

文章编号:1002-2082(2006)03-0192-03

# 小波阈值去噪法在农药荧光分析中的应用

王玉田, 李艳春

(燕山大学 仪器科学系, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 在农药荧光分析中,最大峰值波长对应的荧光强度的信息直接关系到检测的精度。该文提出用小波变换法对测得的农药荧光光谱进行消噪处理。鉴于软阈值和硬阈值 2 种方法均存在一定的缺陷,介绍一种新的阈值处理方法——软硬阈值折衷法,并将使用该方法进行小波去噪后的荧光光谱图与用传统模拟低通滤波器去噪后的光谱图进行了比较。结果表明,经小波去噪后的荧光光谱图更多地保留了原信号的信息,有助于提高系统的检测精度。

**关键词:** 荧光光谱;小波去噪;农药;小波阈值;软硬阈值折衷法

中图分类号:TQ450.7;O482.3

文献标志码:A

## Application of wavelet threshold denoising method in the fluorescence analysis of pesticides

WANG Yu-tian, LI Yan-chun

(Department of Instrument Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In the fluorescence analysis of pesticides, the fluorescence intensity corresponding to the maximum peak is always chosen as the research subject. In order to obtain the fluorescence intensity of the measured pesticide more accurately and further improve the detection accuracy of the pesticide residues in food, the wavelet transformation is adopted to conduct the denoising process for the measured fluorescence spectrum of the pesticide. In view of the disadvantages of the soft-threshold and the hard-threshold methods, a new threshold method, i. e. soft-and-hard-threshold tradeoff method is introduced. The denoised fluorescence spectrum via the wavelet transformation using this threshold method is compared to the denoised spectrum via the analog low-pass filter. The result shows that the denoising spectrum via the wavelet transformation keeps more information for the original signal. Thus the detection accuracy of the system will be improved with the aid of this method.

**Key words:** fluorescence spectrum; wavelet denoising; pesticide; wavelet threshold; soft-and-hard-threshold tradeoff method

## 引言

荧光分析法是在食品中农药残留含量检测领域发展起来的一种新方法,具有操作简便、快捷、灵敏度高、试样需要量少等特点。由于被检测样品中

农药含量往往很低,噪声会对测试荧光信号产生较大干扰,使其信噪比降低。在农药荧光分析中,常选取最大峰值波长对应的荧光强度作为研究对象,因此信号峰值处的信息直接关系到检测的精度。传统

收稿日期:2005-07-23; 修回日期:2005-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助(60272027)

作者简介:王玉田(1952—),男,辽宁本溪人,博士,燕山大学测试计量技术及仪器学科教授,博士生导师,主要从事检测技术与光电传感器的教学与科研工作。E-mail:lr\_ggc2008@yahoo.com.cn

的消噪方法是采用滤波器滤除带外噪声。这样,在降低噪声的同时却展宽了波形,平滑了信号的尖峰成分,降低了系统的检测精度。利用小波对信号进行处理,相当于对信号同时进行低通和高通滤波,即根据信号和噪声在小波变换下表现出来的截然不同的性质,通过选用适当的阈值将信号的细节信息筛选出来,从而达到有效滤除噪声和保留信号峰值信息的目的。

本文运用小波阈值去噪方法对测得的农药荧光信号进行滤波处理。该方法不仅去噪效果较好,而且实现简单,计算量小,在有效滤除噪声的同时也不损失原信号,使信噪比得到明显改善。

## 1 小波阈值去噪

对于 $\forall f \in L^2(R)$ ,设 $f$ 在 $V_j$ 上的投影系数为 $C_{j,k}$ ,在 $W_j$ 上的投影系数为 $d_{j,k}=(j=J, J-1, \dots, -J)$ , $\varphi_{j,k}$ 是 $V_j$ 的一个规范正交基,则有以下分解式

$$f = \sum_{j=-J}^{J-1} \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k} + \sum_k C_{-J,k} \varphi_{-J,k} \quad (1)$$

$$\xrightarrow{J \rightarrow \infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k} = \sum_{j,k \in Z} d_{j,k} \Psi_{j,k} \quad (2)$$

(此时 $C_{-J,k} \varphi_{-J,k} \rightarrow 0$ )

式中, $f$ 为各种分辨率小波的线性组合, $d_{j,k}$ 是对应于小波函数 $\Psi_{j,k}$ 的小波系数。(1)式中,第一和式在小波子空间中表示信号的细节部分(高频部分),一般来说含有噪声;第二和式在尺度空间中(低频部分)反映了信号的本征部分。重构信号由低频部分和去除噪声后的高频部分构成。信号的小波分解就是把1个混频信号分解为若干个互不重叠的频带信号,然后进行滤波。

若测得信号 $f(t) = s(t) + n(t)$ ,其中 $s(t)$ 为有用信号, $n(t)$ 为噪声。那么,对信号 $f(n), n = 0, 1, \dots, N-1$ 进行离散采样,就可得到 $N$ 点离散信号,其小波变换为

$$Wf(j, k) = 2^{-j/2} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \Psi(2^{-j}n - k) \quad (3)$$

得到的一组小波系数 $Wf(j, k)$ 可简记为 $\omega_{j,k}$ 。空间分布不均匀信号 $s(k)$ 对应的各尺度上的小波系数 $\omega_{j,k}$ 在某些特定位置有较大的值,这些值点携带原始信号 $s(k)$ 的畸变位置和其他重要信息,而其他位置的 $\omega_{j,k}$ 值较小。噪声 $n(k)$ 对应的小波系数 $\omega_{j,k}$ 在每一尺度上的分布是均匀的,并随着尺度的增加其值有所减少。因此,通常的去噪方法是寻找一个

合适数 $\lambda$ 作为阈值,把低于 $\lambda$ 的小波系数 $\omega_{j,k}$ (主要由噪声 $n(k)$ 引起)设为零,高于 $\lambda$ 的 $\omega_{j,k}$ (主要由信号 $s(k)$ 引起)则予保留或进行收缩,进而得到小波估计系数 $\hat{\omega}_{j,k}$ 。可理解为 $\hat{\omega}_{j,k}$ 是由信号 $s(k)$ 引起的,然后对它进行信号重构以形成原始信号,达到去除噪声的目的<sup>[1,4]</sup>。

## 2 软硬阈值折衷法小波系数估计

Donoho等人提出了估计小波系数的软阈值和硬阈值方法,但这2种方法均存在一定的缺陷。在硬阈值处理过程中,得到的估计小波系数值(EWC)连续性差,能引起重构信号的振荡;软阈值方法处理后EWC虽然连续性较好,易于处理,但当小波系数较大时,EWC与原来的小波系数有固定的偏差,会给重构信号带来不可避免的误差。本文结合硬阈值和软阈值方法各自的优点,提出了改进方案——软硬阈值折衷法。

软硬阈值折衷法小波系数估计器为

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(\omega_{j,k}) \cdot (|\omega_{j,k}| - \alpha\lambda) & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

$0 < \alpha < 1$

式中 $\omega_{j,k}$ 是由信号 $s(k)$ 对应的小波系数 $u_{j,k}$ 及噪声 $n(k)$ 对应的小波系数 $v_{j,k}$ 组成。 $v_{j,k}$ 的影响会使 $|\omega_{j,k}| > |u_{j,k}|$ 。若令 $|\hat{\omega}_{j,k}|$ 的取值介于 $|\omega_{j,k}| - \lambda$ 与 $|\omega_{j,k}|$ 之间,则会使估计出来的小波系数 $\hat{\omega}_{j,k}$ 更加接近于 $u_{j,k}$ 。因此,在阈值估计器中加入了 $\alpha$ 因子( $\alpha$ 的值在 $0 \sim 1$ 之间)。小波系数通过该方法处理之后,EWC在阈值附近连续性好,且当小波系数较大时,EWC与原小波系数几乎没有偏差,保证了重构信号的精度。后面的实验表明,该方法有较好的去噪效果<sup>[1,3]</sup>。

## 3 阈值的选定

选择不同的阈值对信号进行滤噪处理,发现随着阈值的增大,噪声迅速减少,当阈值增大到一定值时噪声基本消除;若继续增大时,原信号的某些重要特征就会被滤除,从而引起偏差。因此,必须选择适当的阈值,使信号既能得到较大的信噪比,又能尽可能多地保留原信号的信息<sup>[5]</sup>。

通常阈值是根据信号能量和噪声方差 $\sigma^2$ 来选取的。为了更好地保留信号细节部分的信息,本文采取在不同分解尺度上选取不同阈值的方法合理地抑制噪声。在下面实验中,第1层的阈值通过Donoho和Johnstone给出的通用阈值公式 $\lambda =$

$\sigma \sqrt{2\log(N)}$  来选取,其中噪声方差  $\sigma = \text{median}(|\omega_{j,k}|)/0.6745^{[6]}$ 。对于其他各尺度,随着分解层的增加,门限值约按 70% 递减<sup>[2-3]</sup>。

### 4 实验结果

实验用荧光检测系统由激发光源(脉冲氙灯),光电倍增管,滤波、放大电路,数据采集电路以及微机组成。当实验温度保持在 20℃ 时,用甲醇和水的混合溶液(体积比为 4:1)作为本底溶剂,测得的啶虫咪荧光光谱如图 1 所示。

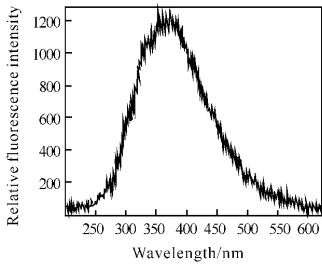


图 1 测得的啶虫咪荧光光谱图

Fig. 1 Detected fluorescence spectrum of acetamidiprid

试验测得的信号噪声主要包括光电探测器的散粒噪声和放大、处理电路引起的电学噪声及光纤传输通道的背景噪声等。在去噪过程中,首先利用 Daubechies 小波将所测信号进行 3 层小波分解,再经过软硬阈值折衷法处理后得到一组小波估计系数,重构后即可得到小波去噪后的啶虫咪农药荧光光谱图,如图 2 所示。试验中取  $\alpha=0.5$ 。通过传统的模拟低通滤波器进行低通滤波后的农药荧光光谱如图 3 所示。

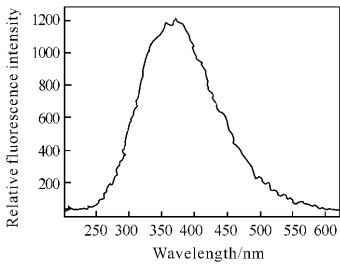


图 2 小波去噪后的啶虫咪荧光光谱图

Fig. 2 Fluorescence spectrum of acetamidiprid after the wavelet denoising transformation

由图 2 和图 3 可以看出,小波阈值去噪后所得信号与经低通滤波器去噪后的信号相比,前者更

多地保留了原信号的重要特征,尤其在 325~400 nm 波长范围内,更多地保留了啶虫咪的荧光光谱特性,这对提高农药残留检测系统的检测精度及多组分混合物农药种类识别有非常重要的意义。

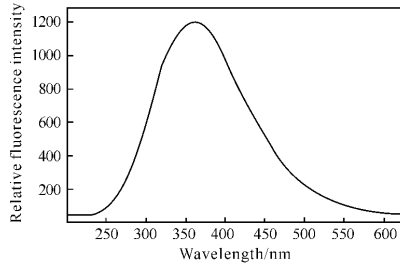


图 3 经低通滤波器后的荧光光谱图

Fig. 3 Fluorescence spectrum via denoising of the analog low-pass filter

### 5 结论

在农药残留含量检测的荧光分析中,测得的农药荧光强度值与待测农药的浓度成正比关系。为了尽可能精确地测得农药的荧光强度信息,本文采用小波变换法对信号进行消噪处理。试验结果表明,小波变换处理后的荧光光谱信号基本平滑,滤波后尽可能多地保留了原信号的信息,这有助于提高系统的检测精度。与其他滤波方法相比,小波变换滤波效果好,信号失真小,可依据不同频率段噪声水平的差异进行分段滤波,把变形降到最小。

#### 参考文献:

- [1] 徐晨,赵瑞珍,甘小冰. 小波分析:应用算法[M]. 北京:科学出版社,2004: 91-111.
- [2] JANSEN M, BULTHEEL A. Multiple wavelet threshold estimation by generalized cross validation for images with correlated noise[J]. IEEE Trans on IP, 1999, 8(7): 947-953.
- [3] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans on IT, 1995, 41(3): 613-627.
- [4] 徐科,徐金梧,杨大雷. 小波变换在信号滤波中的应用[J]. 北京科技大学学报, 1997, 8(19): 382-385.
- [5] 刘中华,周平. 毛细管电泳激光诱导荧光检测信号的小波去噪[J]. 分析科学学报, 2003, 10(19): 404-406.
- [6] 张维强,宋国乡. 基于一种新的阈值函数的小波域信号去噪[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2004, 31(2): 296-299.