

改进辛普森-SNIP算法在航空 γ 仪器谱 本底扣除中的应用

杨 津 李 飞 葛良全 张庆贤 熊茂淋 孙 坤 谷 懿

(成都理工大学 核技术与自动化工程学院 成都 610059)

摘要 航空 γ 能谱测量中的本底计数主要是由于康普顿散射效应、 γ 射线在探测器灵敏体积内产生的小角度散射、电子噪声等干扰因素使能谱的能量区间的计数出现偏差。本底扣除是航空 γ 测量和解谱工作的重要任务之一。统计敏感的非线性迭代剥峰(Statistics-sensitive Nonlinear Iterative Peak-clipping, SNIP)算法具有简单而稳定的数学结构,自20世纪80年代起便被应用在 γ 仪器谱本底扣除中。但原始SNIP扣本底算法易受到峰宽参数的影响,且迭代过程中的收敛速度缓慢,导致运行时间延长。因此本文基于具有较高代数精度的辛普森公式的思想,对原始算法中的第二步SNIP迭代过程进行改进。结果表明:改进后的SNIP算法完整保存了原始算法简洁、高效的优点,同时选择了合适的变换宽度,准确度可提高41.8%,算法整体运行效率可提高2.53%,具有更优秀的本底扣除效果。

关键词 航空 γ 能谱, SNIP算法, 辛普森公式, 本底扣除

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.060401

Application of improved Simpson-SNIP algorithm in background subtraction of airborne gamma-ray instrument spectrum

YANG Jin LI Fei GE Liangquan ZHANG Qingxian XIONG Maolin SUN Kun GU Yi

(The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract [Background] The background count in airborne gamma-ray spectrum measurement is mainly caused by Compton scattering effects, small angle scattering of gamma rays in the sensitive volume of the detector and interference caused by electronic noise in the energy range of the energy spectrum. Background subtraction is one of the important tasks of instrument spectral resolution in airborne gamma-ray measurement. [Purpose] This study aims to propose an improved background subtraction method to achieve accurate and efficient spectral analysis of airborne gamma-ray instrument spectrum. [Methods] As one of the best background subtraction algorithms, the statistics-sensitive nonlinear iterative peak-clipping (SNIP) algorithm with simple mathematical structure and reliable background subtraction effect, was easily affected by the parameters of peak width, and lead to longer running time due to slow convergence speed of iterative process. Motivated by the idea of the Simpson formula with higher algebraic precision, the second step of the SNIP iteration in the original algorithm was improved by using three

国家自然科学基金(No.41774147)、国家重点研发计划(No.2017YFC0602105)、四川省科技支撑计划项目(No.2018GZ0004)资助

第一作者: 杨津, 男, 1995年出生, 2018年毕业于成都理工大学工程技术学院, 现为硕士研究生, 研究领域为核技术及其应用研究

通信作者: 葛良全, E-mail: glq@cdut.edu.cn

收稿日期: 2020-02-18, 修回日期: 2020-04-05

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41774147), National Key Research and Development Plan (No.2017YFC0602105), Sichuan Science and Technology Support Program Project (No.2018GZ0004)

First author: YANG Jin, male, born in 1995, graduated from The Engineering Technical College of Chengdu University of Technology in 2018, master student, focusing on nuclear technology and its application

Corresponding author: GE Liangquan, E-mail: glq@cdut.edu.cn

Received date: 2020-02-18, revised date: 2020-04-05

points of interval bisection for integral interpolation. Comparison of SNIP algorithm before and after the improvement was performed for background subtraction of airborne gamma-ray spectrum with different iteration times and appropriate width of transformation. **[Results]** The comparison results show that the accuracy and the overall operating efficiency of the improved algorithm are improved by 41.8% and 2.53%, respectively, compared with the original SNIP algorithm. **[Conclusions]** The improved Simpson-SNIP algorithm achieves fast convergence speed and better accuracy of calculation results while preserves the advantages of simplicity and efficiency of the original, hence better background deduction effect.

Key words Airborne gamma-ray, SNIP algorithm, Simpson, Background subtraction

航空 γ 能谱测量(Airborne Gamma-ray Spectrometry Survey, AGS)是指将航空 γ 能谱仪系统安装在飞机、飞艇或其他飞行器上,测量地空界面的 γ 射线能谱,从而获得地表介质中放射性铀、钍、钾等核素的含量(比活度)。该方法也可以应用在贵金属矿、稀土矿、多金属矿床等与放射性核素相关的其他矿产的普查上^[1];近年来被广泛应用于岩性地质填图、地下水资源搜寻、放射性环境污染监测等诸多方面^[2-4]。通过航空 γ 仪器谱的道址-计数,可以计算当前谱线反映的放射性核素的种类和含量。因此,航空 γ 仪器谱的解谱工作一直是该领域研究的重点和难点。其中对全谱的本底扣除是解谱过程中最重要的步骤之一^[5]。本底扣除的可信度和精确度将直接影响到后续的寻峰、峰面积计算、核素含量反演等。

理想的扣除本底方法应满足以下特征:1)原理简单、运算快速且本底扣除的设定参数少;2)计算机能进行快速自动处理且运行成本低;3)能有效扣除因康普顿效应对谱峰计数造成的影响。针对散射本底扣除这一步骤,国内外提出了大量方法,其中包括统计敏感的非线性迭代剥峰算法(Statistics-sensitive Nonlinear Iterative Peak-clipping, SNIP)及其相关衍生算法^[6]、傅里叶变换法^[7-8]、剥峰法^[9]、迭代法^[10]等。已知最简便的方法是线性法,即将能量特征峰的两波谷用一条直线连接,将其视为基线,基线以下为本底部分,但该方法会将有效计数当作本底扣除,相对误差大,只适用于粗略估计。SNIP方法被认为是其中的一种较为理想的选择,因为它具有原理简单、运行速度快、成本低等优点,国外核数据计算系统中也已将它运用于全谱本底评估和扣除。张庆贤等^[11]结合SNIP本底扣除方法与傅里叶变换低通滤波方法提出了傅里叶变换本底逐步逼近法。然而,SNIP算法容易受到峰宽参数的影响,采用固定峰区宽度进行本底扣除会带来较大的误差;其次,算法迭代过程中的收敛速度缓慢,导致运行时间延长。因此,本文基于具有较高代数精度的辛普森公式的思想,针对原始算法中的不足,提出了新的

改进方法,并将其应用于航空 γ 仪器谱本底扣除中。改进后的SNIP算法在保留原始算法简洁、高效的优点的同时,减少了迭代次数,提高了运行效率,使得谱峰的本底扣除效果和准确度进一步改善。

1 本底来源分析

通常而言,本底是指除被测量的放射源之外的其他能够在能谱区间造成计数的干扰因素,如放射性污染、宇宙射线及仪器的电子学噪声等。本底扣除是任何辐射测量中不可避免的问题,如果要求提高放射性核素含量和放射性活度分析的准确性,则必须有效地识别和扣除与全能峰面积无关的计数^[12]。

γ 能谱中的本底主要来自康普顿散射效应和 γ 射线在探测器灵敏体积内产生的小角度散射以及其他干扰因素在能谱的能量区间造成的无用计数^[13]。由于 γ 射线同物质发生光电效应、康普顿散射和电子对效应等一系列相互作用,当 γ 射线同周边散射和探测器自身发生散射,产生能量更低的散射光子和反冲电子^[14]。当散射光子被探测器探测或者散射光子逃离探测器时,输出的 γ 谱中会出现康普顿平台^[15]。此外一些外在的环境因素,例如环境中的放射性核素、电子仪器引起的噪声、宇宙射线、电磁干扰等会在能谱中产生环境本底^[16-17]。而放射源的内在因素会导致放射性本底的出现,因为在放射源中除了待测核素外,还存在大量其他的无关核素,如果这些核素也有放射性,就会产生计数干扰^[18]。在对 γ 能谱进行分析的过程中,散射本底加大了 γ 能谱的复杂程度,使得一些弱全能峰难以被识别,从而降低能谱分析数据的精度^[19]。在 γ 能谱的分析过程中,核心问题是要提高能谱仪的测量精度,其关键在于选择合适的本底扣除方法,才能有效抑制康普顿散射对谱线的影响。

2 改进型辛普森-SNIP方法

2.1 SNIP算法及其改进

目前,SNIP算法被认为是最优的本底扣除算法

之一。在1988年,Ryan等^[20]首次提出SNIP算法扣除 γ 能谱本底的原理,但SNIP算法在细节描述方面,很大程度受到峰区宽度参数的影响,当选用不同的参数的时候,扣除本底的效果存在差异。随后Morháč等^[21]在1997年运用LLS运算符(taking the Square root and using the Ln operator twice)改进了在弱峰下的SNIP算法,在运用SNIP算法之前对每一道址的能谱计数进行变换。在2009年,Morháč等^[22]将原始SNIP算法中的函数用高阶滤波函数替代,来缓解因将原始SNIP算法应用于不同能量区时,固定窗宽相同而产生的本底扣除误差,从而得到一个更精确的本底扣除效果。2012年,尹旺明等^[23]通过借助半峰全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)刻度对SNIP滤波窗宽度进行自适应调整,进一步解决固定窗宽带来的影响。2019年,Li等^[24]针对SNIP算法的演变给出了准确评价,提出新的算法演变思路,并指出基于SNIP的改进算法,都在避免因变换宽度而出现扣除本底过程中在峰的高能端与低能端出现的较大误差。而在SNIP光滑的本身,可以采取迭代的思想优化。

利用SNIP算法进行本底扣除,求解净峰面积主要分为4个过程。首先需要对能谱的每一道址计数变换,采用LLS算符(式(1)),通过自然对数运算压缩计数范围,计算高计数谱线,同时平方根运算可以提取弱峰信息。

$$V(i) = \ln[\ln(\sqrt{y(i)} + 1) + 1] \quad (1)$$

式中: i 表示道址; $y(i)$ 表示 i 道址的计数; $V(i)$ 表示经LLS运算后的变换值。

其次,利用迭代的方式,依次计算出 $V_1(i)$ 、 $V_2(i)$ 、 $\dots$ 、 $V_m(i)$ 。假设迭代到 p 次,则通过比较当前 $V_{p-1}(i)$ 与 $V_{p-1}(i+p)$ 和 $V_{p-1}(i-p)$ 的平均值的大小,取两者中较小值作为下一次的迭代值(式(2))。

$$V_p(i) = \min \left\{ V_{p-1}(i), \frac{1}{2} [V_{p-1}(i+p) + V_{p-1}(i-p)] \right\} \quad (2)$$

式中: p 表示第 p 次迭代,即从1开始每次迭代运算后加1直到等于给定的 m 值为止(变换窗宽逐增法); $V_p(i)$ 表示第 p 次迭代的LLS变换值。

迭代完毕后,再通过逆LLS变换(式(3)),求得本底谱数据。即作式(1)的逆运算:对变换值 $y(i)$ 使用两次以 e 为底的指数运算,再进行求平方。

$$b(i) = [e^{e^{V(i)}} - 1]^2 - 1 \quad (3)$$

最后,用原始谱数据减去本底谱数据,得到 γ 能谱的净峰计数谱(式(4))。

$$n(i) = y(i) - b(i) \quad (4)$$

本底扣除方法示意图如图1所示。

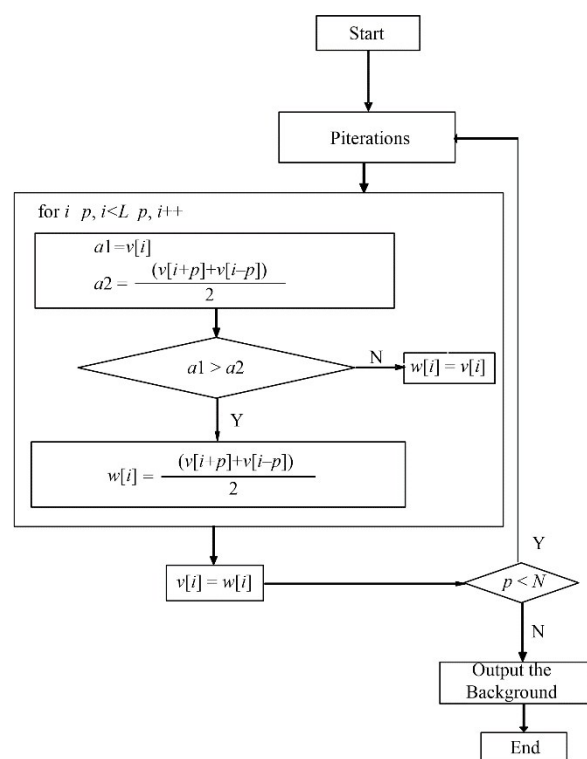


图1 SNIP本底扣除方法示意图
Fig.1 The schematic diagram of SNIP background subtraction algorithm

在第二步SNIP算法迭代的过程中,实质利用的是矩形公式的思想。虽然计算简单,方法可靠,但是收敛速度太慢。本文采用辛普森公式的思想,即利用区间二等分的三个点来进行积分插值,其科特斯系数分别为1/6、4/6、1/6,由此来替代第二步的SNIP迭代计算。由于辛普森公式具有更高的代数精度,计算结果的准确度较之SNIP迭代更优秀。在迭代过程中,设定步长为单位距离,经过LLS转换的数值为对应的函数值(式(5))。

$$V_p(i) = \min \left\{ V_{p-1}(i), \frac{1}{6} [V_{p-1}(i+p) + 4 \times V_{p-1}(i) + V_{p-1}(i-p)] \right\} \quad (5)$$

2.2 测试数据

本文采用XPG-3000A航空 γ 能谱勘查系统的实测数据。系统采用两箱探测器,每箱由两条40 cm×10 cm×5 cm阵列式NaI晶体探测器组成。单晶体能量分辨率在 ^{137}Cs 的0.661 MeV<8.0%,能谱峰漂(^{208}Tl 的2.62 MeV)<0.5道。能量范围最大1~10 MeV,最大线性计数率可达200 ks⁻¹(kilo counts per second),每道最高计数2⁶⁴。

应用 XPG-3000A 系统对 ^{137}Cs 人工核素源进行测试响应。 ^{137}Cs 源活度为 9 795 Bq, 为了更好体现特征 γ 信息, 采用探测器近距离测量的方式, 即雷达高度为 0 m。由于闪烁探测器的阵列式结构, γ 射线与物质反应在探测器内部的电子沉积情况不尽相同, 因此采用不同的探测点位分析, 并记录谱线数据。每次实验测量时间为 200 s, 总测量次数为 50 次。

3 结果与讨论

Morhác 等^[21]在 1997 年提出单峰净峰计数保留率 r 和本底扣除率 t 两个系数, 用于评价算法的本底扣除效果。

$$r = \frac{\text{PNC}}{\text{PNC}_0} \times 100\% \quad (6)$$

$$t = \frac{\text{PNC}}{\text{PTC}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: PNC (Peak Net Counts) 为扣除本底后的净峰计数; PNC_0 为未扣除本底的净峰计数; PTC (Peak Total Counts) 为扣除本底后的总峰计数。

本文采用的是 ^{137}Cs 放射性核素的特征航空 γ 谱数据, 其特征峰对应能量为 0.661 MeV。在确定 m 值的时候, 一般采用公式:

$$W = 2 \times m + 1 \quad (8)$$

式中: W 表示滤波窗的宽度, 即变换宽度; m 为 SNIP 迭代的次数。对于不同宽度 W 的单能峰来说, m 值取在 $(W-1)/2$ 附近, 能获得最佳的谱峰本底扣除效果, 且不会造成谱峰形状的改变。如图 2 所示, 本文运用 SNIP 算法对谱线进行自适应扣除, 先确定特征峰峰位道址为 393 道和谱峰区间为 355~433 道, 再根据特征峰的峰区确定 SNIP 的迭代次数。

由图 2, 迭代次数会影响谱线的本底的剥离结果, 当迭代次数 $m=7$ 时, 会导致原始谱出现“过度剥离”现象, SNIP 法能削弱本底对特征峰的贡献, 并减少本底干扰因素(如本底峰、屏蔽材料产生的特征 X 射线等)的影响, 但同时过度削减了全能峰面积; 当

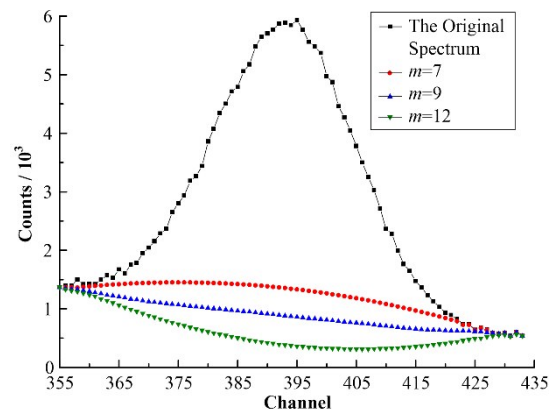


图2 不同迭代次数下 SNIP 本底扣除效果
Fig.2 Background subtraction effect shown on spectrum for SNIP algorithm with different iteration times

迭代次数 $m=12$ 时, 谱线的本底扣除会出现“欠剥离”现象, SNIP 方法不仅不能有效抑制本底计数的影响, 还会因本底扣除不彻底影响到净峰计数。由此, 当迭代次数 $m=9$ 时最为合理, 能够有效抑制康普顿散射对谱线的影响。

为了验证改进算法和原始的 SNIP 算法的本底扣除效果, 本文引用了近年来常用的剥峰法^[25-26], 同时作为本底扣除效果的参照。为减少剥峰法的剥离次数, 提高运行效率, 在剥离前对谱数据进行取对数, 剥峰后, 反变换可得到本底的形状。由于核素活度和元素含量的定量分析与相应特征峰的净峰面积有很直接的关系, 故本文采用这三种方法对谱线进行本底扣除后得到特征峰谱线(图 3), 并通过对比扣除本底后得到的特征峰面积与实际净峰面积的平均相对误差来评价本底扣除效果(表 1)。图 3 中曲线由上至下分别表示原始谱线用高斯函数拟合后的特征峰、经过原始 SNIP 计算得到的净计数峰、改进 SNIP 计算后的净计数峰以及经剥峰法处理得到的净计数峰。最后任意选取 15 次不同时间下测得的谱线, 通过单峰净峰计数保留率 r 和本底扣除率 t 两个系数, 用于进一步评价原始 SNIP 算法、改进 SNIP 算法以及剥峰法这三种算法的本底扣除效果(表 2)。

通过比较三种方法得出的峰面积与实际特征峰

表1 经本底扣除后得到的特征峰面积以及平均相对误差
Table 1 The characteristic peak area and relative error table obtained after deducting from the background

不同扣本底算法 Different background deduction algorithms	特征峰 0.661 MeV (道址 355~433) Characteristic peaks (Channel 355~433)	
	峰面积计数范围 Peak area counting range	平均相对误差 Mean relative error / %
实际峰面积 Actual peak area	149 605~149 651	
原始 SNIP 法 Original SNIP algorithm	160 980~161 022	7.60
改进 SNIP 法 Improved SNIP algorithm	156 222~156 264	4.42
剥峰法 Stripping peak algorithm	135 058~135 103	-9.72

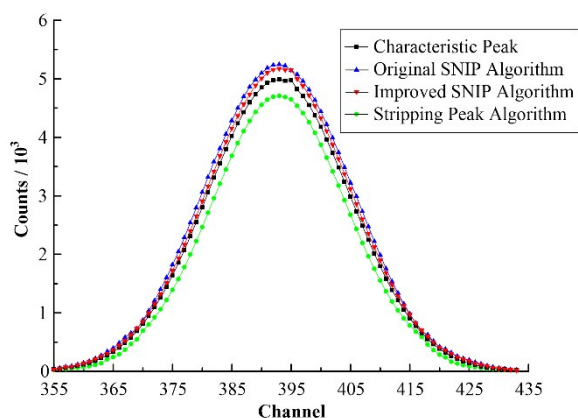


图3 扣除本底后的净计数峰
Fig.3 The comparison of the two background subtraction algorithms

面积的平均相对误差,由表1可知,采用原始SNIP法、改进SNIP法、剥峰法得出的峰面积的平均相对误差分别为7.60%、4.42%、-9.72%,改进方法的准确度较原始SNIP提高了41.8%。由表2可知,在本底扣除效果上,改进SNIP算法的 r 范围为97.79%~99.83%,原始SNIP算法的 r 范围为96.98%~99.45%,剥峰法的 r 范围为96.51%~99.18%,平均值分别为98.71%、98.29%、97.93%。改进SNIP算法的 t 范围为96.59%~99.47%,原始的SNIP算法的 t 范围为95.69%~98.78%,剥峰法的 t 范围为94.73%~98.76%,平均值分别为97.87%、97.15%、97.06%。通过对比,证明了在本文中改进的SNIP算法对单峰的净计数保留和本底扣除方面相对原始SNIP算法有细小提升,对特征峰的本底扣除效果最好,但两种方法的评

价系数 r 和 t 均超过95%,具有足够高的精度,而剥峰法在该方面要稍次于这两种方法。

SNIP算法最大的优势是运算简单、迅速,因此需要对改进的SNIP算法的工作效率做评价。通过记录改进前后两种算法的迭代次数,其中原始的SNIP算法的最优迭代次数为12次,而基于辛普森公式迭代的改进型SNIP算法的最优迭代次数仅为9次,相对于原始的SNIP算法减少了三次,有一定的提升。进一步通过tic-toc的计时方式对两种算法的运行时间进行评价。

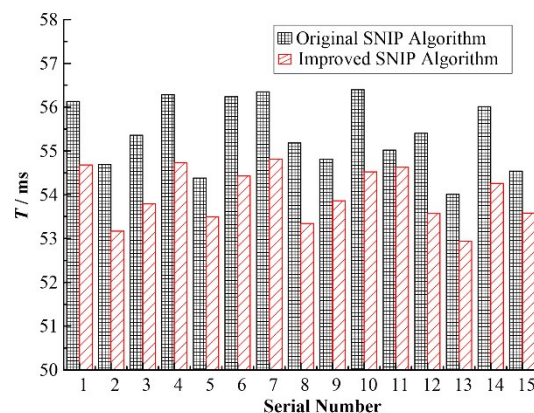


图4 比较SNIP算法改进前后的运行时间
Fig.4 Running time comparison before and after the SNIP algorithm improvement

如图4所示,得到改进SNIP算法运行时间为53.99 ms,而原始SNIP算法运行时间为55.39 ms,从对比中可以发现,改进型SNIP算法比原始SNIP算法的运行效率提高了2.53%,但仍然有较高的运算速度。

表2 三种算法本底扣除评价系数
Table 2 The evaluation coefficient of background subtraction of the three algorithms

编号 Serial number	改进SNIP算法 Improved SNIP algorithm		原始SNIP算法 Original SNIP algorithm		剥峰法 Stripping peak algorithm	
	$r / \%$	$t / \%$	$r / \%$	$t / \%$	$r / \%$	$t / \%$
1	97.79	97.94	97.61	97.21	97.42	96.63
2	98.64	98.43	97.87	97.53	97.59	96.86
3	97.92	96.84	96.98	96.78	96.51	96.96
4	98.91	96.75	98.73	95.69	98.28	94.73
5	99.70	97.51	98.86	96.67	98.35	97.38
6	98.86	99.47	98.58	98.78	98.27	98.21
7	99.23	98.68	98.74	96.34	98.31	95.13
8	97.89	97.86	97.47	97.43	97.23	97.77
9	98.45	96.59	98.29	96.26	97.92	96.03
10	99.83	98.68	99.45	98.63	99.18	98.76
11	98.87	97.92	98.71	97.05	98.28	97.87
12	97.93	98.83	97.76	98.09	97.51	98.66
13	98.67	96.97	98.63	96.70	98.07	96.39
14	98.79	97.69	97.87	96.81	97.64	97.57
15	99.14	97.84	98.80	97.35	98.33	96.98

4 结语

本文利用辛普森公式替换 SNIP 算法中的迭代公式,对 SNIP 算法进行改进并应用在航空 γ 探测的仪器谱本底扣除中,并得到以下结论:

1)通过比较原始 SNIP 算法、改进 SNIP 算法以及剥峰法得出的峰面积与实际特征峰面积的平均相对误差,发现改进 SNIP 法的相对误差为 4.42%,其准确度相比于原始算法提高了 41.8%。

2)对比三种方法的评价系数,证明改进的 SNIP 算法对单峰的净计数保留和本底扣除方面相对原始 SNIP 算法有细小提升,本底扣除效果更准确,且改进前后的两种算法在该方面均优于剥峰法。

3)在实际应用中,改进 SNIP 算法完整保存了原始算法简洁、高效的优势,同时选取了合适的变换宽度来达到缩减误差的效果,且最优迭代次数减少三次,运行效率提高了 2.53%。

4)本文通过对算法的改进,在完成 γ 谱预处理工作的同时,对后续核素的定量分析提供了良好的基础。

参考文献

- 葛良全,熊盛青,曾国强,等. 航空 γ 能谱探测技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016. DOI: 10.11720/wtyht.2012.3.12.
GE Liangquan, XIONG Shengqing, ZENG Guoqiang, *et al.* Airborne gamma energy spectrum detection technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2016. DOI: 10.11720/wtyht.2012.3.12.
- 章晔,华荣洲,石柏慎. 放射性方法勘查[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
ZHANG Ye, HUA Rongzhou, SHI Baishen. Radioactive survey[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.
- 程业勋,王南萍,侯胜利. 核辐射场与放射性勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
CHENG Yexun, WANG Nanpin, HOU Shengli. Nuclear radiation field and radioactive survey[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- 孙坤,熊超,葛良全,等. 基于小波变换的航空 γ 能谱异常信息线单元校正方法[J]. 核技术, 2018, 41(10): 100501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100501.
SUN Kun, XIONG Chao, GE Liangquan, *et al.* Line unit correction method of airborne gamma-ray spectrum anomaly information based on wavelet transform[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(10): 100501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100501.
- Li F, Gu Z X, Ge L Q, *et al.* Application of artificial neural networks to X-ray fluorescence spectrum analysis[J]. X-Ray Spectrometry, 2018, 48(2): 138 – 150. DOI: 10.1002/xrs.2996.
- 龙斌,冯天成,苏川英,等. 一种 γ 能谱散射本底的自适应扣除方法[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 10: 1293–1296. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.10.031.
LONG Bin, FENG Tiancheng, SU Chuanying, *et al.* A self-adaptive method for the clipping of scatter background of γ spectrum[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 10: 1293 – 1296. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.10.031.
- Hampton C V, Lian B, McHarris Wm C. Fast-Fourier-transform spectral enhancement techniques for γ -ray spectroscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1994, 353(1 – 3): 280 – 284. DOI: 10.1016/0168-9002(94)91657-8.
- Zhang Q X, Ge L Q, Gu Y, *et al.* Background estimation based on Fourier transform in the energy-dispersive X-ray fluorescence analysis[J]. X-Ray Spectrometry, 2012, 41(2): 75–79. DOI: 10.1002/xrs.2360.
- Statham P J. A comparative study of techniques for quantitative analysis of the X-ray spectra obtained with a Si(Li) detector[J]. X-Ray Spectrum, 1976, 5: 16–28. DOI: 10.1002/xrs.1300050106.
- Zhu M H, Liu L G, Cheng Y S, *et al.* Iterative estimation of the background in noisy spectroscopic data[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009, 602(2): 597–599. DOI: 10.1016/j.nima.2009.01.174.
- 张庆贤. 航空 γ 能谱特征和仪器谱解析方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
ZHANG Qingxian. The character of airborne gamma-ray spectrometry and the method for spectrum analysis[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- Morháč M. Sophisticated algorithms of analysis of spectroscopic data[C]. Proceedings of Science 2008, 2008. DOI: 10.22323/1.070.0077.
- Li F, Gu Z X, Ge L Q, *et al.* Review of recent gamma spectrum unfolding algorithms and their application[J]. Results in Physics, 2019, 13: 1 – 12. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102211.
- Zhang Y P, Xiao X L, Zhang X, *et al.* Research on elimination background by extending clipping window of SNIP algorithm[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(3): 143–152.
- Li F, Ge L Q, Tang Z Y, *et al.* Recent developments on

- XRF spectra evaluation[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2019, **4**: 1 – 25. DOI: 10.1080/05704928.2019.1580715.
- 16 Zhu M H. On estimating the background of remote sensing gamma-ray spectroscopic data[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, **832**: 259–263. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.134.
- 17 Fornasa M, Sánchez-Conde M A. The nature of the diffuse gamma-ray background[J]. Physics Reports, 2015, **598**: 1–58. DOI: 10.1016/j.physrep.2015.09.002.
- 18 Alamaniotis M, Heifetz A, Raptis A C, *et al.* Background spectrum estimation for low count spectra using kernel-modeled gaussian processes[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2012, **106**: 273–274.
- 19 Li F, Ge L Q, Dan W X, *et al.* Application of improved variable learning rate back propagation neural network in energy dispersion X-ray fluorescence quantitative analysis [C]. ICCCBDA, 2019. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.009664.
- 20 Ryan C G, Clayton E, Griffin W L, *et al.* SNIP, a statistics-sensitive background treatment for the quantitative analysis of PIXE spectra in geoscience applications[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B, 1998, **34**: 396–402. DOI: 10.1016/0168-583x(88)90063-8.
- 21 Morháč M, Kliman J, Matousek V. Background elimination methods for multidimensional coincidence γ -ray spectra[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1997, **401**(1): 113 – 132. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)01023-1.
- 22 Morháč M, Matousek V. Peak clipping algorithms for background estimation in spectroscopic data[J]. Applied Spectroscopy, 2008, **62**(1): 91 – 106. DOI: 10.1366/000370208783412762.
- 23 尹旺明, 刘宏章, 汤彬. 基于SNIP算法扣除 γ 能谱本底的探讨及应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2009, **32**(3): 245 – 248. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2009.03.010.
- YIN Wangming, LIU Hongzhang, TANG Bin. Discussion and application of eliminating the background in γ -ray spectrum by SNIP algorithm[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2009, **32**(3): 245 – 248. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2009.03.010.
- 24 Li F, Ge L Q, Tang Z T, *et al.* Recent developments on XRF spectra evaluation[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2019, **3**: 1 – 14. DOI: 10.1080/05704928.2019.1580715.
- 25 张林艳, 戴挺, 周怡军. 能量色散X射线荧光光谱背景扣除方法的探讨[J]. 分析实验室, 2009, **28**(12): 111–114. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0720.2009.12.029.
- ZHANG Linyan, DAI Ting, ZHOU Yijun. Study on a background subtraction method for energy dispersive X-ray fluorescence spectrum[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2009, **28**(12): 111–114. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0720.2009.12.029.
- 26 Solé V A, Papillon E, Cotte M, *et al.* A multiplatform code for the analysis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectra[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2007, **62**: 63. DOI: 10.1016/j.sab.2006.12.002.