放射源可位于圆锥体表面任意位置,可由多个圆锥体交点确定放射源具体方位。成像过程需对成像空间进行体素划分,然后将重建圆锥体投影至成像空间,便可得到放射源的概率分布,如图 1(b)所示。

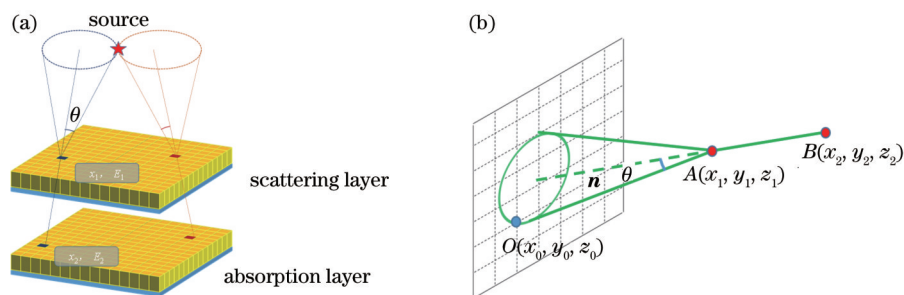


图 1 康普顿成像原理。(a)康普顿相机典型结构;(b)康普顿成像原理图(图中网格为成像平面, A 、 B 分别为散射层和吸收层中的相互作用位置, θ 为康普顿散射角, O 为重建圆锥表面上一点)

Fig. 1 Compton imaging principle. (a) Typical structure of Compton camera; (b) Compton imaging principle diagram (grid in figure is imaging plane, A and B are interaction positions in scattering layer and absorption layer, respectively, θ is Compton scattering angle, and O is one point on reconstructed cone surface)

康普顿相机系统主要包括前端探测器、位置读出模块、数据采集系统以及图像重建终端,图 2 所示是康普顿相机系统的原理框图。探测器的输出信号经过位置读出模块简化后,再由采集系统对简化后的输出进行 1 对 1 采集,最后将输出传回终端进行后续的数据处理以及图像重建等工作。

2.2 探测器的设计

闪烁探测器的主要组成部分有闪烁体、光学收集

系统、光电转换器件等。考虑到探测器尺寸、性能影响因素(能量分辨率、能量线性度等)以及制备成本,闪烁体应具有大光产额且高稳定性,光电转换器件应具有高增益、结构紧凑、转换效率高等特性^[15-17]。

GAGG(Ce) 晶体有着很大的光产额,且没有潮解性,易于加工和阵列封装。表 1 中列举了 GAGG(Ce) 晶体与 γ 射线成像领域常用无机闪烁体的特性^[9]。

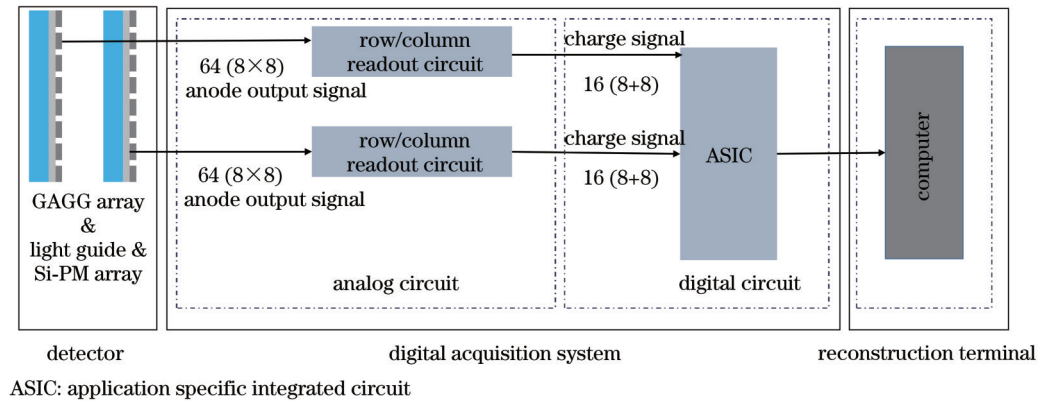


图 2 康普顿相机系统的原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of Compton camera system

表 1 GAGG(Ce)与 γ 射线成像领域常用无机闪烁体的特性^[9]
Table 1 Characteristics of GAGG(Ce) and commonly used inorganic scintillators in γ -ray imaging^[9]

Material	Density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Light yield / ($\text{photon}\cdot\text{MeV}^{-1}$)	Decay time /ns	Deliques cence
LaBr ₃ (Ce)	5.08	63000	16	Yes
NaI(Tl)	3.67	41000	230	Yes
CsI(Tl)	4.51	66000	900	Slightly
LYSO	7.1	32000	41	No
BGO	7.1	9000	300	No
GAGG (Ce)	6.63	56000	92 (86%), 174 (14%)	No

LaBr₃(Ce)材料的发光效率很高,但容易潮解,加工成本高;NaI(Tl)材料的发光效率一般,且易潮解,国内暂无相应的阵列封装技术;CsI(Tl)材料的发光性能好,加工较容易,但其发光衰减需要较长的时间,难以应用于高计数率要求的场景;LYSO材料常用于核医学领域,发光性能较好,但材料本身具有放射性,增加了随机符合的概率,其作为探测器材料时,不利于有效康普顿事件的筛选;BGO材料的发光性能差;GAGG(Ce)材料的发光特性好,且物理特性稳定,加工成本低,同时具有较高的能量。考虑到探测器位置分辨率、多普勒展宽效应以及无效事件等对成像角分

分辨率的影响^[10-11],闪烁晶体选用 23×23 阵列GAGG(Ce)晶体。

硅光电倍增管(Si-PM)结构紧凑,相比PMT(photomultiplier tube)尺寸小。表2列举了ON Semiconductor的6 mm产品MicroFC-60035的各项参数。MicroFC-60035的输出端增加了快信号极,且快信号极与阳极信号互不干扰。为适配GAGG(Ce)晶体尺寸, Si-PM选用 8×8 阵列。

表 2 ON Semiconductor MicroFC-60035 参数

Table 2 Parameters of ON Semiconductor MicroFC-60035

Parameter	Value
Package size /mm	6.0
Gain	3×10^6
Wavelength response /nm	300-950
Rise time /ns	10 (fast), 40 (standard)
Temperature coefficient /($\text{m}\cdot\text{C}^{-1}$)	21.5

探测器由GAGG(Ce)闪烁晶体与MicroFC-60035 Si-PM耦合而成,如图3所示。表3总结了双层结构的康普顿相机的探测器配置参数,两层中的探测器距离为50 mm。

2.3 位置读出模块

选用 8×8 阵列Si-PM与闪烁晶体耦合而成的探

表 3 双层探测器结构康普顿相机的探测器配置参数

Table 3 Detector configuration parameters of Compton camera with double-layer detector structure

Detector	Parameter	Setting
Scattering detector	Scintillator pixel size /($\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$)	$2.2\times 2.2\times 5$
	Number of scintillator arrays	23×23
	Si-PM array area /($\text{mm}\times\text{mm}$)	57.4×57.4
	Number of Si-PM arrays	8×8
Absorption detector	Scintillator pixel size /($\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$)	$2.2\times 2.2\times 10$
	Number of scintillator arrays	23×23
	Si-PM array area /($\text{mm}\times\text{mm}$)	57.4×57.4
	Number of Si-PM arrays	8×8

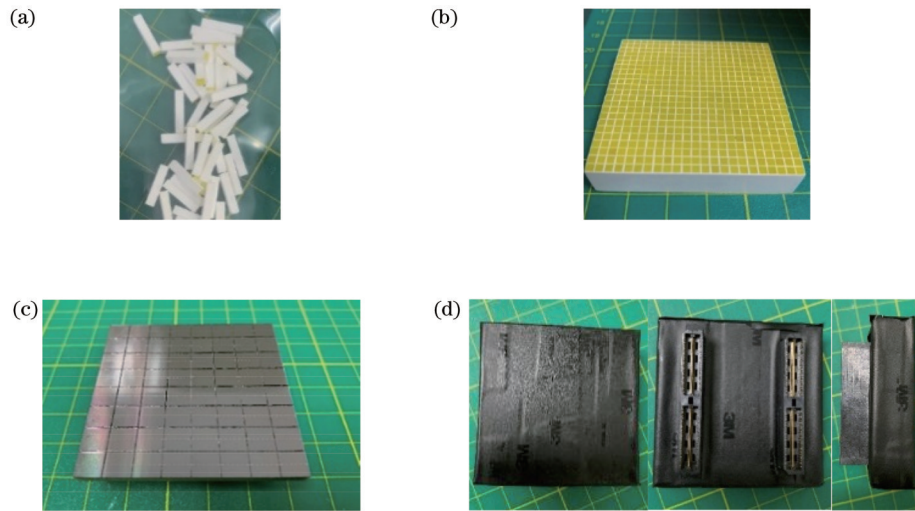


图3 GAGG(Ce)晶体、Si-PM及探测器实物图。(a) GAGG(Ce)晶体封装前;(b) GAGG(Ce)晶体封装后;(c) Si-PM;(d)探测器封装完成后的三种视图

Fig. 3 Pictures of GAGG(Ce) crystal, Si-PM, and detector. (a) Before packaging of GAGG(Ce) crystal; (b) after packaging of GAGG(Ce) crystal; (c) Si-PM; (d) three views after detector is packaged

测器,其输出通道多,有必要简化探测器输出。常用的简化电路有 DPC (discretized positioning circuit)、SCDC (symmetric charge division circuit) 以及行/列读出电路。行/列读出电路可避免 DPC 电路各个输出端等效电阻不一致等问题,并能有效减小阳极信号间噪声串扰的影响,提高信噪比。而 SCDC 电路虽能进一步将行/列读出电路的输出简化,但同时也增加了电子学的复杂性,且在进一步简化到 4 路输出信号后,无法

剔除在散射层中发生多次康普顿散射的事件,影响重建质量。

行/列读出电路的示意图如图 4 所示, Si-PM 输出信号连接每行每列的交叉节点 S, 并被两个阻值相等的电阻 R 分成两路大小相等的电流信号。具有 $N \times N$ 路输出的阵列可简化为 $N+N$ 路信号 (X 和 Y 方向各 N 路)。

使用行/列读出电路简化探测器输出时,采用响应

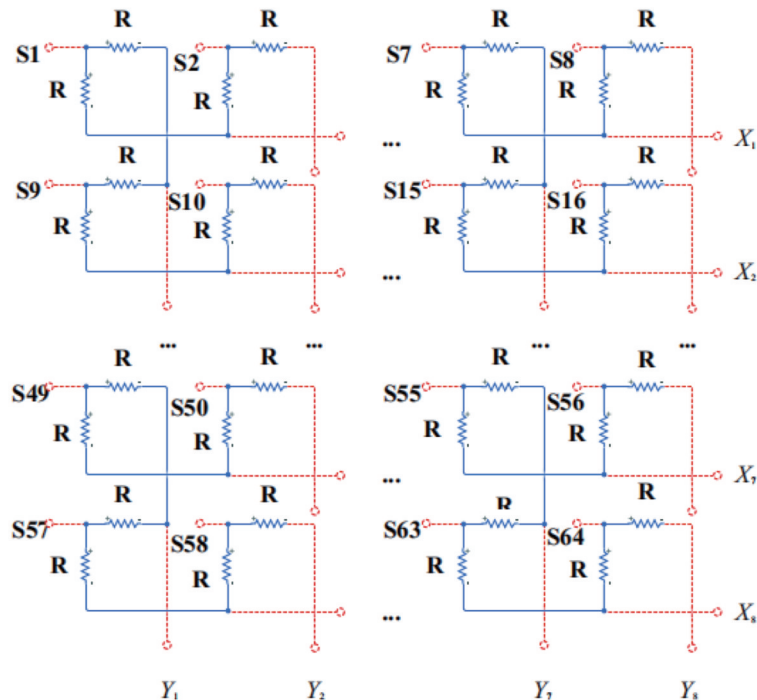


图 4 行/列读出电路示意图^[18]

Fig. 4 Row/column readout circuit^[18]

函数法获取单次事件的相互作用位置和沉积能量^[18]。

2.4 图像处理终端

基于上述模块,自主搭建了如图 5 所示的康普顿相机实验平台,并开发了基于 GPU 且具有分辨率修正的 SOE 重建算法^[19],该算法可实现辐射场的快速重建。

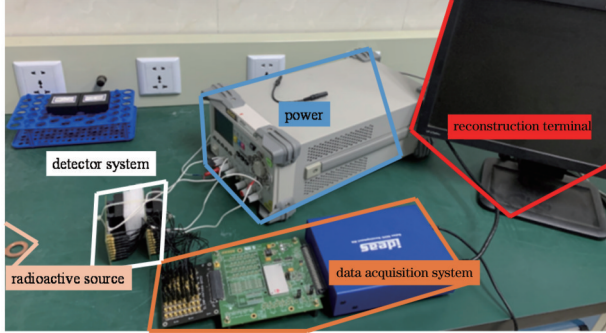


图 5 康普顿相机实验平台

Fig. 5 Compton camera experimental platform

SOE 算法包括两部分:具有分辨率修正的反投影 (PBP-RR) 和源子集驱动的迭代过程。重建算法流程图如图 6 所示,图 6 中 N_e 指算法迭代的次数。

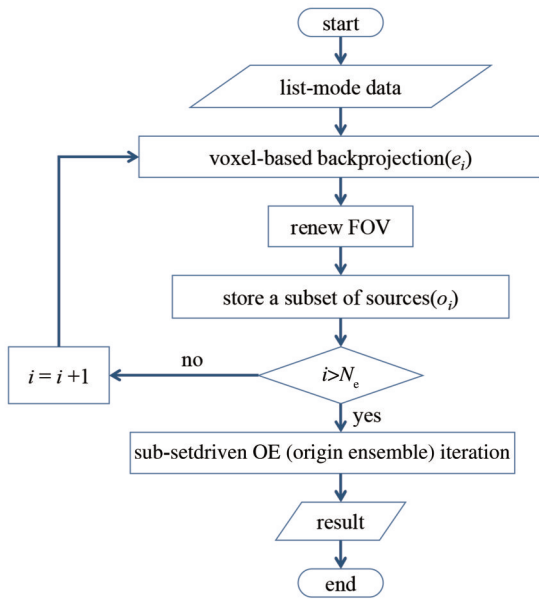


图 6 SOE 重建算法流程图

Fig. 6 Flowchart of SOE reconstruction algorithm

SOE 迭代过程如下:

1) 在稀疏矩阵中随机选择一个元素 S_0 , 并通过 PBP-RR 获得对应的体素位置, 将其作为放射源位置的估计值 O 。

2) 对于第 i 个事件, 基于均匀分布生成一个长度匹配 S_0 的随机数组 S_{0i} 。基于 S_{0i} 对放射源分布进行采样, 得到新的放射源位置的估计值 O_1 。

3) 基于均匀分布生成随机数 a , 并将其与接收概率进行比较。如果接收概率大于 a , 则放射源位置为

O_1 , 同时对应的体素权重增加, O 位置对应的体素权重减小。同理可得接收概率小于 a 情况时的权重变化情况。更新成像的概率密度函数后, O_1 将作为下一次迭代的放射源位置的估计值。

4) 重复步骤 2) 和 3), 直到满足收敛条件或者迭代次数等于预设值。

$$S_0(e_i) = \left[\delta(v_j) \left| \frac{\vec{v}_j L_{i1} \cdot \vec{L}_{i1} L_{i2}}{|\vec{v}_j L_{i1}| \cdot |L_{i1} L_{i2}|} - \cos \theta_i \right| \leq \frac{\Delta(\cos \theta)}{2.355} \right] = \sum_j s_{0, ij}, \quad (1)$$

$$R_{\text{PBP-RR}} = \sum_j \sum_i \delta(v_j, e_i) \left[\left| \frac{\vec{v}_j L_{i1} \cdot \vec{L}_{i1} L_{i2}}{|\vec{v}_j L_{i1}| \cdot |L_{i1} L_{i2}|} - \cos \theta_i \right| \leq \Delta(\cos \theta) \right], \quad (2)$$

式中: v_j 为第 j 个体素; e_i 为第 i 个事件; $S_0(e_i)$ 为第 i 个事件的权重分布(基于体素的反投影); $s_{0, ij}$ 为第 i 个事件中第 j 个体素的权重(基于体素的反投影); $R_{\text{PBP-RR}}$ 为放射源概率分布; $\delta(v_j)$ 为第 j 个体素对应的冲击函数值; L_{i1} 为散射层中相互作用位置; L_{i2} 为吸收层中相互作用位置; θ_i 为康普顿散射角。

不同重建算法的重建时间和成像角分辨率对比如表 4 所示。表 4 中对比结果显示, 本文所采用的 SOE 算法的角分辨率与 PSF-MLEM (point spread function maximum likelihood expectation maximization) 和 Ordered OE-RR (ordered origin ensemble resolution recovery) 相当, 但重建时间大幅减少。

表 4 不同重建算法的重建时间和成像角分辨率对比^[19]

Algorithm	Reconstruction time / s	Imaging angular resolution / (°)
PSF-MLEM	36.4	10.2
Ordered OE-RR	11.4	10.5
SOE	4.8	10.3

3 康普顿相机性能测试与结果分析

为避免客观因素对实验结果带来的影响, 实验过程中保证所有实验条件一致, 包括测试环境温度、Si-PM 供电电压、采集系统通道与 Si-PM 输出的对应关系、放射源, 以及放射源与探测器的相对位置等。测试过程中, Si-PM 供电电压设为 30 V, 测试环境温度为 27 °C。实验室现有的放射源信息见表 5。

3.1 探测器位置分辨率测试

实验过程中放射源使用 ¹³⁷Cs (2000 Bq), 放射源固定在探测器正前方 10 cm 处, 得到探测器的 2 维散点图

表 5 放射源信息

Table 5 Radioactive source information

Radioactive source	Radioactivity /Bq	Interested energy of gamma /keV
²⁴¹ Am	5000	59.54
¹³³ Ba	3000	81,303,356
¹⁵² Eu	3000	122,314
²² Na	1500	511
¹³⁷ Cs	2000, 1.11×10 ⁷	662

如图 7 所示。图 7 中 X 轴和 Y 轴的范围(0~512)根据信号转换精度(9 bit)选取,从图中可以清楚地分辨出探测器的所有像素,探测器像素与散点一一对应,探测器在 X 方向和 Y 方向的位置分辨率由探测器像素尺寸决定,均为 2.2 mm。

3.2 探测器的能量分辨线性度

根据系统测得能谱峰位,进而确定 γ 射线的能量,需要对系统进行能量校正。基于采集系统与 Si-PM 器件的特性,采集系统输出值与实际沉积能量之间存在线性转换关系,称为能量线性。实验过程中分别使用 ²⁴¹Am、¹³³Ba、¹⁵²Eu、²²Na、¹³⁷Cs(2000 Bq)等放射源固

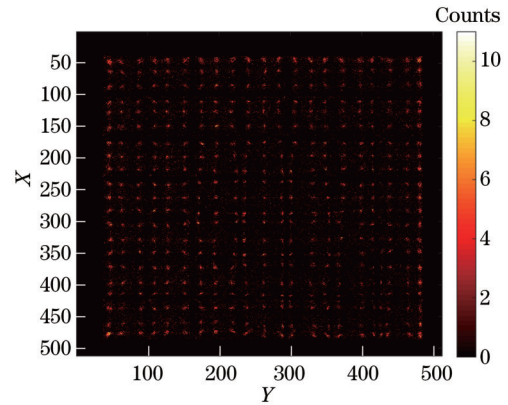


图 7 探测器 2 维散点图(图中亮点与探测器像素一一对应)
Fig. 7 2D scattering dot plot of detector (bright spots in figure correspond to detector pixels)

定在探测器正前方 10 cm 处,测试结束后由最小二乘拟合得到两层探测器对应的能量线性关系。

图 8 为散射层(5,5)像素的能量线性过程,图 8(a)~(e)分别是 ²⁴¹Am、¹³³Ba、¹⁵²Eu、²²Na、¹³⁷Cs 能谱,图 8(f)为全能峰峰位-能量拟合曲线。拟合结果显示,线性拟合优度 R²为 0.991,说明探测器在中低能段具有良好的能量线性。

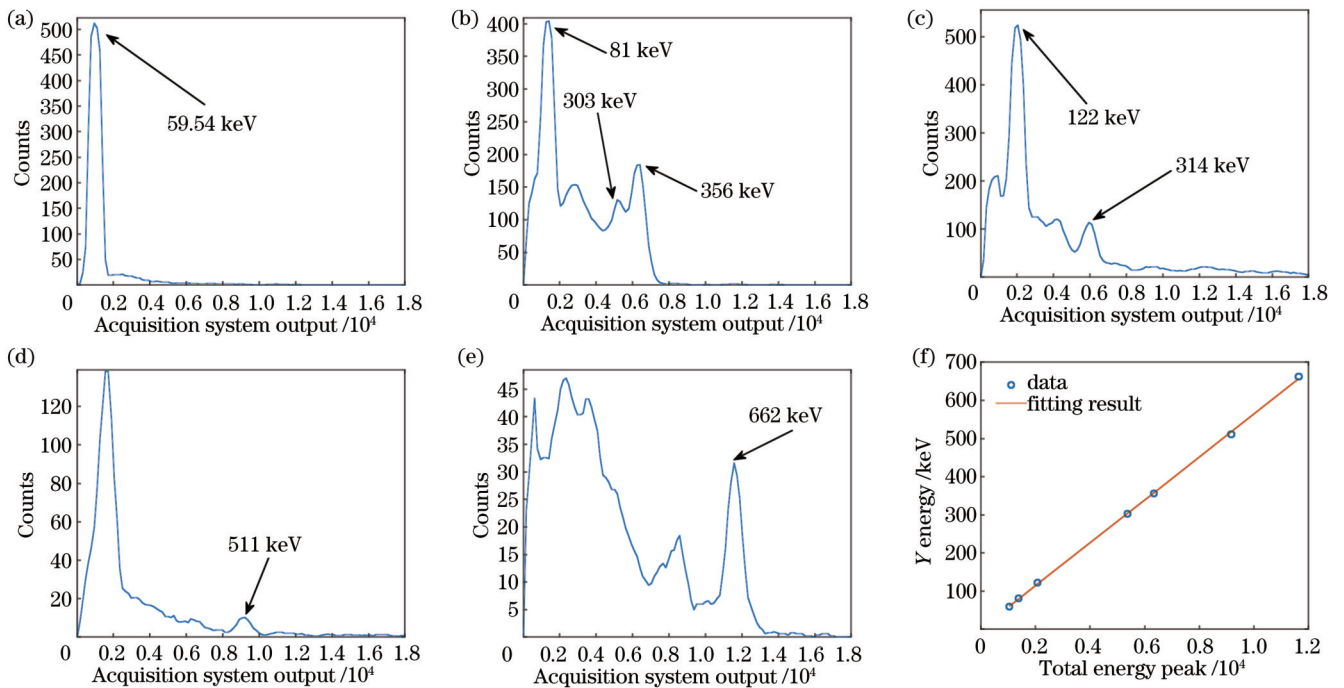


图 8 散射层的能量响应及全能峰峰位-能量拟合曲线[图 8(a)~(e)中标注能量为感兴趣全能峰峰位对应的能量]。(a)²⁴¹Am 能谱;(b)¹³³Ba 能谱;(c)¹⁵²Eu 能谱;(d)²²Na 能谱;(e)¹³⁷Cs 能谱;(f)全能峰峰位-能量拟合曲线

Fig. 8 Energy response of scattering layer and fitting curve of all-energy peak:to-energy [energy marked in Figs. 8(a)-(e) is energy corresponding to peak position of all-energy peak of interest]. (a) ²⁴¹Am energy spectrum; (b) ¹³³Ba energy spectrum; (c) ¹⁵²Eu energy spectrum; (d) ²²Na energy spectrum; (e) ¹³⁷Cs energy spectrum; (f) full energy peak position-energy fitting curve

3.3 探测器的能量分辨率

得到所有像素对应的能量线性关系后,对两层探测器的能量分辨率分别进行了测试。由于计算康普顿圆锥的散射角时利用的是探测器各个像素上的沉积能

量值,因此使用单像素的能量分辨率(而非整个探测器的能量分辨率)来评估探测器能量分辨率,结果见图 9。

图 9 显示了实验测试得到的探测器中一个像素

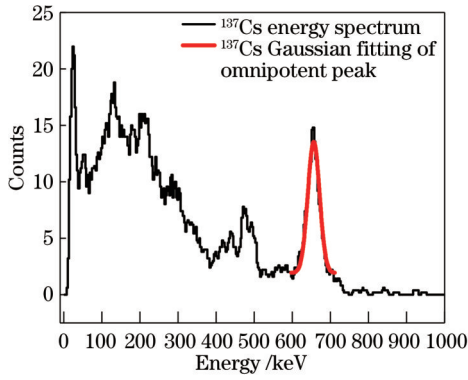


图 9 单像素的 ¹³⁷Cs 能谱
Fig. 9 ¹³⁷Cs energy spectrum of single pixel

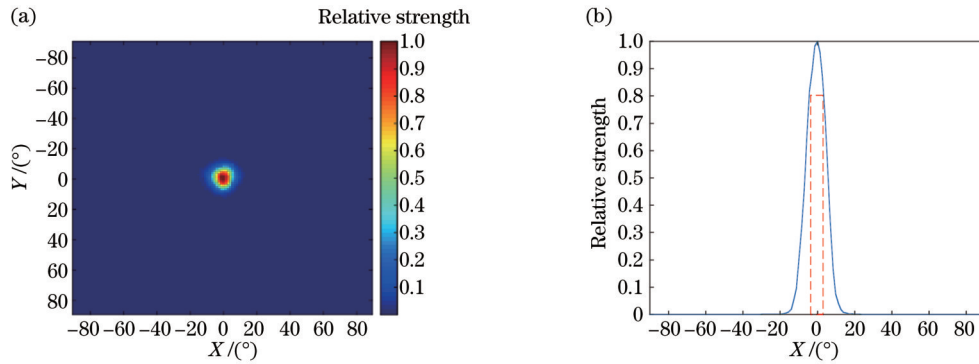


图 10 重建结果及角分辨率。(a)成像结果;(b)图 10(a)中重建剖面的相对强度变化(虚线框对应 $0.8I$, I 为峰值强度)
Fig. 10 Reconstruction result and angular resolution. (a) Imaging result; (b) relative strength change of reconstructed section in Fig. 10(a) (dashed frame corresponds to $0.8I$, and I is peak intensity)

表 6 对本文成像系统与国内外现有康普顿成像系统的性能进行了对比,本文成像系统的总体成像精度与张济鹏^[9]所研制的康普顿相机相当,优于 H3D 的

的 ¹³⁷Cs 能谱,探测器所有像素的平均分辨率(FWHM)为 $6\% \pm 0.6\%$ 。

3.4 成像系统性能测试

为评估成像系统的性能,使用 γ 点源对系统进行了测试,性能参数包括点源分辨率、成像效率以及视场范围。将 ¹³⁷Cs(活度为 1.11×10^{-10} Bq)点源放置在距离系统中心 3.4 m 处,并将其固定在成像系统的视场中心位置,初步成像时间仅为 20 s(有效康普顿事件数为 20)。当总事件数达到 260000 时,有效康普顿事件数为 427。故在此次测试过程中,该系统的成像效率约为 0.16%。图 10 为重建结果,角分辨率约为 $7^\circ @ JND$ 。

H100^[7]型号康普顿相机;同时本文成像系统的成像时间为 20 s,仅为 H100 的 1/3。

表 6 本文成像系统与国内外现有康普顿成像系统的性能对比

Table 6 Performance comparison between our imaging system and existing Compton imaging systems

Product	Imaging time	Angular resolution	Field of view
H100 ^[7]	1 min	20°	4 π
Compton camera proposed by Zhang ^[9]	6 min	7°	2 π
Our imaging system	20 s	7°	π

3.5 模拟场景演示实验

为验证康普顿相机系统的实用性能,进行了模拟核退役应用场景实验,使用成像系统对多个摆放在系统不同方位的放射源同时进行探测。其中,放射源的相对系统位置为:放射源到系统中心的位移 $R=0.5$ m,水平方向上偏移系统的轴线角度 $\theta = -60^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$,偏移系统位于轴线上时 $\theta=0^\circ$ 。得到的结果如图 11 所示。图 11 显示了成像系统能准确定位放置于不同方位处的放射源。测试结果表明,本文研制的成像系统在 π 视场范围内对 γ 放射源的成像效果良好,可用于核退役放射性测量过程。

4 结 论

研制了适用于核设施退役应用场景的康普顿相机,这为放射性测量过程提供了新的技术手段。为提高探测器的位置分辨能力,采用 23×23 阵列式 GAGG(Ce)探测器以及行/列读出电路有效提升了系统辨别有效事件的能力。实验结果表明,本文所研制的康普顿成像系统的探测器位置分辨率为 2.2 mm,能量线性度良好,像素的平均能量分辨率达到 $6\% \pm 0.6\% @ 662$ keV。测试结果显示:当活度为 1.11×10^{-10} Bq 的 ¹³⁷Cs 放射源放置于成像系统正前方 3.4 m 处,成像效率为 0.16%,成像角分辨率为

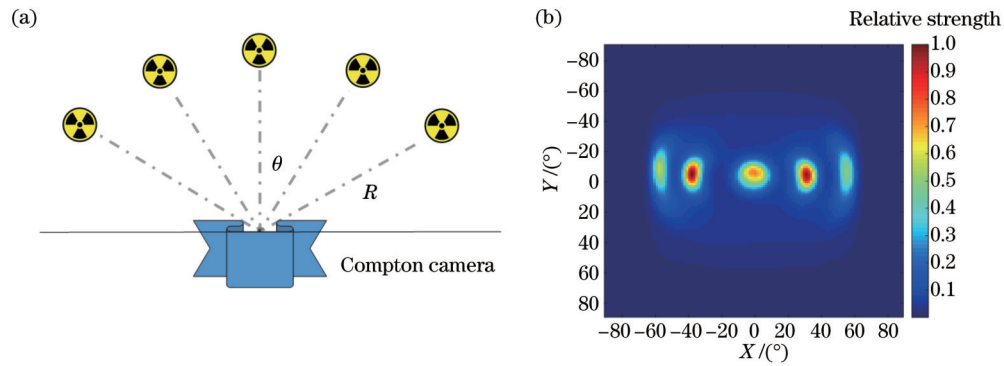


图 11 模拟场景实验配置以及实验结果。(a)实验场景设置;(b)模拟场景实验结果

Fig. 11 Simulation scenario experimental configuration and experimental result. (a) Experimental scenario setting; (b) simulation scene experimental result

7°@JND。模拟场景实验中,该成像系统能在 π 视场范围内对多个 γ 放射源同时进行成像。与H100等康普顿相机相比,本文成像系统在成像时间和角分辨率方面具有明显优势,说明该系统可用于核退役放射性测量过程,有助于提高测量效率,减少作业人员受照剂量。

参 考 文 献

- [1] Lee T, Lee W. Compact hybrid gamma camera with a coded aperture for investigation of nuclear materials[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, 767: 5-13.
- [2] Farber A M, Williams J G. Coded-aperture Compton camera for gamma-ray imaging[J]. EPJ Web of Conferences, 2016, 106: 05003.
- [3] Takeda S, Harayama A, Ichinohe Y, et al. A portable Si/CdTe Compton camera and its applications to the visualization of radioactive substances[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 787: 207-211.
- [4] Liprandi S, Takyu S, Aldawood S, et al. Characterization of a Compton camera setup with monolithic LaBr₃(Ce) absorber and segmented GAGG scatter detectors[C]//2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, October 21-28, 2017, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [5] Shikaze Y, Shimazoe K. Improvement of analysis results from the GAGG scintillator Compton camera operated on an unmanned helicopter by selecting stable flight conditions[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2022, 59(1): 44-54.
- [6] Sato Y, Terasaka Y. Radiation imaging using an integrated Radiation Imaging System based on a compact Compton camera under unit 1/2 exhaust stack of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2022, 59(6): 677-687.
- [7] Inc H3D. H100 Gamma-ray imaging spectrometer[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://h3dgamma.com/H100Specs.pdf>.
- [8] Liu Y L, Fu J Q, Li Y L, et al. Preliminary results of a Compton camera based on a single 3D position-sensitive CZT detector[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(10): 145.
- [9] 张济鹏. 康普顿成像技术研究及系统实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
Zhang J P. Compton imaging technology research and system implementation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [10] 宋张勇, 于得洋, 蔡晓红. 康普顿相机的成像分辨分析与模拟[J]. 物理学报, 2019, 68(11): 118701.
Song Z Y, Yu D Y, Cai X H. Analysis and simulation for Compton camera's imaging resolution[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(11): 118701.
- [11] 高歌. 基于Geant4的康普顿相机的蒙特卡洛模拟与图像重建[D]. 太原: 中国辐射防护研究院, 2018.
Gao G. Monte Carlo simulation and image reconstruction of Compton camera based on Geant4[D]. Taiyuan: China Institute for Radiation Protection, 2018.
- [12] 刘毅. 康普顿散射成像探测器的研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
Liu Y. Development of Compton scattering imaging detector[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [13] Wen J X, Zheng X T, Gao H Z, 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, 2022, 1021: 165954.
- [14] 郭静, 冯鹏, 邓露珍, 等. 针孔X射线荧光CT探测角度优化研究[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111017.
Guo J, Feng P, Deng L Z, et al. Optimization of detection angle for pinhole X-ray fluorescence computed tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111017.
- [15] 黄乐程, 王光毅, 薛玉雄, 等. 光子晶体对LYSO闪烁体光输出的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1031001.
Huang L C, Wang G Y, Xue Y X, et al. Effect of

- photonic crystal on light output from lutetium-yttrium oxyorthosilicate scintillators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1031001.
- [16] 安康, 李汶芳, 段晓礁, 等. 光纤耦合 GAGG_Ce 型 X 射线探测器高分辨成像[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0111001.
An K, Li W F, Duan X J, et al. Fiber-coupled GAGG_Ce X-ray detector for high-resolution imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0111001.
- [17] 陈洪芳, 汤亮, 张爽, 等. 位置敏感探测器对激光追踪测量系统的影响[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1104001.
Chen H F, Tang L, Zhang S, et al. Effects of position sensitive detector on laser tracing measurement system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1104001.
- [18] 刘鑫, 袁永刚, 吴健, 等. 基于 Si-PM 阵列的辐射作用位置定位方法研究[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(6): 066001.
Liu X, Yuan Y G, Wu J, et al. Research on location method of radiation action based on Si-PM array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(6): 066001.
- [19] Yao Z Y, Yuan Y G, Wu J, et al. Rapid Compton camera imaging for source terms investigation in the nuclear decommissioning with a subset-driven origin ensemble algorithm[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2022, 197: 110133.