

文章编号: 1007-4627(2016)03-0321-05

一种基于阶梯阈值的 γ 射线违禁品探测方法

陈勇, 常青青

(公安部第三研究所, 上海 200031)

摘要: 在 γ 射线违禁品探测技术中, 快速准确的 γ 射线康普顿散射信号平滑具有非常重要的意义。现有的多项式平滑法和小波分析方法不仅运算速度慢, 且易受噪声干扰, 容易出现弱峰、谱峰错位等问题。为解决上述问题, 提出一种新的基于阶梯阈值的散射信号分析方法。首先通过数据预处理, 计算康普顿散射信号的基底变量, 然后根据自适应阶梯阈值和测量差值, 依次迭代更新背散射数据, 进行信号滤波, 最后自动检测峰位, 实现可疑物识别。实验结果表明, 相比现有的信号分析方法, 阶梯阈值算法能够降低噪声干扰, 保留康普顿散射信号的峰值和峰位, 运算速度快, 满足便携式探测设备的实时性要求。

关键词: 伽马射线能谱; 康普顿散射, 违禁品探测; 信号平滑

中图分类号: TL84 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.03.321

1 引言

γ 射线探测技术是一种能够对隐蔽部位夹藏毒品和爆炸物等违禁品进行有效探测的便携式探测技术^[1]。该技术采用特种放射性核素作为探测仪的辐射源, 利用 γ 射线的强穿透性和对不同材料有不同康普顿散射强度的原理, 通过探测后向康普顿散射强度, 来确定一定深度范围内的被探测材料密度变化, 以此来探测隐藏着的毒品和爆炸物等各种违禁品的性质和形状, 是缉毒、安全检查、刑侦探测等部门使用的重要技术手段^[2]。由于探测器和电子线路的边缘效应、堆积效应等存在使得观测得到的 γ 射线康普顿散射信号存在噪声, 呈现类高斯峰状并产生“拖尾”现象^[3], 因此在自动识别违禁品中, 如何快速实现 γ 射线能谱数据的平滑成为首要解决的问题。

针对 γ 射线散射信号平滑这一目的, Savitzky^[4]于1964年提出多项式最小二乘移动平滑法, 对平滑窗口内的数据进行多项式拟合, 将拟合后的数据作为平滑后的数据。这种方法对低频噪声很有效。但当噪声干扰严重时, 容易削弱谱峰, 产生“弱峰”的现象。随着小波分析技术的进展, Mallat^[5]于1992年提出在多尺度上对信号和噪声的奇异性进行描述, 利用小波变换模极大值原理实现谱滤波。随后以Donoho^[6]为首的学术群体提出小波阈值信号滤波方法, 引入不同度量方

法(如概率和隶属度等), 对小波系数被噪声干扰的程度量化描述, 从而达到自适应收缩滤波的目的^[7]。但小波滤波是试图去除所有噪声, 保留所有信号, 当噪声干扰严重时, 会削弱本底信号, 造成谱峰错位, 能谱峰净面积误差大的问题, 而且小波分析方法速度较慢, 难以实现工程化应用^[8]。

本文提出一种基于阶梯阈值的 γ 射线康普顿背散射信号分析方法。首先通过数据预处理, 计算散射信号的基底变量; 然后根据自适应阶梯阈值和随机测量误差, 依次迭代更新背散射数据, 进行信号滤波; 最后自动检测峰位, 实现可疑物的报警。和现有的信号分析方法相比, 阶梯阈值方法在去除噪声的同时, 保留了 γ 能谱的峰位和峰值, 提高了违禁品的自动识别的准确率, 而且算法运行速度快, 适用于各种硬件平台。

2 理论与方法

2.1 便携式 γ 射线违禁品探测仪工作原理

便携式 γ 射线违禁品探测仪是公安部第三研究所自主研发的产品, 由 γ 射线放射源、散射强度探测器、信号分析及显示电路组成。放射源选用低能Ba-133核素, 制成10 μ Ci的密封点状源, 采用钨合金和转盘式自复快门连动机构解决核屏蔽技术; 探测器采用碘化铯闪烁晶体的光子簇射转换技术, 实现光子接收及转换, 同时

收稿日期: 2015-09-14; 修改日期: 2015-11-27

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800904)

作者简介: 陈勇(1969-), 男, 上海人, 副研究员, 主要从事核技术探测, 违禁品识别处理;

通信作者: 常青青, E-mail: qingqingchang@163.com。

采用反射型铟铷铯(Sb-Rb-Cs)PMT 光电倍增技术, 解决便携小型化的需求。该探测仪发射和接收设计为一体平面布置, 如图 1 所示。



图 1 (在线彩图) 便携式γ射线违禁品探测仪

该探测仪采用脉冲检测电路, 每 0.28 s 统计一次该时间间隔内的脉冲数量, 即 γ 射线康普顿散射信号总计数, 并记为一次有效采样。当移动该探测仪时, 探测单元连续输出一系列散射强度信号, 然后由信号处理单元采用阶梯阈值的方法实现信号平滑和违禁品报警。探测仪扫描均匀物质时, 探测数据无明显波峰, 仅有噪声引起的轻微数据波动; 但 γ 射线穿过藏匿有违禁品的位置时, 探测数据波动较大, 在违禁品位置呈现明显波峰状, 依据该波峰特征判断并识别违禁品。

针对两组分别藏匿块状毒品和金属手枪的轮胎, 移动该探测仪采集相应探测数据, 采集时间是 19 和 40 s, 探测器输出两组后向背散射信号计数, 分别如图 2, 3 所示。横轴代表探测器第 i 次有效采样; 纵轴代表是探测到的散射信号强度。第一组散射数据采样点数共 75 个, 有 3 个异常波峰, 从图中可以看出, 散射数据的原始噪声干扰强烈, 使得异常点识别存在较大困难。第二组散射数据采样点数共 145 个, 相比于第一组数据, 该组数据噪声干扰更严重, 信号波动范围更大, 且两组信号的幅度差异较大, 因此应在数据预处理的基础上采用自适应的信号分析方法。

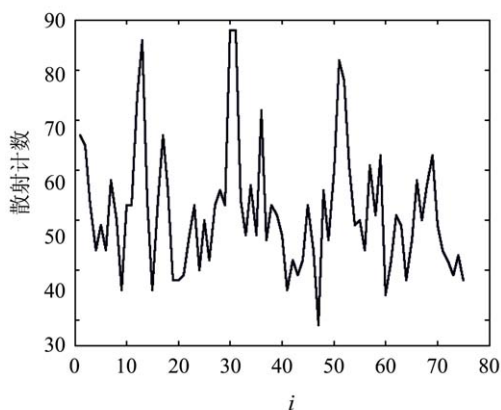


图 2 通过块状毒品时散射信号变化图

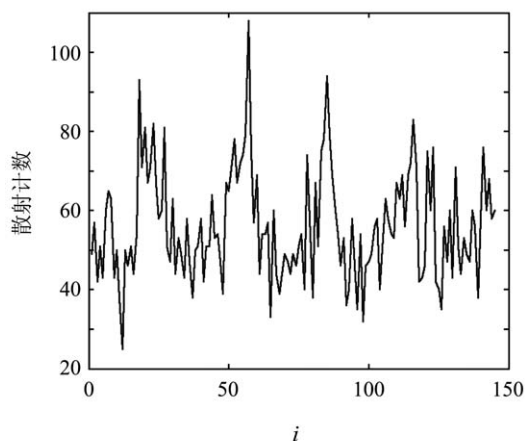


图 3 通过金属手枪时散射信号变化图

2.2 阶梯阈值探测算法

针对探测到的背散射信号, 信号处理单元采用阶梯阈值探测算法实现信号滤波和违禁品报警。首先是背散射数据预处理, 包括基底数据提取、数据校准和数据归一化; 然后根据自适应阶梯阈值和测量差值, 依次迭代更新背散射数据, 保证散射数据的峰位和峰值基本不变的同时, 降低噪声; 最后自动识别违禁品, 显示测量结果并判断是否需要报警。

影响探测算法准确性的因素主要有阶梯阈值、信号滤波的窗宽和测量差值的分析。

2.2.1 阶梯阈值

探测仪采集的背散射信号噪声干扰强烈, 不同信号幅度差异较大, 固定阈值难以满足不同环境的需要。而且运算放大器的噪声信号与输出信号的平方根成正比, 为了滤除信号噪声, 本文采用自适应的平方根阶梯阈值。

利用违禁品探测仪采集 N 个环境散射数据, 均值记为 x 。此次测量的 3 个阶梯阈值, 分别为

$$t_1 = \sqrt{x_0}, \quad t_2 = \frac{3}{2}\sqrt{x_0}, \quad t_3 = \frac{5}{2}\sqrt{x_0}。 \quad (1)$$

2.2.2 信号滤波的窗宽

违禁品探测仪每采集一个背散射数据, 即和前面的 $k-1$ 个数据作为一组进行平滑处理, 那么 k 就是信号滤波的窗宽。限制窗宽 k 的因素有 3 个: 第一是降噪能力, γ 射线照射不同物质产生的探测信号不同, 噪声干扰会造成违禁品分辨能力的下降, 如果平滑窗口过小, 难以滤除噪声; 第二是平滑算法的滞后性, 探测仪当前显示的是前 k 个数据的平滑结果, 如果平滑窗口过大, 散射数据峰位经过数据平滑后容易滞后, 难以及时发现; 第三是为了方便硬件设计, 平滑窗宽 k 应是 2 的幂

次方。基于以上原则, 经过对窗口长度分别是 4, 8 和 16 的平滑算法结果对比, 本算法选择了 $k = 8$ 作为平滑窗口长度, 那么液晶屏显示的数据则是前 2 s 内采集的 8 点数据的平滑结果, 随着采集点数的增加, 显示屏数据也不断更新。

2.2.3 测量差值分析

测量差值是指当前探测的散射数据和环境散射数据 x_0 的差值, 用于判断是否需要更新这 k 个散射数据。在探测器移动过程中, 设第 i 个散射信号值为 x_i , 那么已探测的 k 个散射信号分别为 $x_{i-k+1}, \dots, x_{i-1}, x_i$, 计算 $|x_i - x_0|, |(x_{i-1} + x_i)/2 - x_0|$; 误差标志变量初始为 $Flag=0$ 。根据测量数值的大小和当前 $Flag$ 的状态, 更新这组测量数据:

(1) 如果 $|x_i - x_0| \geq t_3$, 将 x_i 均赋给 $x_{i-k+1}, \dots, x_{i-1}, x_i$, 同时置 $Flag=1$;

(2) 如果 $|x_i - x_0| < t_3$ 且 $|(x_{i-1} + x_i)/2 - x_0| \geq t_2$, 将 $(x_{i-1} + x_i)/2$ 均赋给 $x_{i-k+1}, \dots, x_{i-1}, x_i$, 同时置 $Flag=1$;

(3) 如果 $|x_i - x_0| < t_3$, 且 $|(x_{i-1} + x_i)/2 - x_0| < t_2$, $x_{i-k+1}, \dots, x_{i-1}, x_i, Flag$ 保持不变。

如果 $Flag=1$, 则:

(1) 如果 $|x_i - x_0| \geq t_1$, 将 x_i 均赋给 $x_{i-k+1}, \dots, x_{i-1}, x_i$;

(2) 如果 $|x_i - x_0| < t_1$, 置 $Flag=0$, 同时将 x_i 均赋给 $x_{i-k+1}, \dots, x_{i-1}, x_i$ 。

最后根据更新后的背散射信号值判断是否报警, 并将一组 k 个数据的测量结果输出至显示屏。当探测没有结束时, 循环执行违禁品探测算法。

从阶梯阈值探测算法可以看出, 数据校准和归一化保证了探测数据的一致性, 误差变量标志保证了散射信号峰位和峰值不变, 避免了弱峰和波峰错位, 阶梯阈值

则滤掉了噪声。该违禁品探测算法的计算速度快, 硬件实现方便, 适合应用于便携式探测仪, 具有很强的应用前景。

3 实验与结果

3.1 实验结果谱形分析

本文采用 Matlab2009b 数据处理软件对图 2, 3 的背散射信号数据分别应用多项式信号分析法, 小波分析法和阶梯阈值分析法。本文方法在预处理阶段以 8 次测量取均值作为环境散射数据, 在扫描过程中不断对当前已扫描的 8 点数据进行平滑处理。多项式拟合平滑法针对扫描的 8 点数据, 采用 3 阶多项式拟合, 将拟合的数值作为平滑后的数据。小波分析法采用的是非线性小波分析中的固定阈值函数 (sqtwolog), 通过调用 Matlab 的 wden 函数实现。

针对图 2 所示的第一组散射数据, 采用多项式最小二乘移动平滑、小波分析法和本文提出的阶梯阈值平滑法, 得到处理后的数据如图 4 所示。从图 4(a) 可以看出, 多项式移动平滑法能够去除部分噪声, 使异常点更清晰, 但这种方法同时会些许降低异常点的幅值, 使异常点与正常数据间的差异变小了。另外该方法使异常点附近产生了幅值较高的旁瓣, 类似于“假峰”, 从而影响异常点检测的准确度。从图 4(b) 可以看出, 小波分析方法可以很好地滤除高频噪声, 但同时峰值信号也变得更小。而且小波分析法使得峰位出现错位现象。从图 4(c) 可以看出, 本文提出的阶梯阈值滤波法不仅去除了信号中的噪声, 而且保留了异常点的幅值, 保持了异常点与正常数据间的差异性。同时该算法对原始信号中的旁瓣有抑制作用, 进而能够保证了异常点检测的准确率, 不易产生误检测。

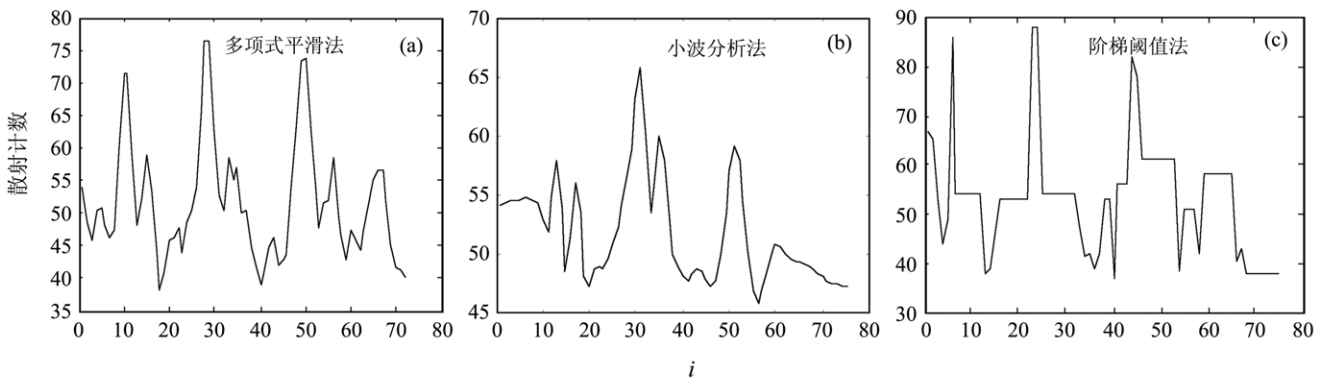


图 4 利用 3 种方法对第一组数据的平滑结果图

针对图 3 所示的第二组散射数据, 分别应用上述 3 种方法, 结果如图 5 所示。从 3 种方法的对比结果可以看出, 多项式方法和小波分析方法的信号都被整体大幅削减, 多项式平滑法和小波分析法的最大数值范围从大于 100 分别降到 90 和 60 左右。小波分析方法滤波后的信号很平滑, 但由于噪声干扰严重, 平滑幅度较大, 导致谱峰幅值大幅降低, 峰位错位严重。本文提出的方法更好地保留了基底数据范围, 更加清楚反映异

常数据的波动。以第二个异常点为例, 其周围环境数据为 53, 多项式方法平滑后异常点数值为 87, 仅超出环境数据 39%, 小波平滑后异常点的数值仅为 63.31, 仅比环境数据高 19%。而本文提出的方法滤波后检测到的异常点值为 108, 超出环境数据 104%, 异常点与正常点的差异性更大, 因而利于提高异常点检测的灵敏度和准确率。

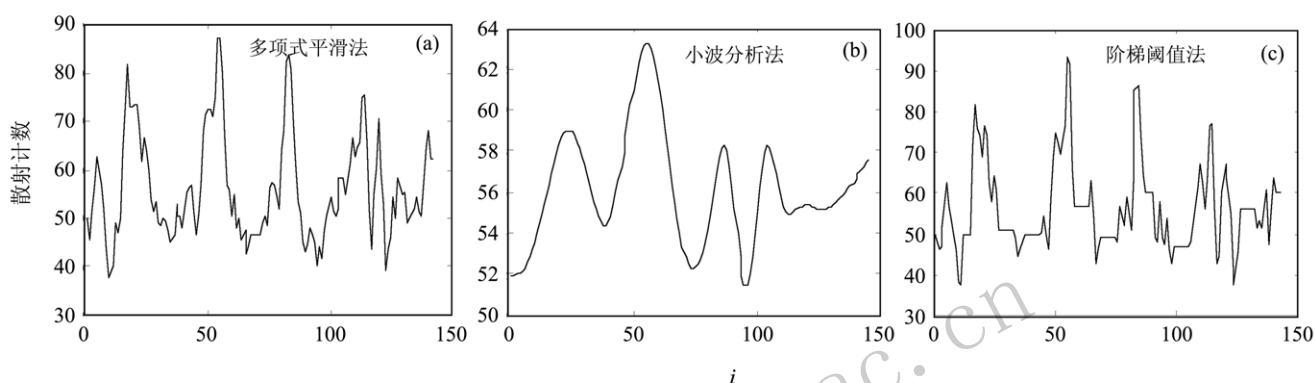


图 5 利用 3 种方法对第二组数据的平滑结果图

3.2 实验结果谱数据分析

为评估不同算法对上述两组能谱数据平滑效果, 计算平滑后谱峰峰值与基底间的相对差值; 同时采用科沃尔 (Covell) 法^[9]计算峰位位置平均偏差、全能峰净面积、净面积的误差和滤波算法运行的时间, 从这四方面对 3 种方法的平滑效果进行量化分析。该方法是在峰位旁各取 n 道, 总宽度为 $2n+1$ 道来计算峰面积, 本文

设 $n=2$, 计算结果如表 1 所列。从表 1 可以看出, 当处理高频噪声较少的第一组数据时, 多项式分析方法和本文提出的方法都能较好地滤除噪声, 保持能谱峰值, 而小波分析的方法则更能保持峰位不变。当处理噪声干扰严重的第二组数据时, 小波分析法会大大削弱原始信号, 造成峰位误差和峰净面积误差增大, 这也反映了小波分析法需要针对实际数据选定最优参数的缺陷。

表 1 两组采样数据滤波结果量化对比表

方法	峰1幅值	峰2幅值	峰3幅值	峰4幅值	平均峰位偏差	全能峰净面积	峰净面积误差	运行时间/ms
能谱数据一	86	88	82		0	961	0	—
多项式法	33.3%	42.6%	37.06%	—	2.8%	948	13.5%	79
小波分析法	8.71%	24.1%	11.7%		0	850	11.6%	270
阶梯阈值法	60%	63.72%	52.56%		0	967	6.24%	5
能谱数据二	93	108	94	83	0	1468	0	—
多项式法	51.94%	62.47%	55.67%	40.15%	3.29%	1487	14.9%	94
小波分析法	11.4%	19.5%	10.1%	9.97%	4.07%	1187	19.1%	283
阶梯阈值法	73.02%	100.9%	74.88%	54.42%	0	1454	9.5%	5.8

针对各种高频和低频的噪声, 本文提出的方法都能在去除噪声的同时, 很好地保留了能谱的峰值, 保证了违禁品检测的准确率。在能谱特征方面, 峰位平均偏差和峰净面积相对误差也是最小, 与平滑前的能谱特征一致, 而且算法运行速度最快, 实现了快速准确的谱滤波满足便携式 γ 探测仪的实时性需求。

4 总结

本文针对 γ 射线康普顿散射信号分析算法中弱峰、谱峰错位和速度慢的问题, 提出了一种新的 γ 射线违禁品探测算法。该算法在数据预处理的基础上计算散射信号的基底变量, 然后根据自适应阶梯阈值和随机测量误差, 依次迭代更新背散射数据, 进行信号滤波, 最后自

动检测峰位, 实现可疑物识别。利用 γ 射线探测的散射数据, 分析对比多项式信号分析法, 小波分析法和阶梯阈值分析法的信号平滑效果。实验结果表明, 阶梯阈值算法能够降低噪声干扰, 保留康普顿散射信号的峰值和峰位, 且运算速度快, 适用于各种硬件平台。

参考文献:

- [1] EBERHARDT J E, RAINEY S, STEVENS R J, *et al.* Applied Radiation & Isotopes Including Data Instrumentation & Methods for Use in Agriculture Industry & Medicine, 2005, **63**(2): 179.
- [2] DEHAAN D, DELESDERNIER D L. Hand-held contraband detector: US, US5068883 A[P]. 1990.
- [3] PANG Jufeng. γ -ray spectrum data analyze[M]. Xi'an: Shanxi science and technique publishing press, 1990. (in Chinese)
(庞巨丰. γ 能谱数据分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1990.)
- [4] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Analytical Chemistry, 1964, **36**(8): 1627.
- [5] MALLAT S, HWANG W L. Information Theory IEEE Transactions on, 1992, **38**(2): 617 .
- [6] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. J of the Amer. Statist. Assoc, 1995, **90**(432): 1200.
- [7] PAN Quan, MENG Jinli, ZHANG Lei, *et al.* Wavelet Filtering Method and Its Application[J]. Journal of Electronics & Information Technoloty. 2007, **29**(1): 236. (in Chinese)
(潘泉, 孟晋丽, 张磊, 等. 电子与信息学报, 2007, **29**(1): 236)
- [8] HU Guangshu. Digital signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 93. (in Chinese)
(胡广书. 数据信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 93)
- [9] QU JianShi, WANG Jingyu. Multi-channel pulse analysis system[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987: 206. (in Chinese)
(屈建石, 王晶宇. 多道脉冲分析系统原理[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 206)

A Step Threshold Based Method for γ -ray Contraband Detection

CHEN Yong, CHANG Qingqing

(The Third Research Institute of the Ministry of Public Security, Shanghai 200031, China)

Abstract: Fast and accurate Compton scattering signal smoothing plays an important part for γ -ray-based contraband identification. Traditional methods based on polynomial averaging or wavelet analysis are not only slow but also sensitive to noise, which makes them suffer from issues such as peak amplitude decrease and peak dislocation. A new method based on step threshold is proposed for scattering signal analysis, which can overcome aforementioned issues. Firstly, the base value for Compton scattering signal is computed via data pre-processing. Secondly, the scattering data is iteratively updated using adaptive threshold and system measurement, thus producing smoothed signal data. At last, the peak is localized from the filtered signal data and abnormality is identified. Experimental results show that our method is robust against noise compared to existing methods. The amplitude and location of the peak can be accurately perceived and identified. The method is efficient and can be deployed on portable contraband detection devices.

Key words: γ -ray spectrum; compton backscatter; contraband detection; filtering method

Received date: 14 Sep. 2015; Revised date: 27 Nov. 2015

Foundation item: National Key Research and Development Plan of China(2016YFC0800904)

Corresponding author: CHANG Qingqing, Email: qingqingchang@163.com.