

文章编号: 1007-4627(2014)03-0407-04

一种折中的小波阈值方法对 γ 能谱平滑处理的研究

颜瑜成^{1, 2}, 刘明哲^{1, 2}, 刘福至^{1, 2}

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;
2. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610059)

摘要: 采用小波软、硬阈值函数折中后的小波阈值方法对天然放射性环境下 γ 谱数据进行平滑处理。通过 Matlab 数据分析软件, 分析对比了五种不同的平滑去噪方法: 五点平滑法、傅里叶变换法、小波软阈值法、小波硬阈值法, 以及折中的小波阈值方法。结果表明: 折中的小波阈值方法在反映 γ 能谱特征的峰本比和峰总比分别为 7.1609, 0.3945, 平滑去噪效果要明显优于其他四种方法, 能最大程度地保留原始信号特征, 具有较高的应用价值。

关键词: 小波阈值; 平滑去噪; γ 能谱; Matlab 程序

中图分类号: TL84 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.03.407

1 引言

核衰变、 γ 能谱仪电子学元器件噪声以及 γ 射线散射会给谱数据的测量造成很大的统计涨落误差, 这种误差不仅会影响全能峰峰位的确定和峰面积的计算, 而且也会把弱峰给掩盖, 导致核素的漏判, 因此会给 γ 能谱的定性定量分析带来困难^[1]。本文所用 γ 谱数据为天然放射性环境下用 NaI(Tl) 探测器对 ¹³⁷Cs 源测量所得。由于 NaI(Tl) 探测器分辨率低, 会使测量的 γ 能谱全能峰叠加在康普顿散射坪以及由衰变、散射和电子元器件产生的统计涨落上, 将会影响特征峰峰位和形态。因此, 在天然放射性的能谱分析中, 谱线的平滑处理显得尤为重要。

为减少统计涨落对能谱测量带来的误差, 尽可能的保留能谱特征峰的全部重要特征, 须对实测 γ 能谱原始数据进行光滑处理。目前用来研究谱平滑处理的方法一般有最小二乘拟合法、多点均滑重心法^[1]、傅立叶变换法、小波变换法^[2]、SNIP 法^[3]、神经网络法^[4]等。本文对小波软、硬阈值方法进行了折中改进后并应用于 γ 谱数据的平滑处理, 并对比了前四种传统方法的优缺点, 结果显示了改进的折中小波阈值

方法在反映 γ 能谱特征参数上, 平滑效果要明显优于其他四种方法, 能最大程度地保留原始信号特征。

2 小波平滑原理

由于小波变换能同时在频域和时域内对信号进行分析, 在低频时具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频时具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 因此小波变换对信号的处理具有自适应性^[5]。它能够有效地区分信号中的突变部分和涨落噪声, 从而实现信号的消噪。

Dohono 等^[6-7]在小波变换的基础上提出了阈值去噪的方法: 当小波系数 $W_{j,k}$ 小于某一个临界阈值时, 可认为 $W_{j,k}$ 主要由噪声引起(舍弃); 当 $W_{j,k}$ 大于这个临界阈值时, 认为 $W_{j,k}$ 主要是由信号引起(保留)。再用新的小波系数对小波函数进行重构去噪后的信号。

硬阈值函数:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| < \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| \geq \lambda \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-11-29; 修改日期: 2014-02-15

基金项目: 国家高技术发展计划项目(2012AA063501); 国家自然科学基金(41025015, 41274109)

作者简介: 颜瑜成(1985-), 男, 湖南耒阳人, 硕士, 从事核仪器、matlab 人工智能、蒙特卡罗粒子输运研究;

E-mail: yanyucheng1234@126.com

通信作者: 刘明哲, E-mail: liumz@cdu.edu.cn.

软阈值函数:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

其中: $W_{j,k}$ 为小波系数; λ 为阈值; $\lambda = \sigma \times \sqrt{2 \lg N}$; σ 为噪声标准差; N 为信号长度。噪声标准差 $\sigma = \text{Median}(|x|) / 0.6745$, 其中 $\text{Median}(|x|)$ 为小波多分辨率分解系数中值^[5]。

3 改进的小波函数

一个含噪的一维信号模型可表示为如下形式:

$$X_{j,t} = S_{j,t} + \sigma \times e_{j,t}, \quad (j=0, 1, \dots, N-1), \quad (3)$$

式中: $X_{j,t}$ 为含噪信号; $S_{j,t}$ 为原始信号; σ 为噪声强度; $e_{j,t}$ 为噪声信号。由于噪声 $e_{j,t}$ 的原因可能使得 $|X_{j,t}| > |S_{j,t}|$, 为使 $|X_{j,t} - S_{j,t}|$ 最小, 要求 $X_{j,t}$ 的取值在 $S_{j,t} - \lambda$ 和 $S_{j,t}$ 之间将使得到的的小波系更接近 $S_{j,t}$ 。利用上述软硬阈值算法特点进行了折中的改进, 改进后的小波阈值函数为

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k}) \left[|w_{j,k}| - \frac{\lambda}{e^{|(w_{j,k}-\lambda)/a|} + 1} \right], & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

式中: 参数 a 为大于 0 的实数, 可根据具体情况调整。容易验证, 当 $a \rightarrow 0$ 式 (4) 接近硬阈值函数; 当 $a \rightarrow \infty$, 式 (4) 接近软阈值函数, 可见改进后的阈值函数是一个介于软、硬阈值函数之间的小波函数。通过调整参数 a 的值, 可以得到一个实用有效的小波阈值函数^[8]。

可以证明式 (4) 是以 $\hat{W}_{j,k} = W_{j,k}$ 为渐近线的, 随着 $X_{j,t}$ 的增大, $\hat{w}_{j,k}$ 逐渐接近 $X_{j,t}$, 从而减少了软阈值函数中 $\hat{w}_{j,k}$ 之间的恒定偏差的缺点。此外, 式 (4) 高阶还可求导, 对各种数学形式的变换更加灵活, 所以改进后小波阈值函数相比传统的软、硬阈值函数更加优越^[8]。这里采用的阈值 λ 取值为 $\sigma \sqrt{2 \lg(M)}(1 + 1/j)$, 其中 M 为信号长度, j 为分

解尺度。

4 平滑结果及数学评价

利用大型科学计算软件 Matlab 进行数据分析处理, 实验的能谱数据在天然放射性环境下用 NaI(Tl) 晶体探测器对 ¹³⁷Cs 源的 γ 能谱进行测量所得。能谱的横坐标为能量 (道址), 分为 512 道。纵坐标为计数。对该能谱采用傅立叶变换法、五点平滑法、小波软阈值法、小波硬阈值法方法以及折中改进后的小波阈值函数法进行全谱处理。改进的小波阈值法采用 sym7 小波为母小波, 分解层数为五层。六种方法去噪处理后得到的结果如图 1 至图 6 所示。

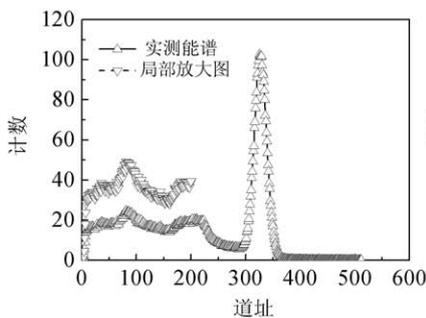


图 1 实测能谱

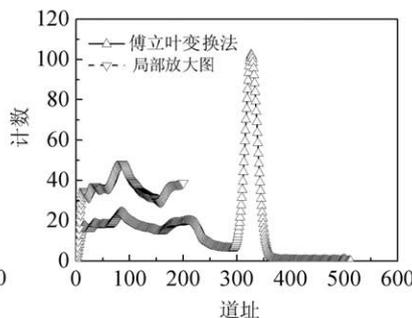


图 2 傅立叶变换法

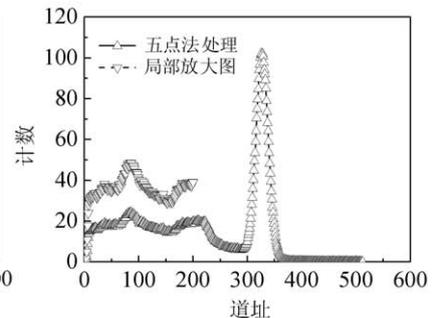


图 3 五点平滑法

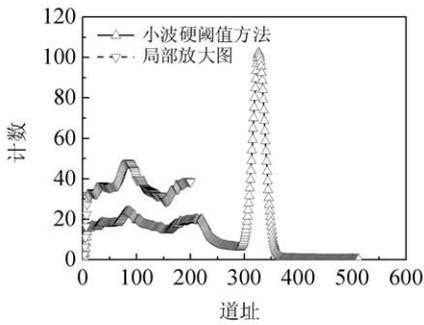


图 4 小波硬阈值法

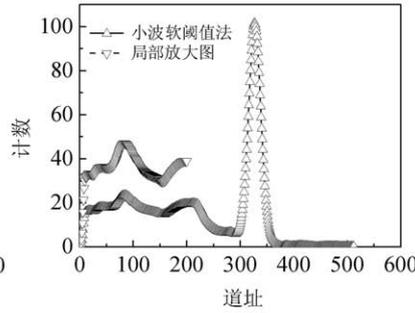


图 5 小波软阈值法

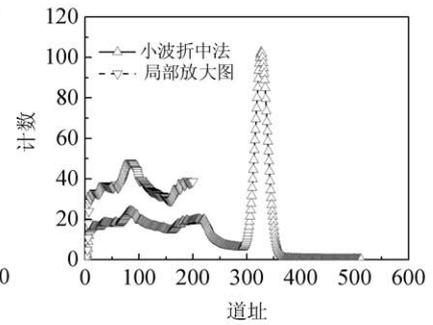


图 6 小波折中法

在进行峰本比求解时, 为了能尽量多地选择全能峰区间内的计数, 提高有效计数率。采用高斯分布 99.7% 的置信概率区间来确定全能峰峰区边界。对于一个标准的高斯函数, 分布在 $\mu \pm \sigma$ 的区间内的概率为 68.3%, $\mu \pm 2\sigma$ 区间内的概率为 95.4%, $\mu \pm 3\sigma$ 的区间内的概率为 99.7%。因此全能峰区间范围内如果满足 $\mu \pm 3\sigma$ 这个区间, 就可以包含近 100% 的有效计数^[9]。

γ 能谱仪的能量分辨 FWHM 有关系: $\sigma = \text{FWHM}/2.35482$, σ 是表征峰形宽度的特征量。

γ 能谱数据处理后的峰-本比、峰面积、本底分别见表 1。

由表 1 的数据可以看出, 这五种方法在减少随机噪声上平滑效果都不一样, 使用傅立叶变换、小波软阈值法、小波硬阈值法方法处理后, 峰本比、峰总比较低, 丢失的峰信息也较高; 采用五点平滑法处理之后的能谱曲线, 峰丢失的信息较少, 峰面积、峰-本比和峰总比也均较理想, 要明显优于其他三种传统的噪声消除方法。而使用改进后的小波阈值函数处理的峰面积、峰-本比最大, 峰总比是最高的, 因此特征峰丢失的信息相对也较少。说明应用改进后的阈值函数在天然本底 γ 谱线中准确提取核素信号具有非常重要的意义。

表 1 五种去噪方法的定量分析结果

评价参数	原始能谱	五点平滑	傅立叶变换	小波硬阈值	小波软阈值	改进小波阈值($a=10$)
本底	369.7250	359.8171	353.0033	358.5506	361.5986	364.8865
峰面积	2583.8139	2571.4329	2514.8658	2552.5931	2563.0472	2612.9158
峰本比	6.9885	7.1465	7.1242	7.1192	7.0881	7.1609
峰总比	0.3942	0.3943	0.3943	0.3942	0.3942	0.3945

5 结论

针对统计涨落引起的实验误差, 可用来对获取的谱数据进行平滑处理的方法也较多, 利用小波软阈值法、小波硬阈值法的特点对小波阈值函数进行了折中的改进, 并用改进后的小波函数对天然放射性环境中 ^{137}Cs 源的 γ 能谱进行分析。实验的结果表明, 改进后的小波阈值函数有着比傅立叶变换、小波软阈值函数、小波硬阈值函数、五点平滑法更好地平滑去噪效果, 能很好地降低由统计涨落带来的实验误差, 更适合低分辨率的 NaI(Tl) 晶体在天然放射性环境中 γ 能谱数据的消噪处理。

参考文献:

- [1] ZHANG Xinjun, LIU Hongfu, ZHANG Hesheng. Atomic Energy Science and Technology, 2010, **44**(8): 897. (in Chinese)
(张新军, 刘鸿福, 张和生. 原子能科学技术, 2010, **44**(8): 897.)
- [2] SHI Dongsheng, DI Yuming, ZHOU Chuanlin. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, **26**(6): 134. (in Chinese)
(史东生, 弟宇鸣, 周春林. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(6): 134.)
- [3] WU Heixi, LIU Qingcheng, YANG Bo, et al. Nuclear Techniques, 2010, **33**(7): 513. (in Chinese)

- (吴和喜, 刘庆成, 杨波, 等. 核技术, 2010, **33**(7): 513.)
- [4] ZHENG Kun, SUN Guangmin, LIAO Shengyu, *et al.* China Sciencepaper, 2013, **8**(4): 339. (in Chinese)
(郑鲲, 孙光民, 廖晟宇, 等. 中国科技论文, 2013, **8**(4): 339.)
- [5] AN Yun. MATLAB-Based Wavelet Analysis for Seismic Signal DenosingResearch[D]. Taiyuan: North University of China, 2012(6): 18. (in Chinese)
(安蕴. 基于MATLAB的小波分析用于地震信号的去噪研究[D]. 太原: 中北大学, 2012(6): 18.)
- [6] DONOHO D L. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, **41**(3): 613.
- [7] DONOHO D L, JOHNSTONE J M. Journal of American Stat Assoc, 1995, **90**: 1200.
- [8] GUO Xiaoxia, YANGHuizhong. CAAI Transactions on Intelligent Systems. 2008, **3**(3): 222. (in Chinese)
(郭晓霞, 杨慧中. 智能系统学报, 2008, **3**(3): 222.)
- [9] LIU Yonggang. Study on γ Spectral Data Analysis Methods[D]. China University of Geosciences(BeiJing), 2011(5): 37. (in Chinese)
(刘永刚. γ 能谱谱数据分解方法研究[D]. 北京: 中国地质大学. 2011(5): 37.)

Study of Smooth Processing to γ Energy Spectrum by Using an Average Wavelet Threshold Method

YAN Yucheng^{1, 2}, LIU Mingzhe^{1, 2}, LIU Fuzhi^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Nuclear Technology and Automation Engineering College, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: This work illustrated a wavelet threshold method by combining soft and hard threshold function of wavelet for γ energy spectrum under the natural radioactive condition as a kind of smooth processing. By using Matlab Program, we compared five different smooth de-noising methods including smoothing by five points, the Fourier transform method, soft and hard threshold method and average wavelet threshold method. We showed that the average wavelet threshold method can reflect the ratio of the peak and the peak-to-total ratio of characteristic peak of γ energy spectrum as 7.1609 and 0.3945, respectively. Thus, this method is superior to the other four methods in de-nosing, and it is able to keep the original signal properties with the largest extent and has a high value of application.

Key words: wavelet threshold; smooth de-nosing; γ energy spectrum; Matlab program

Received date: 29 Nov. 2013; **Revised date:** 15 Feb. 2014

Foundation item: National High Technology Research and Development Program of China(2012AA063501); National Natural Science Foundation of China(41025015,41274109)

Corresponding author: LIU Mingzhe, E-mail: liumz@cdut.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>