

# 小波阈值去噪技术在呼出气体激光光谱诊断中的应用研究

周 超, 刘宁武, 何天博, 周 胜, 张 磊, 李劲松

安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601

**摘要** 为了消除激光吸收光谱信号中噪声对分析结果的影响,提出了基于小波变换的阈值去噪方法。利用气体分子的直接吸收光谱信号,结合 MATLAB 软件进行仿真实验,深入对比分析了阈值方法、分解层数和小波基函数类型对降噪效果的影响,最后将获得的最佳滤波参数用于人体呼出气体的光谱信号分析中。结果表明,小波变换去噪算法模型对呼出气体吸收光谱信号的去噪效果良好。通过选择其他波段的可调谐激光光源,即可实现对其他呼出气体成分的实时分析;量子级联激光光谱系统可广泛应用于呼出气体诊断等领域。

**关键词** 光谱学; 激光光谱; 小波变换; 信号分析; 呼吸气体诊断

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1111003

## Application of Wavelet Threshold Denoising Technique in Expired Gas Analysis Based on Laser Spectroscopy

Zhou Chao, Liu Ningwu, He Tianbo, Zhou Sheng, Zhang Lei, Li Jinsong

School of Physics and Materials Science, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

**Abstract** In order to eliminate the influence of noise in laser absorption spectral signal on analysis result, we propose a threshold denoising method based on wavelet transform. The simulation experiment is implemented with the utilization of direct absorption spectroscopy signal of gas molecules combined with MATLAB software, and the effects of threshold methods, decomposition level and wavelet function type on denoising effect are analyzed in details. Finally, the optimized filtering parameters are used to analyse the spectral signal of human expired gas in experiment. The results show that the wavelet transform algorithm developed in this study has a good denoising effect for the spectral signal. In addition, real-time analysis of the other component of expired gas can be realized by selecting different tunable laser light sources at other wavelength. The quantum cascade laser (QCL) spectroscopy system can be widely used in the field of expired gas diagnosis and other fields.

**Key words** spectroscopy; laser spectroscopy; wavelet transform; signal analysis; expired gas diagnosis

**OCIS codes** 300.6360; 280.3420; 300.6270

## 1 引 言

随着医学诊断无损化的发展,呼出气体诊断技术作为一种新型的无损医疗诊断方法,越来越受到人们的关注。实时定量地研究人体呼出气体中各种微量气体的含量,有助于医生及时诊断患者的身体状况。在医学上,内源性一氧化碳(CO)是系统性血红素加氧酶的副产品,被认为是氧化应激、炎症和呼吸疾病的标识

收稿日期: 2017-06-07; 收到修改稿日期: 2017-07-20

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2016YFC0302202)、国家自然科学基金(61675005,61440010,61705002)、安徽省自然科学基金(1508085MF118)、安徽省科技攻关项目(1501041136)、安徽省留学人员科技活动项目择优资助经费(J05015143)、安徽大学人才引进基金(10117700014)、安徽大学创新训练和科研训练计划项目资助(J10118515790, J10118520289)

作者简介: 周 超(1997—),男,本科,主要从事数字信号处理算法方面的研究。E-mail: chaoszhou123@163.com

导师简介: 李劲松(1979—),男,博士,教授,主要从事高灵敏度激光光谱技术及其应用方面的研究。

E-mail: jingsong\_li@ahu.edu.cn(通信联系人)

物,而患有哮喘疾病或长期接触一氧化二氮( $N_2O$ )的人,呼出气体中的  $N_2O$  含量比较高。激光吸收光谱作为一种新型的非接触式气体浓度诊断技术,具有灵敏度高、分辨率高和响应速度快等特点,被广泛地应用于人体呼出气体的测量研究<sup>[1-4]</sup>。该测量方法主要基于朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律,通过检测气体分子对特定波长激光吸收产生的光强衰减量,并结合一定的理论算法模型和已知实验参量来反演出被测分子的浓度、温度和速度等信息<sup>[5-6]</sup>。近年来,以半导体激光器作为激发光源而发展起来的可调谐激光吸收光谱(TDLAS)技术具有成本低、结构简单和响应速度快等特性<sup>[7-9]</sup>,该技术原理相对简单,但易受到噪声的影响,测量精度和灵敏度有限。通常可分别从硬件和软件方面改进该类光谱系统,从而实现高灵敏度的应用需求。硬件方面的改进措施主要包括将 TDLAS 与长程吸收池相结合以及选择对应目标分子强吸收波段的激光光源,以提高吸收信号强度;软件方面的改进措施主要是采用适当的数字信号处理算法去除信号噪声,以提高信号的信噪比(SNR)。总体而言,基于软件的数字信号处理技术具有成本低、灵活性和兼容性高,以及易大规模集成等优点。

小波变换(WT)是一种多分辨率的变换分析方法,继承和发展了传统傅里叶变换局部化的思想,同时又克服了窗口大小不随频率变化的缺点,已成为信号时频分析和处理的理想工具。近年来,随着小波理论的日益完善,小波分析在信号分析、图像处理、量子理论、地震勘探、语音识别与合成、机器视觉等科学技术领域得到了广泛应用<sup>[10-12]</sup>。相比于其他数字信号处理方法,小波分析因具有多分辨率的特性而可以更好地描述信号时间(空间)和频率(尺度)域的局部特性<sup>[10]</sup>。本文针对传统硬阈值和软阈值方法的不足,提出了一种基于高次逼近法和指数折衷法的新型阈值模型方法,并通过大量的仿真实验对该算法模型在激光光谱吸收去噪方面的可靠性进行系统评估;最后,将最优的相关参数应用到基于新型中红外量子级联激光器(QCL)的呼出气体诊断中。

## 2 小波变换

### 2.1 小波变换原理

小波变换可表示为

$$W(\omega, t) = \frac{1}{\sqrt{t}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) \psi\left(\frac{\xi - \omega}{t}\right) d\xi, \quad (1)$$

式中  $W(\omega, t)$  为小波变换后的结果,  $\omega, t$  分别为小波母函数的平移因子与伸缩因子,  $\xi$  为积分变量,  $f(\xi)$  为原始信号,  $\psi[(\xi - \omega)/t]$  为小波母函数。(1)式的含义是将  $t$  时刻频率分量为  $\omega$  的信号成分分离出来。相比于傅里叶变换,小波变换是一种时频的局部变换,通过对小波基的伸缩与平移可以有效观察信号的时频特征,在信号去噪过程中不会产生非常明显的破坏。对于非平稳的信号,小波变换解决了傅里叶变换不具有时间分辨率的问题。

### 2.2 小波阈值去噪原理

假设信号为  $S(t)$ ,则正常情况下观测的光谱信号可表示为

$$Y(t) = S(t) + W(t), \quad (2)$$

式中  $W(t)$  为 Gauss 白噪声。在光谱信号中,噪声一般处于高频区域,有用信号一般处于低频区域<sup>[13]</sup>,故去噪过程可以归结为对小波分解光谱信号产生的高频部分进行阈值处理的过程。该处理过程根据光谱信号获取阈值,并选取恰当的阈值函数处理小波分解产生的各层高频小波系数,最后对处理后的各层小波系数进行信号重构,最终达到去除噪声、恢复信号的目的<sup>[14-15]</sup>。根据上述分析可以得出小波阈值去噪的具体过程为:

1) 确定恰当的小波基。在小波分解过程中,小波基的选择直接关系到光谱信号去噪效果的好坏, Mallat 算法指出,小波基应该满足正交性、对称性、紧支撑、消失矩和相似性 5 种性质。常用的离散小波基有 haar 小波基、db 小波族与 sym 小波族,此外还有 rbio 小波族与 bior 小波族,它们满足双正交的性质,并且具有较好的去噪效果。

2) 确定分解深度并对信号进行分解。不同含噪信号的分解深度一般不相同,关于信号分解深度的确定可以参考文献<sup>[16-18]</sup>,这里不再赘述。确定分解深度后,应对信号进行分解, Mallat 算法的信号分解方式如

图 1 所示。利用一组高低通滤波器将小波分解成一系列低频(CA)、高频(CD)成分。低频成分体现了信号的特征,由于多数光谱信号的主要频率分布在低频部分,故低频成分是较为重要的部分;而高频成分描述的是信号的细节,往往对应的是信号中的噪声。Mallat 算法涉及的多分辨分析思想是小波分析的核心,利用该算法可以有效分离信号能量与噪声能量,有利于信号后续的阈值处理。

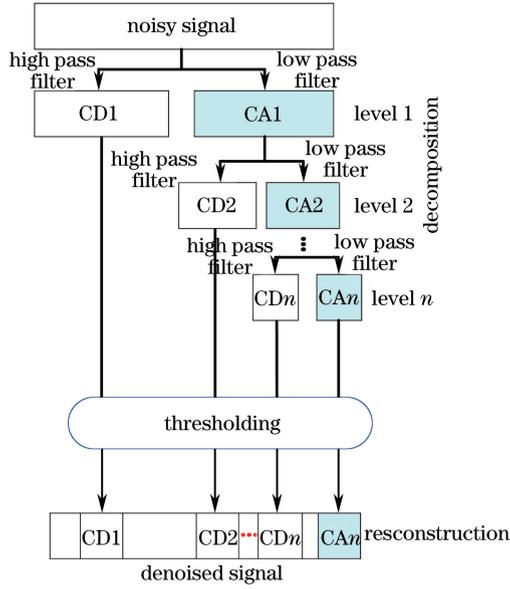


图 1 多分辨小波去噪过程

Fig. 1 Schematic of the multi-resolution wavelet denoising

3) 估计阈值。阈值的选取与噪声方差有关,但在实际光谱信号处理过程中,往往并不知道噪声的方差,需要对含噪光谱信号的噪声方差进行有效估计。阈值的计算公式为  $\lambda = \sigma \sqrt{2 \lg N}$ ,  $\sigma$  为估计的噪声标准差,  $N$  为分解的各层信号长度。

4) 选取阈值函数进行去噪。确定阈值后,可以利用硬阈值或软阈值法<sup>[20]</sup>处理小波系数,并利用处理后的小波系数进行信号重构。软阈值和硬阈值方法的数学表达式分别为

$$g(a) = \begin{cases} \text{sgn}(a)(|a| - \lambda), & |a| \geq \lambda \\ 0, & |a| < \lambda \end{cases}, \quad (3)$$

$$g(a) = \begin{cases} a, & |a| \geq \lambda \\ 0, & |a| < \lambda \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $\text{sgn}$  为符号函数,  $a$  为分解的各层小波系数。由(3)式和(4)式可以看出,传统的硬阈值与软阈值方法都有难以避免的缺点:硬阈值法在信号还原过程中容易产生振荡,也就是 Gibbs 现象;软阈值法可以解决振荡的问题,但信号的还原效果不好。为了解决软阈值和硬阈值方法的缺陷,近年来很多学者提出了多种修改方案<sup>[11-12]</sup>,如高次逼近法和指数折衷法,它们的具体表达式分别为

$$g(a) = \begin{cases} a \left(1 - \left|\frac{\lambda}{a}\right|^m\right), & |a| \geq \lambda \\ 0, & |a| < \lambda \end{cases}, \quad (5)$$

$$g(a) = \begin{cases} \text{sgn}(a) \left[ |a| - \lambda / \exp\left(\frac{|a| - \lambda}{\lambda}\right) \right], & |a| \geq \lambda \\ 0, & |a| < \lambda \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $m$  为可调参数。

值得注意的是,在高次逼近法中,  $m$  的取值范围为  $[1, +\infty)$ 。当  $m$  取 1 时,高次逼近法等效于软阈值处理法,而当  $m \rightarrow +\infty$  时,高次逼近法等效于硬阈值处理法,根据信号的不同可以选择适当的  $m$  值以达到最佳的去噪效果。可见,这两种阈值方法都对传统模型进行了一定的修正,在继承硬阈值与软阈值去噪优点的同

时,一定程度上规避了软阈值和硬阈值方法的缺点,理论上比传统方法的去噪效果更好。

5) 将处理后的小波系数进行重构,还原信号。

### 3 仿真实验结果与分析

根据小波阈值去噪过程可知,小波去噪效果主要受小波基的选择、信号分解深度、阈值估计以及阈值函数选择的影响<sup>[10]</sup>。仿真实验结果表明,小波基的选择、信号分解深度和阈值函数选择对小波去噪效果的影响较大。为了找寻最有效、最适合光谱分析的小波去噪参数,使用仿真实验产生的直接吸收光谱信号进行染噪处理,然后将所得的含噪信号分别与这三种因素进行仿真。

#### 3.1 阈值处理方式的选择

传统的阈值处理方法分为软阈值和硬阈值方法,但这两种方法都存在缺陷。本课题组详细研究了高次逼近法和指数折衷法,并与软阈值和硬阈值方法进行对比。为了防止诸如小波基的选择等对信号造成的影响,对比过程中统一选用 db8 小波基,各阈值函数分解去噪的仿真实验结果如图 2 所示。实验中 4 种去噪方法获得的最大信噪比和最佳分解深度见表 1。由图 2 和表 1 可以看出:在针对含噪信号的处理过程中,利用硬阈值还原信号的方法取得的去噪效果要好于软阈值法的去噪效果,但还原信号产生了明显的抖动;软阈值法虽然保持了信号的连续性,但信号的还原程度并不高,这说明软阈值法虽然解决了硬阈值处理方法导致的抖动问题,但却使原始信号受到一定损失,导致信噪比较低;指数折衷法对信号的还原程度最好,信噪比  $R_{SN}$

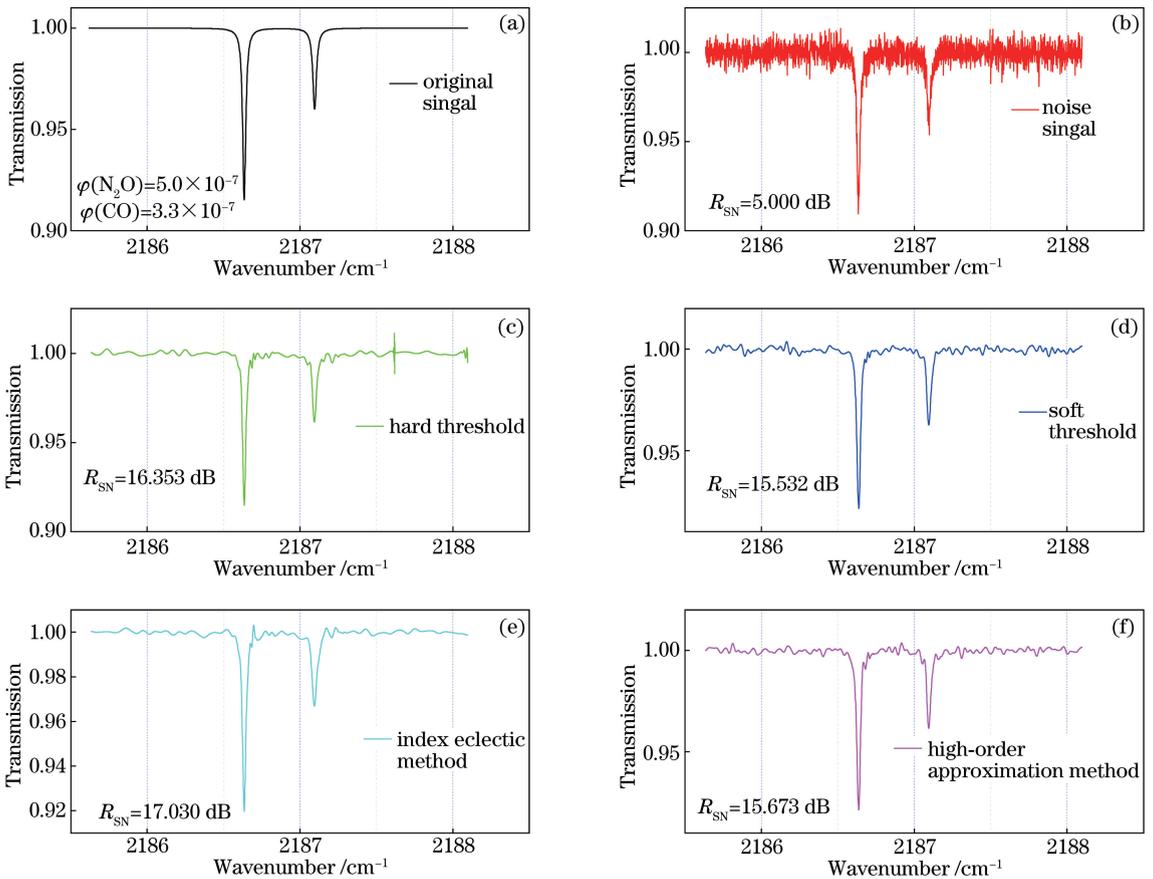


图 2 经各类阈值处理方法处理后的透射谱。(a)原始信号;(b)噪声信号;(c)硬阈值法处理结果;(d)软阈值法处理结果;(e)指数折衷法处理结果;(f)高次逼近法处理结果

Fig. 2 Transmission spectra after processing by various threshold methods. (a) Original signal; (b) noise signal; (c) transmission spectrum after processing by hard threshold method; (d) transmission spectrum after processing by soft threshold method; (e) transmission spectrum after processing by index eclectic method; (f) transmission spectrum after processing by high-order approximation method

可以达到 17.03 dB;高次逼近法在信噪比上与软阈值法得到的结果差不多。可见,改进后的指数折衷法对仿真模拟的吸收光谱信号具有更好的去噪效果,而高次逼近法对光谱信号的去噪效果较差。

表 1 经不同阈值处理方法处理后的信噪比

Table 1 Signal to noise ratio (SNR) after processing by various threshold processing methods

Threshold processing method	Maximal SNR /dB	Optimal decomposition depth
Hard threshold	16.624	5
Soft threshold	15.848	4
Index eclectic method	17.030	5
High-order approximation method	15.548	4

### 3.2 小波基的选取

在小波基的选取上,Mallat 算法指出,小波基应该满足正交性、对称性、紧支撑、消失矩和相似性。为了找出对光谱信号具有最好去噪效果的小波基,针对 MATLAB 内置的多种小波基函数进行比对测试,通过比较信号的信噪比来衡量其去噪效果。由上述实验结果可知,在比较小波基函数去噪效果的实验中应选取指数折衷法作为阈值函数。不同小波族去噪后的信噪比曲线如图 3 所示。由图 3 可见:4 种常用的正交小波族都具有较好的去噪效果;db 小波族在分解深度为 5 或 6 时的去噪效果较好,但随着分解深度进一步增加,去噪信号质量不断下降;而对于 sym、bior 与 rbio 小波族,当信噪比达到最大值后,它们的信噪比不再受分解深度的影响,说明这三类小波族的稳定性较好。表 2 列举了去噪后信噪比大于 17 的部分小波基函数及其对应的最佳分解深度。由表 2 可见,sym4 小波基在信号分解深度为 6 时的信噪比达到了 18.374,去噪效果最好。

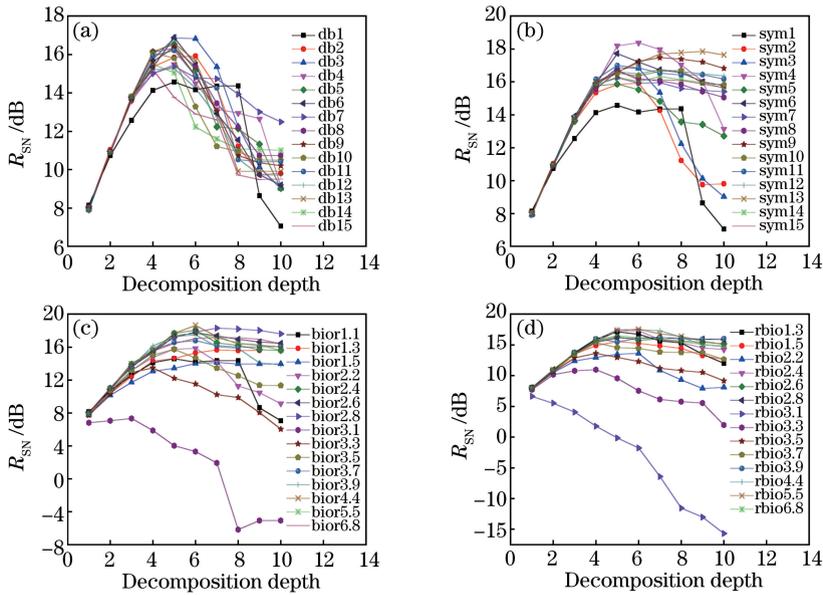


图 3 不同小波族去噪后的信噪比曲线。(a) db 小波族;(b) sym 小波族;(c) bior 小波族;(d) rbio 小波族

Fig. 3 SNR as a function of decomposition depth for different wavelet families. (a) db family; (b) sym family; (c) bior family; (d) rbio family

表 2 不同小波基函数对应的最佳去噪结果和相应的分解深度

Table 2 The best denoising result and the corresponding decomposition depth obtained from different wavelet basis functions

Wavelet basis function	$R_{SN}$ /dB	Decomposition depth	Wavelet basis function	$R_{SN}$ /dB	Decomposition depth
db8	17.108	5	bior3.9	17.492	6
sym4	18.374	6	bior4.4	18.634	6
sym6	17.718	5	bior5.5	17.681	6
coif2	17.062	5	rbio1.3	17.148	5
bior2.4	18.070	6	rbio2.4	17.331	6
bior2.6	17.758	6	rbio4.4	17.459	6
bior2.8	18.282	7	rbio5.5	17.545	6

#### 4 小波去噪在呼出气体激光光谱检测中的应用

为了检验所建立的小波阈值去噪算法模型在实际应用中的可靠性,将获得的最佳滤波参数用于人体呼出气体的激光光谱检测。呼出气体激光光谱检测系统的结构示意图如图 4 所示。激光光源为室温连续模式量子激光器(瑞士 ALPES 公司),该激光器主要由温度和电流控制单元控制,其工作温度范围为 253~303 K,输出波数调谐范围为  $2182\sim 2198\text{ cm}^{-1}$ ,最高输出功率可达 30 mW。本实验以人体常见的呼出气体成分 CO、N<sub>2</sub>O 和水蒸气(H<sub>2</sub>O)为检测对象。为了实现同时测量这三种气体成分的吸收光谱信号,设定激光器的工作温度为 295 K,偏置电流为 400 mA,同时以低频(100 Hz)三角波信号(幅值为 1.5 V)驱动激光器的工作电流,从而实现  $2186.4\sim 2187.4\text{ cm}^{-1}$ 波数范围的激光输出。激光器的出射光束首先经过聚焦准直系统(mirror objective),随后透过氟化钙镜片,再由离轴抛物面镜耦合到长程光学吸收池(AMAC-76)内,光束在吸收池内发生多次反射,最终的出射光由另一离轴抛物面镜聚焦到热电制冷的碲镉汞(VI-4TE-5)探测器中。探测器将光信号转换成电信号,输出到数据采集卡(NI-6212)中,然后通过模数转换最终输入到计算机中。氟化钙镜片用于耦合另一可见光激光器(trace laser),以便于调节光路。在实验中,整个系统的控制和信号分析由自行编写的 LabVIEW 软件自动完成。本系统可同时实现大气中 CO、N<sub>2</sub>O 和水蒸气的高灵敏度测量<sup>[21]</sup>。

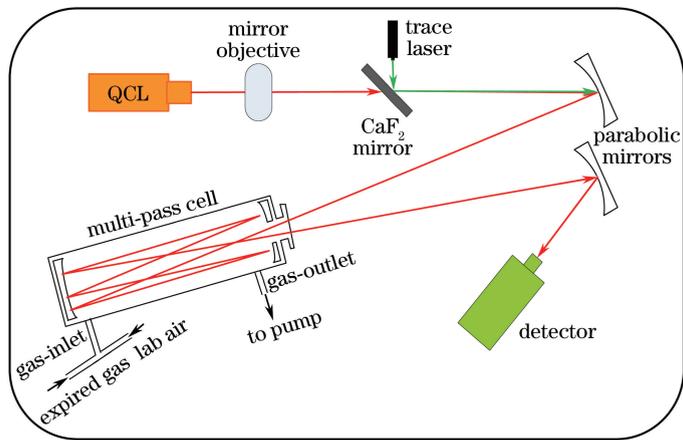


图 4 呼出气体诊断实验装置结构示意图

Fig. 4 Schematic of experimental setup for expired gas diagnosis

为了实现对呼出气体的实时监测,实验中通过循环泵将气体或室内空气连续抽入长程吸收池中,再由泵抽出,长程光学吸收池中的气体压力控制在 100 Pa 左右。实验中为了反演呼出气体中 CO、H<sub>2</sub>O 与 N<sub>2</sub>O 的浓度,需要预先测量室内空气背景中相应三种气体成分的浓度,并进行扣除,然后即可反演出真实呼出气体中 CO、H<sub>2</sub>O 与 N<sub>2</sub>O 的浓度。图 5 给出了实验测量的室内空气和携带某志愿者呼出气体成分的室内空气的吸收光谱信号,从左到右 3 个吸收峰分别为 CO(@  $2186.64\text{ cm}^{-1}$ )、H<sub>2</sub>O(@  $2186.922\text{ cm}^{-1}$ )与 N<sub>2</sub>O(@  $2187.10\text{ cm}^{-1}$ )的吸收峰。显然,原始信号中包含了一定的噪声,为了更精确地反演出各个成分的浓度,选用上述仿真实验中去噪效果最好的 sym4 小波基对其进行降噪处理,分解级次为 6,并利用指数折衷法进行阈值处理,最终得到去噪后的光谱信号,如图 5 所示。通过对比原始信号和小波去噪后的结果可以看出,原始信号中的微弱噪声在利用改进的阈值去噪方法处理后,几乎全部消除。这充分证明了小波阈值去噪方法对光谱信号处理的有效性。此外,去噪后的信号变得更加光滑,这更有利于精确地反演各个成分的浓度。为了进一步评估系统的性能,对携带和不携带呼出气体成分的室内空气开展了实时测量实验,连续测量时间约为 1 h,时间分辨率为 1 s,即在 1 s 内完成信号的采集和浓度反演处理,并给出 CO、水蒸气与 N<sub>2</sub>O 的浓度。本实验中共有 9 位志愿者,首先测量的是室内空气(不含呼出气体成分),大约持续 250 s 后,携带志愿者①呼出气的室内空气被采集到吸收池内,测量结果显示三种气体成分的浓度显著升高,持续到 275 s 时,恢复到不含呼吸气的室内空气的测量,依次规律,交替测量不携带呼出气和携带呼出气的室内空气,如图 6 所示。由图 6 可见,室内空气中 CO 和 N<sub>2</sub>O 本底浓度(体积分数)分别为  $4.2\times 10^{-7}$  和  $3.4\times 10^{-7}$ ,整个

实验过程具有良好的稳定性,实验系统对 CO 与 N<sub>2</sub>O 浓度的变化具有快速的一致响应特性,但水蒸气的强吸附性使得其浓度的变化具有一定的滞后性和不稳定性。此外,在第 1335~1475 s 和 1990~2090 s 2 个时间段内,CO 的体积分数达到  $2.0 \times 10^{-6}$  以上,这与志愿者④和志愿者⑤的吸烟历史有明显的关联性。志愿者②和志愿者③的呼出气体分别采集了两次,这是因为这两位志愿者呼出气体中的 N<sub>2</sub>O 浓度差异显著,且都具有很好的重复性。实验中发现,呼出气中 N<sub>2</sub>O 浓度明显偏高的志愿者均长期接触了 N<sub>2</sub>O,如志愿者③和志愿者⑥均为长期从事 N<sub>2</sub>O 实验的学生,而志愿者⑤为长期工作在实验室内的工作人员;其他几位志愿者日常接触 N<sub>2</sub>O 的几率很低。

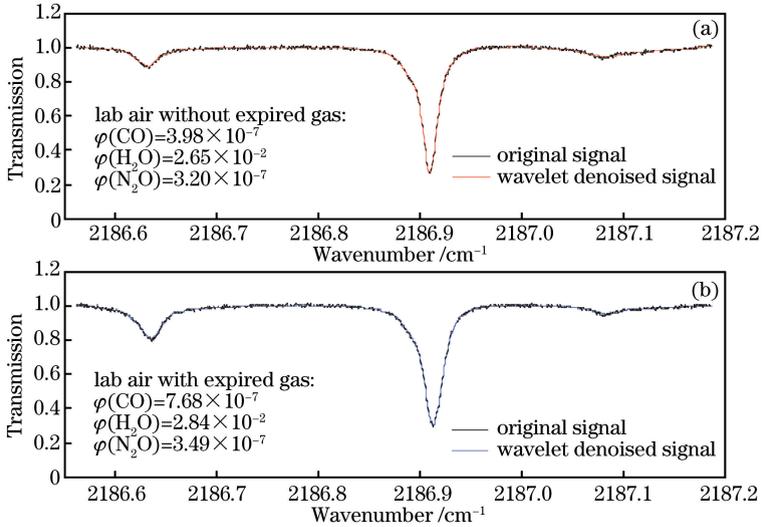


图 5 (a)室内空气与(b)携带呼出气的室内空气的透射谱信号及相应的小波去噪光谱信号

Fig. 5 Transmission spectra of indoor air without (a) and with (b) expired gas, as well as the corresponding results after wavelet denoising

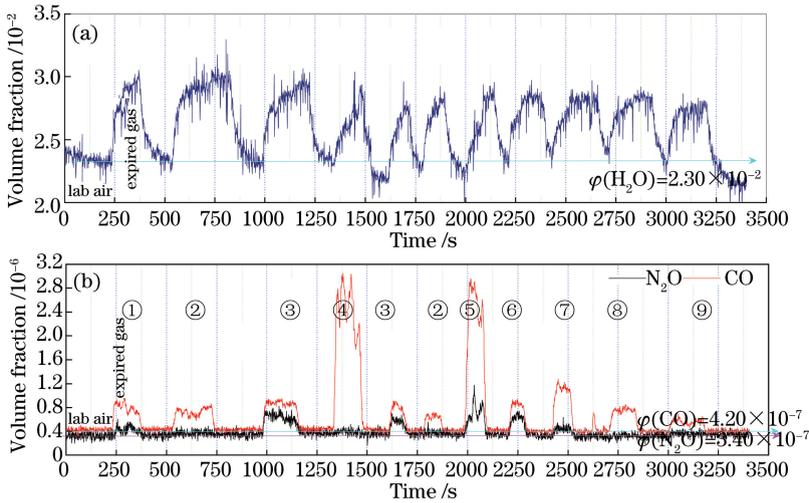


图 6 实时测量室内空气与不同志愿者呼出气体中不同组分的浓度。(a)水蒸气;(b) N<sub>2</sub>O 和 CO

Fig. 6 Real-time concentration of different components of indoor air and expired gases from different volunteers. (a) H<sub>2</sub>O; (b) N<sub>2</sub>O and CO

## 5 结 论

TDLAS 技术具有高灵敏度、高分辨率和非破坏性等特性,近年来被广泛应用于大气环境污染监测、工业处理控制、高温燃烧、等离子诊断和医疗呼出气体分析等领域。针对激光吸收光谱信号中噪声对分析结果

的影响,首先开展了基于小波变换的阈值去噪方法的理论和实验研究。通过自行建立的 MATLAB 模型算法和模拟的气体分子直接吸收光谱信号,深入对比分析了不同阈值方法、分解层数和小波基函数类型对降噪效果的影响,并将获得的最佳滤波参数用于人体呼出气体的光谱信号分析中。实验结果表明,本研究所建立的小波变换去噪算法模型对呼出气体吸收光谱信号的去噪效果良好。此外,通过选择其他波段的可调谐激光光源即可实现对其他呼出气体分子的实时分析。本系统可广泛应用于呼出气体诊断等领域的应用研究。

## 参 考 文 献

- [1] Ghorbani R, Schmidt F M. Real-time breath gas analysis of CO and CO<sub>2</sub> using an EC-QCL[J]. Applied Physics B, 2017, 123: 144.
- [2] Pakmanesh N, Cristescu S M, Ghorbanzadeh A, *et al.* Quantum cascade laser-based sensors for the detection of exhaled carbon monoxide[J]. Applied Physics B, 2016, 122: 10.
- [3] Gao Yanwei, Zhang Yujun, Chen Dong, *et al.* Measurement of oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0330001.  
高彦伟, 张玉钧, 陈东, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度测量研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0330001.
- [4] Cui Xiaojuan, Dong Fengzhong, Zhang Zhirong, *et al.* Studies on improving measurement sensitivity of HONO based on second harmonic wavelength modulation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0630006.  
崔小娟, 董凤忠, 张志荣, 等. 基于二次谐波调制技术提高 HONO 测量灵敏度的方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0630006.
- [5] Wei Min, Liu Jianguo, Kan Ruifeng, *et al.* Study on detection of greenhouse gases based on quantum cascade laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1230003.  
魏敏, 刘建国, 阚瑞峰, 等. 基于量子级联激光器的温室气体测量方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1230003.
- [6] Tang Yuanyuan, Liu Wenqing, Kan Ruifeng, *et al.* Rapid and sensitive measurements of motor vehicle exhausts using quantum cascade lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1215003.  
汤媛媛, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 基于量子级联激光器高灵敏快速检测机动车尾气排放气体浓度[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1215003.
- [7] Li J, Yu B, Zhao W, *et al.* A review of signal enhancement and noise reduction techniques for tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2014, 49(8): 666-691.
- [8] Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.* Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208003.  
袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气 CO<sub>2</sub> 监测仪[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208003.
- [9] Chen Ying, Gao Guangzhen, Cai Tingdong. Detection technique of ethylene based on photoacoustic spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(5): 0511001.  
陈颖, 高光珍, 蔡廷栋. 基于光声光谱的乙烯探测技术[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0511001.
- [10] Li J, Parchatka U, Fischer H. Applications of wavelet transform to quantum cascade laser spectrometer for atmospheric trace gas measurements[J]. Applied Physics B, 2012, 108(4): 951-963.
- [11] Duan Yonggang, Ma Liyuan, Li Yongjun, *et al.* Improvement and simulation analysis of threshold denoising algorithm [J]. Process Automation Instrumentation, 2011, 32(9): 27-28.  
段永刚, 马立元, 李永军, 等. 阈值去噪改进算法及其仿真分析[J]. 自动化仪表, 2011, 32(9): 27-28.
- [12] Ye Yulei, Dai Wenzhan. Signal de-noising in wavelet based on new threshold function [J]. Journal of Computer Applications, 2006, 26(7): 1617-1619.  
叶裕雷, 戴文战. 一种基于新阈值函数的小波信号去噪方法[J]. 计算机应用, 2006, 26(7): 1617-1619.
- [13] Li Qingzhong, Liu Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0209001.  
李庆忠, 刘清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0209001.
- [14] Li Haidong, Li Qing. Wavelet denoising based on technique of threshold [J]. Computer Technology & Development, 2009, 19(7): 56-58.  
李海东, 李青. 基于阈值法的小波去噪算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(7): 56-58.
- [15] 王新楼. 小波去噪方法分析与 Matlab 仿真[J]. 工业控制计算机, 2008, 21(6): 55-56.
- [16] Du Wenliao, Zhu Rumin, Li Yanming. Adaptive selection of optimal decomposition level in filtering algorithm based on

- wavelet transform[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(9): 1408-1411.
- 杜文辽, 朱茹敏, 李彦明. 小波滤波分解层数的自适应确定方法[J]. *光电子 • 激光*, 2010, 21(9): 1408-1411.
- [17] Tao Ke, Zhu Jianjun. A hybrid indicator for determining the best decomposition scale of wavelet denoising[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 749-755.
- 陶珂, 朱建军. 多指标融合的小波去噪最佳分解尺度选择方法[J]. *测绘学报*, 2012, 41(5): 749-755.
- [18] Zhang Jixian, Zhong Qiuhai, Dai Yaping. The determination of the threshold and the decomposition order in threshold de-noising method based on wavelet transform[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2004, 24(2): 118-122.
- 张吉先, 钟秋海, 戴亚平. 小波门限消噪法应用中分解层数及阈值的确定[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(2): 118-122.
- [19] Qu Weiwei, Gao Feng. Study on wavelet threshold denoising algorithm based on estimation of noise variance[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2): 28-33.
- 曲巍巍, 高峰. 基于噪声方差估计的小波阈值降噪研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(2): 28-33.
- [20] Mao Jiandong, Hua Dengxin, Wang Yufeng, *et al.* Noise reduction in lidar signal based on wavelet packet analysis[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0209001.
- 毛建东, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 基于小波包分析的激光雷达信号消噪算法的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0209001.
- [21] Li J, Deng H, Sun J, *et al.* Simultaneous atmospheric CO, N<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O detection using a single quantum cascade laser sensor based on dual-spectroscopy techniques[J]. *Sensors & Actuators B*, 2016, 231: 723-732.