

文章编号 1004-924X(2010)02-0357-07

应用小波 Firm 阈值滤波实现光谱实时采集

李正刚^{1,2}, 吴一辉¹, 宣 明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学
国家重点实验室, 吉林长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种利用小波域 Firm 阈值滤波去除随机噪声的方法,以提高微型光谱仪的光谱采集精度。首先,采集 2 次光谱谱线,取均值作为待处理谱线;然后,计算出这两次谱线的噪声标准差取代传统小波去噪中的噪声标准差估计,运用通用阈值法确定上阈值。调整下阈值对待处理谱线进行小波 Firm 阈值滤波,并判断滤波后偏差是否在计算的噪声方差内。选用标准溶液以 2 种浓度做相对吸光度实验(标准值是 $A=0.3204$),分别用传统 10 次平均方法和 Firm 阈值滤波法进行去噪。实验结果表明,提出的方法优于传统 10 次平均法,标准差从 0.00796 降低到了 0.00697,提高了采集速度。在以光纤光谱仪为主体的微型生化分析仪样品检测过程中的应用表明:该方法提高了检测精度,减少了检测时间,提高效率 4~5 倍。

关键词:小波滤波; CCD; 光谱采集; 光谱分析; 噪声方差估计

中图分类号: TH744.12; TP391.4 **文献标识码:** A

Spectral data real-time acquisition with wavelet Firm shrinkage filtering

LI Zheng-gang^{1,2}, WU Yi-hui¹, XUAN Ming¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A method for spectral data real-time acquisition with Firm shrinkage wavelet filtering was presented in this paper to improve the performance of biochemical analyzers. Firstly, two spectral lines were acquired and their average spectrum was taken to be processed. Then, the noise variance from two spectral lines was calculated to be used as the next threshold to replace the noise variance estimation based on traditional wavelet denoising. Furthermore, by adjusting the threshold on the line, the average spectrum was processed with Firm wavelet filtering and evaluation criteria were obtained. A relative spectral absorbance experiment was carried out based on the traditional 10 times average method and proposed Firm wavelet filtering method, and the experiment results indicate that the standard deviation of spectral signals obtained from the proposed method has decreased from 0.00796 to 0.00697, which means the acquired speed of the proposed method is higher than that of the tradi-

收稿日期: 2009-07-15; 修订日期: 2009-10-26.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA04Z367); 国家 863 高技术研究发展计划重点资助项目 (No. 2007AA042102)

tional method. Moreover, the method has been used in a micro biochemical analyzer, tested results show that it optimizes the detection accuracy, reduces the detection time and the detection efficiency has improved by 4–5 times.

Key words: wavelet filtering; CCD; spectral acquisition; spectral analysis; noise variance estimation

1 引言

近几年,由于 CCD 的普遍使用,微型光谱仪发展很快,在 CCD 信号噪声处理方面也有不少的突破。CCD 输出噪声主要有光子散粒噪声、暗电流散粒噪声、读出噪声(包括放大器复位噪声、输出放大器噪声),另外还存在低频噪声和宽带白噪声。去噪方式上基本可分为硬件去噪和软件去噪。硬件去噪根据噪声来源可分控温去噪和模拟前端设计去噪。控温去噪是对 CCD 器件采取致冷措施,设计模拟前端去噪是把 CCD 输出的模拟信号经过放大降噪等处理后,在采样及控制脉冲的作用下变换成相应的数字图像信号^[1]。然而硬件去噪的方法在实际应用中并不能完全去除随机噪声,并且采集和处理电路也存在随机噪声,因此,还需要通过软件进一步去噪滤波。传统的软件去噪方法有多点平滑、多次平均、傅里叶去噪等,这些去噪方法各有局限性。多点平滑易失真;多次平均耗费采集时间;傅里叶去噪尽管使测定的准确度、测量误差、测量速度得到了提高,但对信号的分解却常受噪声的干扰,效果也不是很理想。

小波变换是近几年发展起来的一种信号处理方法,其基本思想是将原始信号分解成一系列具有良好时频局部化的基元信号,利用这些基元信号的局部特征,实现对信号的时频局域化分析。小波变换这种表征信号局部特征的多分辨率分析方法十分适用于光谱分析^[2],许多文献已对该方法的实现进行了详细阐述。

现有文献中描述的用滤波方法来分析特殊谱线的评定标准(凭借感官经验,峰值信噪比, MSE,峰位置、峰高、峰面积误差,信噪比等^[3-4])只是对小波滤波前后的信号进行对比分析,对实时采集滤波作用不大。因此,本文根据小波滤波理论的基本原理,提出了将小波域 Firm 阈值^[5-6]滤波应用于光谱实时采集的方法。

2 基本原理和方法

2.1 小波域阈值滤波基本原理

基于信号和噪声在不同尺度上有不同的特征表现这一原理,Mallat、Xu 和 Donoho 等提出了各自的信号滤波方法。目前存在的小波滤波方法主要分为三种:第一种是 Mallat 提出的模极大值重构滤波;第二种是 Xu 提出的空域相关滤波;第三种是 Donoho 提出的小波域阈值滤波^[7]。文献^[7]指出模极大值重构滤波方法计算量大速度慢,而空域相关滤波对相关系数的定义要求严格,容易出现偏差。因此,本文选择小波域阈值滤波作为降噪方法。

在小波域阈值滤波算法中。阈值函数选取和阈值确定是两个基本问题。

首先,小波域阈值滤波方法也有多种,由于选取的阈值函数不同,体现了对小波系数的不同处理策略。阈值函数主要分为硬阈值函数、软阈值函数和 Firm 阈值函数,他们的基本思想都是去除小的系数,对大的系数进行收缩或保留。硬阈值法有较大的方差而软阈值法有较大的偏差^[5]。为了克服软阈值和硬阈值法的缺点,Gao HongYe 提出了另外一种阈值函数,即 Firm 阈值函数(Firm shrinkage)。其阈值处理过程如下:

$$\theta_{j,i} = \begin{cases} 0 & |w_{j,i}| \leq t_1 \\ \operatorname{sgn}(w_{j,i}) \frac{t_2(|w_{j,i}| - t_1)}{t_2 - t_1} & t_1 < |w_{j,i}| \leq t_2 \\ w_{j,i} & |w_{j,i}| > t_2 \end{cases}$$

其中, t_1 和 t_2 分别称为下阈值和上阈值。

在阈值函数选取确定之后,选取的阈值 t 必须刚好大于噪声的最大水平。事实上 Donoho 等人已经证明:噪声的最大幅度有一个刚好低于 $t = \sigma\sqrt{2\ln N}$ 的非常高的概率,是噪声标准方差, N 是采样数目。一般的上阈值可取 $t_2 = \sigma\sqrt{2\ln N}$,而下阈值 t_1 的选取与信号的形式有关。对于细节较多的信号,可将其取得较小,这样有利于保持信

号的细节;对于细节较少的信号,一般将其取得较大,这样更有利于去噪。

2.2 用于实时采集的小波 Firm 阈值滤波方法

根据以上小波理论的基本原理,提出了应用于实时采集的小波 Firm 阈值滤波方法。虽然 Firm 阈值滤波有两个阈值,但是这种方法便于调整而且和后来提出的 Garrett 阈值法效果一致^[6]。

阈值确定 $t = \sigma\sqrt{2\ln N}$ 中 σ 通常是通过各种噪声方差估计来确定的,噪声方差估计方法经大量 Monte Carlo 仿真实验证实,当信噪比很高时,相对估计误差较大,在信噪比为 18.95 时最大达到 35.6%^[7]。也有相关文献对噪声方差估计方法进行了改进,但是只是相对减小了这种相对误差。本文方法中不再使用最高频子带小波系数幅度的中值来估计谱线的噪声方差,而是计算出当前采集系统的随机噪声标准方差。通过连续采集 2 次光谱谱线,做差求出 2 次光谱谱线的差值谱线,根据误差传递公式,差值谱线的标准偏差将是 $\sqrt{2}$ 倍采集谱线噪声^[10]。这种噪声标准差获取方法更直接,与实际应用环境更相符,减少了噪声方差估计给去噪带来的误差。

CCD 输出噪声主要是光子散粒噪声、暗电流散粒噪声和读出噪声,由于这些噪声产生的特点,它们在每个像元上反应的都是相同的随机噪声。因此,可用 $N(0, \sigma^2)$ 表示每个像元上总的噪声。两次采集谱线和差值谱线分别为:

$$S_{1i} = y_{1i} + N(0, \sigma^2); S_{2i} = y_{2i} + N(0, \sigma^2);$$

$$X_i = S_{1i} - S_{2i} = y_{1i} - y_{2i} + N(0, 2\sigma^2);$$

$$i = 1, 2, \dots$$

式中 S 表示实际采集的光谱信号; X 表示差值谱线; y 表示理想的光信号; $N(0, \sigma^2)$ 表示像元上的随机噪声; i 表示像元序号。

线阵 CCD 像元信号通过一个视频端口输出,在微型光谱仪快速地采集两次光谱谱线,两次采集谱线具有相关性。即短时间光信号可视为不变,变化的只有随机噪声,因此, $y_{1i} = y_{2i}$, $X_i = N(0, 2\sigma^2)$ 。两次谱线做差获得的差值谱线即为

视频端口输出随机噪声 σ 。 $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n}}$ (X_i 表

示差值谱线第 i 个像元差值; n 表示 CCD 像元个数)。如果采用型号为 SLIS-2048 的 CCD, 其有 2048 个像元, 视频端口随机噪声相当于被测得 2048 次。现有线阵 CCD 像元数一般都在 512 以上, 这对于计算标准差测量次数已经是充分大。如果 CCD 像元太多影响了计算速度, 可以截取中间一段。如果 CCD 像元太少小于 10 个, 可以采用极差法和最大误差法来计算标准差^[10]。

然后计算出两次谱线的均值谱线。对均值谱线进行小波变换, 设定上阈值为 $t_2 = \sigma\sqrt{2\ln N}$, 调整下阈值, 进行小波重构。在 Walden 论文中成功应用了上阈值 $t_1 = 1/2t_2$ ^[8]。根据下阈值选取原则, 对于细节较多的信号, 可将其取得较小; 对于细节较少的信号, 一般将其取得较大^[5], 取 $t_1 = 1/4t_2, 3/4t_2$ 作为备用下阈值。然后评价微型光谱仪此次采集的关键点误差是否在计算获得噪声的方差范围内。如果不合格启用备用下阈值继续小波重构, 选取 3 个下阈值较好的作为终结滤波。图 1 为此方法的流程图。

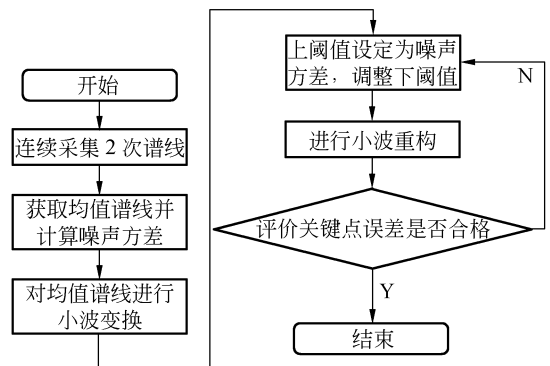


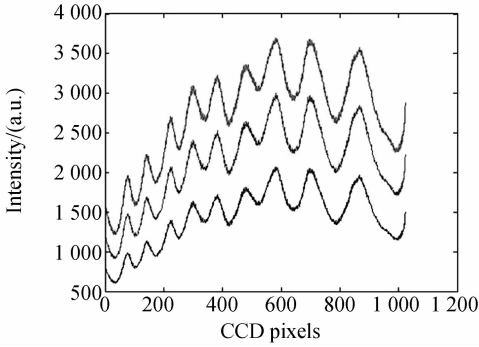
图 1 实时采集小波滤波方法流程图

Fig. 1 Flow chart of real-time acquisition with wavelet filtering

3 实验结果及讨论

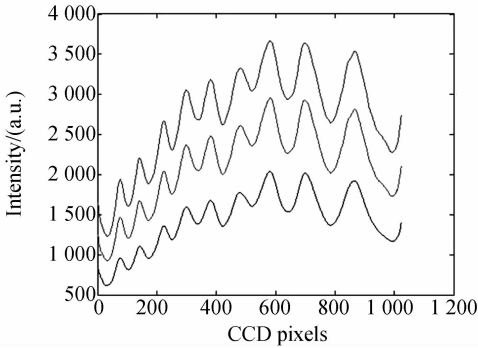
为了验证该方法的优点,设计实验如下。使用本实验室研制的微型光谱仪在预热 30 min 后使用 1 到 3 积分档采集去离子水光谱曲线各 100 次, 然后使用 10 次平均法和小波滤波实时采集方法在 1 到 3 积分档各采集 10 次数据, 计算数据的标准差和各积分档谱线的线性相关系数。

图 2 为去离子水 1 到 3 积分档光谱谱线小波去噪前后效果图,可以看出小波滤波后信噪比在直观上有了很大的改善。



(a) 滤波前

(a) Before filtering



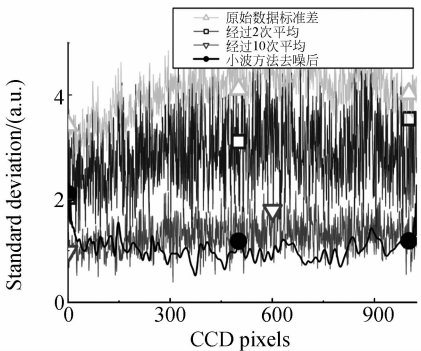
(b) 滤波后

(b) After filtering

图 2 去离子水光谱谱线在小波滤波前后效果图

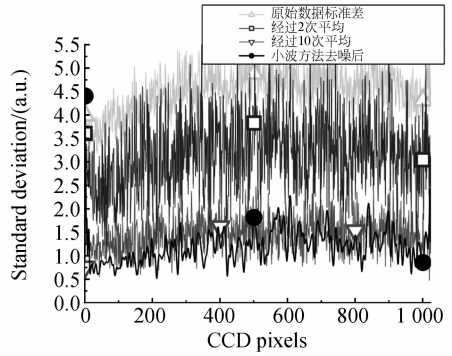
Fig. 2 Comparison of deionized water spectra before and after wavelet filtering

从图 3 可以看出经过小波去噪后,采集信号的标准差已经低于 10 次平均去噪标准差,为原来



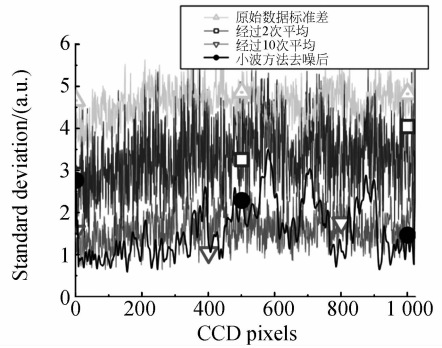
(a) 第 1 积分档

(a) Integral time grade 1



(b) 第 2 积分档

(b) Integral time grade 2



(c) 第 3 积分档

(c) Integral time grade 3

注:4 条数据线分别是:

△:100 个谱线所有数据标准差

□:100 个谱线经过 2 次平均后所有数据标准差

▽:100 个谱线经过 10 次平均后所有数据标准差

●:100 个谱线经过 2 次平均又小波去噪后的标准差

图 3 各积分档小波滤波和均值去噪法采集标准差对比图

Fig. 3 Standard deviation comparison of wavelet filtering and mean filtering

标准差的 25%左右,基本去除了随机噪声。以上只是单独积分档中的信号标准差达到了理想的效果,为了验证经过小波去噪后,各积分档之间数据是否保持原有的线性关系,本文做了如下分析:将 3 个积分时间档数据分别就原始信号和小波滤波后信号选取关键点和随机点进行线性拟合,由于篇幅有限,仅对 7 个像元点进行了直线拟合,相关系数如表 1。

表 1 小波滤波前后线性相关系数对比

Tab.1 Comparison of correlation coefficients before and after wavelet filtering

序号	原始信号	小波滤波后
1	0.999 98	1
2	0.999 99	1
3	0.999 99	0.999 91
4	0.999 97	0.999 83
5	0.999 99	0.999 92
6	0.999 97	0.999 99
7	0.999 99	1

可以看出用此方法滤波后并没有改变其原始信号的线性比例关系,说明此方法在去除噪声的同时很好地保留了原始信号的信息。

使用一般配置计算机,CPU 主频 3.0 G,内存 1 G,小波变换去噪耗时大约 6~16 ms,而采集系统数据传输耗时 50 ms 左右,可以看出小波变换去噪耗时在本系统中基本可以满足实时采集要求。并且在小波域 Firm 阈值滤波实时采集的信号标准差达到 10 次平均滤波效果的同时,滤波耗时也有很大的减少。进行小波去噪耗时对比如表 2。

表 2 小波滤波光谱实时采集耗时对比

Tab.2 Time consuming comparison of wavelet filtering and mean filtering

采集方法	积分时间档耗时/s	
	1 档	15 档
普通	0.111 262	0.890 096
十次平均	1.1	9.0
小波 Firm 阈值滤波	0.25	1.85

选用标准溶液以 2 种浓度做相对吸光度实验,标准值是 $A=0.320 4$,分别用传统 10 次平均方法和 firm 阈值滤波法进行去噪,获得实验数据如图 4 所示。在节省实验采集时间 4~5 倍的同时,达到了预期测量效果,标准差从 0.007 96 降低到了 0.006 97。

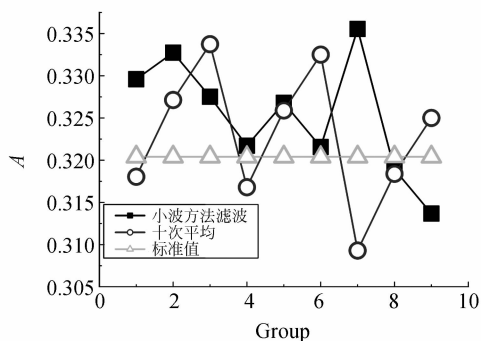


图 4 使用标准液测量相对吸亮度对比图

Fig.4 Absorbance comparison among wavelet filtering, mean filtering and standard

在光谱实时采集中,小波域 Firm 阈值滤波克服了硬件滤波的缺点,有效的去除了随机噪声,成本低廉,方便实用。但小波滤波计算量大,目前大多在计算机上使用。

另外,在研究中发现,由于采用 CCD 芯片信号采集,光谱谱线存在像元差异,如果噪声大于像元差异引起的波动则上阈值中的 σ 可以按文中所述设为噪声的标准差。如果噪声小于像元差异引起的波动,可以将上阈值中的 σ 设为像元差异的波动标准差。这样可以同时减少噪声和去除像元差异引起的光谱谱线的波动。

4 结 论

本文提出了小波域 Firm 阈值滤波光谱实时采集方法。此方法采用实时测量系统噪声标准方差代替噪声方差估计确定上下阈值,完全去除了小波阈值滤波中由于噪声方差估计带来的误差。实验证明,这种方法很好地保留了原始信号,谱线信号标准差减小为原来的 25% 左右,达到了理想的去噪效果,同时比 10 次平均方法节省采集时间 4~5 倍。

参考文献:

[1] 薛旭成,李云飞,郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端

设计[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1191-1195.

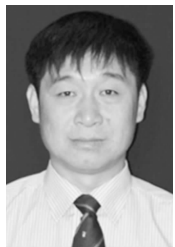
XUE X CH, LI Y F, GUO Y F. Design of analog front end of CCD imaging system[J]. Opt. Preci-

- sion Eng.*, 2007, 15(8): 1191-1195. (in Chinese)
- [2] 秦侠, 沈兰荪. 小波分析及其在光谱分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 20(6): 892-897.
QIN X, SHEN L S. Wavelet transform and its application in spectral analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 20(6): 892-897. (in Chinese)
- [3] 王瑛, 莫金垣. 光谱信号的小波去噪新技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(1): 124-127.
WANG Y, MO J Y. A new de-noising technique for spectra based on mexican hat wavelet[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(1): 124-127. (in Chinese)
- [4] 秦侠, 沈兰荪. 一种新的小波滤波方法在化学谱图信号滤噪中的应用[J]. 分析化学, 2002, 30(7): 805-808.
QIN X, SHEN L S. A new wavelet denoising method used in chemical signal[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2002, 30(7): 805-808. (in Chinese)
- [5] BRUCE A G, GAO H Y. Waveshrink and firm shrinkage[J]. *Statistica Sinica*, 1997, 7(4): 855-874.
- [6] GAO H Y. Wavelet shrinkage denoising using the non-negative garrote[J]. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1998, 7(4): 469-488.
- [7] 潘泉, 张磊, 孟晋丽, 等. 小波滤波方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
PAN Q, ZHANG L, MENG J L, et al.. *Method and Application of Wavelet Filtering*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [8] WALDEN A T, MCCOY E J, PERCIVAL D B. Spectrum estimation by wavelet thresholding of multitaper estimators[J]. *Technical report, Imperial College of Science, Technology and Medicine*, 1995.
- [9] MALLAT S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*[M]. 2nd Edition. California: Academic Press, 1999.
- [10] 费业泰. 误差理论和数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
FEI Y T. *Theory of Error and Data Processing*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:



李正刚(1977—),男,吉林安图人,博士研究生,主要从事计算机控制、数据采集、软件工程方面的研究。E-mail: leegon@163.com



宣明(1956—),男,江苏常州人,研究员,博士生导师,主要从事 MEMS 技术、精密机械等方面的研究。E-mail: xuanm@ciomp.ac.cn

导师简介:



吴一辉(1965—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,研究员,博士生导师,主要从事 MOEMS 技术、微流体、光探测技术和卫星姿态控制飞轮等方面的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn