

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202504010

基于NaI(Tl)探测器阵列的 γ 放射源定位研究

孙威¹, 陈洁^{2*}, 霍勇刚¹, 姜仁强³, 李玉枝⁴

(1. 火箭军工程大学, 西安 710025;

2. 火箭军特色医学中心, 北京 100032;

3. 火箭军装备部驻绵阳地区第二代表室, 绵阳 621000;

4. 96033部队, 怀化 148000)

摘要: 为实现对 γ 放射源的远距离快速定位, 设计了一款NaI(Tl)晶体探测器阵列。基于蒙特卡罗方法, 使用Geant4软件建模并开展数值模拟, 采用高斯拟合算法和最小二乘原理, 将放射源定位问题转化为拟合寻峰问题, 通过对拟合参数的求解, 实现了 γ 放射源的快速定位。然后, 进一步研究了距离、发射粒子总数、射线能量、俯仰角及探测器数量对定位精度的影响。结果表明: 当放射源位于探测器阵列平面内, 到达探测器阵列的射线强度大于9个/cm²时, 定位误差小于1°; 随着放射源位置相对于阵列平面的俯仰角增大, 定位精度逐渐降低, 当俯仰角小于30°时, 平均绝对误差小于1°; 通过增加探测器阵列的探测器数量, 可以有效提高定位精度, 当阵列的探测器数量由12增加至24时, 不同俯仰角的定位精度均提高了42.9%以上, 但也增加了阵列的质量、尺寸和成本, 实际应用中需根据场景合理选择。

关键词: 探测器阵列; 高斯拟合算法; 最小二乘原理; 放射源定位

中图分类号: TL8

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)04-085-10



听语音
与作者互动
聊科研

NaI(Tl) Detector Array-Based Study on the Orientation of γ -Ray Radioactive Sources

SUN Wei¹, CHEN Jie^{2*}, HUO Yonggang¹,
JIANG Renqiang³, LI Yuzhi⁴

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Characteristic Medical Center of Rocket Force, Beijing 100032, China;

3. 2nd Representative Office of Rocket Force Equipment Department in Mianyang Region,
Mianyang 621000, China;

4. Troops No.96033, Huaihua 148000, China)

ABSTRACT: A NaI(Tl) crystal detector array was designed to enable rapid, long-range orientation of radioactive sources. Based on the Monte Carlo method, modeling and numerical simulation

收稿日期: 2025-01-10

修回日期: 2025-03-17

录用日期: 2025-04-01

第一作者: 孙威 (1989—), 男, 助理讲师, 主要从事核技术与核安全研究。E-mail: 1372469915@qq.com

***通信作者:** 陈洁 (1982—), 女, 主管护师, 主要从事核应急医学救援救治与研究。E-mail: 472473569@qq.com

引用格式: 孙威, 陈洁, 霍勇刚, 等. 基于NaI(Tl)探测器阵列的 γ 放射源定位研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(4): 85-94. SUN Wei, CHEN Jie, HUO Yonggang, et al. NaI(Tl) detector array-based study on the orientation of γ -ray radioactive sources[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(4): 85-94.

tions were performed with the Geant4 software. The problem of radioactive source orientation was transformed into a peak-fitting problem by applying a Gaussian fitting algorithm and the least-squares principle. By solving for the fitting parameters, rapid orientation of γ -ray sources were successfully achieved. Further research was conducted to examine the effects of various factors on positioning accuracy, including the distance between the source and the array, the total number of emitted particles, γ -ray energy, the pitch angle of the source relative to the array plane, and the number of array detectors. The results show that when the radioactive source is located in the plane of the detector array and the intensity of the rays exceeds 9 rays/cm², the positioning error is less than 1°. As the pitch angle of the source increases relative to the array plane, positioning accuracy gradually decreases. When the pitch angle is less than 30°, the average absolute error is less than 1°. Positioning accuracy improves significantly with an increased number of detectors in the array. For instance, when the number of detectors increased from 12 to 24, the positioning accuracies at different pitch angles improve by more than 42.9%. However, this improvement comes at the cost of increased array weight, size, and manufacturing cost. In practical applications, the configuration should be selected based on specific operational requirement.

KEYWORDS: detector array; Gaussian fitting algorithm; least squares principle; radioactive source orientation

随着核技术的飞速发展, 各类放射源被广泛应用于食品灭菌、医学诊疗、农业育种、工业探伤、科学研究等领域^[1-4]。从国家核安全局的年报数据看^[5-9], 五年来放射源的使用数量以每年 4% 左右的速度增加, 截至 2023 年底, 在用放射源有 169 593 枚, 且每年都有辐射事故发生, 其中放射源丢失或被盗事故占比最大, 丢失的主要是 ¹³⁷Cs、⁶⁰Co、¹⁹²Ir 和 ²²⁶Ra 等^[10]。发生放射源丢失事故后, 核应急处置人员通常采用车载或机载大晶体探测器对可疑区域开展地毯式搜索^[11], 在确定辐射异常区域后, 由专业人员穿特制防护服进入辐射异常区域, 使用长柄手持式 γ 探测仪确定放射源的精确位置, 从而实现对放射源的回收^[12]。这种方法需要消耗大量的人力物力, 无形中增加了人员受照风险^[13], 比如, 2014 年 5 月 7 日, 南京发生 ¹⁹²Ir 放射源丢失事故^[14], 在确定可疑区域后, 仍耗时一天才完成对放射源的搜寻。

为解决放射源的快速定位问题, 国内外学者开展了大量研究。因探测器阵列具有探测视野广、定位距离远、效率高、受照风险小等优点, 成为研究热点^[15-18]。Akkoyun^[19]设计了一款三维平板 NaI 晶体耦合方向探测器, 通过 3 个平板计数率与角度的关系, 实现了对放射源的定位, 其平均误差为 10°。姜浩^[20]设计了一款 4×4 的 BGO 闪烁晶体耦合阵列, 采用二维两次多项式曲面拟合方法, 得到放射源方向及角度, 平均角度误差为 2.94°。

Willis 等^[21]基于 2×2 NaI (TI) 探测阵列, 通过模糊逻辑算法, 实现了放射源定向, 其对 ¹³⁷Cs 的定位精度较高, 平均达到 0.681°, 但对 ⁶⁰Co 的定位精度较低, 误差在 5° 左右。张振朝等^[22]利用 NaI、CsI 和 BGO 3 种闪烁晶体的发光效率不同, 制作三晶体耦合 γ 射线方向探测器, 通过对计数进行曲线拟合, 能够实现对放射源角度的分辨, 但在距离 3 m 处, 对 ¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co 的定向误差均大于 1°, 且误差随着距离的增加逐渐增大。Durbin 等^[23]基于 4 个矩形 NaI (TI) 探测器构成的探测器阵列, 采用 k 邻近算法, 实现了对放射源方位角和距离的预测, 但其对 ¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co 的平均探测误差均大于 2.8°。管弦等^[24]基于 2×2 NaI (TI) 探测阵列, 通过支持向量机 (support vector machine, SVM) 回归拟合获得计数率-角度的关系, 实现了对放射源的快速定位, 其对 ¹³⁷Cs 点源角度预测平均最大偏差为 9.21°, 最小偏差为 1.77°。大量研究表明, 探测器阵列是实现 γ 放射源快速定位的有效途径, 但也存在定位精度不高、能量适用范围窄等不足。

为解决现有探测器阵列定位过程中存在的精度不高、探测能量范围窄等不足, 本文设计了一款环形 NaI (TI) 探测器阵列。将阵列设计成环形可确保探测角度的全覆盖, 增加铅屏蔽层, 拓宽能量适用范围, 并通过蒙特卡罗方法仿真模拟^[25], 验证了模型的有效性。

1 探测器阵列设计

探测器阵列由 12 个半径为 5 cm, 高为 10 cm 的圆柱形 NaI (Tl) 闪烁体探测器组成, 整体呈环状, 外径约 34.1 cm, 内径约 22.5 cm, 阵列结构如图 1 所示。

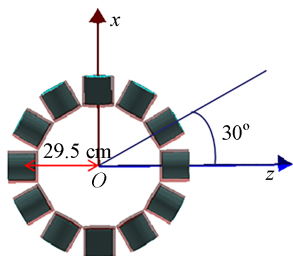


图 1 探测器阵列结构

Fig. 1 Detector array structure

12 个探测器呈环形排列, 阵列中心位于原点 O , 各探测器的轴线位于 xOz 平面内, 相邻探测器轴线间夹角为 30° 。各 NaI 晶体轴线与探测器轴线重合, 晶体中心距原点的距离均为 29.5 cm, 定义晶体距阵列中心近的圆面为底面, 距阵列中心远的圆面为顶面。每个 NaI 晶体的柱面和顶面涂有 0.8 mm 厚特氟龙反射层, 底面有 5 mm 厚的玻璃窗, 便于荧光光子计数。反射层外侧包有 0.5 mm 厚的铝膜, 用于屏蔽晶体外产生的荧光光子。实现对除顶面外其余角度 γ 射线的有效屏蔽, 在柱面的外侧和底部均设置 1 cm 厚的铅屏蔽层, 屏蔽层的上沿与 NaI 晶体平齐, 每个探测器的结构如图 2 所示。

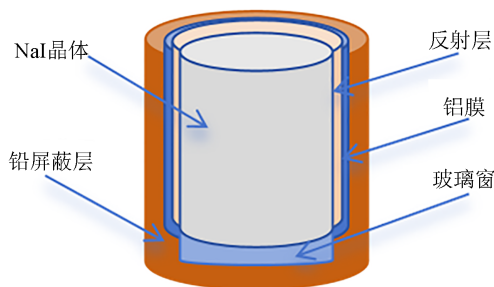


图 2 探测器结构

Fig. 2 Detector structure

2 探测器定位原理

在放射源定位过程中, 源与探测器的距离通常较远, 且源尺寸较小, 可以将其视为点源。为探究放射源方位角与阵列中各探测器计数之间的关系, 利用蒙特卡洛模拟软件 Geant4 开展仿真模拟, 模型如图 3 所示。

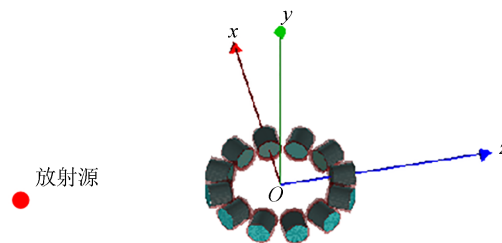


图 3 放射源定位模型

Fig. 3 Model of radioactive source positioning

各探测器结构相同, 方位角不同, 因铅屏蔽层的屏蔽作用, 使得相对于同一个放射源, 各探测器探测窗口的等效面积不同, 同时受探测器间的“阴影效应”以及探测器的角响应^[26]等因素影响, 使得当阵列中心到放射源的方向向量与探测器轴线夹角最小时, 计数最大, 随着夹角增大, 计数逐渐减小。通过模拟可知, 各探测器的计数近似服从正态分布。如果将各探测器计数和探测器方位角数据进行曲线拟合, 可知计数取得峰值的方位角即为放射源的方位角。探测器阵列定位示意如图 4 所示。

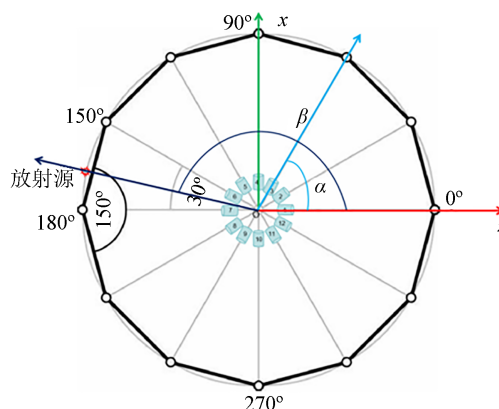


图 4 探测器阵列定位示意

Fig. 4 Schematic of detector array positioning

1 号探测器的轴线与 z 轴正向重合, 逆时针方向依次为 2~12 号探测器, α 表示 3 号探测器的方位角, 12 个探测器的方位角依次为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 、 180° 、 210° 、 240° 、 270° 、 300° 、 330° , β 表示放射源的方位角, α 与 β 差值的绝对值即为放射源与探测器之间的夹角, 夹角越小则计数越大。由于探测器阵列是中心对称的, 且相邻探测器的轴线夹角均为 30° 。因此, 对探测器阵列定位精度的验证可以等效为对相邻探测器轴线所形成的 30° 扇形区域进行验证。模拟放射源为各向同性的 ^{60}Co 点源, 发射粒子总数为 10^8 个, 点源与探测器阵列间为标准

大气压空气。对距探测器阵列中心 3 m，方位角分别为 150°、160°、170° 和 180°，开展仿真模拟，各探测器的计数见表 1。

表 1 放射源位于不同方位角时各探测器计数
Table 1 Counting of each detector when the radioactive source is located at different azimuths

探测器编号	探测器方位角/(°)	放射源位于不同方位角时各探测器计数/个			
		150°	160°	170°	180°
1	0	219	270	752	301
2	30	61	112	140	227
3	60	978	266	108	56
4	90	4 700	3 534	2 057	932
5	120	6 849	6 468	5 860	4 776
6	150	8 066	7 741	7 255	6 911
7	180	6 837	7 326	7 876	7 953
8	210	4 867	5 776	6 284	6 833
9	240	957	2 082	3 480	4 818
10	270	58	104	282	949
11	300	218	135	112	49
12	330	321	776	222	219

观察表 1 中数据，每个角度的各探测器计数都具有对称性。各探测器的计数由两部分组成，一是 γ 射线由探测窗口进入晶体产生的荧光光子计数，二是穿过屏蔽层或其余探测器后产生的荧光光子计数。以方位角为自变量，光子计数为因变量，对数据进行拟合，发现角度与计数的关系近似符合高斯函数，拟合结果如图 5 所示。根据图 5 可知，各探测器计数的拟合曲线都近似满足高斯曲线，通过高斯拟合得到计数曲线取得峰值的角度及偏差如表 2 所示。

表 2 计数曲线取得峰值的角度及偏差
Table 2 Angle and deviation of the counting curve when obtaining the peak value (°)

放射源的方位角	拟合计数曲线取得峰值的位置	与放射源方位角的偏差
150	150.344 4	0.344 4
160	159.446 5	0.553 5
170	169.778 3	0.221 7
180	179.966 1	0.033 9

由表 2 可知，计数曲线取得峰值的角度与放射

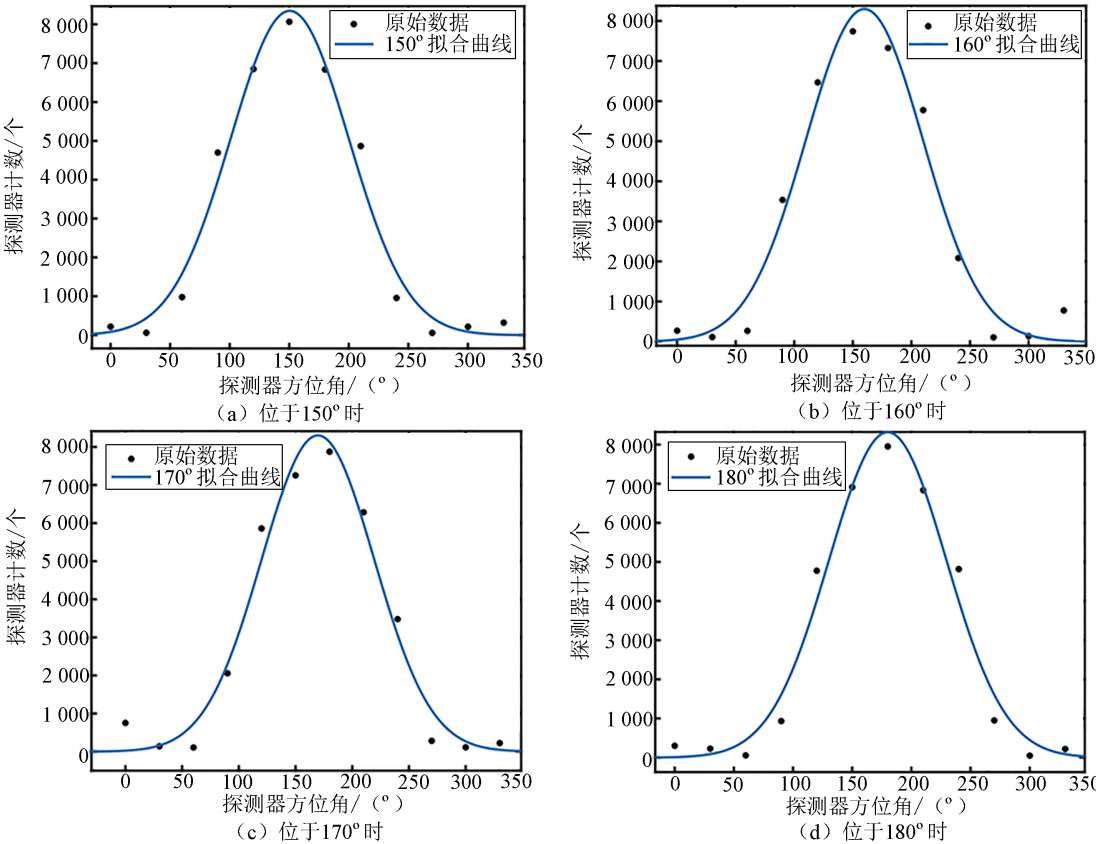


图 5 放射源位于不同方位角时各探测器计数拟合
Fig. 5 Fitting results of the counting of each detector when the radioactive source is located at different azimuths

源所处方位角偏差较小, 仅为 0.5° 左右, 因此, 采用高斯拟合可巧妙地放射源定位问题转换为曲线的拟合寻峰问题。为了进一步提高拟合的优度, 引入了评价函数, 通过最小二乘原理, 实现了对放射源方位角的精准探测。

3 高斯拟合算法原理

高斯曲线是正态分布中的一条标准曲线。高斯拟合算法^[27]即使用高斯函数对数据点集进行函数逼近的拟合方法。高斯函数为

$$f(x) = a \cdot \exp \left[-\frac{(x-c)^2}{2b^2} \right] \quad (1)$$

式中: a 为曲线的高度; c 为曲线在 x 轴的中心; b 为半宽度 (与半峰全宽有关)。

假设通过所设计的探测器阵列测量, 得到一组计数 (θ_i, n_i) ($i = 1, 2, \dots, n$), 其中, θ_i 表示第 i 个探测器所处的方位角, n_i 表示第 i 个探测器的计数, θ_i 和 n_i 的函数关系可用高斯函数描述为

$$n_i = a \cdot \exp \left[-\frac{(\theta_i - c)^2}{2b^2} \right], i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: c 为待估参数, 即放射源所处的方位角。

线性高斯拟合法的原理是对高斯模型进行对数化, 即将式 (2) 两边取自然对数, 整理后得

$$\ln n_i = (\ln a - \frac{c^2}{2b^2}) + \frac{\theta_i c}{b^2} - \frac{\theta_i^2}{2b^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

对式 (3) 进行变量代换, 令

$$\ln n_i = z_i, \ln a - \frac{c^2}{2b^2} = b_0, \frac{c}{b^2} = b_1, -\frac{1}{2b^2} = b_2 \quad (4)$$

则式 (3) 可简化为二次多项式拟合函数, 即

$$z_i = b_0 + b_1 \theta_i + b_2 \theta_i^2 = \begin{bmatrix} 1 & \theta_i & \theta_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

若对方程组进行直接求解, 由式 (5) 可知, 通过 3 个探测器的位置和计数信息, 即可求得待估参数 a 、 b 、 c , 其中, c 的表达式为

$$c = -\frac{b_1}{2b_2} \quad (6)$$

根据实验数据的不同组合, 可以得到很多拟合曲线, 但最佳拟合曲线与定位精度息息相关。为得到最佳的拟合曲线, 需要构造评价函数来反映拟合结果的优劣。

令 $f(\theta_i) = b_0 + b_1 \theta_i + b_2 \theta_i^2$, 则所构建的评价

函数为

$$L(b_0, b_1, b_2) = \sum_{i=1}^n (z_i - f(\theta_i))^2, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

评价函数的意义是使 θ_i 对应的拟合曲线值 $f(\theta_i)$ 与探测器计数对数 z_i 的距离的平方和最小, 据此所求得的参数误差最小。

为得到最优解, 需要引入最小二乘法^[28], 通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配, 即使式 (7) 取得最小值。

考虑到全部的测量数据, 可将式 (5) 转化为矩阵形式, 即

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

可简记为

$$\mathbf{Z}_{n \times 1} = \mathbf{X}_{n \times 3} \mathbf{B}_{3 \times 1} \quad (9)$$

根据最小二乘原理, 可求得拟合参数 b_0 、 b_1 、 b_2 构成的矩阵 $\mathbf{B}$ 的广义最小二乘解为

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Z} \quad (10)$$

进而根据式 (6), 可求得待估参数 c , 得到放射源所在的方位角。

4 放射源定位仿真模拟

4.1 距离对定位精度的影响

为了探究距离对探测器阵列定位精度的影响, 假设放射源位于探测器阵列所在的平面内, 建立直角坐标系, 探测器阵列的中心位于原点 O , 各探测器的轴线位于 xOz 平面内, 放射源也位于 xOz 平面内。选择放射源距原点距离依次为 3 m、5 m、7 m, 探测器阵列方位角为 $150^\circ \sim 180^\circ$, 每间隔 5° 模拟对 ^{60}Co 点源的定位, 发射粒子总数为 10^8 个, 不同距离不同角度定位结果如表 3 所示, 各方位角定位绝对误差如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 随着距离的增加, 探测器阵列的定位精度变化不大, 且定位误差均小于 1° 。放射源距离 3 m、5 m、7 m 时的平均定位误差分别为 0.28° 、 0.44° 、 0.49° , 随着距离的增加, 平均定位绝对误差总体上略有增加。分析其原因, 应与到达探测器的射线强度随距离的增加而减弱有关。因此, 所设计的探测器阵列能够实现一定距离内放射源的精准定位。

表 3 不同距离不同角度定位结果
Table 3 Positioning results at different distances
and angles (°)

实际 角度	定位角度			绝对偏差		
	3 m	5 m	7 m	3 m	5 m	7 m
150	150.34	149.61	150.03	0.34	0.39	0.03
155	155.06	154.24	154.38	0.06	0.76	0.62
160	159.45	159.57	159.13	0.55	0.43	0.87
165	165.22	165.66	165.85	0.22	0.66	0.85
170	169.78	169.39	169.39	0.22	0.61	0.61
175	175.54	174.92	174.95	0.54	0.08	0.05
180	179.97	180.21	179.57	0.03	0.21	0.43

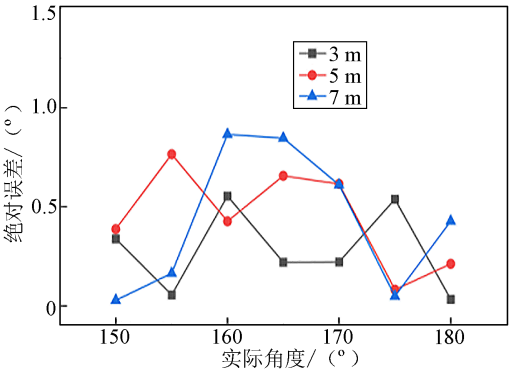


图 6 不同距离时定位角度的绝对误差曲线
Fig. 6 Absolute error curves of positioning angles at
different distances

4.2 射线强度对定位精度的影响

为了探究不同射线强度对探测器阵列定位精度的影响，选择放射源为⁶⁰Co，放射源位于 xOz 平面内，距离原点 3 m，设置发射粒子总数范围为 $[10^5, 10^9]$ ，并在探测器阵列方位角为 $150^\circ \sim 180^\circ$ 的扇行区域内，间隔 5° 进行模拟，不同方位

角发射不同粒子总数的定位结果如表 4 所示，不同射线强度的平均绝对误差如图 7 所示。

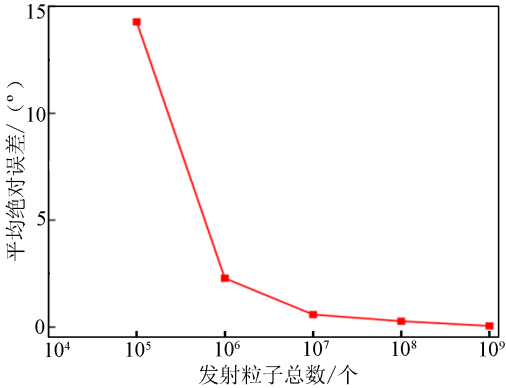


图 7 不同射线强度的平均绝对误差
Fig. 7 Average absolute error of different ray intensities

由表 4 和图 7 可以看出，随着射线强度的增大，定位误差逐渐降低，可根据定位精度需求估算到达探测器阵列的最小可定位射线强度。以发射总粒子数为 10^7 个为例，用发射粒子总数除以半径为 3 m 球的表面积，可以估算当到达探测器阵列的射线平均强度大于 $9 \text{ 个}/\text{cm}^2$ 时，其定位精度即可达到 1° 以内。由于到达探测器阵列的射线强度与源的强度成正比，与源距探测器阵列距离的平方成反比^[29]。因此，可根据需要定位的放射源强度，通过缩短距离或延长采样时间，使到达探测器阵列的射线强度大于最小可定位强度，从而实现放射源的精准定位。

4.3 射线能量对定位精度的影响

为研究射线能量对探测器阵列定位精度的影响，选择最常见的⁶⁰Co 和¹³⁷Cs 作为放射源，放射源位于 xOz 平面内，距离原点 3 m，发射粒子总数为 10^8 个，并在探测器阵列方位角为 $150^\circ \sim 180^\circ$ 的扇行区域内，间隔 5° 进行模拟，所得各角度的定位误差如图 8 所示。

表 4 不同方位角发射不同粒子总数的定位结果
Table 4 Positioning results with different particle total emitted from different azimuths

发射粒子总数/个	不同角度的定位结果/(°)						
	150	155	160	165	170	175	180
10^5	124.34	182.64	162.48	170.84	173.24	165.07	205.12
10^6	152.66	153.29	159.75	164.96	166.90	173.75	187.00
10^7	149.88	154.42	159.29	164.39	168.10	174.56	180.80
10^8	150.34	155.06	159.45	165.22	169.78	175.54	179.97
10^9	150.13	155.01	159.95	164.93	170.05	175.04	179.90

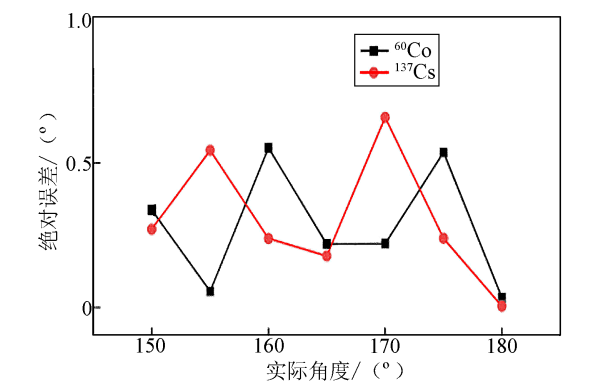


图 8 ^{137}Cs 与 ^{60}Co 的定位角度偏差曲线
Fig. 8 Positioning angle deviation curves between ^{137}Cs and ^{60}Co

由图8可以看出,不同能量的放射源对定位精度影响不大, ^{137}Cs 的平均定位误差为 0.3° , ^{60}Co 的平均定位误差为 0.28° ,所设计的探测器阵列可以实现对不同能量放射源的一维定位。

4.4 俯仰角对探测器阵列定位精度的影响

通常情况下放射源不会处于探测器阵列平面内,即放射源相对于探测器阵列有一定的俯仰角,因此需要对不同俯仰角的定位精度进行验证。选放射源为 ^{60}Co ,放射源在阵列平面 xOz 的投影距原点距离为3 m,发射粒子总数为 10^8 个,方位角范围取 $150^\circ\sim 180^\circ$,间隔 5° 进行验证,俯仰角范围取 $0^\circ\sim 60^\circ$,间隔 15° 进行验证,其结果如图9所示。

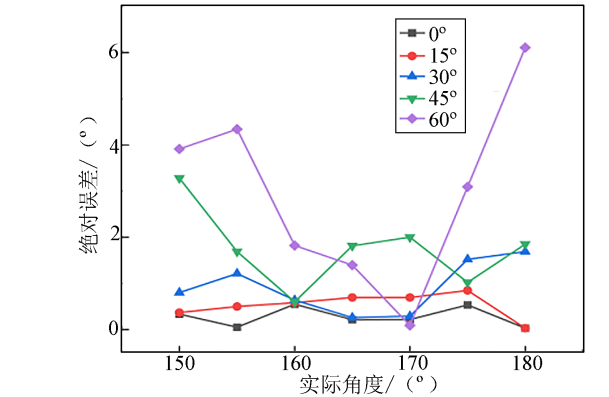


图 9 不同俯仰角的定位角度偏差
Fig. 9 Positioning angle deviation curves of different pitch angles

可以看出,随着俯仰角的增加,角度误差逐渐增大,这与探测窗口的有效面积减小、探测器间的“阴影效应”减弱有关,不同俯仰角的最大角度偏差和平均角度偏差见表5。可以看出,当俯仰角小于 30° 时,定位误差变化不大,平均绝对

误差小于 1° ,而当俯仰角大于 30° 时,定位误差明显增大。因此,可根据实际定位场景,通过合理设置探测器阵列的俯仰角度,来有效提高定位精度。

表 5 不同俯仰角的最大角度偏差和平均角度偏差

Table 5 Maximum and average angle deviations of different pitch angles ($^\circ$)

俯仰角	最大角度偏差	平均角度偏差
0	0.55	0.28
15	0.85	0.54
30	1.69	0.92
45	3.28	1.75
60	6.10	2.97

4.5 探测器数量对定位精度的影响

如果将探测器阵列用于复杂地形,比如山地、沟壑,或悬挂于无人机下,对放射源进行定位,则需要提高其大俯仰角的定位精度。最简单的方法就是增加探测器的数量,即通过增加拟合曲线的点数,来减小拟合的误差。将环形阵列的探测器数量由12个增加至24个,选取放射源为 ^{60}Co ,发射粒子总数为 10^8 个,放射源在阵列平面的投影距阵列探测器中心为3 m,方位角范围取 $150^\circ\sim 180^\circ$,相邻被测点间隔 5° ,俯仰角范围取 $0^\circ\sim 60^\circ$,相邻被测点间隔 15° 进行验证,其结果如图10所示。

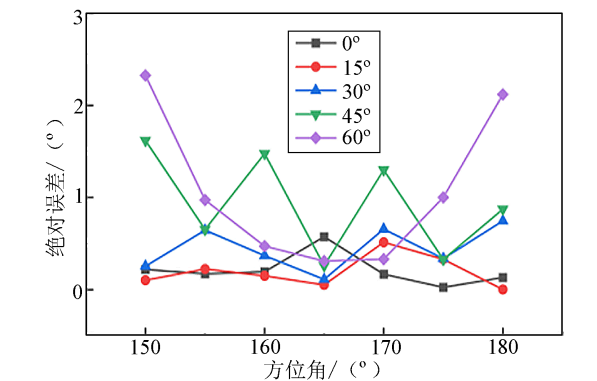


图 10 增加阵列探测器数量后不同俯仰角定位角度误差曲线

Fig. 10 Positioning angle error curves at different pitch angles after increasing the number of array detectors

由图10可以看出,阵列中探测器数量增加后,定位精度有了一定的提高。不同数量探测器组成的阵列不同俯仰角的最大偏差和平均偏差如图11所示。

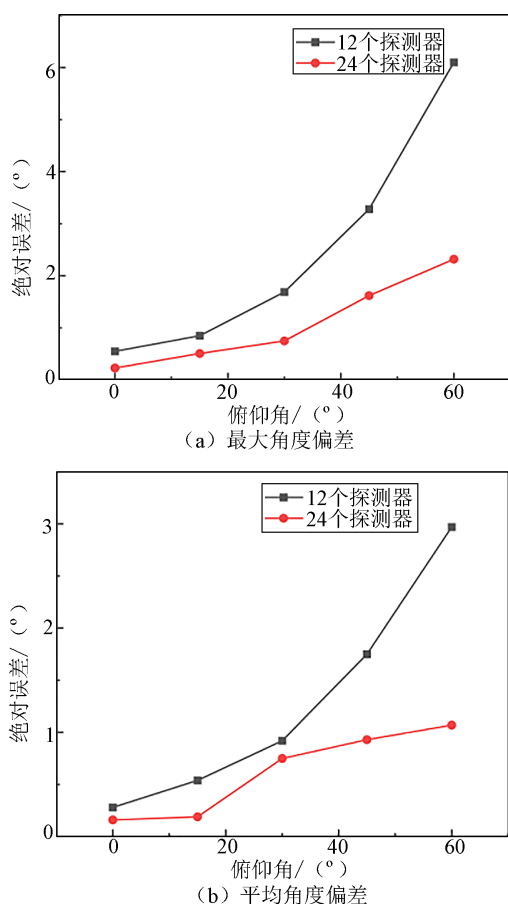


图 11 不同探测器阵列不同俯仰角的最大角度偏差和平均角度偏差曲线

Fig. 11 Maximum and average angular deviation curves of different detector arrays at different pitch angles

由图 11 可以看出, 当环形阵列探测器个数增加一倍, 不同俯仰角的定位精度均提高了 42.9% 以上。说明通过增加探测器阵列中探测器的个数, 可以有效减小最大角度偏差和平均角度偏差, 但会导致阵列的成本、质量至少增加一倍, 阵列的直径将从 0.6 m 增加至 1 m, 不利于阵列的携带与架设。在实际应用中, 需根据具体场景选择不同的阵列, 比如当地势比较平坦时, 阵列通常架设高度较低, 即放射源相对于探测器平面的俯仰角小于 30° , 12 个探测器阵列的定位精度可以满足定位需要, 但当地势起伏较大时, 俯仰角可能大于 30° , 此时 24 个探测器的阵列定位精度和效率更高。

5 结论

为实现对 γ 放射源的快速定位, 基于 NaI (TI) 探测器设计了一款环形探测器阵列, 使用

Geant4 完成模型搭建和数值模拟, 并通过高斯拟合算法和最小二乘原理进行数据处理, 验证了模型的可行性; 进一步研究了距离与角度、射线强度、放射源能量、放射源相对于阵列平面俯仰角及阵列中探测器数量对定位精度影响, 所得主要结论如下。

1) 所设计的探测器阵列相较于现有探测器阵列定位精度更高, 对于位于探测器平面内的放射源, 当到达探测器阵列的射线强度大于 $9 \text{ 个}/\text{cm}^2$ 时, 定位误差小于 1° ; 探测能量范围更宽, 对 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 定位精度相差不大, 对于探测器平面内, 距离 3 m 的 ^{137}Cs 的平均定位误差为 0.3° , ^{60}Co 的平均定位误差为 0.28° 。

2) 所设计的探测器阵列能够实现一定俯仰角内的放射源定位, 当放射源相对于探测器平面俯仰角小于 30° 时, 平均角度误差小于 1° , 拓展了探测器阵列的应用场景。

3) 通过增加探测器阵列的探测器个数, 可以缩小不同俯仰角的定位误差, 当环形阵列探测器数量增加一倍, 不同俯仰角的定位精度均提高了 42.9% 以上, 可以据此设计实现放射源二维定位的探测器阵列。

参考文献

- [1] 许鹏, 刘梦雅, 范新峰, 等. 人工智能算法在核应急中的应用综述[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(3): 104-110.
- XU P, LIU M Y, FAN X F, et al. Overview of application of artificial intelligence algorithms in nuclear emergency[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(3): 104-110.
- [2] 周钦然, 吴迪, 方纪成, 等. RSNA2020 医学影像技术研究进展[J]. 放射学实践, 2021, 36(3): 315-325.
- [3] 王伟. 浅谈辐射诱变技术在农业育种中的应用[J]. 南方农机, 2022, 53(7): 43-45.
- [4] 申超波. 核技术应用走进新时代[J]. 国防科技工业, 2022(10): 28-33.
- [5] 国家核安全局. 中华人民共和国国家核安全局 2023 年年报 [EB/OL]. (2024-05-31) [2025-01-05]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqbg/haqnb_1/202405/P020240531579488725688.pdf.
- [6] 国家核安全局. 中华人民共和国国家核安全局 2022 年年报 [EB/OL]. (2023-12-18) [2025-01-05]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqbg/haqnb_1/202312/P020231218535140311745.pdf.

- [7] 国家核安全局. 中华人民共和国国家核安全局 2021 年年报 [EB/OL]. (2022-06-23) [2025-01-05]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztlz/haqbg/haqnb_1/202206/P020220623505600970403.pdf.
- [8] 国家核安全局. 中华人民共和国国家核安全局 2020 年年报 [EB/OL]. (2021-06-29) [2025-01-05]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztlz/haqbg/haqnb_1/202106/P020210629665594621226.pdf.
- [9] 国家核安全局. 中华人民共和国国家核安全局 2019 年年报 [EB/OL]. (2020-07-09) [2025-01-05]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztlz/haqbg/haqnb_1/202007/P020210204322583688925.pdf.
- [10] 龚宇, 党磊, 李小丁, 等. 我国 2016—2020 年辐射事故回顾与分析[J]. 辐射防护, 2023, 43(6): 665-670.
GONG Y, DANG L, LI X D, et al. Review and analysis of radiation accidents in China from 2016 to 2020[J]. Radiation Protection, 2023, 43(6): 665-670.
- [11] 林殿科. 一起放射源失控事故的调查处理[J]. 辐射防护通讯, 2007(5): 31-33.
LIN D K. Investigation and treatment of an accident of radioactive sources out of control[J]. Radiation Protection Bulletin, 2007(5): 31-33.
- [12] 黄超云, 周启甫. 孤儿源搜寻初探[J]. 辐射防护通讯, 2007(5): 28-30.
HUANG C Y, ZHOU Q F. Discussion on the search of orphan sources[J]. Radiation Protection Bulletin, 2007(5): 28-30.
- [13] 肖云鹏, 朱奇健, 林珂. 核辐射环境监测与辐射防护方法研究[J]. 中国高新科技, 2024(8): 154-156.
XIAO Y P, ZHU Q J, LIN K. Research on nuclear radiation environment monitoring and radiation protection methods[J]. China High and New Technology, 2024(8): 154-156.
- [14] 周晓剑, 周启甫, 王晓涛, 等. 南京铱-192 放射源丢失事故受照人员物理剂量初步估算[J]. 环境与职业医学, 2014, 31(8): 605-607.
ZHOU X J, ZHOU Q F, WANG X T, et al. Preliminary estimation of physical doses of exposed individuals in radiation accident of Nanjing iridium-192 radioactive source loss[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2014, 31(8): 605-607.
- [15] 黄逸菲, 赵倩儒, 吴其超, 等. 定向探测器协同四足机器人的 γ 放射源搜寻技术研究[J]. 辐射防护, 2024, 44(S1): 28-34, 66.
HUANG Y F, ZHAO Q R, WU Q C, et al. Directional detector worked with four-leg robot for searching gamma-ray source[J]. Radiation Protection, 2024, 44(S1): 28-34, 66.
- [16] 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): 147-153.
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): 147-153.
- [17] 马鹏, 孙宏清, 党云博, 等. 塑料闪烁光纤阵列探测器研制及验证[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(9): 1952-1957.
MA P, SUN H Q, DANG Y B, et al. Development and validation of plastic scintillation fibre array detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(9): 1952-1957.
- [18] 王相星, 程鹏, 王建超. MC 模拟闪烁体阵列探测器能量沉积分布研究[J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(1): 57-61.
WANG X X, CHENG P, WANG J C. Research on the energy deposition distribution of MC simulated scintillator array detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, 42(1): 57-61.
- [19] AKKOYUN S. A method for determination of gamma-ray direction in space[J]. Acta Astronautica, 2013, 87: 147-152.
- [20] 姜浩. 环境辐射监测与定位系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 43-59.
JIANG H. Design and development of environmental radiation monitoring and localization system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013: 43-59.
- [21] WILLIS M J, SKUTNIK S E, HALL H L. Detection and positioning of radioactive sources using a four-detector response algorithm[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, 767: 445-452.
- [22] 张振朝, 左国平, 谭军文, 等. 基于三晶体耦合 γ 射线方向探测器的放射源定位[J]. 核技术, 2017, 40(10): 45-49.
ZHANG Z Z, ZUO G P, TAN J W, et al. Locating radioactive source based on three coupled-crystals directional detector of γ rays[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(10): 45-49.
- [23] DURBIN M, SHEATSLEY R, MCDANIEL P, et al. Experimental tests of gamma-ray localization aided with machine-learning (GLAM) capabilities

- ties[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1038: 166905.
- [24] 管弦, 魏星, 李子锟, 等. 基于SVM的放射源快速定位技术研究[J]. 核技术, 2023, 46(9): 19-29.
GUAN X, WEI X, LI Z K, et al. Fast localization of radiation sources based on support vector machine[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(9): 19-29.
- [25] 王浩伟, 蔡幸福, 郭晓辉, 等. 基于蒙特卡罗方法的核事故碎片辐射场模拟计算[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(2): 32-38.
WANG H W, CAI X F, GUO X H, et al. Simulation calculation of radiation field of nuclear accident debris based on Monte Carlo method[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(2): 32-38.
- [26] 韦应靖, 黄亚雯, 杨慧梅, 等. 国内常见环境 γ 辐射监测仪性能评价[J]. 中国辐射卫生, 2014, 23(2): 175-178.
- [27] 杨家懿, 熊永前. 用于光谱重叠峰和太赫兹波时域曲线的高斯拟合算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 79-85.
YANG J Y, XIONG Y Q. Gaussian fitting algorithm for spectral overlapping peaks and terahertz time-domain curves[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 79-85.
- [28] 李翔. 基于MCM的多项式最小二乘法拟合的不确定度评定[J]. 环境技术, 2024, 42(7): 105-110, 140.
LI X. Uncertainty assessment of polynomial least squares fitting based on MCM[J]. Environmental Technology, 2024, 42(7): 105-110, 140.
- [29] 石先伟, 白立新. γ 放射源强度平方反比定律验证实验设计[J]. 大学物理, 2013, 32(9): 39-42.
SHI X W, BAI L X. An experimental design for inverse square law between γ -rays intensity and distance[J]. College Physics, 2013, 32(9): 39-42.
- (编辑: 于福兴)