

CO 在 1.578 μm 的可调谐二极管激光光谱信号小波去噪研究

邱选兵¹, 孙冬远¹, 李传亮^{1*}, 吴应发¹, 张恩华¹, 魏计林¹, 王 高^{2*}, 鄢 玉^{3*}

1. 太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024
2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051
3. 河北工业职业技术学院汽车工程系, 河北 石家庄 050091

摘 要 研究了一氧化碳(CO)近红外波段直接吸收和波长调制信号去噪处理算法。从 HATRAN 数据库中得到 CO 气体的吸收信号作为仿真数据, 提取直接吸收信号、1- f 和 2- f 解调信号作为原始信号, 研究了不同小波基以及不同的分解层数对叠加高斯白噪声的光谱信号去噪的效果。最后利用基长为 0.95 m 有效光程为 55.1 m 的 Herriott 型多光程池对 CO 在 1.578 μm 处的第二泛频带 P(4)吸收谱线信号进行测量和信号处理, 与原始信号相比, 经过信号处理过的直接吸收、1- f 和 2- f 解调信号的信噪比都提高 1~2 个数量级; 通过选择不同小波基和优化小波变换层数, 增加了系统的抗干扰能力。

关键词 激光吸收光谱; 近红外 CO 光谱; 波长调制; 小波去噪

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)02-0628-06

引 言

近年来, CO 已经成为了大气环境污染的重要气体之一, 其与人类的身体健康密切相关^[1]。同时, CO 是化石燃料的主要燃烧物, 准确测量其浓度值可以优化燃烧效率^[2]。可调谐激光吸收光谱(TDLAS)具有非侵入式、实时性、指纹特性、高灵敏等特点, 广泛应用于恶劣环境下的气体浓度、温度、压力以及速度等测量^[3]。TDLAS 结合波长调制技术(WMS)可以提高气体的检测灵敏度和鲁棒性^[4]。目前, CO 的测量主要是基于 4.7 μm 和第一泛频 2.3 μm 的强吸收带^[5], 基带和谐波带的 CO 具有很强吸收特性, 因此采用波长调制的检测极限可以达到 ppm 甚至 ppb 数量级^[5]。

气体在近红外波段的吸收比中红外区域弱, 其直接吸收和解调信号的幅度较小^[6]。激光器、透镜、反射镜、探测器等器件(标准具效应)和电子设备(高斯白噪声)的噪声也会混入到解调信号中, 从而降低了解调信号的信噪比^[7], 引起信号的随机波动。在痕量气体测量时, 解调信号的谐波成份可能被埋在噪声中^[8]。因此, 国内外大量学者提出了不同的

去噪算法。信号的平均值是最早也是最简单的一种应用于 TDLAS 的信号处理方法, 它可以增强稳定性、提高准确度^[9]。维纳滤波器采用最小均方误差(MMSE)算法优化滤波器系数, 以自适应光谱信号的漂移或背景变化^[10]。Claps 将卡尔曼滤波算法应用到 NH_3 和 CO_2 的浓度同时测量中, 其灵敏度提高 6 个数量级^[11]。维纳滤波器和卡尔曼滤波器在实时处理中需要消耗大量的时间和内存。然而, 基于小波变换的滤波算法可以达到更好的测量精度和灵敏度^[12]。Wang 通过引入小波去噪算法到近红外 CH_4 检测中, 最小的检测极限达到 1 ppm, 在 4~50 kppm 的测量范围内, 误差降低到 6.2%, Allan 偏差降低到 0.08 ppm^[13]。Zhang 等将相关分析和小波分析与波长调制技术相结合, 使得 NH_3 的检测下限降低到处理前的约百分之一^[14]。

然而, 在小波去噪算法中, 不同的小波基函数和变换层数具有不一样的去噪效果。在应用小波去噪时, 应综合考虑待分析信号的特征、算法的计算成本、去噪效果等因素, 以选择最优化的小波基和变换层数。因此, 本文将从仿真数据和实验数据方面来分析 CO 在第二泛频跃迁 P(4)吸收线的吸收光谱信号对于不同小波基函数和不同去噪层数的去噪效

收稿日期: 2017-04-16, 修订日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1610117, U1810129, 11504256, 61573323), 山西省回国留学人员科研项目(2014-054), 山西省高等学校优秀青年学术带头人(2018), 山西省重点研发计划项目(201803D31077, 201803D121090), 山西省“1331”工程重点创新团队建设计划项目, 江西中医药大学现代中药制剂教育部重点实验室开放基金项目, 有机地球化学国家重点实验室开放基金项目(SK-LOG-2017-18)资助

作者简介: 邱选兵, 1980 年生, 太原科技大学应科学院物理系副教授 e-mail: qiuxb@tyust.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: clii@tyust.edu.cn; wanggao@nuc.edu.cn; Liaiyuer@126.com

果, 并推导出最优化的去噪方案。

1 小波去噪算法

1.1 小波去噪理论

小波变换是将待分析信号分解成不同的频率成分, 然后在每一个的尺度上进行多分辨率的分析。将信号在这些特殊的子空间进行投影, 并得到一系列的小波系数。通常采用抑制小的系数而保留大的系数来进行滤波。抑制细节系数分为软阈值法和硬阈值法两种: 硬阈值是将小波分解后的细节系数的绝对值小于或等于阈值的设置为零, 此法容易在某些点产生间断; 软阈值是在硬阈值的基础上将边界出现不连续的点收缩到零, 有效地避免间断。一般来说, 经过硬阈值去噪的信号更为粗糙, 而软阈值具有很好的数学特性, 去噪后的信号比较光滑。

1.2 小波基与分解层数的选择

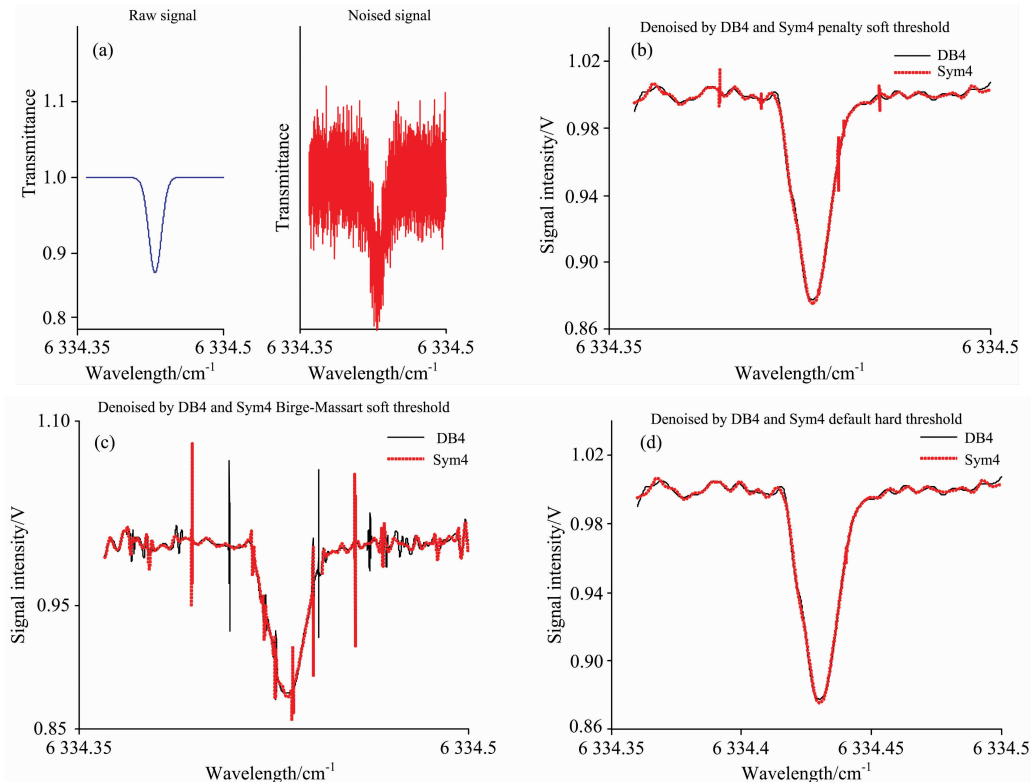
在小波去噪中, 不同的母小波基会直接影响信号在该基上的投影(系数和基函数), 特别在实时信号的小波去噪中。因此在选择小波基的时候, 需要综合考虑如: 去噪效率、算法的复杂度、去噪时间, 以满足实时需要。解析分析和实验都验证具有正交特性、紧支集以及二阶或三阶消失矩的小波基(如 Daubechies, DB4 和 Symlets, Sym4)更适合实时去噪^[15]。另一方面小波变换的层数一般选择为 $L = \log_2(N)$, 其中 N 为样本的长度。在试验中 N 为 5 003, 则变换的层数最大为 13。然而变换层数越多, 计算复杂度越高, 时间就越长, 因此为了平衡计算时间和去噪效果, 将选择变换的层数从 4 到 8 层, 小波基选择 DB4—DB8 以及 Sym4—Sym8, 阈值处理算法采用 penalty 算法、Birge-Massart(B-M) 阈值法以

及 default hard(默认) 阈值法, 并通过 HATRAN 数据库中的 CO 吸收谱线进行算法仿真, 得到最优去噪小波基、变换层数以及阈值处理算法。

2 仿真与分析

选择 CO 的中心波长为 $1.578 \mu\text{m}$, CO 的第二泛频跃迁 P(4) 吸收线。仿真的数据为纯 CO 的 DAS(直接吸收信号)、1- f 信号(1 倍锁相解调信号)和 2- f 信号(2 倍锁相解调信号)叠加高斯白噪声。此处选择高斯白噪声原因在于理论和试验中的噪声主要为高斯白噪声。仿真数据从 HITRAN 2012 光谱数据库中得到的, 其参数如下: 波数为 $6\ 334.36 \sim 6\ 334.50 \text{ cm}^{-1}$, 温度 T 为 296 K, 压强为 133.32 Pa, 步长为 $2.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$, 线型为 Voigt, 吸收长度 $L = 50 \text{ m}$, 数据点个数数为 5 003^[16]。

图 1 为 CO 直接吸收原始信号、1- f 、2- f 、叠加白噪声信号以及采用 DB4 和 Sym4 在不同阈值去噪的结果。从直观来看, 两种小波基滤波效果基本一致, Sym4 小波基在峰值处会出现更强的振幅, 这和 Sym4 小波基函数有关。作为三种阈值处理方法, penalty 算法和默认阈值算法比 B-M 阈值法更好, 噪声抑制强。因此, 论文将仿真数据从 1 Torr(Torr = 133.32 Pa) 到 8 Torr 得到 8 组仿真数据, 小波基选择 DB4—DB8 以及 Sym4—Sym8, 选择变换的层数从 4 到 8 层, 小波阈值选择 penalty 算法、B-M 阈值法以及默认阈值法进行滤波实验, 并采用滤波前后的信噪比进行分析。每组产生 10 次的随机白噪声进行实验, 在每组实验中, 层数从 4~8 层共计算 5 次, 小波基从 DB4, DB5 一直到 DB8 共计 5 次, 因此每组大气压的仿真数据 750 次, 10 组共计 7 500 次。由



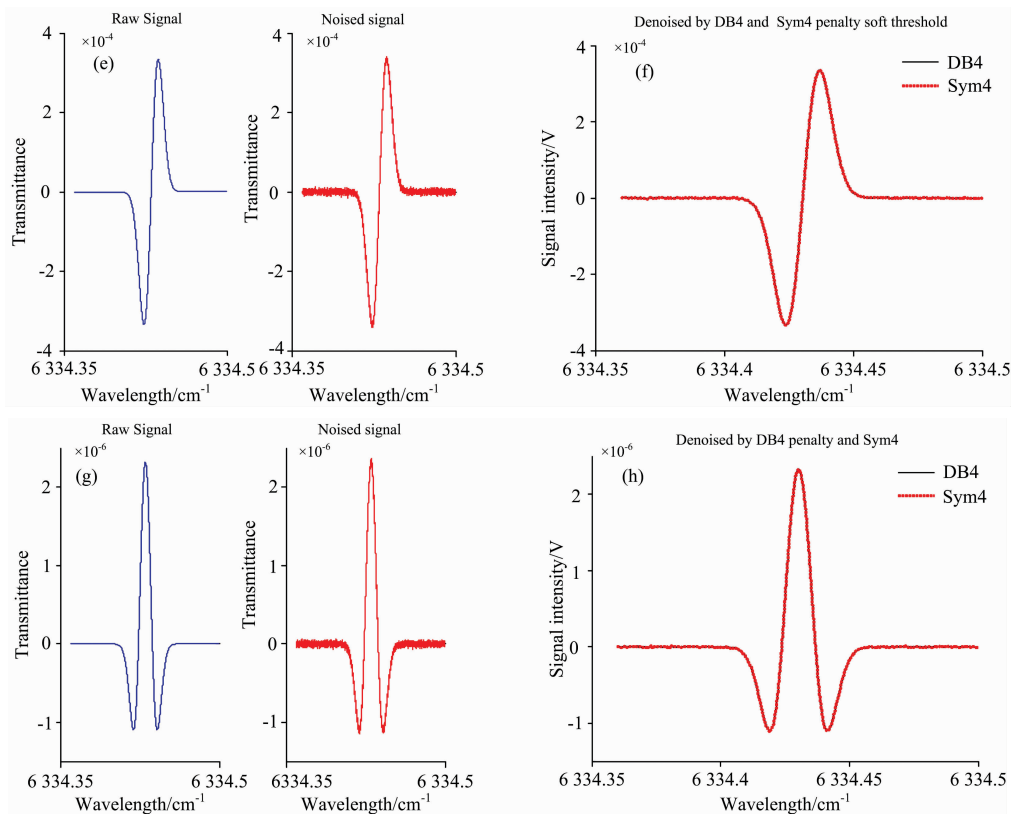


图 1 信号去噪

(a): 纯信号和加噪信号; (b): penalty 去噪; (c): B-M 去噪; (d): 默认阈值去噪; (e): 1-*f* 和加噪信号; (f): 1-*f* 的 penalty 去噪; (g): 2-*f* 和加噪信号; (h): 2-*f* 的 penalty 去噪

Fig. 1 Signal denoising

(a): Pure signal and noised signal; (b): Penalty denoising; (c): B-M denoising; (d): Default denoising; (e): 1-*f* signal and noised 1-*f*; (f): Penalty denoising 1-*f*; (g): 2-*f* signal and noised 2-*f*; (h): penalty denoising 2-*f*

于篇幅原因, 论文给出了总压在 10 Torr 情况下不同的小波基(DB4—DB8, Sym4—Sym8)分解层数从 4 层到 8 层的去噪效果, 如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 信噪比随着小波基的级数增大而增加, 同时分解的层数越多, 信噪比也越高; 然而, 小波基的

级数越大, 分解的层数越多, 则计算的复杂度越高, 耗时越长, 不利于在线实时检测分析。因此综合分解的层数、小波基的级数、信噪比以及计算成本等因素, 选择 DB6-8 或 Sym6-8, 分解的层数选择在 7~8 较为合适。

表 1 在 10 Torr 气压下不同小波基在分解层数 4 层到 8 层的 SNRs(信噪比)
Table 1 SNRs of decomposition signals from the 4th to 8th layer based on 10 Torr

小波基种类	Layer-4	Layer-5	Layer-6	Layer-7	Layer-8
原始加噪信号	10.163 1	10.176 9	10.075 2	10.163 4	10.164 2
DB4 penalty 阈值法	20.099 4	25.986 9	34.200 3	41.334 7	45.177 6
DB4 B-M 阈值法	18.647 3	22.963 3	28.341 4	35.731 4	35.546 3
DB4 默认阈值法	20.099 4	25.986 8	33.881 1	45.855 3	52.711 5
Sym4 penalty 阈值法	20.557 0	26.716 9	34.159 5	37.118 7	44.097 4
Sym4 B-M 阈值法	19.412 4	25.738 6	29.285 6	33.253 5	42.436 3
Sym4 默认阈值法	20.556 7	26.712 2	34.020 3	44.378 6	46.509 3
DB5 penalty 阈值法	20.609 5	26.850 9	39.440 3	39.848 2	52.701 9
DB5 B-M 阈值法	18.876 4	23.546 9	27.085 3	38.547 4	39.475 9
DB5 默认阈值法	20.608 9	26.859 9	39.278 2	29.866 7	55.387 0
Sym5 penalty 阈值法	20.619 4	26.689 9	39.320 6	35.146 1	42.624 3
Sym5 B-M 阈值法	18.367 1	23.129 6	27.920 5	46.728 9	36.243 3

续表 1

Sym5 默认阈值法	20.619 4	26.689 4	38.682 1	44.832 8	54.003 9
DB6 penalty 阈值法	20.918 0	27.108 1	37.479 2	40.319 6	35.416 6
DB6 B-M 阈值法	19.043 4	22.446 6	31.268 9	33.459 3	35.429 2
DB6 默认阈值法	20.918 0	27.111 9	37.047 4	42.289 3	43.202 9
Sym6 penalty 阈值法	20.918 0	27.250 6	36.355 1	36.438 14	48.202 6
Sym6 B-M 阈值法	18.382 2	24.759 6	31.674 5	36.354 4	33.140 4
Sym6 默认阈值法	20.978 6	27.141 8	36.715 3	42.659 3	55.742 1
DB7 penalty 阈值法	20.511 3	27.169 3	34.455 4	47.599 9	41.218 5
DB7 B-M 阈值法	18.580 7	22.710 8	30.137 0	35.139 4	39.619 3
DB7 默认阈值法	20.529 7	27.183 4	34.406 3	47.843 1	56.402 5
Sym7 penalty 阈值法	20.475 0	26.975 2	35.230 8	47.599 9	30.976 7
Sym7 B-M 阈值法	19.067 2	24.093 4	27.436 9	38.873 7	44.652 3
Sym7 默认阈值法	20.475 1	26.946 4	36.190 2	53.200 3	67.090 5
DB8 penalty 阈值法	21.330 4	26.777 2	33.419 0	46.199 4	45.012 0
DB8 B-M 阈值法	17.914 9	22.078 3	28.127 6	31.009 1	37.689 2
DB8 默认阈值法	21.330 8	26.776 2	34.265 5	35.303 8	60.786 1
Sym8 penalty 阈值法	21.544 4	27.295 8	35.678 7	37.223 6	33.012 8
Sym8 B-M 阈值法	19.471 1	23.654 0	28.221 9	48.330 5	38.897 4
Sym8 默认阈值法	21.544 2	27.204 1	35.578 8	52.754 1	77.010 2

表 2 为总气压在 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 以及 8 Torr 情况下的 DAS, 1- f 信号、2- f 信号最优去噪统计结果。从表 2 可以看出, 针对加白噪声后的光谱信号, 当选择 DB6 或 Sym6 小波基, 去噪的层数选择 7 层时, 阈值处理方法采用默认阈值法, 去噪性能达到了最优化(考虑计算的复杂度、时间效率等因素, 信噪比达到最优), 因此实验验证中按照此原则对 CO 的光谱信号进行去噪分析。

表 2 直接吸收、1- f 以及 2- f 去噪信噪比Table 2 SNRs of DAS, 1- f and 2- f

Total pressure(Torr)	SNRs by DAS	SNRs of 1- f	SNRs of 2- f
1	77.010	2 258.162	2 049.129
2	140.018	2 138.237	1 952.866
3	131.257	2 078.817	2 126.047
4	156.496	2 046.701	1 921.394
5	177.532	1 887.122	1 926.843
6	206.685	1 708.219	1 871.773
7	224.935	1 553.267	1 840.734
8	254.074	1 464.886	1 843.463

3 实验部分

CO 多光程吸收信号采集与滤波处理的实验装置请参见项目组前期工作^[17]。其中 DFB 激光器(distributed feedback laser, 分布式反馈激光器)的温度和注入电流采用 LDC-3724C 控制。信号发生器 AFG3102C 产生的扫描三角波信号和锁相放大器(SR830)提供的正弦波叠加后输入到激光控制器 LDC-372 4C 中, 对 DFB 激光器的波长进行扫描和调制。激光通过准直系统后进入 Herriott 吸收池。Herriott 吸收池的两侧安装有直径为 6 cm、曲率半径为 5 m 的球面反射镜。

激光束通过一侧的入射孔进入吸收池, 反射 58 次(有效光程为 55.1 m)后, 再次从入射孔出射。出射光聚焦到 InGaAs 探测器(ET-3010)并转换为电压信号, 该信号经放大后一路输入到示波器(MDO3104, 5 GS·s⁻¹ 采样率, 1 GHz 带宽), 另一路输入到锁相放大器中进行 1- f 和 2- f 信号的解调, 解调后的信号也输入到示波器中。示波器采集 DAS, 1- f 和 2- f 信号后通过 USB 传输到计算机中, 数据在 Matlab 进行数据的分析、处理和保存。

4 结果与讨论

图 2 为纯 CO 气体混入 8 Torr 空气后吸收光谱信号处理。其中图 2(a)为原始的三角波扫描信号和吸收信号, (b)为根据三角波的半个周期扫描信号截取的光谱信号, (c)为拟合基线, (d)为 CO 吸收的光谱信号以及采用 DB6 的 7 层去噪后的波形图。从图 2(d)中的局部放大图可以看出, 原始信号的噪声幅度比较大, 根据文献[9], 可以计算出原始光谱信号的信噪比为 5.677, 信号的标准差为 0.363 040, 经过去噪后的信噪比为 67.282, 信号的标准差为 0.015。

图 2(e)和 2(f)为 1- f 和 2- f 解调信号去噪前和去噪后的波形对照图。可以看出原始的解调信号其信噪比低, 在无论是吸收峰值还是未吸收处, 原始信号都难以获得准确的信号电平, 在 DB6 和 Sym6 小波 7 层分解去噪后重构的信号中可以得到高信噪比的解调信号。从图 2(e)和 2(f)的局部放大图可以看出, 信噪比很差, 原始的解调信号很难直接进行分析和浓度的反演, 而经过小波去噪后的波形在吸收峰值处非常的平滑, 在未吸收的地方噪声的幅度已经被大大的压缩了, 为准确的浓度反演提供了依据。从图 2 可以看出, 在 DB6 和 Sym6 小波 7 层分解以及默认阈值的条件下信号的恢复达到了最优化。

针对不同浓度的纯 CO 气体, 从 1~8 Torr, 每隔 1 Torr

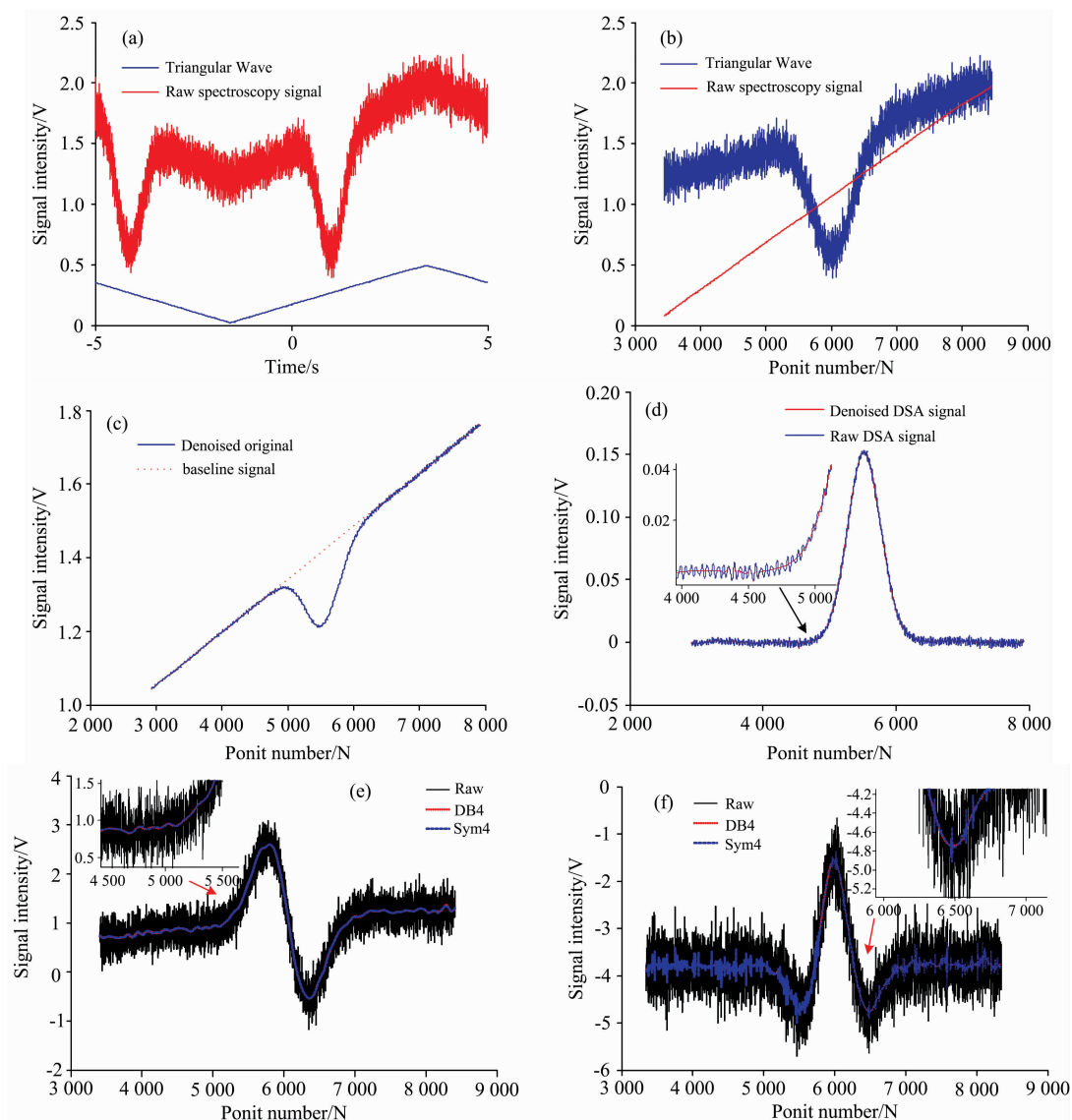


图 2 CO 吸收信号处理

(a): 原始信号与扫描信号; (b): 单周期原始信号与扫描信号; (c): 去噪后以及基线拟合;
 (d): DSA 去掉基线后信号; (e): 1-*f* 解调信号去噪前后; (f): 2-*f* 解调信号去噪前后

Fig. 2 The processing for CO absorption signal

(a): Row signal and scanning signal; (b): Row signal and scanning signal in a scanning period;
 (c): Denoising signal and baseline fitting; (d): The signal subtraction by baseline;
 (e): 1-*f* demodulated signals before and after denoising; (f): 2-*f* demodulated signals before and after denoising

表 3 小波基为 Sym6 和 DB6 的直接吸收、1-*f* 以及 2-*f* 去噪

Table 3 The SNRs of DAS, 1-*f*, 2-*f* based on Sym6 and DB6 wavelet bases

total pressure(Torr)	SNRs of DAS		SNRs of 1- <i>f</i>		SNRs of 2- <i>f</i>	
	Sym6	DB6	Sym6	DB6	Sym6	DB6
1	68.196	62.763	12.352	12.321	52.971	53.628
2	71.157	56.579	24.022	24.053	166.36	153.14
3	80.746	78.301	37.877	37.673	247.60	229.26
4	104.94	89.528	43.452	43.458	223.40	204.69
6	138.67	160.11	66.695	67.069	208.90	211.43
7	118.61	123.32	76.665	77.045	236.56	243.38
8	135.12	125.12	85.663	85.541	259.77	263.02

测量一次, 对采集得到的数据采用上文的处理方法进行去噪。表 3 为原始信号、1-*f* 和 2-*f* 信号, 采用默认阈值法, 小波基采用 DB6 和 Sym6, 7 层分解的去噪结果。图 2 和表 3 可以看出, 光谱数据的 DAS 信号、1-*f* 解调和 2-*f* 解调信号的信噪比都提高了 1 到 2 个数量级。

实验中激光器的驱动电路、光电探测器、运算放大器以及模数转换等电子器件和线路存在工作噪声以及温漂引起的热噪声, 主要以白噪声存在, 而小波去噪算法对白噪声具有优越的去噪特性。结合表 1、表 2、表 3, 可以看出, 系统测量噪声大大地被抑制掉, 信噪比提高了 1~2 个数量级, 标准差也降低了 1 个数量级以上, 从而使得系统检测的灵敏度得到

了提高,增加了系统的抗干扰能力。

5 结 论

光谱吸收信号的信噪比是制约其检测灵敏度的重要参数,为了获得高灵敏度的检测极限,对多光程的光谱吸收信号进行了信号的增强。针对不同的小波基、不同的分解层数

对信噪比的影响,采用 Sym4—Sym8、DB4-D 小波基,分解的层数从 4—8 层分析滤波的信噪比、计算效率因素的影响。不同压强下的 HATRAN 仿真数据和实验数据的 DAS、1- f 以及 2- f 信号的去噪结果表明,选择 DB6 或 Sym6,分解的层数选择在 7 较为合适,信噪比都提高 1~2 个数量级,增加了系统的抗干扰能力,为下一步的高灵敏度的光谱测量提供了支持。

References

- [1] Wojtas J, Bielecki Z, Staciewicz T, et al. *Opto-Electronics Review*, 2012, 20: 26.
- [2] Ren W, Farooq A, Davidson D F, et al. *Applied Physics B*, 2012, 107: 849.
- [3] Hanson Ronald K. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33: 1.
- [4] Kluczynski Pawel, Gustafsson Jörgen, Lindberg Åsa M, et al. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2001, 56: 1277.
- [5] Töpfer Thomas, Petrov Konstantin P, Mine Yasuharu, et al. *Applied Optics*, 1997, 36: 8042.
- [6] Reid J, Labrie D. *Applied Physics B*, 1981, 26: 203.
- [7] Masiyano Dackson, Hodgkinson Jane, Schilt Stéphane, et al. *Applied Physics B*, 2009, 96: 863.
- [8] Meng Y, Liu T, Liu K, et al. *Photonics Journal IEEE*, 2014, 6: 6803209.
- [9] Lins B, Zinn P, Engelbrecht R, et al. *Applied Physics B*, 2010, 100: 367.
- [10] Werle Peter W, Scheumann Bodo, Schandl Josef. *Opt. Eng.*, 1994, 33: 3093.
- [11] Leleux D P, Claps R, Chen W, et al. *Applied Physics B*, 2002, 74: 85.
- [12] Li Jingsong, Parchatka Uwe, Fischer Horst. *Applied Physics B*, 2012, 108: 951.
- [13] Zheng Chuantao, Ye Weilin, Huang Jianqiang, et al. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 190: 249.
- [14] ZHANG Li-fang, WANG Fei, YU Li-bin, et al(张立芳, 王 飞, 俞李斌, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2016, 36(6): 1794.
- [15] Qiu Xuanbing, Wei Chao, Cui Xiaochao, et al. *INSIGHT*, 2013, 55: 136.
- [16] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4.
- [17] Li Chuanliang, Wu Yingfa, Qiu Xuanbing, et al. *Applied Spectroscopy*, 2017, 71: 809.

Wavelet Denoising Research for the Tunable Laser Diode Absorption Spectroscopy of the CO at 1.578 μm

QIU Xuan-bing¹, SUN Dong-yuan¹, LI Chuan-liang^{1*}, WU Ying-fa¹, ZHANG En-hua¹, WEI Ji-lin¹, WANG Gao^{2*}, YAN Yu^{3*}

1. School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China

2. State Key Laboratory for Electronic Test Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China

3. Automobile Engineering Department, Hebei Vocational Education College of Industry, Shijiazhuang 050091, China

Abstract The signals processing algorithm is presented based on laser spectroscopy direct absorption signal (DAS) and wavelength modulation spectroscopy (WMS) for the trace carbon monoxide (CO) measurement. The simulated transmittance data of the pure CO gas are from the HATRAN database. The DAS intensity, appending WMS 1- f and WMS 2- f signal intensities are used as the raw signals. Aimed to obtain optimized filtering algorithm, those raw signals which were added Gaussian white noise are denoised by using diverse wavelet-bases and decomposition layers. The effectiveness is validated by our CO concentration detection experiment which measures the weak laser absorption spectral line P(4) of second overtone band at 1.578 μm . A 0.95 m Herriott-type cell provides an effective absorption path length of 55.1 m. Comparing the sensing performances without and with using the optimized wavelet, the experimental results show that the signal-to-noise ratios of the system are significantly improved by 1 to 2 orders of magnitude for the DAS, 1- f and 2- f signal. The anti-jamming capability of the system is improved by proposing the suitable wavelet-base and decomposition layer algorithm.

Keywords Laser absorption spectroscopy; CO spectra at near-infrared; Wavelength modulation spectroscopy; Wavelet-denoising

* Corresponding authors

(Received Apr. 16, 2017; accepted Aug. 23, 2017)