

基于Boosted-Gold算法的 γ 能谱反演分析

张双 贺三军 廖峰 罗万 周芷千 高波 刘丽艳 赵修良

Analysis of the unfolded γ energy spectrum based on Boosted-Gold algorithm

Zhang Shuang He San-Jun Liao Feng Luo Wan Zhou Zhi-Qian Gao Bo Liu Li-Yan Zhao Xiu-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 102901 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212429

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212429>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于微结构气体探测器对单能和连续谱快中子的模拟解谱

Unfolding simulation of single-energy and continuous fast neutrons spectrum based on micro-pattern gas detector

物理学报. 2021, 70(11): 112901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201954>

太阳宇宙线地面增强事件(GLE72)峰值能谱研究

Research on the peak energy spectrum of the solar cosmic ray ground level enhancement event (GLE72)

物理学报. 2021, 70(10): 109601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201662>

特征 γ 射线谱分析的蒙特卡罗模拟技术

Monte Carlo simulation technology based on characteristic γ -ray spectrum analysis

物理学报. 2020, 69(11): 112801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200279>

抗磁悬浮振动能量采集器动力学响应的仿真分析

Simulation analysis of dynamic response of the energy harvester based on diamagnetic levitation

物理学报. 2018, 67(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171551>

利用静电场中光电离效率谱精确确定1,3-二乙氧基苯分子的电离能

Accurate determination of ionization energy of 1, 3-diethoxybenzene via photoionization efficiency spectrum in electrostatic field

物理学报. 2021, 70(5): 053301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201273>

面向真彩色三维显示的分层角谱算法和Gerchberg-Saxton算法研究

Gerchberg-Saxton algorithm and angular-spectrum layer-oriented method for true color three-dimensional display

物理学报. 2018, 67(9): 094203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172464>

基于 Boosted-Gold 算法的 γ 能谱反演分析*

张双 贺三军 廖峰 罗万 周芷千 高波 刘丽艳 赵修良†

(南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001)

(2021 年 12 月 30 日收到; 2022 年 2 月 16 日收到修改稿)

为了利用低能量分辨率探测器 γ 能谱分析获取未知放射性核素的特征信息, 提高 γ 能谱中重峰及弱峰分析的准确性和有效性, 本文开展了基于 Boosted-Gold 算法的 NaI(Tl) 探测器 γ 能谱分析研究. 采用 MCNPX 建立 NaI(Tl) 探测器模拟模型, 获得了维度 201×200 的探测器响应矩阵. 基于 Boosted-Gold 算法开发了 γ 能谱反演程序. 实验测量了 γ 源 ^{22}Na , ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 的探测器响应能谱, 并以不同 γ 射线能量、不同能差 (ΔE)、不同相对强度为条件构建了 3 组低分辨率模拟 γ 能谱, 结合响应矩阵及反演程序对实测 γ 能谱和模拟 γ 能谱进行反演. 以 IAEA 数据库核素标准特征信息对反演结果进行分析. 结果表明: Boosted-Gold 算法对实测 γ 能谱特征能量反演误差最大为 2.17% (^{133}Ba 源 0.276 MeV), 反演强度与标准强度最大差为 0.197 (^{152}Eu 源 1.408 MeV). 对模拟 γ 能谱核素特征能量均可准确分析, 反演强度与标准强度差值保持在 0.01 以内; 当增强系数 $p \leq 14$ 时, Boosted-Gold 算法有利于 γ 放射性核素的定量分析, 对于相对强度大于 10% 的 γ 射线, 该算法具有更好的分析准确性.

关键词: γ 能谱分析, 响应函数, 能谱反演, Boosted-Gold 算法**PACS:** 29.30.Kv, 25.20.Dc**DOI:** 10.7498/aps.71.20212429

1 引言

随着 γ 能谱分析技术在核应急监测、核安全、环境辐射防护等应用领域的深化扩展, 对 γ 能谱分析核素特征信息的准确性和有效性提出更高的要求^[1]. 目前 NaI(Tl) 探测器因其探测效率高、价格低、易维护等特点, 大面积应用于一些实际条件下的 γ 能谱的测量^[2], 但受其能量分辨率限制以及测量环境本底等因素的影响, 实测 γ 能谱常常表现为能量相近的射线形成复杂的重峰、强度较弱的核素全能峰完全淹没于本底及康普顿效应当中^[3,4], 以上不利性态提高了辐射特征信息的分析难度, 目前针对低能量分辨率 γ 能谱的定性定量分析准确性低^[5], 尤其针对弱峰的定量分析误差可达 34% 以上^[6]. 因

此如何实现重峰及弱峰的分离和识别、提高低分辨率 γ 能谱分析的准确性和有效性是目前急需解决的问题.

能谱反演技术用于 γ 能谱分析可有效提高其能量分辨率, 增强低分辨率 γ 能谱核素特征信息的易读性^[7,8]. 现已提出多种 γ 能谱反演算法, 如奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 算法^[9], 最大似然-期望最大化算法 (maximum-likelihood expectation maximization, ML-EM)^[10], Gold 算法^[11], 直接解调法 (direct demodulate method, DDM) 等^[12]; 其中 ML-EM 和 Gold 算法因具有全局收敛性、解的非负性、收敛速度快等特性, 是目前最有效且常用的反演算法^[10,11,13]; 然而 Gold 算法相较 ML-EM 算法在理解掌握和开发方面更具优势^[14,15]; 在 Gold 算法基础上提出的 Boosted-Gold 算法^[16],

* 国家自然科学基金 (批准号: 12005098)、湖南省教育厅科学研究项目 (批准号: 19A431) 和湖南省教育厅研究生科研创新项目 (批准号: CX20210945) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaoxiul@usc.edu.cn

进一步提高了收敛速度, 解决了前者收敛稳定后无法更进一步提升能谱分辨率的问题.

目前国内外学者分别对多种算法在不同探测器、不同领域下的运用做了验证性研究^[9–16], 2009 年 Rahmand 等^[3]将 ML-EM 算法用于水下 γ 放射性核素监测系统的能谱分析, 结果表明 γ 能谱峰总比提高, 全能峰计数提高了 5.29 倍; 2016 年何剑锋等^[17]采用 Gold 算法, 以实测能谱数据验证了采用高斯响应矩阵对 γ 能谱进行分析的可行性; 2019 年, 赵日等^[18]采用 Gold 算法运用于全身计数器 γ 能谱分析, 与 Genie2000 软件分析结果比较, 表明反演算法优于传统全能峰法; 2021 年张双佼等^[19]将 one-fold Gold 算法用于 EJ309 液体闪烁体探测器的响应谱反演, 验证了其用于 γ 能谱分析的可行性以及在 n - γ 分辨领域的应用潜力. 然而更多工作只强调了反演算法用于特定领域 γ 能谱分析的可行性^[17–22], 尤其对于 Boosted-Gold 算法用于低能量分辨率探测器 γ 能谱分析的应用研究并未见更多报道. 因此, 有必要对 Boosted-Gold 算法应用于低分辨率探测器 γ 能谱分析, 开展其重峰及弱峰分析的准确性和有效性研究; 尽管本研究只针对了较低能量分辨率的 NaI(Tl) 探测器, 但其应用范围与实用性价值较大.

本文为了提高低分辨率探测器 γ 能谱重峰及弱峰分析的准确性和有效性, 开展了基于 Boosted-Gold 算法的 NaI(Tl) 探测器 γ 能谱反演研究, 以期实现对入射 γ 射线的准确定性定量分析, 为利用低分辨率探测器在未知放射性核素的种类及强度分析中提供技术支撑.

2 理论及算法开发

理论上, 某一特征能量的 γ 射线的能谱表现为线状谱^[23], 即只在特征能量存在幅值, 能谱反演的目的是由谱仪测量的脉冲响应谱求解 γ 射线本征谱, 实现 γ 射线的定性定量分析. 入射 γ 射线与脉冲响应谱之间的关系可如 (1) 式所示^[2,11]:

$$y = \int_{E_1}^{E_2} h(\Delta E, E) x(\Delta E) d(\Delta E), \quad (1)$$

其中 x 为入射谱; y 为脉冲响应谱; $h(\Delta E, E)$ 为探测器的响应函数, 表示所测能量为 ΔE 的单位能量的 γ 射线对应于脉冲响应谱中能量 E 处的相应计数. 当 $h(\Delta E, E)$ 与 $x(\Delta E)$ 均可积条件下, (1) 式可

进一步离散化为

$$y = \mathbf{H} \times x + \Delta \varepsilon, \quad (2)$$

其中 $\Delta \varepsilon$ 为 γ 射线测量过程中的误差; \mathbf{H} 为探测器响应矩阵, 如下所示:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1} & H_{m2} & \cdots & H_{mn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

维度 m, n 分别由响应函数离散化程度与步长确定. 根据 (2) 式和 (3) 式, 函数 (1) 可离散化为

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ M & M & O & M \\ H_{m1} & H_{m2} & L & H_{mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中误差项 $\Delta \varepsilon$ 包涵于响应矩阵 \mathbf{H} 中. 由于 (4) 式中误差项的存在以及 \mathbf{H} 中各列之间的强关联性^[13], 使得该方程组解的问题实际是不适定问题, 采用直接求逆方法无法求出有意义的解, 通常由特殊反演算法得到待求解.

为了准确求解 (4) 式, Boosted-Gold 反演算法^[16]中以 \mathbf{H}^T 左乘 (2) 式, 引入局部松弛系数 μ , 建立如下迭代过程:

$$x^{k+1} = x^k + \mu (\mathbf{H}^T y - \mathbf{H}^T \mathbf{H} x), \quad (5)$$

式中, μ 向量中各元素为 $\mu_i = \frac{x^{(k)}}{\sum_{l=1}^n (\mathbf{H}^T \mathbf{H})_{il} x_l^{(k)}}$, i 和 l 分别由 m, n 确定; 则 (5) 式可进一步表示为

$$x_i^{(k+1)} = \frac{(\mathbf{H}^T y)_i x_i^{(k)}}{\sum_{l=1}^n (\mathbf{H}^T \mathbf{H})_{il} x_l^{(k)}}, \quad (6)$$

其中 n 为构成响应矩阵的响应函数个数, 将满足收敛条件解 x 的各分量 x_i 进行如 (7) 式的幂指数非线性增强, 并将其作为迭代初值再一次进入 (6) 式迭代计算, 最终得到满足收敛条件的解.

$$x^{(0)} = |x^{(k)}|^p. \quad (7)$$

上式中 $p > 1$, 为幂指数增强系数; 根据 (6) 式和 (7) 式对算法进行开发, 过程如图 1 所示:

如图 1 所示, 算法迭代过程如下:

a) 首先, 给定初值 $x(0)$ 、迭代次数 k 以及迭代终止判定条件 φ .

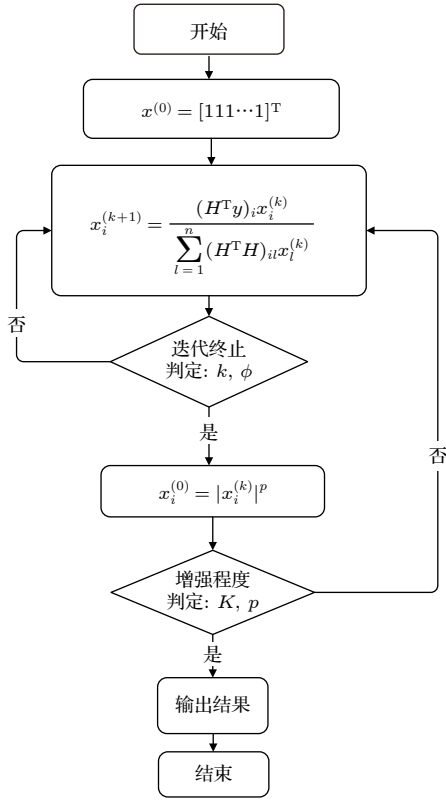


图 1 Boosted-Gold 算法计算过程

Fig. 1. The calculation process of Boosted-Gold Algorithm.

- b) 其次, 进入迭代过程并进行迭代终止判定.
- c) 再次, 设定增强次数 K 及增强系数 p 进行再一次迭代并进行迭代终止判定.
- d) 最后输出结果.

其中初值 $x^{(0)}$ 中的各分量设定为 1; 迭代判别条件如 (8) 式所示:

$$\frac{Px^{(k+1)} - x^{(k)}P}{Px^{(k)}P} < \varphi, \quad (8)$$

式中, $x^{(k)}$ 为第 i 次迭代结果, $x^{(k+1)}$ 为第 $i+1$ 次迭代结果; φ 为给定的迭代残差精度.

3 探测器刻度及响应矩阵的获取

3.1 实验系统及 γ 能谱测量

γ 能谱测量实验系统主要由 FJ374 型 NaI(Tl) 闪烁体探测器 (40 mm×40 mm), BH1283N 型高压电源, BH1218 型线性放大器 (FH0001A 型机箱), ADC 多道脉冲幅度分析器以及 PC 搭建, 如图 2 所示. 实验中 γ 源到探测器探头的距离为 1.5 cm, 高压电源电压为 420 V, 主放大倍数为 20, 测量时间 120 min, 输出信号由 4096 道 ADC

多道脉冲幅度分析器进行数据采集并在 PC 端显示; 最后对标准 γ 源 ^{22}Na , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs 和 ^{152}Eu 脉冲响应谱进行了测量, 并在相同实验条件下测量了环境本底用于后续数据处理.

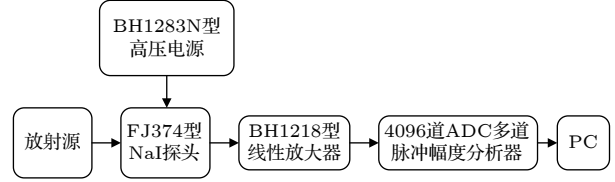


图 2 实验平台电子学框图

Fig. 2. The electronics block diagram of the experimental platform.

3.2 NaI(Tl) 探测器能量刻度和分辨率刻度

探测器的能量刻度和分辨率刻度是 γ 能谱分析的依据, 也为 NaI(Tl) 探测器蒙特卡罗建模提供准确参数. 能量刻度函数由 γ 射线的全能峰峰位与对应的特征能量线性拟合获得. 为了准确获得标准 γ 源 ^{22}Na , ^{60}Co , ^{133}Ba 和 ^{137}Cs 全能峰的峰位以及半高宽 (FWHM), 首先根据实测自然本底对实验能谱进行了本底计数扣除; 然后采用 Savitzky-Golay 方法对谱数据进行了 3 点平滑滤波, 消除探测器对 γ 射线响应统计过程中统计涨落的影响; 最后采用一阶导数寻峰方法, 获得所测 γ 源全能峰峰位及半高宽信息; 能量刻度如图 3 所示.

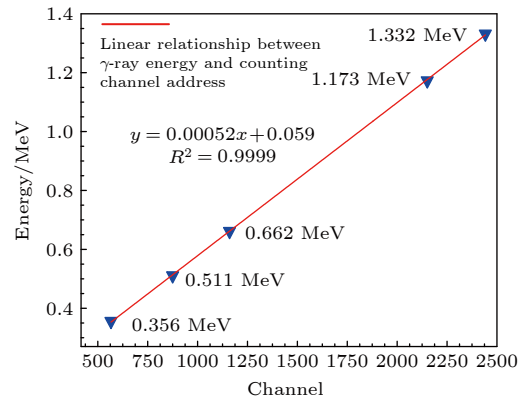


图 3 FJ374 型 NaI(Tl) 探测器能量刻度

Fig. 3. Energy calibration of FJ374 NaI(Tl) detector.

图 3 中能量刻度函数表征了全能峰峰位 (N) 与入射 γ 射线特征能量 (E_γ) 的线性关系. 如 (9) 式所示:

$$E_\gamma = 0.0005198791N + 0.05886. \quad (9)$$

能量分辨率与入射 γ 射线的能量相关, 因此能量分辨率刻度由 γ 射线特征能量与响应谱对应全能峰半高宽 (FWHM) 完成, 函数表达式如 (10) 式所示 [24]:

$$\text{FWHM}(E_\gamma) = a + b\sqrt{E_\gamma + cE_\gamma^2}, \quad (10)$$

其中 a, b, c 为待定展宽参数. E_γ 为全能峰对应的入射 γ 射线特征能量, 单位为 MeV; 根据实测标准 γ 源特征能量及对应全能峰半高宽信息进行非线性待参拟合, 获得 (10) 式待定参数 $a = 0.01607$, $b = 0.02729$, $c = 1.28065$, 如图 4 所示.

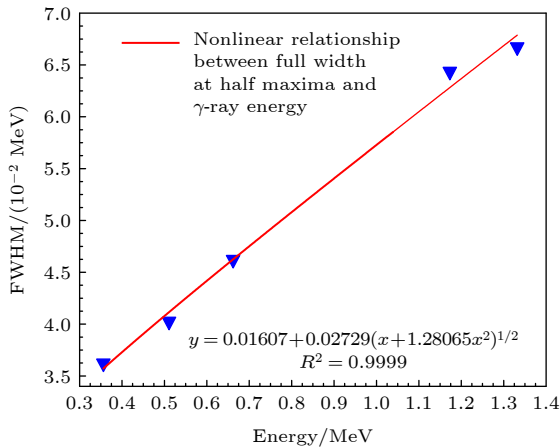


图 4 能量 (E_γ) 与半高宽 (FWHM) 对应关系

Fig. 4. The correspondence between energy (E_γ) and half-maximum width (FWHM).

3.3 响应矩阵的计算

响应矩阵的准确性和反演算法的稳定性是进一步降低分析偏差的两方面. 为了准确获得 NaI(Tl) 探测器响应矩阵, 采用 MCNPX 模拟程序构建了探测器模型, 建模参数与实验条件保持相同, 其中入射 γ 射线源为点源, 与探测器探头距离为 15 mm, 探测器灵敏体积为厚 40 mm、直径 40 mm 的柱型, 外层铝壳厚度为 1.5 mm, 反光层 MgO 厚度为 1.5 mm, 如图 5 所示.

将每个入射单能 γ 射线响应函数作为构建响应矩阵一个列向量, 共由 200 个单能 γ 射线的响应函数列向量构成; 模拟过程采用 F8 计数卡进行计数抽样为 200 道, 抽样能量范围为 0—2 MeV; 各单能 γ 射线能量随步长 0.01 MeV, 覆盖能量区间为 0.01 至 2 MeV; 采用 (10) 式对模拟响应函数进行展宽, 最终得到维度为 201×200 的响应矩阵, 结果如图 6 所示.

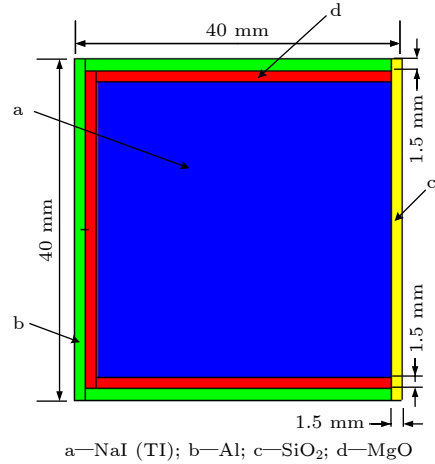


图 5 FJ374 型 NaI(Tl) 探测器仿真模型

Fig. 5. The simulation model of FJ374 NaI(Tl) detector.

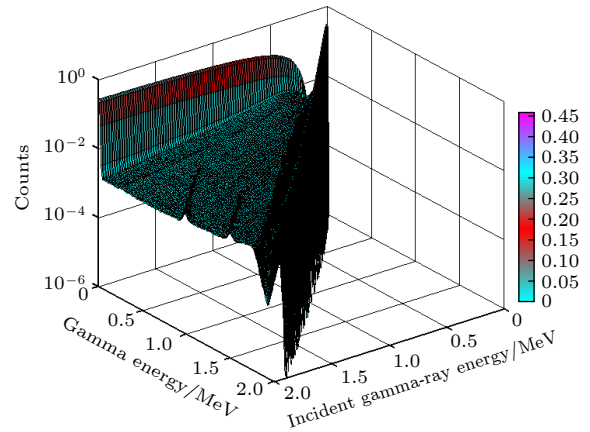


图 6 NaI(Tl) 探测器响应函数

Fig. 6. Response matrix for the NaI (TI) detector.

4 γ 能谱反演

4.1 Boosted-Gold 算法反演低能量分辨率 γ 能谱的准确性

为了验证 Boosted-Gold 算法反演低分辨率 γ 能谱重峰和弱峰分析的准确性, 根据开发的反演算法程序和计算的响应矩阵, 对实验测量标准 γ 源 ^{22}Na , ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 脉冲响应谱进行反演, 反演前后结果对比如图 7 所示.

由图 7 可见, 图 7(a) 中 ^{22}Na 源只能清晰显现能量为 0.511 MeV 的 γ 射线全能峰, 图 7(b) 中 ^{133}Ba 源特征能量为 0.223, 0.303, 0.384 MeV 的 γ 射线全能峰被完全淹没, 而图 7(c) 中 ^{152}Eu 源只有少数全能峰可见, 经过反演后 γ 能谱全谱分辨率均明显提高, 全能峰准确显现且峰面积计数可读, 对反演结果的准确性进行分析, 如表 1 所列, 其中 γ 射线

特征能量反演结果与标准值误差由 (11) 式计算:

$$E = \left| \frac{E_{\text{cou}} - E_{\text{nor}}}{E_{\text{cou}}} \right|, \quad (11)$$

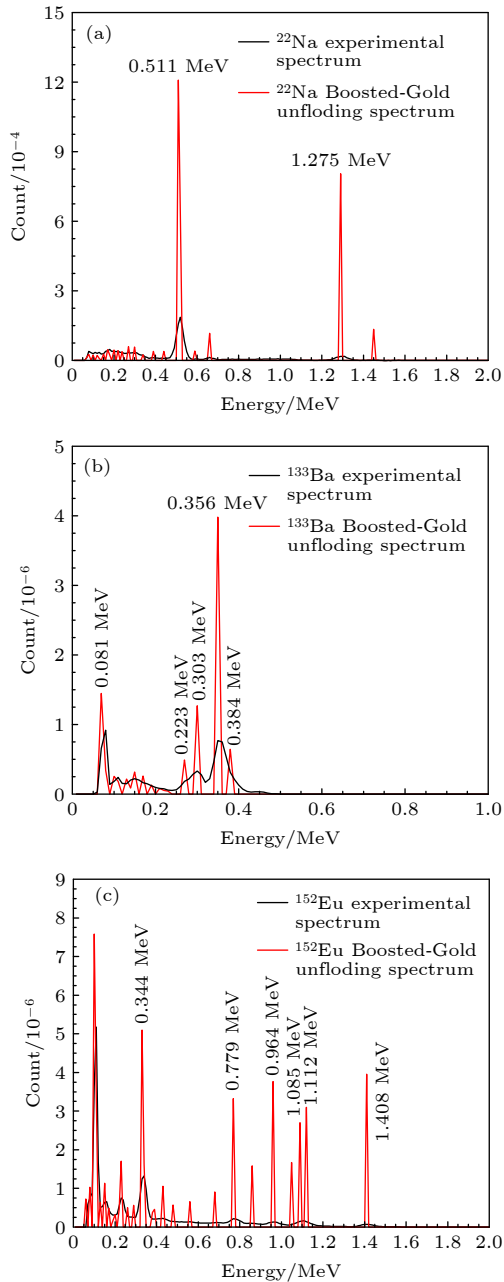


图 7 实测 γ 能谱与反演能谱的比较 (a) ^{22}Na γ 源能谱反演前后结果对比; (b) ^{133}Ba γ 源能谱反演前后结果对比; (c) ^{152}Eu γ 源能谱反演前后结果对比

Fig. 7. The comparison between the measured γ energy spectra and the unfolded energy spectrum: (a) Comparison of the results before and after the unfolded of the energy spectrum of the ^{22}Na γ source; (b) comparison of the results before and after the unfolded of the energy spectrum of the ^{133}Ba γ source; (c) comparison of the results before and after the algorithm unfolded of the energy spectrum of the ^{152}Eu γ source.

式中, E_{cou} 表示反演后的特征能量, E_{nor} 表示标准特征能量, 反演强度分析中采用 IAEA 核数据库 γ 放射性核素各特征射线间绝对强度之比作为标准数据, 用于验证 γ 射线全能峰计数收敛结果的准确性.

表 1 实验谱与反演谱结果分析对比

Table 1. Analysis and comparison of the experimental spectrum and the unfolded spectrum results.

源	定性分析			定量分析		
	标准能量/MeV	反演能量/MeV	误差/%	标准谱强度比	反演谱强度比	偏差
^{22}Na	0.511	0.51	0.2	1	1	0
	1.275	1.29	1.18	0.556	0.438	0.118
	0.081	0.08	1.23	0.55	0.449	-0.101
^{133}Ba	0.276	0.27	2.17	0.115	0.123	0.008
	0.303	0.30	0.99	0.295	0.319	0.024
	0.356	0.35	1.69	1	1	0
	0.384	0.38	1.04	0.144	0.162	0.018
^{152}Eu	0.344	0.34	1.16	1	1	0
	0.779	0.77	1.15	0.486	0.495	0.009
	0.964	0.96	0.41	0.546	0.56	0.014
	1.085	1.09	0.46	0.38	0.402	0.022
	1.112	1.12	0.72	0.514	0.461	-0.053
	1.408	1.4	0.57	0.785	0.588	-0.197

表 1 反演结果表明, γ 射线特征能量反演误差最大为 2.17% (^{133}Ba 能量为 0.276 MeV). 反演强度与标准强度最大偏差为 0.197, 除特征能量为 1.275 MeV (^{22}Na), 0.081 MeV (^{133}Ba), 1.408 MeV (^{152}Eu) 的 γ 射线强度偏差大于 0.1 外, 其余 γ 射线反演强度偏差均小于 0.06.

反演偏差主要由于以下原因: 首先由于反演结果的准确性依赖于响应矩阵的准确性, 因此蒙特卡罗模拟响应函数与实际响应函数的差异是造成反演结果偏差的一方面; 其次, 当低能区全能峰计数收敛不完全时, 强度计算过程中认为 γ 射线特征能量相邻道计数也属于全能峰计数, 一定程度上增加了强度计算与标准值的偏差; 最后, 受限于响应矩阵步长 (0.01 MeV), 当两种 γ 射线能差小于响应矩阵步长时, 将无法分析该两种特征 γ 射线, 强度反演结果将大于标准值, 如对 ^{133}Ba 的特征能量为 0.079 和 0.08 MeV 的 γ 射线分析.

4.2 Boosted-Gold 算法反演低能量分辨率 γ 能谱的准确性和有效性

实测 γ 能谱反演结果验证了 Boosted-Gold 算法对低分辨率探测器 γ 能谱重峰和弱峰分析的准

确性, 为了进一步研究 Boosted-Gold 算法用于低分辨率探测器 γ 能谱分析的准确性和有效性范围, 以 MCNPX 建立的 NaI(Tl) 探测器模型, 根据 γ 射线不同相对强度、不同能量 (E_γ)、不同能差 (ΔE) 模拟获得了三组低分辨率探测器 γ 能谱, 其中入射 γ 射线能量由 (12) 式确定 [25]:

$$E_{i+1} = E_i + n \left(0.01607 + 0.02729 \sqrt{E_i + 1.28068 E_i^2} \right), \quad (12)$$

其中 n 取值为 1, E_i 为第 i 种单能射线能量, 模拟谱分别有 4, 6 和 8 种不同 γ 射线能量, 获得 γ 能谱射线最小能差为 0.03 MeV, 相邻 γ 射线强度最大比为 1:0.3; 利用开发的反演算法程序和获取的响应矩阵对模拟 γ 能谱进行反演; 增强因子 $p = 4$, 进行 10 次增强过程, 每次进行 1000 次迭代, 反演前后结果对比如图 8 所示。

如图 8(a1)、图 8(b1) 和图 8(c1) 三组混合 γ 能谱中, 强度较弱的 γ 射线全能峰严重重叠甚至被相

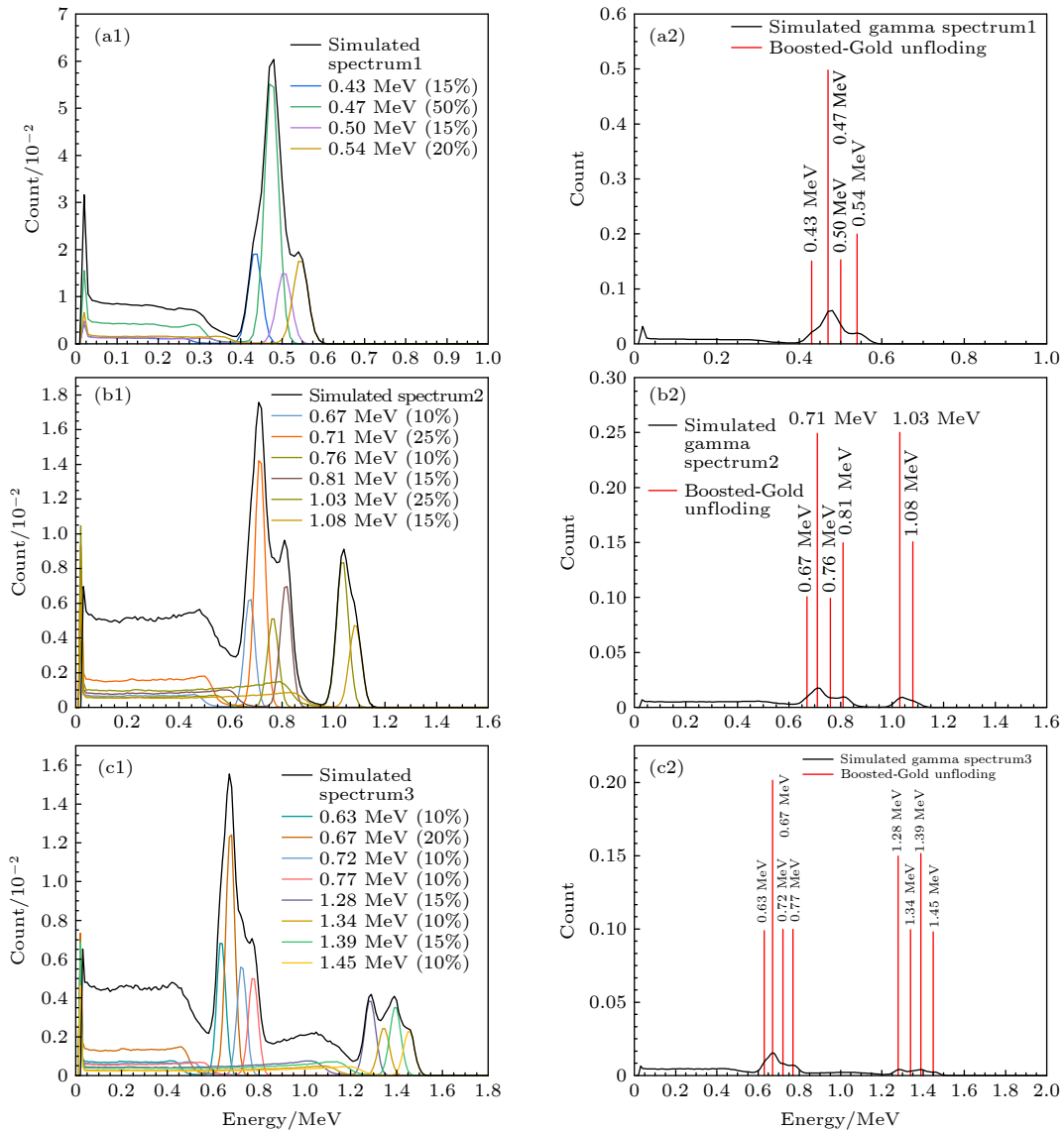


图 8 模拟 γ 能谱反演前后结果对比 (a1) 4 种能量 γ 射线模拟谱; (a2) 4 种能量 γ 射线模拟谱反演前后结果对比; (b1) 6 种能量 γ 射线模拟谱; (b2) 6 种能量 γ 射线模拟谱反演前后结果对比; (c1) 8 种能量 γ 射线模拟谱; (c2) 8 种能量 γ 射线模拟谱反演前后结果对比

Fig. 8. The comparison of between the results before and after the unfolding of the simulated γ energy spectrum: (a1) The simulation spectrum of gamma-rays of 4 energies; (a2) the comparison between the results before and after the unfolding of the simulated spectrum of energy γ -rays of 4 energies; (b1) the simulation spectrum of gamma-rays of 6 energies; (b2) the comparison between the results before and after the unfolding of the simulated spectrum of energy γ -rays of 6 energies; (c1) the simulation spectrum of gamma-rays of 8 energies; (c2) the comparison between the results before and after the unfolding of the simulated spectrum of energy γ -rays of 8 energies.

对强度较高的 γ 射线全能峰掩盖,反演结果分别如图 8(a2)、图 8(b2) 和图 8(c2) 所示,各全能峰清晰显现且计数均收敛于一道,入射 γ 射线能量及全能峰计数均可直接读取,反演谱分析结果如表 2 所列.

表 2 模拟谱与反演谱结果对比

Table 2. Comparison of the simulated spectrum and the unfolded spectrum results.

谱	定性分析		定量分析		
	标准能量 /MeV	反演能量 /MeV	标准谱强度比	反演谱强度比	偏差
谱1	0.43	0.43	0.3	0.302	0.002
	0.47	0.47	1	1	0
	0.5	0.5	0.3	0.307	0.007
	0.54	0.54	0.4	0.4	0
谱2	0.67	0.67	0.4	0.403	0.003
	0.71	0.71	1	0.996	-0.004
	0.76	0.76	0.4	0.397	-0.003
	0.81	0.81	0.6	0.598	-0.002
	1.03	1.03	1	1	0
	1.08	1.08	0.6	0.602	0.002
谱3	0.63	0.63	0.5	0.49	-0.01
	0.67	0.67	1	1	0
	0.72	0.72	0.5	0.495	-0.005
	0.77	0.77	0.5	0.495	-0.005
	1.28	1.28	0.75	0.744	-0.006
	1.34	1.34	0.5	0.494	-0.006
	1.39	1.39	0.75	0.752	0.002
	1.45	1.45	0.5	0.486	-0.014

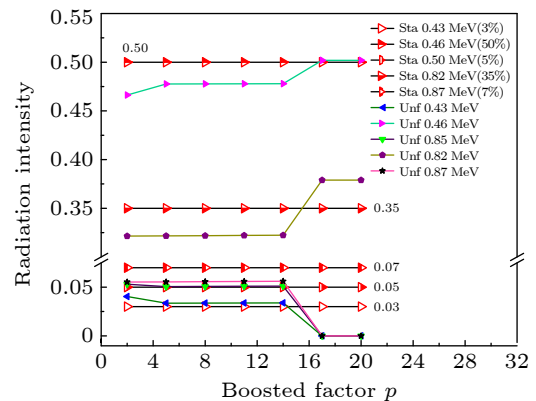
由表 2 可知, γ 能谱中被淹没的全能峰均可被准确反演, γ 射线反演能量与入射能量一致;反演强度与标准强度最大差为 0.014,其余各全能峰反演强度与标准强度偏差均小于 0.01. 图 8(a1) 中能量为 0.5 MeV 的 γ 射线反演强度偏差最大为 0.007,其余 γ 射线反演强度偏差均小于 0.002. 图 8(a2) 中能量为 0.71 MeV 的 γ 射线强度反演结果偏差最大为 0.004,而能量为 0.67 和 0.76 MeV 的 γ 射线强度反演偏差为 0.003. 图 8(a3) 中能量为 1.45 MeV 的 γ 射线强度反演偏差最大为 0.014,且能量为 1.28, 1.34, 0.67 和 0.72 MeV 全能峰强度与标准强度偏差均大于 0.005. 可见,随着入射 γ 射线增多, γ 射线强度反演的准确性变小,且反演准确性与 γ 射线强度成正比.

当 γ 射线相对强度小于 10% 时,反演强度均小于标准强度,且相对强度越小,反演强度与准确强度偏差越大,造成这一结果的原因在于,反演过程中非线性幂指数增强系数 p 使得谱数据中占比

较小的分量相对更小,导致迭代过程该分量更快向 0 收敛,表现在反演结果中 γ 射线强度反演结果偏小,且 γ 射线相对强度越小偏差将越大.

4.3 增强系数 p 对弱峰及重峰结构解析能力的影响

Boosted-Gold 反演算法中非线性幂指数增强系数 p 的引入是为了克服 Gold 反演算法收敛稳定后无法进一步提升能量分辨率的问题;然而实验发现,增强系数 p 在进一步提升 γ 能谱重峰和弱峰分离的同时,分析结果的准确性随 p 变化较大,尤其对于相对强度小于 10% 的 γ 射线;为了进一步说明增强系数 p 对弱峰或重峰结构的解析准确性的影响,构建了能量和相对强度分别为 0.43 MeV(3%), 0.46 MeV(50%), 0.5 MeV(5%), 0.82 MeV(35%), 0.87 MeV(7%) 的低分辨率 γ 能谱,研究在不同 p 值下相对强度小于 10% 的 γ 射线反演结果的准确性,如图 9 所示.

图 9 不同 p 值下标准相对强度数据与反演数据的对比Fig. 9. The comparison of the standard relative intensity data and the unfolded data at different p -values.

反演结果表明,当 $p \leq 14$ 时各 γ 射线强度的反演结果基本保持恒定,有利于 γ 能谱的分析,特别是弱峰;当 $p > 14$ 时,反演结果准确性降低,相对强度小于 10% 的 γ 射线全能峰计数进一步向 0 收敛,相对强度较大的 γ 射线计数进一步增加,最终全谱只有相对强度较大的 γ 射线全能峰被保留且保持恒定,将无法完成相对强度小于 10% 的 γ 射线的分析识别.

5 结 论

为了利用低能量分辨率探测器 γ 能谱分析获

取未知放射性核素的特征信息, 提高 γ 能谱中重峰及弱峰分析的准确性和有效性, 本文开展了基于 Boosted-Gold 算法的 NaI(Tl) 探测器 γ 能谱分析研究. 首先采用蒙特卡罗方法建立了 NaI(Tl) 探测器模型, 以此构建了 NaI(Tl) 探测器响应矩阵; 其次根据 Boosted-Gold 算法理论开发了能谱反演程序; 然后根据响应矩阵和开发的反演算法程序对模拟 γ 能谱和实测 γ 能谱进行反演; 以实测 γ 源 ^{22}Na (0.511 和 1.275 MeV), ^{133}Ba (0.081, 0.276, 0.303, 0.356 和 0.384 MeV) 和 ^{152}Eu (0.344, 0.779, 0.964, 1.085, 1.112 和 1.408 MeV) 脉冲响应谱, 验证了 Boosted-Gold 算法反演低分辨率探测器 γ 能谱的准确性; 以不同 γ 射线相对强度、不同入射能量 (E_γ)、不同能差 (ΔE) 构建了三组低分辨率探测器 γ 能谱, 进一步验证了其反演低分辨率探测器 γ 能谱重峰及弱峰的准确性和有效性; 最后进一步明确了非线性增强系数 p 对重峰及弱峰结构分析准确性的影响.

实测 γ 能谱反演结果表明: Boosted-Gold 算法对 γ 射线特征能量反演误差最大为 2.17% (^{133}Ba 能量为 0.276 MeV); 反演强度与标准强度最大偏差为 0.197 (^{152}Eu 能量为 1.408 MeV). 能谱中 γ 射线强度最大比为 1:0.115 (^{133}Ba 特征能量 0.276 和 0.356 MeV)、最小能差为 0.03 MeV (^{133}Ba 特征能量 0.356 和 0.384 MeV), 表明 Boosted-Gold 算法反演低能量分辨率探测器 γ 能谱可实现较准确的分析结果, 尤其具有准确的定性分析能力.

模拟 γ 能谱反演结果表明: 最多 8 种 γ 射线能量、 γ 射线强度最大比为 1:0.3、能差为 1 倍 FWHM 条件下, Boosted-Gold 算法能够准确分析入射 γ 射线特征能量, γ 射线反演强度与标准强度差值保持在 0.01 以内; 当 γ 射线相对强度小于 10% 时, 反演准确性随之降低, 且强度反演准确性与 γ 射线强度成正比, 表明 Boosted-Gold 算法对于相对强度大于 10% 的 γ 射线具有更好的分析准确性, 但分析准确性与增强系数 p 取值相关, 在 $p \leq 14$ 时 γ 放射性核素的定量分析更准确, $p > 14$ 时将无法完成相对强度小于 10% 的 γ 射线的定性定量分析. 由于模拟 γ 能谱过程更接近理想物理过程, 模拟 γ 能谱反演结果优于实测 γ 能谱反演结果, 说明 γ 能谱测量过程中误差对反演结果的准确性影响较大, γ 能谱数据误差校正与反演算法结合, 将进一步提升低分辨率 γ 能谱反演分析精度.

参考文献

- [1] Li F, Cheng Z Y, Tian C S, Xiao H F, Zhang M, Ge L Q 2020 *Appl. Spectrosc. Rev.* **56** 255
- [2] Chen Y 2021 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Academy of Military Sciences) (in Chinese) [陈晔 2021 博士学位论文 (北京: 军事科学院)]
- [3] Rahman M S, Cho G, Kang B S 2009 *Radiat. Prot. Dosim.* **135** 203
- [4] Alizadeh D, Ashrafi S 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **915** 1
- [5] Demir N, Kuluöztürk Z N 2021 *Nucl. Eng. Technol.* **53** 3759
- [6] Milbrath B D, Choate B J, Fast J E, Hensley W K, Kouzes R T, Schweppe J E 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **572** 774
- [7] Baré J, Tondeur F 2011 *Appl. Radiat. Isot.* **69** 1121
- [8] Morháč M, Matoušek V 2009 *Digital Signal Proces.* **19** 372
- [9] Kwan E, Wu C Y, Haight R C, Lee H Y, Bredeweg T A, Chyzh A, Devlin M, Fotiades N, Gostic J M, Henderson R A, Jandel M, Laptev A, Nelson R O, O'Donnell J M, Perdue B A, Taddeucci T N, Ullmann J L, Wender S A 2014 *Nucl. Data Sheets* **119** 221
- [10] Meng L J, Ramsden D 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 1329
- [11] Shi R, Tuo X G, Li H L, Xu Y Y, Shi F R, Yang J B, Luo Y 2018 *Nucl. Sci. Tech.* **29** 10
- [12] Li L, Tuo X G, Liu M Z, Wang J 2014 *Nucl. Sci. Tech.* **25** 050202
- [13] Wachtmeister S, Csillag S 2011 *Ultramicroscopy* **111** 79
- [14] Zhou R J, Zhong G Q, Hu L Q, Tardocchi M, Rigamonti D, Giacomelli L, Nocente M, Gorini G, Fan T S, Zhang Y M, Hu Z M, Xiao M, Li K, Zhang Y K, Hong B, Zhang Y, Lin S Y, Zhang J Z 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 123510
- [15] Morháč M, Matoušek V 2011 *J. Comput. Appl. Math.* **235** 1629
- [16] Jandel M, Morháč M, Kliman J, Krupa L, Matoušek V, Hamilton J H, Ramayya A V 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **516** 172
- [17] He J F, Yang Y Z, Qu J H, Wu Q F, Xiao H L, Yu C C 2016 *Nucl. Sci. Tech.* **27** 111
- [18] Zhao R, Liu L Y, Cao Q J 2019 *At. Energy Sci. Technol.* **53** 1495 (in Chinese) [赵日, 刘立业, 曹勤剑 2019 原子能科学技术 **53** 1495]
- [19] Zhang S J, Liu C Q, Yang X, Huang C, Xie Q, Hu Z J, Hu Z M, Han C, Bai X H, Huo D Y, Wu K, Wang J R, Zhang Y, Wei Z, Yao Z E 2021 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **1006** 165407
- [20] Ai X Y, Wei Y X, Xiao W Y 2006 *J. Tsinghua. Univ. (Sci. & Tech.)* **46** 821 (in Chinese) [艾宪芸, 魏义祥, 肖无云 2006 清华大学学报 (自然科学版) **46** 821]
- [21] Khilkevitch E M, Shevelev A E, Chugunov I N, Naidenov V O, Gin D B, Doinikov D N 2013 *Tech. Phys. Lett.* **39** 63
- [22] Morháč M, Hlaváč S, Veselský M, Matoušek V 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **621** 539
- [23] Wu H X, Yuan X Y, Liu Q C, Liu Y J, Yang L 2012 *At. Energy Sci. Technol.* **46** 1142 (in Chinese) [吴和喜, 袁新宇, 刘庆成, 刘玉娟, 杨磊 2012 原子能科学技术 **46** 1142]
- [24] Salgado C M, Brandão L E B, Schirru R, Pereira C M N A, Conti C C 2012 *Prog. Nucl. Energy* **59** 19
- [25] Cheng W, Su C Y, Feng T C, Liu W B, Tian Z N 2018 *Nucl. Tech.* **41** 70 (in Chinese) [陈伟, 苏川英, 冯天成, 刘文彪, 田自宁 2018 核技术 **41** 70]

Analysis of the unfolded γ energy spectrum based on Boosted-Gold algorithm*

Zhang Shuang He San-Jun Liao Feng Luo Wan Zhou Zhi-Qian
Gao Bo Liu Li-Yan Zhao Xiu-Liang[†]

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

(Received 30 December 2021; revised manuscript received 16 February 2022)

Abstract

To obtain the characteristic information of unknown radionuclides by analyzing the γ -energy spectrum of a low-resolution detector, and to improve the accuracy and validity of the analysis of overlapping and weak peaks in the γ -energy spectrum, in this paper we analyze the γ -energy spectrum of NaI(Tl) detectors based on the Boosted-Gold algorithm. A simulation model of NaI(Tl) detector is established by using MCNPX, and a detector response matrix with dimension 201×200 is obtained. The γ -energy spectrum unfolding program is developed based on the Boosted-Gold algorithm. The detector response spectra of the γ radioactive sources ^{22}Na , ^{133}Ba , and ^{152}Eu are measured. Three groups of low-resolution γ spectra are constructed with different γ -ray energy, different energy differences (ΔE) and different relative intensities by simulation. Combining the response matrix and the unfolding procedures, the measured and simulated γ energy spectra are unfolded. The unfolding results are analyzed with the nuclide standard characteristics information from the IAEA database. The results show that the maximum unfolding error of the characteristic energy of the measured γ -energy spectrum is 2.17% (0.276 MeV for ^{133}Ba source) by the Boosted-Gold algorithm, and the maximum deviation between the unfolded intensity and the standard intensity is 0.197 (1.408 MeV for ^{152}Eu source). For the simulated γ energy spectrum, the characteristic energy of nuclide can be accurately analyzed, and the deviation between unfolded intensity and standard intensity maintains 0.01. When the enhancement factor $p \leq 14$, the Boosted-Gold algorithm is beneficial to the quantitative analysis of γ -radionuclides. For the relative intensity of γ -rays greater than 10%, this algorithm has better analysis accuracy.

Keywords: γ energy spectrum analysis, response function, energy spectrum unfolding, Boosted-Gold algorithm

PACS: 29.30.Kv, 25.20.Dc

DOI: 10.7498/aps.71.20212429

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12005098), the Scientific Research Program of Education Department of Hunan Province, China (Grant No. 19A431), and the Postgraduate Innovation Program of Education Department of Hunan Province, China (Grant No. CX20210945).

[†] Corresponding author. E-mail: zhaoxiul@usc.edu.cn