

基于单块连续 CeBr₃ 晶体的高定位精度编码孔径伽马相机

High positioning accuracy coded aperture gamma camera based on monolithic CeBr₃ crystal

官慧星^{1,2} · 黄先超¹ · 方声浩¹ · 王卓然^{1,2} · 梁秀佐¹ · 袁航^{1,2} · 杨诗涵^{1,2} · 章志明^{1,2} · 魏龙^{1,2,*}

¹ 中国科学院高能物理研究所 ² 中国科学院大学核科学与技术学院

³ 中国科学院福建物质结构研究所

RESEARCH ARTICLE



Rev. Sci. Instrum. 96, 053102 (2025)
DOI: 10.1063/5.0250404

单块连续 CeBr₃ 晶体结合 CNN 三维定位、五倍精细采样及 DOI 分层加权解码，在 44° 视场内实现了 5.2° 的角分辨率和 3.44° 的平均角定位精度。

探测器横向位置分辨率 1.25 / 1.29 mm X / Y 平均 FWHM	探测器深度分辨率 1.98 mm Z 方向平均 FWHM	探测器能量分辨率 4.92% @ 662 keV	双点源角分辨能力 5.2° 视场 44°	平均角定位不确定性 3.44° 视场 44°
--	---	---------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

研究问题与系统设计

1. 研究背景

编码孔径伽马相机通过编码掩模对放射源发出的伽马射线进行空间调制，并利用探测器记录的投影图像重建放射源角位置，具有探测效率高、信噪比较好和适于远距离定位等特点，可用于辐射安全监测、核应急搜寻和放射性热点定位。

传统系统通常采用阵列型闪烁晶体探测器。晶体条之间的反射层会产生探测死区；随着晶体像素尺寸减小，制造难度和成本也会增加。此外，阵列型晶体通常无法提供相互作用深度信息，斜入射伽马射线产生的 DOI 效应会使投影图像展宽，降低角分辨率和定位准确度。

2. 研究目标

本研究采用单块连续 CeBr₃ 晶体替代阵列型晶体，并利用卷积神经网络恢复伽马射线在晶体中的三维相互作用位置。在此基础上，开展位置分区能量校正、精细采样平衡解码和 DOI 分层加权定位，以提高编码孔径相机对单点放射源的角定位精度。

目标

- 射线沉积位置连续三维定位
- 任意精度精细采样解码
- 使用深度信息提高角定位精度

3. 系统组成

- 探测器：
 - 闪烁晶体：26 × 26 × 10 mm³ 的单块 CeBr₃ 晶体；
 - 光电转换器件：8 × 8 SiPM 阵列，单片尺寸 3 mm，阵列尺寸 25 × 25 mm²；
 - 读出电子学：TOFPET2 ASIC。
- 编码掩模：
 - MURA排列：rank 11，使用 2 × 2 马赛克形式扩展；
 - 掩模单元：
 - 尺寸：1.7 × 1.7 × 8 mm³；
 - 材料：钨金属。
 - 焦距：掩模与探测器通过可调节滑轨连接，可变焦距。

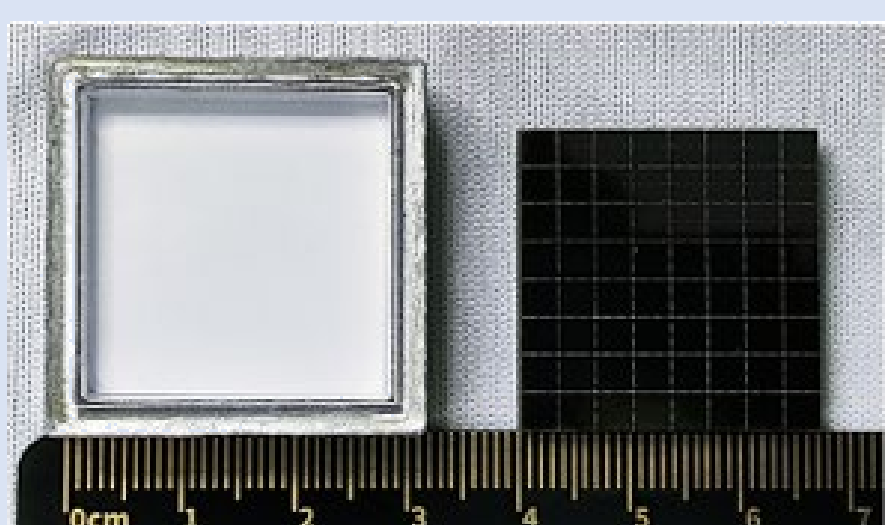
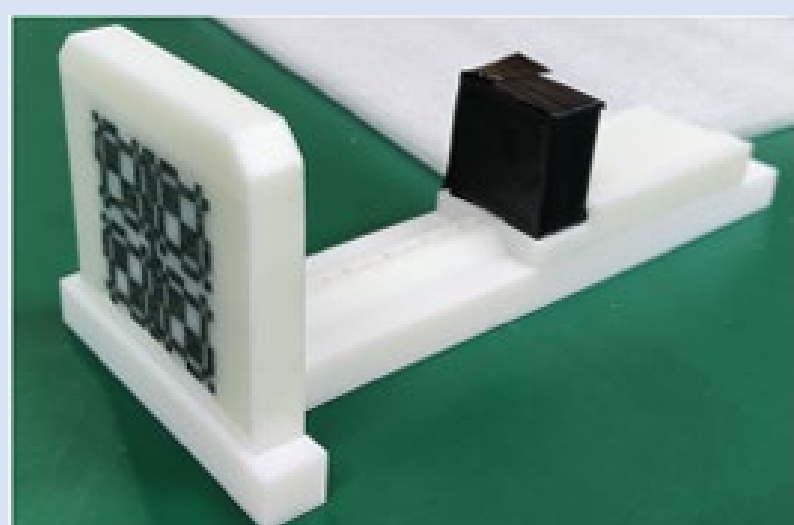


图1 编码孔径伽马相机组成部件。探测器由单块CeBr₃晶体、8 × 8 SiPM 阵列和 TOFPET2 读出电子学构成，前端采用 rank 11 MURA 钨金属掩模。



(b)

4. 三维位置标定

位置标定采用 1 mCi 的 Cs-137 放射源和缝宽为 0.5 mm 的扇束准直器。在 x 和 y 方向分别设置 26 个标定位置，范围为 -12.5 ~ 12.5 mm，间隔为 1 mm；在 z 方向设置 5 个标定位置，范围为 1 ~ 9 mm，间隔为 2 mm。每个位置的采集时间超过 5 min，实验温度约为 18 °C。

由于晶体边界反射会破坏理想光分布，传统重心法在边缘区域会产生明显偏差。因此，本研究采用 CNN 对 8 × 8 SiPM 光分布进行机器学习建模，减轻边缘效应，实现伽马射线相互作用位置的三维重建。

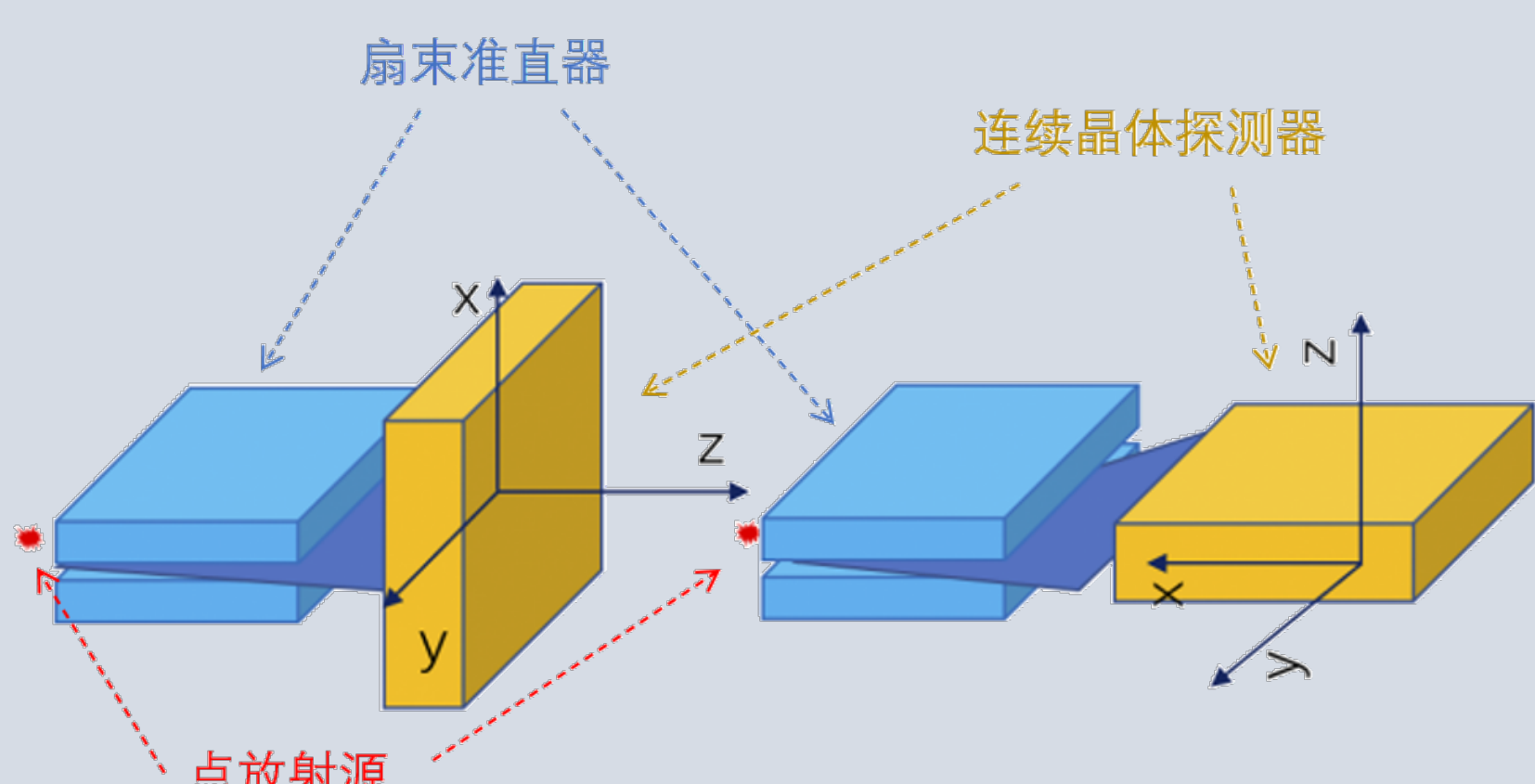
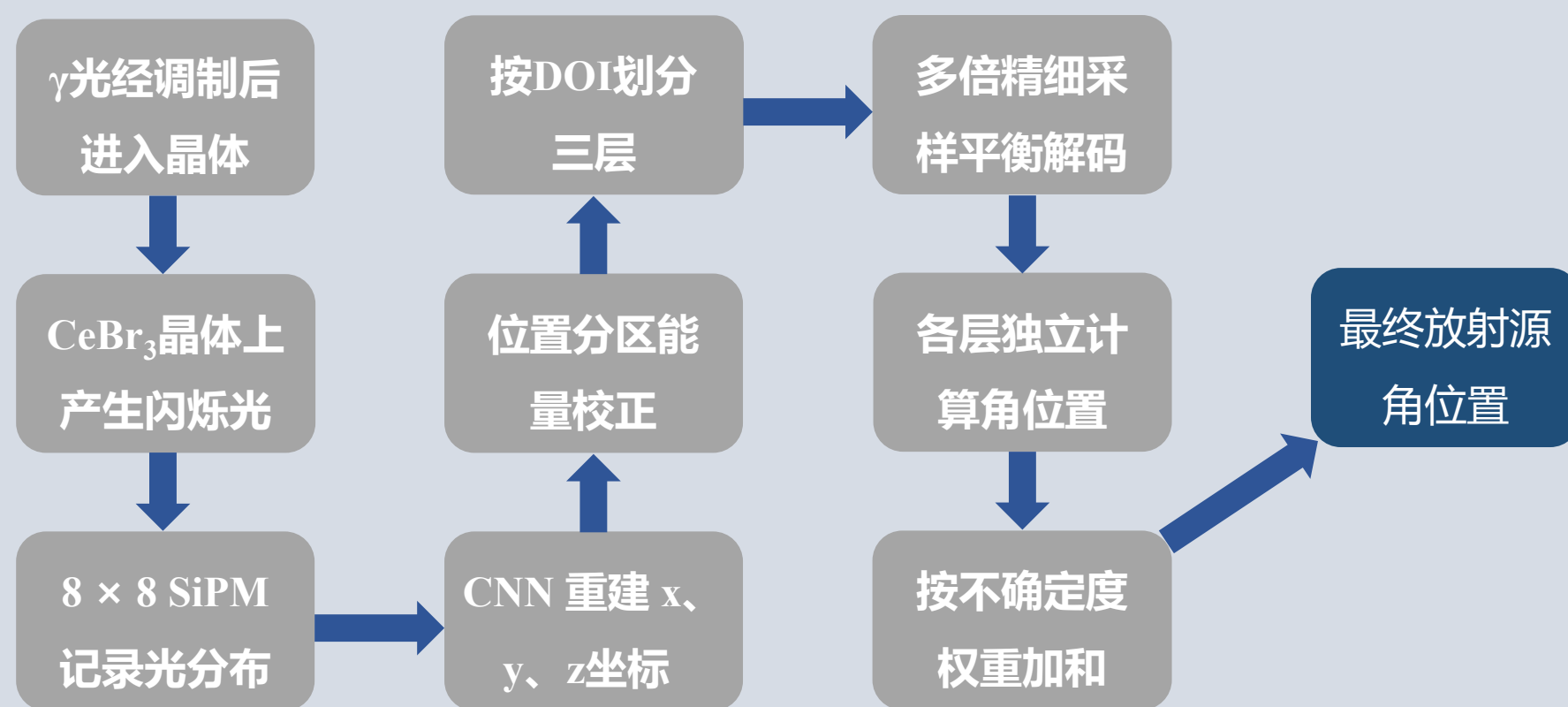


图2 使用扇束伽马射线对探测器三维位置分辨进行标定示意图。

三维定位与高精度解码方法

1. 总体技术路线



2. CNN三维位置重建

采用包括两个卷积层和一个全连接层的 CNN 模型。闪烁光信号在 8 × 8 SiPM 阵列上的二维分布归一化后作为 CNN 输入，模型输出相互作用位置的 x、y 或 z 坐标。

定位结果近似服从高斯分布，FWHM 用于表征位置分辨率，均值Mu表征定位偏差。边缘效应出现在晶体边缘约 2 ~ 3 mm 范围内。

平均位置分辨能力

X : 1.25 mm Y : 1.29 mm Z : 1.98 mm

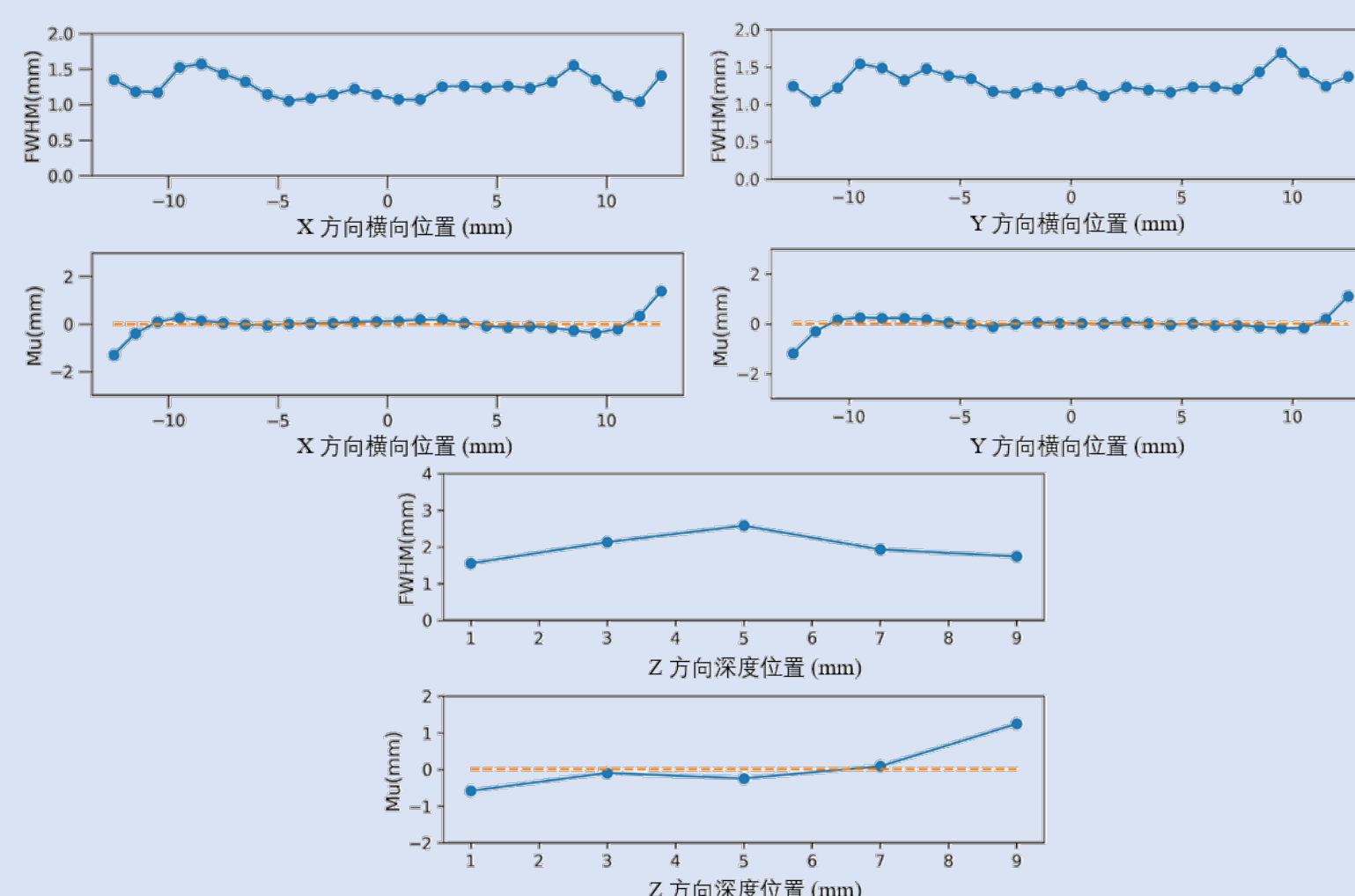
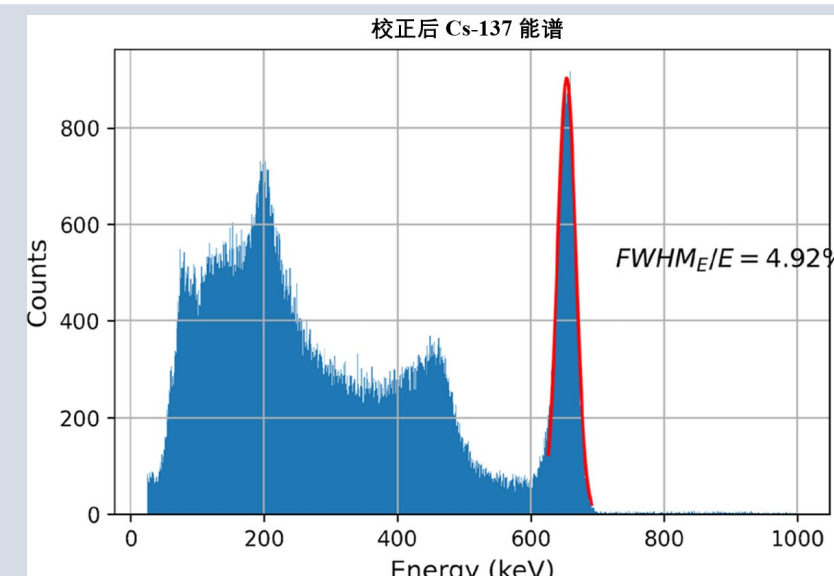


图3 x、y、z三个方向上的位置分辨和定位偏差。

3. 位置分区能量校正

- 原因：
 - 不同位置的集光效率不同；
 - 不同位置 SiPM 饱和程度不同。
- 方法：
 - 分区域使用 Am-241、Na-22、Cs-137 和 Co-60 进行非线性能量标定；
 - 非线性模型采用： $Channel = A \times (1 - e^{-B \times Energy}) + C$ 。
- 结果：
 - 位置分区校正后，能量分辨达到 4.92% @ 662 keV。



4. 5 倍精细采样

提取投影图像中心不受边缘效应影响的 18.7 × 18.7 mm² 的正方形区域，它包含投影图像的一个完整周期，利用连续三维定位信息可将其按一倍到任意多倍采样进行网格划分。

随着采样率增加，解码热点面积逐渐减小，并在采样率达到 5 后趋于稳定，并且此时信噪比没有出现明显的系统性下降。5 倍精细采样能够更连续地恢复热点形状和峰值位置，因此用于后续定位实验。

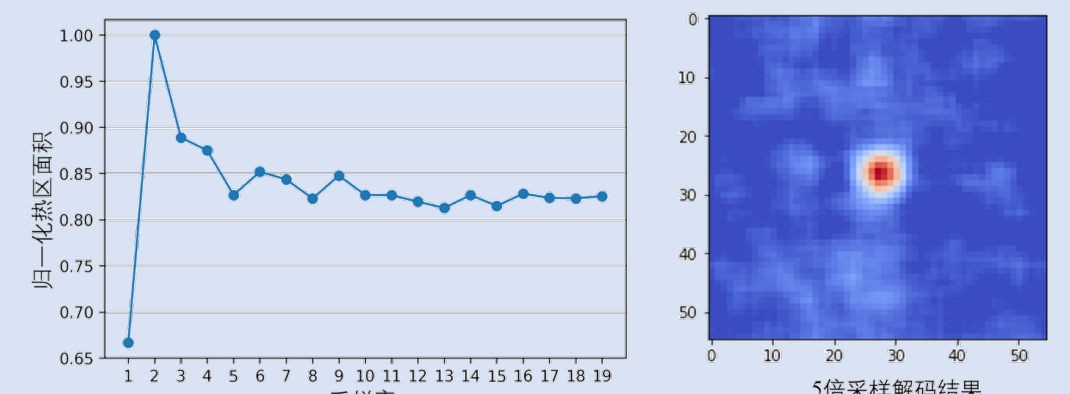


图4 解码热点面积随采样率的变化情况及5倍采样解码结果

5. DOI分层加权定位

为减小斜入射伽马射线产生的 DOI 模糊，事件按照在CeBr₃晶体内的深度 z 坐标划分为三层。

各层投影图像分别进行 5 倍精细采样和平衡解码。根据热点中心位置 a、热点宽度 d 和焦距 h 计算每一层的放射源角位置及定位不确定性：

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a}{h}, \delta\theta = \left| \tan^{-1} \frac{a+d/2}{h} - \tan^{-1} \frac{a-d/2}{h} \right|$$

最终结果按照不确定性进行加权合并

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i / \delta\theta_i^2}{\sum_{i=1}^N 1 / \delta\theta_i^2}, \delta\theta = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N 1 / \delta\theta_i^2}}$$

实验结果与主要结论

1. 三维定位与能量性能

CNN 模型成功恢复了伽马射线在单块 CeBr₃ 晶体中的三维相互作用位置。x、y 和 z 方向的平均 FWHM 位置分辨率分别达到 1.25、1.29 和 1.98 mm。平面定位能力与小尺寸阵列型晶体相当，同时系统额外获得了约 2 mm 的 DOI 分辨能力。

采用位置分区能量校正后，Cs-137 的 662 keV 光电峰能量分辨率达到 4.92%，说明该方法能够有效补偿晶体内部的空间响应不均匀性。

2. DOI 分层显著改善角定位

在不同入射角度下，非分层解码容易受到 DOI 效应影响。随着放射源偏离系统中心轴，热点在横向方向发生展宽，定位不确定度明显增大。

采用三层解码后，不同深度范围内的事件分别形成投影图像，减少了不同作用深度相互混合造成的模糊。对实际角位置为 0°、5°、10°、15° 和 20° 的 Cs-137 点源，三层加权定位明显优于不分层解码。

放射源真实角位置(°)	不分层解码		分层解码并按不确定性权重加权	
	$\theta(^{\circ})$	$\delta\theta(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$\delta\theta(^{\circ})$
0	0.11	5.83	0.11	3.25
5	4.57	6.55	4.33	3.55
10	11.43	7.02	10.42	3.32
15	16.21	8.15	15.19	3.91
20	20.91	8.68	19.50	3.16

3. 系统综合性能

研究分别使用 Co-57、Na-22、Cs-137 和 Co-60 放射源开展成像实验，覆盖 122、511、662 和 1332.5 keV 等能区，系统均能够形成可识别的解码热点。

在双 Cs-137 点源实验中，非分层解码的最优角分辨率为 5.7°；使用底层 DOI 数据解码后，最优角分辨率提高至 5.2°。系统视场为 44°。

对于 Cs-137 点源，在剂量率约 2.5 μSv/h 条件下，约 1 s 数据即可获得接近 5 的图像信噪比。

4. 主要创新点

① 单块 CeBr₃ 探测器

采用单块连续晶体替代阵列型晶体，避免晶体条之间的探测死区，同时获得连续二维位置和 DOI 信息。

② 三维位置驱动的数据

处理将 CNN 三维定位用于位置分区能量校正、精细采样和分层解码，使探测器三维位置信息直接参与后续成像重建。

③ 多层角位置加权估计

各 DOI 层独立解码，并依据定位不确定性进行加权合并，显著降低斜入射造成的角定位不确定性

5. 结论

本研究研制了一套基于单块连续 CeBr₃ 晶体的编码孔径伽马相机，并形成了从 CNN 三维位置重建、位置分区能量校正到 5 倍精细采样和 DOI 分层解码的完整处理流程。

系统实现了 1.25、1.29 和 1.98 mm 的 x、y、z 方向平均位置分辨率，以及 4.92% @ 662 keV 的能量分辨率。三层 DOI 加权定位将平均角定位不确定性由 7.25° 降低至 3.44°。

最终，系统在 44° 视场下实现了 5.2° 的角分辨率和 3.44° 的平均角定位精度，证明了具有三维定位能力的单块晶体探测器能够有效提高编码孔径伽马相机的放射源定位性能。

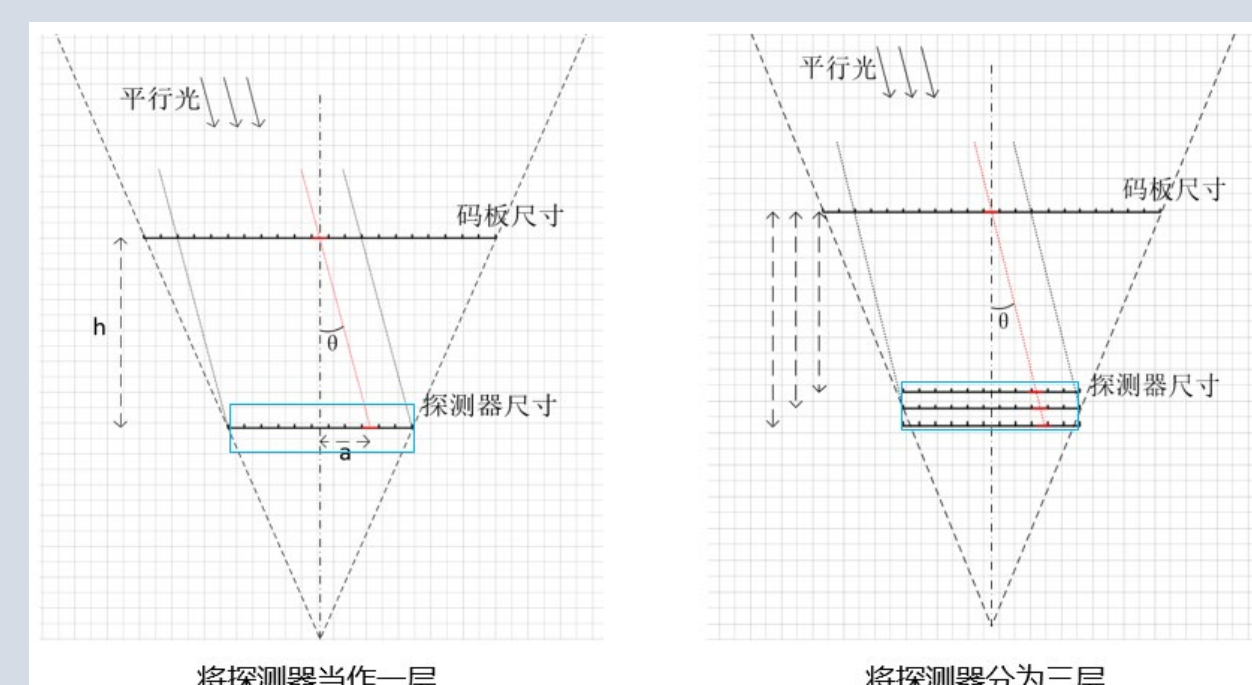


图5 不考虑深度信息的单层解码和考虑深度信息的三层解码

参考文献

- Dieke, R. H. (1968). Scatter-hole cameras for X-rays and gamma rays. *Astrophysical Journal*, 153, L101.
- Lee, T., Lee, H., & Lee, W. (2020). Coded aperture imager with depth of interaction scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 954, 161783.
- Shah, K. S., et al. (2005). CeBr₃ scintillators for gamma-ray spectroscopy. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 52, 3157–3159.
- Conde, P., et al. (2014). Minimization of border effects in monolithic scintillators using neural networks. *EJNMIM Physics*, 1, A19.
- He, W., et al. (2021). High-performance coded aperture gamma camera based on monolithic GAGG:Ce crystal. *Review of Scientific Instruments*, 92, 013106.
- Fenimore, E. E., & Cannon, T. M. (1981). Uniformly redundant arrays: Digital reconstruction methods. *Applied Optics*, 20, 1858–1864.
- Zeng, X., et al. (2024). Evaluation of monolithic crystal detector with dual-ended readout utilizing multiplexing method. *Physics in Medicine & Biology*, 69, 085003.