

光谱信号乘性加性混合随机噪声去除方法

陈正伟^{1,2,3}, 张 方¹, 周 扬³, 黄惠杰^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³浙江科技学院工程训练中心, 浙江 杭州 310023

摘要 提出一种光谱信号噪声的乘性加性混合分析模型, 并采用维纳滤波和同态滤波相结合的算法对光谱信号进行去噪处理。仿真结果表明, 该算法比移动平均算法、最小均方算法和递归最小均方算法具有更好的去噪性能。实验结果表明, 氙灯光谱信号中的噪声符合乘性加性混合模型。与移动平均算法、最小均方算法和递归最小均方算法相比, 从该算法处理后的汞灯光谱信号中能够提取更加稳定的谱峰谷位置、谱峰幅度、谱峰半峰全宽等特征值, 定量分析时能获得更好的结果。

关键词 光谱学; 维纳滤波; 同态滤波; 加性噪声; 乘性噪声

中图分类号 O433.4; TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0730001

Denoising Method of Spectral Signal with Multiplicative and Additive Mixed Random Noises

Chen Zhengwei^{1,2,3}, Zhang Fang¹, Zhou Yang³, Huang Huijie^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronical Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Center of Engineering Training, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract An analysis model for mixed multiplicative and additive noise of spectral signal is built, and an algorithm combining Wiener filtering and homomorphic filtering is proposed to denoise the spectral signal. Simulation results show that the proposed algorithm has better performance than moving average algorithm, least mean square algorithm and recursive least square algorithm. Experimental results indicate that the noise in xenon lamp spectral signal matches the mixed multiplicative and additive model. Compared with moving average algorithm, least mean square algorithm, and recursive least squares algorithm, after the mercury lamp spectral signal is processed by the proposed algorithm, more stable characteristic spectral parameters can be extracted, such as peak and valley locations, peak amplitude and full width at half maximum. Better result can be obtained in quantitative analysis with the proposed algorithm.

Key words spectroscopy; Wiener filtering; homomorphic filtering; additive noise; multiplicative noise

OCIS codes 300.1030; 300.6540

1 引 言

光谱信号由含噪声的尖峰信号组成, 光谱分析重点关注的是尖峰信号的位置、幅度和面积等特征量^[1-4]。光谱信号中的噪声会严重影响光谱信号特征值的准确提取, 因此在提取光谱特征量值前需要将噪声有效地

收稿日期: 2017-01-22; **收到修改稿日期:** 2017-02-26

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0110600)、浙江省公益技术研究社会发展项目(2015C33087)、上海市国际科技合作基金项目(16520710500)

作者简介: 陈正伟(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光学生物传感技术方面的研究。E-mail: czw19831983@163.com

导师简介: 黄惠杰(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光刻技术、光学生物传感技术等方面的研究。

E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn(通信联系人)

去除。光谱信号中的噪声来源广泛,很难用统一的数学模型描述,因此光谱去噪是光谱测量技术的一个难点^[4]。性能优越的去噪算法可以大大提高光谱信号的信噪比,进而提升整个光谱测量系统的性能。

自适应滤波算法是一种常见的光谱去噪算法,具有计算量小、计算速度快和实时性好等优点^[5-7]。陈丛等^[5-6]应用自适应算法对脉搏波光谱信号进行处理,虽然取得了一定的去噪效果,但都没有对信号中的非平稳噪声进行分析。Diniz^[7]比较了多种自适应滤波器的实现方法及其优劣性。这些自适应滤波算法都是基于加性高斯白噪声,而一般光谱信号的随机噪声并不能满足加性高斯白噪声的假设条件,因此已有算法很难满足光谱信号去噪的实际要求。

本文首先分析了光谱信号的噪声特性,建立了一种光谱信号中随机噪声的乘性加性混合分析模型,然后针对乘性和加性噪声的特性,提出了一种维纳(Wiener)滤波和同态滤波相结合的算法,并采用该算法对乘性加性噪声进行有效处理。

2 基本原理

2.1 光谱信号噪声的乘性加性混合分析模型

光谱分析系统中的随机噪声主要包括暗电流噪声、散粒噪声、复位噪声、热噪声、 $1/f$ 噪声等^[4],这些噪声具有不同的特性和谱密度函数。要完全滤除这些噪声,需要对它们逐个建模并设计相应的去噪算法,工作量大,可行性不强。一般去噪算法都把信号中的噪声作为多种噪声的综合体来处理。根据噪声的物理特性,依照噪声与信号之间的相关性将综合噪声分为乘性噪声和加性噪声^[8-14],噪声模型表示为

$$y = Ms + s + N, \quad (1)$$

式中 y 为含噪声的光谱信号, s 为理想光谱信号, N 为加性噪声(一般以高斯白噪声为主), M 为乘性噪声系数。

2.2 光谱信号乘性加性混合随机噪声的去除方法

根据(1)式建立的光谱信号乘性加性噪声混合分析模型,提出一种维纳滤波和同态滤波相结合的算法。该算法首先采用维纳滤波器去除加性噪声,然后采用同态滤波器去除乘性噪声。

2.2.1 基于维纳滤波的加性噪声去除方法

维纳滤波由美国科学家 Wiener 于 1942 年为解决对空射击的控制问题所建立,维纳滤波器从理论上完美地解决了平稳信号在最小均方误差条件下的最佳估计问题^[15-19]。维纳滤波器的原理如图 1 所示,观测信号 $x(n)$ 由信号真值 $s(n)$ 和噪声 $v(n)$ 组成, $y(n)$ 是 $x(n)$ 经维纳滤波器滤波后的输出信号, $d(n)$ 是期望输出信号, $e(n)$ 是误差信号。

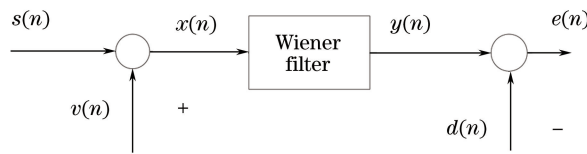


图 1 维纳滤波器原理示意图

Fig. 1 Schematic of the Wiener filter

维纳滤波器在均方误差 $E[e^2(n)]$ 最小时达到最优。当 $d(n) = s(n)$ 时, $E[e^2(n)]$ 最小等同于 $x(n)$ 经维纳滤波器滤波后的输出信号 $y(n)$ 与信号真值 $s(n)$ 的均方误差最小。 $E[e^2(n)]$ 表示为

$$E[e^2(n)] = E \left\{ \left[s(n) - \sum_{m=0}^{\infty} h(m)x(n-m) \right]^2 \right\}, \quad (2)$$

式中 $h(m)$ 为维纳滤波器的冲击响应。若要使得 $E[e^2(n)]$ 达到最小,则需要

$$E \left\{ \left[s(n) - \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(n-k) \right] x(n-m) \right\} = 0, \quad (3)$$

由此得到维纳-霍甫夫方程:

$$\sum_{k=0}^{\infty} h(k)R_x(m-k) = R_{xs}(m), \quad (4)$$

式中 $R_{xs}(m)$ 和 $R_x(m-k)$ 分别为 x 的自相关函数和互相关函数。通过计算(4)式便可得到维纳滤波器

$H_{opt}(z)$ 。

图 1 中期望信号 $d(n)$ 的获取是维纳滤波器实现的关键。在期望信号较难获取的情况下,通过获取噪声的期望信号,同样可以应用于维纳滤波。图 2 为通过获取噪声的期望信号实现维纳滤波器去噪的原理示意图。含噪声的光谱信号 $x(n)$ 为

$$x(n) = s(n) + v_0(n), \quad (5)$$

式中 $s(n)$ 为理想光谱信号, $v_0(n)$ 为噪声。 $v_1(n)$ 是与 $v_0(n)$ 相关而与 $s(n)$ 无关的信号,由 $v_1(n)$ 可得到 $v_0(n)$ 在最小均方差意义下的最优估计 $v_0'(n)$,从而得到 $e(n)$ 是 $s(n)$ 在最小均方差意义下的最优估计。

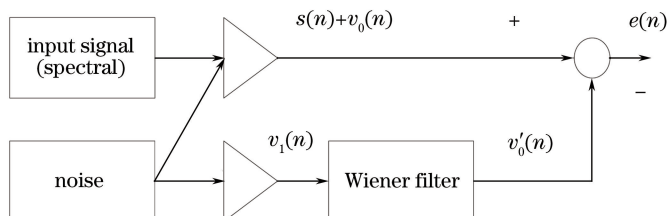


图 2 通过噪声期望信号实现维纳滤波器去噪的原理示意图

Fig. 2 Schematic of denoising by Wiener filter with noise expectation signal

在光谱探测系统中, $v_1(n)$ 一般只能通过间接的方式获得。同一光源且在不改变实验条件时先后测得 k_1 时刻的光谱 $x_1(\lambda)$ 和 k_2 时刻的光谱 $x_2(\lambda)$, 则 $x_1(\lambda) = s_1(\lambda) + n_1(\lambda)$, $x_2(\lambda) = s_2(\lambda) + n_2(\lambda)$, 其中 $s_1(\lambda)$ 和 $n_1(\lambda)$ 分别表示 k_1 时刻的理想光谱信号和噪声, $s_2(\lambda)$ 和 $n_2(\lambda)$ 分别表示 k_2 时刻的理想光谱信号和噪声。当 k_1 和 k_2 之间的时间间隔很短时,合理假定 $s_1(\lambda) = s_2(\lambda)$, 可以将 $x_1(\lambda) - x_2(\lambda)$ 作为 $x_1(\lambda)$ 中噪声的期望信号。

2.2.2 基于同态滤波的乘性噪声去除方法

带噪声的信号经过维纳滤波器滤波后,滤除了大部分的加性噪声,但乘性噪声仍然存在,乘性噪声的滤波采用同态滤波器。同态滤波的流程如图 3 所示,先将乘性噪声通过对数变换变为加性噪声,然后采用去除加性噪声的滤波方法进行处理,最后经指数变换变成输出信号^[20]。

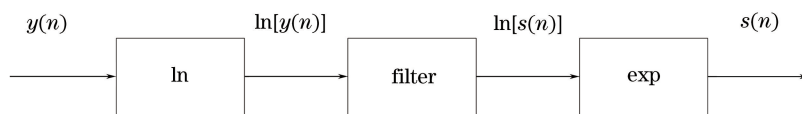


图 3 同态滤波器去噪流程

Fig. 3 Denoising flow chart of the homomorphic filter

只含有乘性噪声的信号 y 可以表示为

$$y = Ms + s = s(M + 1), \quad (6)$$

对(6)式取对数变换可以得到

$$\ln y = \ln s + \ln(M + 1), \quad (7)$$

通过(7)式将乘性噪声转为加性噪声,对 $\ln y$ 去除加性噪声后得到 $\ln s$, $\ln s$ 再经指数变换得到 $s = \exp(\ln s)$ 。

3 仿真分析

高斯和莱布尼兹型是分子光谱的两种基本类型^[21]。仿真分析时,在高斯和莱布尼兹型光谱信号模型中添加了加性高斯白噪声和乘性噪声,理想光谱信号 s 和含噪声信号 y 如图 4 所示。应用移动平均算法、最小均方(RLS)算法、递归最小均方(LMS)算法和本文提出的算法对图 4(b)所示含噪声信号 y 进行仿真分析,分析结果如图 5 所示。由图 5 中可直观看出本文算法的去噪效果优于 RLS 算法和 LMS 算法。通过计算去噪后信号的信噪比(SNR)得到信号 y 经移动平均算法处理后的信噪比为 32.0 dB,经 RLS 算法处理后的信噪比为 18.3 dB,经 LMS 算法处理后的信噪比为 19.9 dB,经本文算法处理后的信噪比为 40.1 dB,进一步证明了本文算法对高斯和莱布尼兹型光谱信号组成的光谱有更好的去噪性能。

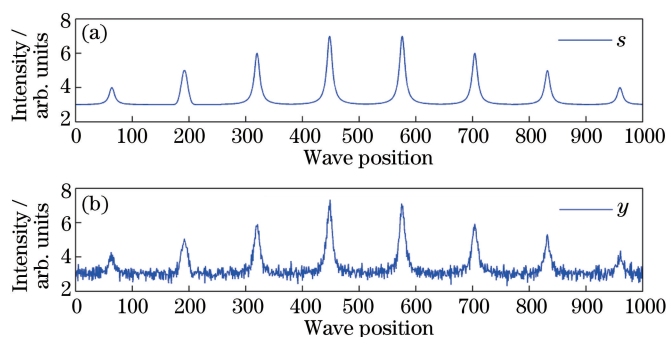


图 4 仿真分析中的光谱信号。(a)理想光谱信号;(b)含噪声光谱信号

Fig. 4 Spectral signal in the simulation analysis. (a) Ideal spectral signal; (b) spectral signal with noise

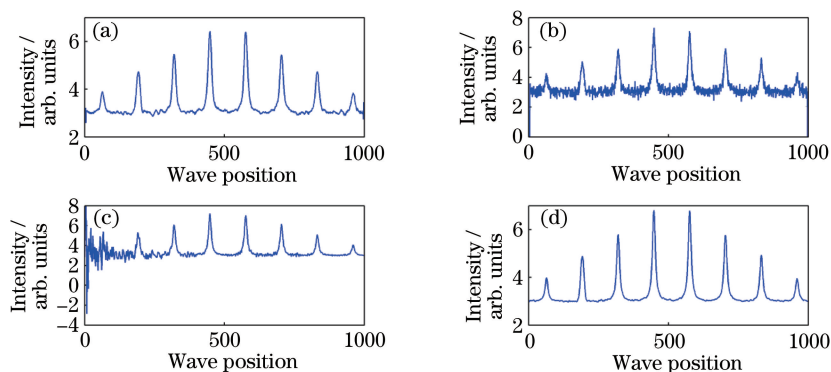


图 5 不同去噪算法的仿真结果。(a)移动平均算法;(b) LMS 算法;(c) RLS 算法;(d)本文算法

Fig. 5 Simulation results of different denoising algorithms. (a) Moving average algorithm; (b) LMS algorithm; (c) RLS algorithm; (d) proposed algorithm

4 实 验

4.1 氙灯光谱信号噪声特性分析

氙灯是常见的连续光谱光源,通过分析氙灯光谱信号的空间域特性可以得到氙灯光谱信号中噪声的空间域特性。图 6(a)、(b)为在积分时间为 50 ms 时采集 64 次暗电流信号得到的光谱仪中 CCD 传感器各个像素点的统计特征空间分布,图 6(a)为各像素点信号的标准差,图 6(b)为各像素点信号的平均值。图 6(c)、

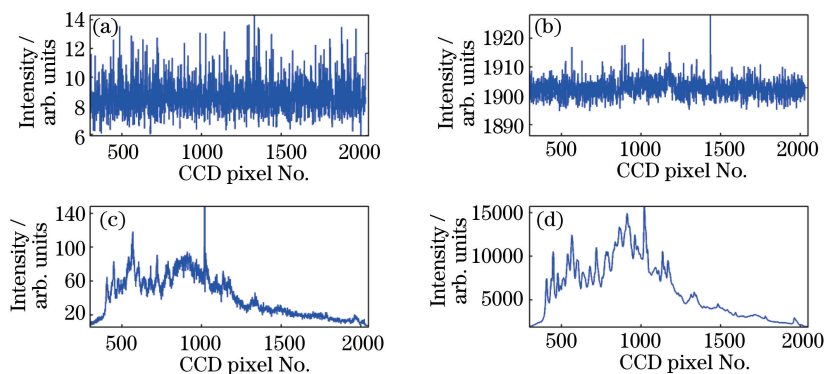


图 6 光谱仪中 CCD 传感器信号的统计特性。(a)暗电流信号的标准差特性;(b)暗电流信号的平均值特性;
(c)氙灯信号的标准差特性;(d)氙灯信号的平均值特性

Fig. 6 Statistical characteristics of the CCD sensor signal in spectrometer. (a) Standard deviation characteristic of dark current signal; (b) average value characteristic of dark current signal; (c) standard deviation characteristic of xenon light signal; (d) average value characteristic of xenon light signal

(d)为在积分时间为 50 ms 时采集 64 次氙灯信号得到的光谱仪中 CCD 传感器各个像素点的统计特征空间分布,图 6(c)为各像素点信号的标准差,图 6(d)为各像素点信号的平均值。

从图 6(a)、(b)可知,在 2048 个像素点中,每个像素点 64 次测量得到的暗电流信号的均值和标准差值都与位置无关,即光谱仪中 CCD 传感器暗电流信号中的噪声具有加性白噪声的特征。从图 6(c)、(d)可知,在 2048 个像素点中,每个像素点 64 次测量得到的氙灯信号的均值和标准差值与像素点的位置有明显的相关性,并且每个像素点 64 次测量得到的氙灯信号的标准差和均值与高度相关,即氙灯信号中的噪声具有乘性噪声的特征。氙灯光谱信号的噪声既包含加性噪声成分又包含乘性噪声成分,氙灯光谱信号的噪声符合(1)式所示的乘性加性混合分析模型。

4.2 汞灯光谱去噪实验

标准低压汞灯光源是一种常用的校准光源,具有丰富的特征峰。去噪实验中使用光谱仪采集标准低压汞灯光源的光谱,比较 4 种算法处理对汞灯特征峰峰值位置和半峰全宽(FWHM)两个核心参数的影响^[22]。采集到的 5 组汞灯的初始光谱信号如图 7 所示。由图 7 可知,汞灯光源的光谱信号只在几个离散的特征波长位置有谱峰,在其他位置基本都是暗电流信号。为了消除谱峰信号和乘性噪声对维纳滤波器参数计算的影响,首先在无谱峰信号的暗电流信号中建立维纳滤波器,即用像素点位置为 1~100 的暗电流信号组成的信号 $s_1(n)(n=1, 2, \dots, 100)$ 建立维纳滤波器模型,然后应用该模型对所有像素组成的信号 $s(n)$ 进行滤波。

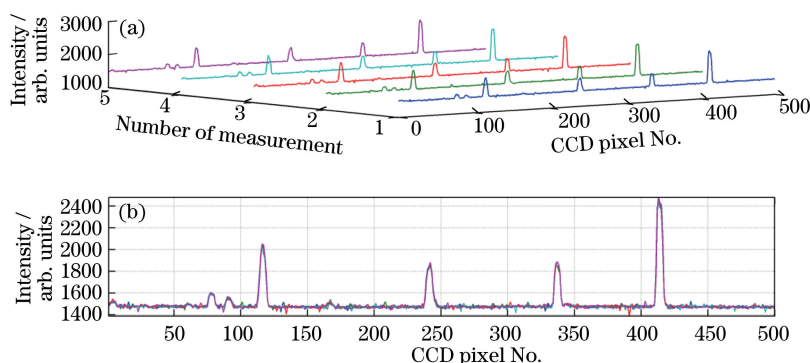


图 7 汞灯光谱图。(a) 5 次光谱平铺;(b) 5 次光谱叠加

Fig. 7 Spectra of the mercury lamp. (a) Tile view of 5 successive acquisitions of the spectra; (b) superposed view of 5 acquisitions of the spectra

实验选取 100 份同一测试条件下汞灯在波长 253.7 nm 特征峰附近的光谱信号进行去噪分析。应用本文算法得到的处理结果如图 8 所示,由图 8 可知,经过本文算法处理后,100 份同一测试条件下测得的光谱信号绘制的光谱图重合得更好,直观表明本文算法提升了初始光谱信号的重复性。汞灯光谱峰值位置、峰值稳定性、FWHM 及 FWHM 的稳定性等指标的比较如表 1 所示。

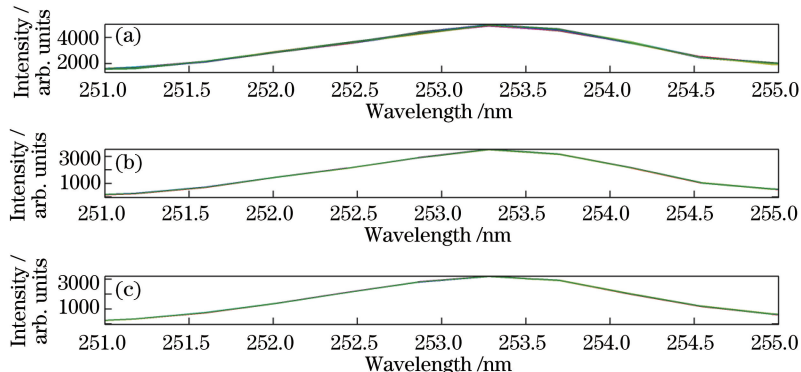


图 8 253.7 nm 波长的汞灯光谱去噪结果。(a)原始光谱;(b)维纳滤波处理后的光谱;(c)维纳滤波和同态滤波处理后的光谱

Fig. 8 Denoising results of the mercury lamp spectra at 253.7 nm. (a) Original spectra; (b) spectra processed by Wiener filter; (c) spectra processed by Wiener filter and homomorphic filter

表 1 汞灯特征峰 253.7 nm 处的光谱信号去噪结果

Table 1 Denoising results of mercury lamp spectral signal at characteristic peak of 253.7 nm

Item	Mean of peak value /arb. units	Variance of peak value /arb. units	Mean of peak position /nm	Variance of peak position /nm	Mean of FWHM /nm	Variance of FWHM /nm
Original signal	3513.4	29.0062	253.71	0	2.0820	0.0186
LMS	3514.1	62.2409	253.71	0	2.0806	0.0349
RLS	3515.3	221.6726	253.73	0.118	2.0888	0.1241
Moving average	2938.3	14.9645	254.53	0.092	2.4923	0.0100
Proposed algorithm	3184.4	4.6530	253.71	0	2.2090	0.0030

由表 1 的指标数据可知:1)峰值方差由未处理的 29.0062 减小到 4.6530,说明经本文算法去噪处理后,汞灯峰值的测量稳定性有了很大的提升;2)FWHM 方差由原来的 0.0186 减小到 0.0030,说明本文提出的算法对 FWHM 指标的一致性也有显著的提升;3)由 FWHM 均值可以看出,同态滤波略微放大了 FWHM 均值,测量均值由 2.0820 增加到 2.2090,但是较移动平均算法的 2.4923,增加的量相对较少。综合来看应用本文算法得到汞灯光谱信号的性能指标在峰值方差和 FWHM 方差两个核心指标上均有明显提升,在 FWHM 均值这个指标上也优于移动平均去噪算法。

4.3 去噪处理对光谱分析性能的影响

为了进一步验证本文算法的有效性,进行基于光谱的定量分析实验,建立图 9(a)所示实验装置,主要包括光源、入射光纤、待测样品、出射光纤和光谱仪等。光谱仪采用杭州晶飞科技有限公司的 FLA4000 型光纤光谱仪,光谱仪中的光电传感器为线阵 CCD 传感器,有效像素个数为 2048。实验样品采用杭州奥盛仪器有限公司提供的 DNA 标准溶液,如图 9(b)所示。

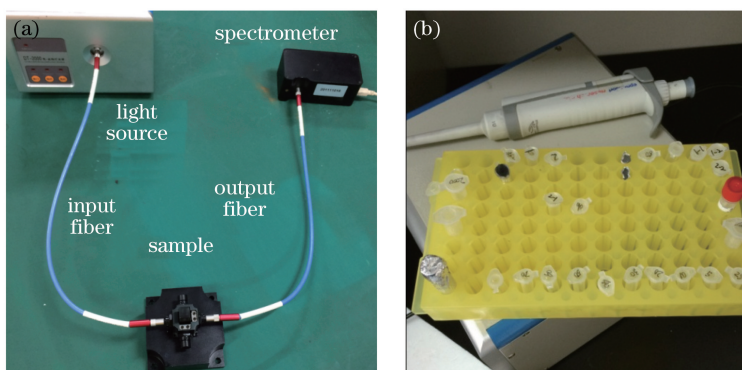


图 9 实验装置及样品。(a)实验装置;(b) DNA 样品

Fig. 9 Experimental setup and samples. (a) Experimental setup; (b) DNA samples

根据朗伯比尔定律,在光程固定的条件下样品溶液中 DNA 的浓度与其在 260 nm 波长下的吸光度呈正比关系^[23-24]。实验选用 8 种已知浓度的标准 DNA 样品溶液进行定量分析,应用 4 种不同的去噪算法,得到的结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,与其他 3 种去噪算法相比,本文算法具有更高的决定系数($R^2 = 0.9999$)和更小的残差($R_{MSEP} = 2.4346$),因此具有更高的性能。

表 2 核酸溶液定量分析中 4 种去噪算法的处理结果对比

Table 2 Comparison of quantitative analysis results of nucleic acid solution using 4 denoising algorithms

Sample number	Reference value / ($\text{ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$)	Predicted value / ($\text{ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$)			
		LMS algorithm	RLS algorithm	Moving average algorithm	Proposed algorithm
1	50.0860	58.3430	42.3959	49.9640	51.5806
2	101.9820	103.1139	84.3443	98.6525	100.0022
3	200.8070	198.7490	204.8807	200.2821	201.2728
4	304.6370	298.0080	312.0220	302.2208	301.8614
5	405.6960	402.0681	429.5185	410.7178	405.7715
6	506.4260	502.2006	512.0679	509.6838	511.3819

Sample number	Reference value / (ng · μL ⁻¹)	Predicted value / (ng · μL ⁻¹)			
		LMS algorithm	RLS algorithm	Moving average algorithm	Proposed algorithm
7	796.5090	807.9797	805.0454	806.0879	793.6192
8	907.5620	903.2427	883.4303	896.0961	908.2152
R^2		0.9996	0.9975	0.9996	0.9999
R_{MSEP}		6.1123	14.5598	5.8765	2.4346

5 结 论

分析了光谱信号噪声的特性,建立了一种光谱随机噪声的乘性加性混合分析模型,并根据该模型提出了维纳滤波和同态滤波混合去噪算法。仿真结果表明,该算法对光谱信号的去噪效果优于移动平均算法、LMS算法和RLS算法。实验结果表明,该算法处理后的汞灯光谱信号在峰值稳定性和半峰全宽稳定性两个核心指标上优于移动平均算法、LMS算法和RLS算法,并且经本文算法处理后的光谱信号用于定量分析时具有更好的性能。

参 考 文 献

- [1] Lan Jiming, Xiong Gang, Zhang Haiyan. Adaptive moving average filtering algorithm weighting on amplitude and phase bivariate distance[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(10): 141-145.
蓝集明,熊刚,张海燕.幅相二元距离加权的自适应滑动平均滤波[J].计算机工程与应用,2012,48(10):141-145.
- [2] Han Qingyang, Zhou Pengji. Research on the method of eliminating noise and background in the meantime in detecting ethanol contention based on Raman spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(12): 3406-3409.
韩庆阳,周鹏骥.乙醇含量拉曼光谱检测中噪声与背景同时消除方法研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(12):3406-3409.
- [3] Xia Liangping, Li Huadong, Yin Shaoyun, et al. Eliminating complex background noise of Raman spectrum based on configuration similarity comparing method[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0530003.
夏良平,李华栋,尹韶云,等.基于形状相似性比较法消除拉曼光谱的复杂背景噪声[J].光学学报,2013,33(5):0530003.
- [4] Xia Ruobin. Data acquisition and digital signal processing of CCD spectrometer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 56-77.
夏若彬. CCD光谱测量系统的数据采集及信号数字化处理[D].杭州:浙江大学,2007:56-77.
- [5] Chen Cong, Lu Qipeng, Peng Zhongqi. Preprocessing methods of near-infrared spectrum based on NLMS adaptive filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0530001.
陈丛,卢启鹏,彭忠琦.基于NLMS自适应滤波的近红外光谱去噪处理方法研究[J].光学学报,2012,32(5):0530001.
- [6] Lu Qipeng, Chen Cong, Peng Zhongqi. Application of adaptive filter to noninvasive biochemical examination by near infrared spectroscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 873-879.
卢启鹏,陈丛,彭忠琦.自适应滤波在近红外无创生化分析中的应用[J].光学精密工程,2012,20(4):873-879.
- [7] Diniz P S R. Adaptive filtering: algorithms and practical implementation[M]. 3th ed. New York: Springer, 2008: 77-227.
- [8] Sun Yi. Research on signal denoising technology based on adaptive lifting wavelet transform[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008: 23-37.
孙轶.基于自适应提升小波的信号去噪技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2008:23-37.
- [9] Om H, Biswas M. An adaptive image denoising method based on local parameters optimization[J]. Sadhana, 2014, 39(4): 879-900.
- [10] Meher S K, Singhawat B. An improved recursive and adaptive median filter for high density impulse noise[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(12): 1173-1179.
- [11] Zhou Tao. Study on the real-time monitoring method of flue gas by DOAS[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 33-50.

- 周 涛. 烟气排放紫外差分吸收光谱实时监测方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 33-50.
- [12] Li Xiaojie. Method research and system design for testing photoelectric parameters of CCD[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 47-64.
李晓杰. CCD 光电参数测试方法研究及系统设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 47-64.
- [13] Lu D Y. A hybrid optimization method for multiplicative noise and blur removal[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2016, 302: 224-233.
- [14] Rodrigues P M, Freitas D, Teixeira J P. Electroencephalogram cepstral distances in Alzheimer's disease diagnosis[J]. Procedia Computer Science, 2015, 64: 879-884.
- [15] Wu Decao, Wei Biao, Feng Peng, *et al.* Denoising algorithm of UV-Vis spectroscopy on water quality detection based on two-dimension restructuring and dynamic pane[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 1044-1050.
吴德操, 魏 彪, 冯 鹏, 等. 基于二维重组和动态窗格的水质检测紫外-可见光谱去噪算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 1044-1050.
- [16] Yan Jun. The application of the modified Wiener filtering in the seismic data processing [D]. Changchun: Jilin University, 2007: 27-40.
颜 军. 改进的维纳滤波在地震资料处理中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 27-40.
- [17] Wang Shutao, Zeng Qiuju, Song Haobing, *et al.* Signal denoising method based on the SVM filter absorption methane detection[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0915001.
王书涛, 曾秋菊, 宋浩兵, 等. 基于 SVM 滤波器的吸收式甲烷检测的信号去噪方法[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0915001.
- [18] Cui Xiaojie. The application of Wiener filtering[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006: 2-24.
崔晓杰. 维纳滤波的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2006: 2-24.
- [19] Mohan J, Krishnaveni V, Guo Y. MRI denoising using nonlocal neutrosophic set approach of Wiener filtering[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2013, 8: 779-791.
- [20] Gao Hongxia, Wu Lixuan, Xu Han, *et al.* Denoising method of micro-focus X-ray images corrupted with mixed multiplicative and additive noises[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 3100-3113.
高红霞, 吴丽璇, 徐 寒, 等. 微焦点 X 射线图像乘性加性混合噪声的去除[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(11): 3100-3113.
- [21] Lui Jieli. Research on spectral line profile and line width of high-resolution (saturation) molecular spectra and its application[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2000: 15-31.
林洁丽. 高分辨(饱和)分子光谱谱线线型、线宽及其应用的研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2000: 15-31.
- [22] GB/T 26798—2011 Single beam UV visible spectrophotometer[S]. Standardization Administration of the People's Republic of China, 2011: 1-14.
GB/T 26798—2011 单光束紫外可见分光光度计[S]. 中国国家标准管理委员会, 2011: 1-14.
- [23] Wang Shutao, Chen Dongying, Wang Xinglong, *et al.* Detection of polycyclic aromatic hydrocarbons combining fluorescence analysis with ABC-BP neural network[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1115001.
王书涛, 陈东营, 王兴龙, 等. 荧光分析法和 ABC-BP 神经网络相结合的多环芳烃的检测[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1115001.
- [24] Fu Bo, Hu Yongxiang, Liu Rong, *et al.* Near-infrared measurement with medium concentration sample as reference [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0230003.
傅 博, 胡永翔, 刘 蓉, 等. 基于中等浓度样品参考测量的近红外光谱检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0230003.