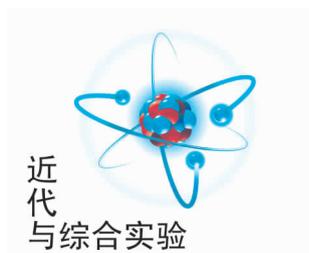


文章编号:1005-4642(2021)09-0011-07



基于奇异谱分析的 γ 能谱降噪算法

赵思文, 吴 怡, 王崇杰

(辽宁师范大学 物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要:针对传统频域滤波法无法有效解决 γ 能谱中噪声频谱与谱成分频谱的重叠问题,本文提出了基于奇异谱分析的 γ 能谱降噪方法,阐述了奇异谱分析降噪方法的基本原理,给出了降噪算法. 通过分析 γ 能谱的奇异谱特征,给出了最优嵌入维数和 γ 能谱重构阶数的选取方法. 实测 $^{60}\text{CoHPGe}$ γ 能谱的降噪结果表明:奇异谱分析法可有效分离和消除 γ 能谱的加性噪声和乘性噪声,从而大幅提高了能谱信噪比. 与传统方法相比,该方法算法简单,具有较强的降噪能力,且待定参量少,是有效的 γ 能谱降噪方法.

关键词: γ 能谱; 噪声去除; 奇异值分解; 线性滤波; 同态滤波

中图分类号: TL817.2; TP274

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.09.002

γ 能谱分析是放射性核素分析及核材料类型识别的重要手段,广泛应用于环境监测、核武器核查、宇宙探测以及核安全保障等领域^[1-6]. 然而, γ 能谱中存在的噪声给 γ 能谱分析与识别带来较大困难,甚至导致错误结果(特别是对于低水平放射性分析和差异甚微的核材料识别^[2-4]). 因此,降噪处理是 γ 能谱分析与识别过程中重要的技术环节.

传统的 γ 能谱降噪方法主要有道址域的曲线拟合移动平滑法和频域的滤波法^[7-8]. 移动平滑法容易引起谱线变形、失真,甚至畸变^[8]. 频域滤波法是目前较常用的 γ 能谱降噪方法,其中主要有基于快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)和小波变换(Wavelet transform, WT)的线性滤波法^[8-9]. γ 能谱噪声的频谱通常是全域的,与 γ 能谱成分的频谱严重重叠,传统的频域滤波法难以对噪声和谱成分进行有效分离. 因此,常常存在降噪不充分或降噪过度的现象. 另外,除加性噪声外, γ 能谱还含有乘性噪声,而传统的降噪方法往往忽视 γ 能谱的乘性噪声^[9],导致降噪效果不理想.

奇异谱分析(Singular spectrum analysis, SSA)

是在奇异值分解理论上兴起的独立于信号模型的无参量频谱估计技术^[10],已成功应用于信号的降噪处理^[11-12]. 该技术具有不受噪声频谱分布影响和自适应降噪的特点^[12]. 本文首先提出了基于 SSA 的 γ 能谱降噪方法,并介绍了降噪的基本原理与具体算法. 其次,通过分析 γ 能谱的奇异谱特征,对轨迹矩阵嵌入维数和重构奇异值阶数的最优取值方法进行了研究和讨论. 最后,对实测 $^{60}\text{CoHPGe}$ γ 能谱进行了降噪处理,并与传统的 FFT 和 WT 滤波法进行比较,验证了降噪算法及其参量选取方法的有效性.

1 基于 SSA 的 γ 能谱降噪原理

基于奇异谱分析的 γ 能谱降噪算法的基本思想是:首先通过构建轨迹矩阵将一维 γ 能谱数据映射到高维相空间;然后对轨迹矩阵进行奇异值分解,并根据奇异谱的特征对 γ 能谱成分和噪声成分进行分离,较大的奇异值对应 γ 能谱成分,较小的奇异值则对应噪声成分;最后利用较大奇异值成分对 γ 能谱进行重构,从而达到降噪的目的. 降噪算法包括 4 个步骤:轨迹矩阵嵌入、奇异值分解、奇异值分组和对角平均化^[10-12].

收稿日期: 2021-05-26; **修改日期:** 2021-06-25

作者简介: 赵思文(1997—),女,辽宁铁岭人,辽宁师范大学物理与电子技术学院 2019 级硕士研究生.
E-mail: 1574834713@qq.com

通讯作者: 王崇杰(1964—),男,辽宁北镇人,辽宁师范大学物理与电子技术学院教授,硕士,主要研究方向为核技术及其应用. E-mail: wang_chongjie@163.com



1) 轨迹矩阵嵌入. 设 $x_1, x_2, \dots, x_{N'}$ 为一维 γ 能谱数据, 则相应 γ 能谱的 $L \times K$ 轨迹矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_K \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & \cdots & x_{N'} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中, N' 为 γ 能谱的最大道址数, L 为嵌入维数, $1 < L < N', K = N' - L + 1$.

2) 轨迹矩阵奇异值分解. 对轨迹矩阵 \mathbf{X} 进行奇异值分解

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^d \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T, \quad (2)$$

式中, $d = \text{rank}(\mathbf{X})$ 是轨迹矩阵的秩, 即 \mathbf{X} 的非零奇异值个数, 且 $d \leq \min(L, K)$. $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_d$ 为降序排列的非零奇异值, 向量 $\mathbf{u}_i \in \mathbf{R}_{L \times 1}$ 和向量 $\mathbf{v}_i \in \mathbf{R}_{K \times 1}$ ($i = 1, 2, \dots, d$) 分别为轨迹矩阵 \mathbf{X} 的左奇异向量和右奇异向量.

3) 奇异值分组. 按轨迹矩阵 \mathbf{X} 奇异值的大小, 将奇异值分成 2 组, 前 r ($r < d$) 阶较大的奇异值对应谱成分, 后 $d - r$ 阶较小奇异值对应噪声成分. 利用前 r 个较大奇异值及其相应的左右奇异向量即可得到降噪后的轨迹矩阵, 即

$$\mathbf{Y} = \sum_{j=1}^r \sigma_j \mathbf{u}_j \mathbf{v}_j^T. \quad (3)$$

4) 对角平均化. 对角平均化实质上是将降噪后的轨迹矩阵 $\mathbf{Y} \in \mathbf{R}_{L \times K}$ 转换成降噪后的 γ 能谱. 设 y_{ij} 为轨迹矩阵 \mathbf{Y} 的元素, 则降噪后 γ 能谱为

$$x_{\text{rc}}(m) = \begin{cases} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{i, m-i+1}, & 1 \leq m < L; \\ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L y_{i, m-i+1}, & L \leq m \leq K; \\ \frac{1}{N' - m + 1} \sum_{i=m-K+1}^{N'-K+1} y_{i, m-i+1}, & K < m \leq N'. \end{cases} \quad (4)$$

选择恰当的嵌入维数 L 和重构阶数 p , 即能达到降低 γ 能谱噪声的目的.

2 实测 γ 能谱降噪处理与结果

2.1 仪器设备与测量

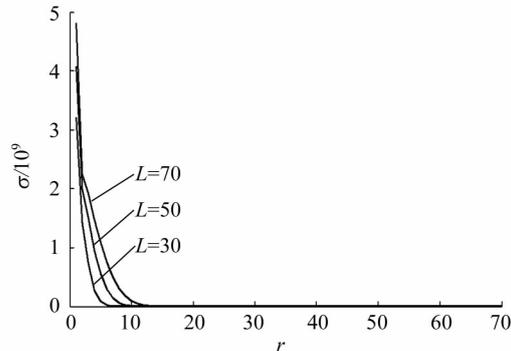
选用 EG&G ORTEC 918A-HPGe γ 能谱仪, 多道分析器最大道址为 8 192, 谱仪系统在 ^{60}Co 1 332.50 keV 处的能量分辨率为 2.0 keV. 放射源为 ^{60}Co 标准点源, 活度为 2.75 kBq. 测量

活时间设置为 1, 2, 3, 4, 5 h, 相应谱数据分别记为 Co1h~Co5h.

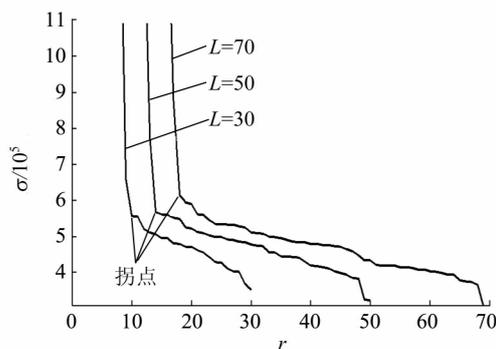
2.2 γ 能谱的奇异谱特征及其降噪算法参量的选取

为了达到最佳的降噪效果, 需选择最优的轨迹矩阵嵌入维数 L 和重构阶数 p . 关于轨迹矩阵嵌入维数和重构阶数的取值问题, 目前还没有通用的准则和方法, 相关文献针对不同信号推荐的方法, 都具有一定的主观性^[12-15]. 鉴于此, 本文对 γ 能谱的奇异谱特征进行了分析, 并研究了 γ 能谱降噪信噪比随嵌入维数的变化规律. 根据 γ 能谱降噪剩余噪声奇异谱的特征, 给出了最优重构阶数的选取方法.

图 1 是不同嵌入维数情况下 Co1h γ 能谱的奇异谱. 由图 1 可知, 对于不同的嵌入维数 L , 奇异谱均存在 1 个拐点, 拐点左侧的奇异值较大, 而且随着阶数的增加奇异值快速衰减, 对应 γ 能谱成分; 而拐点右侧的奇异值较小, 且随阶数的变化相对平缓, 对应噪声成分. 因此, 利用奇异谱中的拐点可对谱成分和噪声进行分离, 进而通过重构得到降噪 γ 能谱.



(a) 不同嵌入维数下的奇异谱



(b) 图 1(a) 奇异谱的纵向局部放大图

图 1 Co1h γ 能谱的奇异谱

图 2 是 Co1h γ 能谱降噪后信噪比随轨迹矩阵嵌入维数 L 的变化规律,其中信噪比为

$$R_{\text{SNR}} = 10 \lg \left[\frac{\left(\sum_{i=N_{\text{CH1}}}^{N_{\text{CH2}}} x_i \right)^2}{\sum_{j=N_{\text{CH1}}}^{N_{\text{CH2}}} \left(x_j - \sum_{i=N_{\text{CH1}}}^{N_{\text{CH2}}} x_i \right)^2} \right], \quad (5)$$

式中, x_i 是第 i 个道址上的谱计数, N_{CH1} 和 N_{CH2} 分别是 ^{60}Co 1 332. 50 keV γ 射线康普顿平台左右边界能量 1 040 keV 和 1 090 keV 所对应的多道分析器道址^[16-17].

由图 2 可知,当嵌入维数较小时,信噪比相对较低;当 $L > 50$ 时,信噪比变化相对平稳;当 $L > 110$ 时,信噪比则开始缓慢下降. 研究表明:当 L 在 50~110 区间内取值时,均可获得较大的信噪比和较好的降噪效果,该区间是嵌入维数的最佳取值区间,且与谱数据长度基本无关.

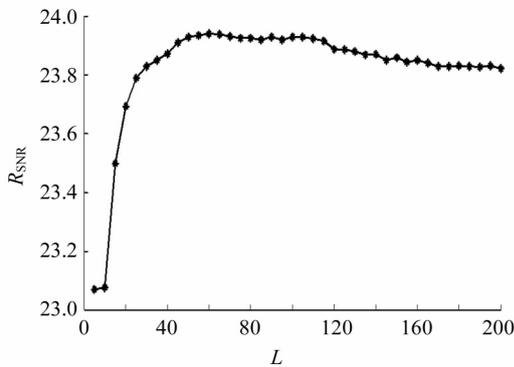


图 2 信噪比随嵌入维数 L 的变化规律

由 SSA 降噪原理可知,剩余噪声中不含谱成分时对应的最小重构阶数就是最优重构阶数. 上述研究表明,噪声奇异谱与谱成分奇异谱之间的差异十分明显. 因此,为确定最优重构阶数,首先在 γ 能谱奇异谱中分别取拐点 r 和 $r-1$ 右侧奇异谱重构剩余噪声谱;然后按下式计算 2 个剩余噪声谱奇异谱之间的相关系数 R ^[18-19]:

$$R(p) = \frac{\sum_{i=1}^D [n_p(i) - \bar{n}_p][n_{p-1}(i) - \bar{n}_{p-1}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^D [n_p(i) - \bar{n}_p]^2 \sum_{j=1}^D [n_{p-1}(j) - \bar{n}_{p-1}]^2}}, \quad (6)$$

式中, n_p 和 n_{p-1} 分别表示重构阶数为 p 和 $p-1$ 时剩余噪声的奇异谱, D 为剩余噪声轨迹矩阵的秩;最后,逐步减小 p 值,当相关系数 R 明显减

小,且小于一定阈值时,相应的 p 值就是最优重构阶数. 由式(6)计算可得,当 $p < 11$ 时, p 和 $p-1$ 所对应剩余噪声奇异谱之间的相关系数 R 减小,而当 $p \geq 11$ 时, R 显著增大,且均大于 0. 92. 图 3 是嵌入维数 $L=50$,重构阶数分别为 $p=11$ 和 $p=12$ 时 Co1h 的剩余噪声奇异谱,二者相关系数 $R=0. 59$. 因此, $p=11$ 即是最优重构阶数.

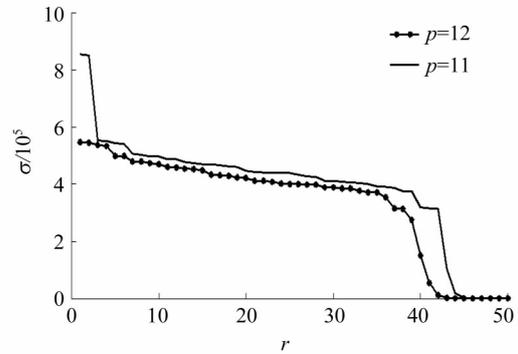


图 3 剩余噪声奇异谱

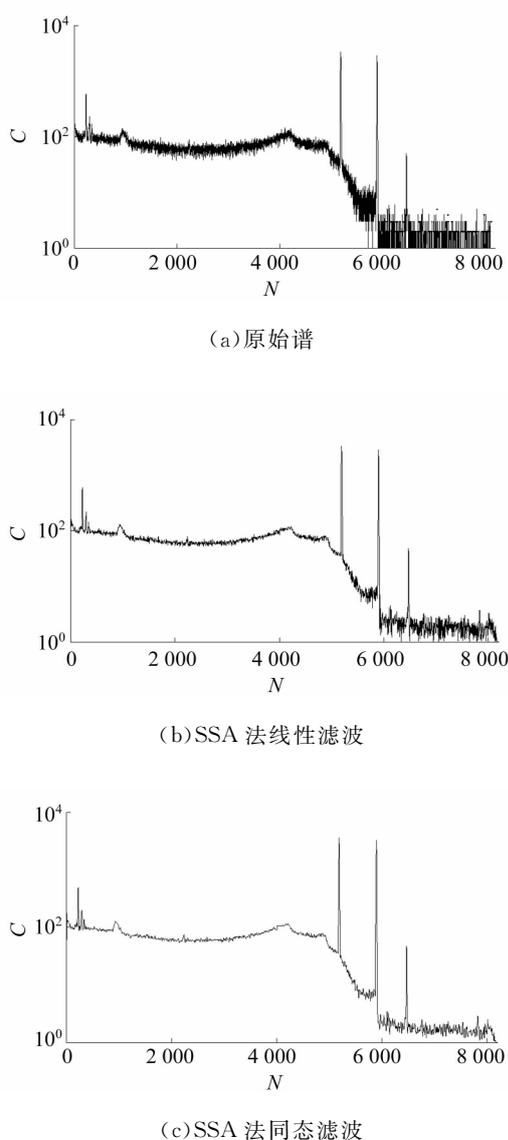
2.3 γ 能谱降噪与结果

分别采用线性滤波和同态滤波方式^[9],对实测 ^{60}Co γ 能谱进行了降噪处理,并与传统的 FFT 和 WT 降噪方法进行比较.

线性滤波是直接对谱数据进行变换或分解,然后通过选取适当的滤波参量消除噪声分量,最后通过逆变换或重构得到降噪 γ 能谱. 同态滤波则用于消除乘性噪声,首先对谱数据进行对数运算,将谱成分与噪声之间的非线性关系转换成线性关系,然后通过线性滤波消除噪声分量,最后通过指数运算得到降噪谱.

在 SSA 方法中,取轨迹矩阵嵌入维数 $L=50$,利用上述剩余噪声奇异谱相关系数法确定重构阶数. 在 FFT 滤波中,根据 γ 能谱幅频特性,将幅值小于一定阈值的傅里叶变换系数置为 0,再进行逆变换得到降噪谱^[16]. 在 WT 滤波中,选择对称性和紧支性较好的光滑小波“sym8”为小波基函数,采用小波分解和低频系数进行重构,实现降噪^[7-9]. 在确保谱线不变形的情况下,尽量提高降噪幅值阈值和小波分解层数. 在线性滤波和同态滤波中,小波分解层数分别为 2 和 3.

降噪前后的 Co1h 谱图如图 4 所示. 由图 4 可看出,SSA 法的降噪效果显著,且采用同态滤波降噪效果明显优于线性滤波.

图 4 降噪前后实测⁶⁰Co γ 能谱

Co1h~Co5h 谱降噪前后信噪比见表 1. 除 Co1h 谱的线性降噪结果外, SSA 法降噪后信噪比均大于传统降噪方法. 采用线性滤波, SSA 法降噪后的信噪比提高了 20.64%~25.58%, 整体高于传统的 FFT 法(17.89%~26.50%)和 WT 法(17.83%~26.49%). 采用同态滤波, SSA 法降噪后的信噪比提高了 31.57%~39.16%, 高于 FFT 法(21.08%~25.96%)和 WT 法(28.23%~35.50%), 获得最佳降噪效果. 而采用同态滤波降噪信噪比均大于相应的线性滤波降噪信噪比. 研究表明, SSA 法能够降低加性噪声, 通过同态滤波方式也降低了乘性噪声, 使 γ 能谱信噪比得到较大幅度提高, 较传统频域滤波法具有更强的降噪能力.

为了进一步探究 SSA 降噪法对 γ 能谱的影响, 计算了降噪前后⁶⁰Co 谱中 1 332.50 keV γ 射线特征峰(全能峰)参量. 所用峰形函数为^[17]

$$f(N) = H \exp \left[\frac{-(N - N_p)^2}{2\sigma^2} \right] + aN + b, \quad (7)$$

式中, N 为道址, H 为峰高, N_p 为峰位, a 和 b 分别为峰本底系数. 半高全宽、净峰面积及峰康比分别为

$$\Delta N_{\text{FWHM}} = 2 \sqrt{2 \ln 2} \sigma, \quad (8)$$

$$A = \sqrt{2\pi} H \sigma, \quad (9)$$

$$R_{\text{PCR}} = \frac{(H + aN_p + b)(N_{\text{CH2}} - N_{\text{CH1}})}{\sum_{N_{\text{CH1}}}^{N_{\text{CH2}}} x_i}, \quad (10)$$

式中, N_{CH1} 和 N_{CH2} 分别是 1 040~1 090 keV 能量区间的左右边界道址.

表 1 降噪前后谱信噪比及其误差

谱数据	R_{SNR0}	E_0	滤波方式	R_{SNR}			E		
				FFT	WT	SSA	FFT	WT	SSA
Co1h	18.58	8.60%	线性滤波	23.51	23.51	23.34	2.19%	2.24%	2.08%
			同态滤波	23.41	25.18	25.86	2.20%	1.37%	1.14%
Co2h	21.48	7.64%	线性滤波	26.00	25.98	26.21	2.23%	2.10%	1.91%
			同态滤波	26.43	28.07	29.89	2.03%	1.27%	0.99%
Co3h	23.42	6.71%	线性滤波	27.60	27.60	28.26	2.15%	1.83%	1.68%
			同态滤波	28.36	30.03	30.82	2.09%	1.14%	0.92%
Co4h	24.60	6.50%	线性滤波	29.70	29.69	29.94	1.66%	1.62%	1.37%
			同态滤波	29.82	32.22	33.55	1.66%	0.85%	0.60%
Co5h	25.40	7.79%	线性滤波	29.95	30.13	30.79	2.25%	1.61%	1.38%
			同态滤波	30.99	33.10	34.29	1.89%	0.85%	0.61%

降噪前后谱峰高及其误差如表 2 所示. 由表 2 可知,在线性滤波方式下,2 种传统频域滤波法对峰高无明显影响,而 SSA 降噪法对峰高几乎无影响. 在同态滤波方式下,FFT 法降噪后峰高亦无明显变化,而 SSA 法降噪后峰高略有增加,WT 法降噪后的峰高明显提高. 研究表明:FFT 属于时-频全局变换,而 γ 能谱中噪声频谱与谱成分频谱存在交叠,频域滤波过程中容易造成谱成分损失,从而使峰高降低. WT 属于时-频局域变换,在同态滤波方式下能更有效地降低乘性噪声而使峰高得到较大幅度提高^[9],但降噪效果与小波函数的对称性、连续性等密切相关,如果小波函数选择不当,容易引起谱线局部畸变. SSA 降噪法则是在相空间通过对谱数据的奇异值分解和重构实现降噪,而且噪声奇异谱与谱成分奇异谱之

间的差异明显,最优重构阶数的确定不受噪声频谱的影响. 因此,不会造成过度降噪而使峰高降低和谱线变形等现象,并且在同态滤波方式下,也可以更有效地分离和降低乘性噪声,从而使峰高有所增加.

降噪前后谱半高全宽及其误差如表 3 所示. 由表 3 可知,采用线性滤波,SSA,FFT 和 WT 3 种降噪法对全能峰半高全宽的影响均很小,尤其是 SSA 降噪法对半高全宽几乎没有影响. 采用同态滤波,FFT 法对半高全宽的影响亦很小,而 SSA 法降噪后半高全宽略有减小,WT 法降噪后半高全宽则显著减小. 结合表 2 可知,在同态滤波方式下,SSA 法与 WT 法在使峰高增大的同时使半高全宽减小,而且峰高与半高全宽的相对变化幅度基本相同.

表 2 降噪前后谱峰高及其误差

谱数据	H_0	E_0	滤波方式	H			E		
				FFT	WT	SSA	FFT	WT	SSA
Co1h	2 898.62	0.02%	线性滤波	2 891.33	2 890.39	2 898.61	0.12%	0.14%	0.12%
			同态滤波	2 897.14	3 041.18	2 918.46	0.27%	0.27%	0.10%
Co2h	5 865.49	0.17%	线性滤波	5 865.64	5 856.76	5 865.51	0.11%	0.15%	0.11%
			同态滤波	5 864.32	6 199.03	5 923.15	0.35%	0.20%	0.10%
Co3h	8 787.37	0.15%	线性滤波	8 785.97	8 663.23	8 787.31	0.12%	0.14%	0.11%
			同态滤波	8 783.55	9 243.73	8 787.66	0.82%	0.20%	0.11%
Co4h	11 681.13	0.14%	线性滤波	11 680.00	11 584.00	11 681.07	0.11%	0.13%	0.11%
			同态滤波	11 676.00	12 326.00	11 847.24	0.31%	0.22%	0.12%
Co5h	14 605.07	0.12%	线性滤波	14 603.00	14 609.00	14 604.50	0.10%	0.12%	0.09%
			同态滤波	14 600.00	15 640.00	14 846.87	0.36%	0.21%	0.11%

表 3 降噪前后谱半高全宽及其误差

谱数据	ΔN_{FWHM0}	E_0	滤波方式	ΔN_{FWHM}			E		
				FFT	WT	SSA	FFT	WT	SSA
Co1h	11.02	4.69%	线性滤波	11.02	11.01	11.03	2.53%	2.93%	2.50%
			同态滤波	11.04	10.49	10.97	4.94%	0.53%	2.10%
Co2h	10.95	3.47%	线性滤波	10.95	10.98	10.95	2.31%	2.97%	2.39%
			同态滤波	10.96	10.36	10.82	6.12%	3.78%	2.01%
Co3h	10.91	3.13%	线性滤波	10.91	11.23	10.91	2.43%	2.48%	2.34%
			同态滤波	10.92	10.39	10.79	2.71%	3.90%	2.24%
Co4h	10.94	2.95%	线性滤波	10.95	11.12	10.94	2.27%	2.68%	2.19%
			同态滤波	10.95	10.39	10.80	4.72%	4.23%	2.40%
Co5h	10.93	2.41%	线性滤波	10.93	10.93	10.93	1.97%	2.57%	1.97%
			同态滤波	10.94	10.36	10.77	3.77%	4.09%	1.91%

降噪前后谱峰康比及其误差如表 4 所示. 由表 4 可知,在线性滤波方式下,与传统频域滤波降噪方法相同,SSA 法降噪后峰康比基本保持不变. 在同态滤波方式下,FFT 法降噪后的峰康比亦保持不变,而 SSA 法降噪后的峰康比有小幅提

高,WT 法降噪后的峰康比提高幅度相对较大. 结合表 2 可知,如果考虑峰本底,峰康比的变化反映了峰高的变化,而康普顿平台没有变化. 结果表明:与传统频域滤波方法相同,SSA 法降噪不影响谱线整体分布.

表 4 降噪前后谱峰康比及其误差

谱数据	R_{PCRO}	E_0	滤波方式	R_{PCR}			E		
				FFT	WT	SSA	FFT	WT	SSA
Co1h	41.21	11.75%	线性滤波	41.19	41.20	41.23	6.67%	6.75%	6.52%
			同态滤波	41.19	43.91	41.55	6.66%	5.24%	5.16%
Co2h	41.69	8.42%	线性滤波	41.68	41.70	41.69	5.00%	4.76%	4.65%
			同态滤波	41.68	44.39	42.12	4.82%	3.73%	3.63%
Co3h	41.62	6.73%	线性滤波	41.63	41.04	41.63	4.13%	3.87%	3.70%
			同态滤波	41.61	44.02	42.07	3.71%	2.99%	2.88%
Co4h	41.46	5.86%	线性滤波	41.47	41.11	41.46	3.26%	3.25%	2.98%
			同态滤波	41.44	43.91	42.06	3.27%	2.45%	2.10%
Co5h	41.35	5.33%	线性滤波	41.36	41.36	41.35	3.17%	2.89%	2.70%
			同态滤波	41.34	43.91	42.05	3.20%	2.21%	1.92%

降噪前后峰净面积及其误差如表 5 所示. 由表 5 可知,与传统频域滤波法相同,无论是线性滤波方式还是同态滤波方式,SSA 法降噪后的净峰

面积保持不变. 说明 SSA 降噪法能够适用于后续的 γ 能谱定量分析,进一步表明 SSA 降噪法是有效的.

表 5 降噪前后峰净面积及其误差

谱数据	A_0	E_0	滤波方式	A			E		
				FFT	WT	SSA	FFT	WT	SSA
Co1h	33 946.81	0.35%	线性滤波	33 933.15	33 882.02	33 947.27	0.10%	0.23%	0.19%
			同态滤波	33 967.42	33 792.67	34 006.85	0.41%	0.43%	0.16%
Co2h	68 230.21	0.26%	线性滤波	68 218.11	68 265.26	68 229.80	0.18%	0.23%	0.18%
			同态滤波	68 247.68	68 057.71	68 058.70	0.52%	0.31%	0.16%
Co3h	101 769.98	0.24%	线性滤波	101 788.88	101 780.36	101 773.32	0.19%	0.22%	0.18%
			同态滤波	101 807.55	101 729.56	101 698.32	0.21%	0.32%	0.18%
Co4h	135 679.66	0.23%	线性滤波	135 735.24	136 916.87	135 680.80	0.17%	0.21%	0.16%
			同态滤波	135 725.88	136 010.05	135 765.92	0.36%	0.34%	0.19%
Co5h	169 489.77	0.18%	线性滤波	169 522.06	169 560.06	169 488.45	0.15%	0.20%	0.15%
			同态滤波	169 545.91	169 647.47	169 707.46	0.29%	0.34%	0.18%

3 结 论

SSA 降噪法可通过轨迹矩阵将 γ 能谱映射到相空间,进而在相空间通过奇异值分解和重构实现信噪分离,克服了传统频域滤波方法无法解

决的噪声频谱与谱成分频谱的重叠问题. 同时,由于轨迹矩阵只与待降噪 γ 能谱有关,因此,SSA 降噪法不易引起谱线变形或畸变. 剩余噪声奇异谱相关系数法可确定降噪谱的最优重构阶数,有效避免了传统方法降噪过程中存在的降噪不充分

或降噪过度现象. 由于受统计涨落的影响,原始谱的信噪比、半高全宽及峰康比等指标的误差相对较大,而降噪后误差明显减小,反映了不同降噪方法的降噪效果. SSA 降噪法对全能峰峰高几乎没有影响,因此,降噪不会影响 γ 能谱的能量线性. 综上,SSA 降噪法算法简单,具有较好的降噪性能,在采用线性滤波和同态滤波 2 种滤波方式下均可获得令人满意的降噪效果,是有效的 γ 能谱降噪方法.

参考文献:

- [1] 田晨扬,过惠平,欧阳晓平,等. 基于缓发 γ 能谱测量的铀丰度分析[J]. 原子能科学技术,2019,53(8):1502-1508.
- [2] 王崇杰,包东敏,程松,等. 核材料 γ 能谱指纹模糊识别机理研究[J]. 物理学报,2008,57(9):5361-5365.
- [3] 伍怀龙,龚建,李伟,等. 通过惰性气体氦判断核试验信息的方法[J]. 物理学报,2013,62(24):242802-1-6.
- [4] Taqi A H, Ali A M, Al-Ani L A A. Estimating the natural and artificial radioactivity in soil samples from some oil sites in Kirkuk-Iraq using high resolution gamma rays spectrometry [J]. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 2017,55(9):674-682.
- [5] Ji Y Y, Chang H S, Lim T, et al. Application of a $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ scintillation detector to in situ gamma-ray spectrometry in the environment [J]. Radiation Measurements, 2019,122:67-72.
- [6] Bu M Q, Murray A S, Kook M, et al. Characterisation of scintillator-based gamma spectrometers for determination of sample dose rate in OSL dating applications [J]. Radiation Measurements, 2018,120:253-259.
- [7] 曾晨浩,冯孝杰,段中山,等. 基于模极大值法的 γ 能谱数据处理与分析[J]. 原子能科学技术,2017,51(7):1305-1310.
- [8] 张新军,刘鸿福,张和生,等. 应用小波新阈值函数对低放射性活性炭测氦 γ 能谱的消噪[J]. 原子能科学技术,2010,44(8):897-901.
- [9] 王崇杰,范成杰,吉鹏,等. 同态滤波法消除 γ 能谱混合噪声[J]. 核电子学与探测技术,2017,37(3):323-328.
- [10] Broomhead D S, King G P. Extracting qualitative dynamics from experimental data [J]. Physica, 1986,20(2/3):217-236.
- [11] Hossein H, Rahim M, Mohammad Z, et al. On the separability between signal and noise in singular spectrum analysis [J]. Fluctuation and Noise Letters, 2012,11(2):1250014-1-6.
- [12] Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series: Introduction to this special issue [J]. Statistics and Its Interface, 2010,3(3):255-258.
- [13] Hassani H, Mahmoudvand R, Zokaei M. Separability and window length in singular spectrum analysis [J]. Comptes rendus-Mathématique, 2011,349(17/18):987-990.
- [14] Mahmoudvand R, Zokaei M. On the singular values of the Hankel matrix with application in singular spectrum analysis [J]. Chilean Journal of Statistics, 2012,3(1):43-56.
- [15] Khan M A R, Poskitt D S. A note on window length selection in singular spectrum analysis [J]. Australian & New Zealand Journal of Statistics, 2013,55(2):87-108.
- [16] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,2001:5-99.
- [17] 田东风,龚健,伍钧,等. 核材料 γ 特征谱的探测和分析技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005:44-89.
- [18] 王岩,隋思莲,王爱青. 数理统计与 Matlab 工具数据分析[M]. 北京:清华大学出版社,2006:285-287.
- [19] 肖云茹. 概率统计计算方法[M]. 天津:南开大学出版社,1994:270-271.

(下转 22 页)

Heisenberg uncertainty relation verification experiment for coherent states

JIANG Jia-tong, CHEN Yu, CHEN Xin, WU Yuan, YIN Ya-ling, CHEN Li-qing

(Central Laboratory for Physics, School of Physics and Electronic Science,

East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Experimental verification of Heisenberg uncertainty principle is difficult due to the microscopic nature of quantum theory and experiments. To tackle this problem, the Heisenberg uncertainty relation of quantum orthogonal operators from the light quantization was proposed, and the Heisenberg uncertainty principle was verified by detecting the variance of quantum orthogonal operators with the balanced zero-beat technique. The experiment results showed that the orthogonal operators of light field had minimum uncertainty relation in coherent states. Through this experiment, the students could intuitively understand Heisenberg uncertainty principle and master quantum experimental techniques, which could lay a foundation for further research on quantum technology.

Key words: quantum mechanics; Heisenberg uncertainty principle; quadrature phase operator; coherent state; balance zero-beat technique

[责任编辑:任德香]

(上接 17 页)

Denoising algorithm of gamma energy spectra based on singular spectrum analysis

ZHAO Si-wen, WU Yi, WANG Chong-jie

(School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: In order to effectively solve the overlapping problem of noise spectrum and spectral component spectrum in γ spectrum, a γ energy spectrum denoising method based on singular spectrum analysis was proposed in this paper. The basic principle of noise reduction method based on singular spectrum analysis was described and the algorithm was given. By analyzing the singular spectrum characteristics of the γ energy spectrum, a method to determine the optimal embedding dimension and the reconstruction order of the γ energy spectrum was given. The noise reduction results of the measured ^{60}Co HPGe γ energy spectrum showed that the singular spectrum analysis method could effectively separate and eliminate the additive noise and multiplicative noise of the γ energy spectrum, and greatly improve the signal-to-noise ratio of energy spectrum. Compared with the traditional method, this method was simple and had strong reduction ability, less undetermined parameters, and could be an effective method for γ spectrum noise reduction.

Key words: gamma spectrum; noise reduction; singular value decomposition; linear filtering; homomorphic filtering

[责任编辑:任德香]