

用于近红外宽带腔增强吸收光谱的小波去噪

姚丹^{1,2}, 郑凯元^{1,2}, 刘梓迪^{1,2}, 李俊豪^{1,2}, 郑传涛^{1,2*}, 王一丁^{1,2}

¹ 吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室, 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012;

² 吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 吉林 长春 130012

摘要 为了有效抑制检测系统的噪声, 提高气体浓度的反演精度, 研究了近红外宽带腔增强气体传感系统的小波去噪方法。小波去噪方法的优化分析结果表明, 选择 db2 小波函数作为小波基对含噪信号进行 6 级分层处理, 并选择 heursure 阈值估计方法, 采用局部阈值方式对噪声部分小波系数进行置零处理, 可达到最优去噪效果。将近红外宽带腔增强吸收光谱技术与高分辨率傅里叶变换红外光谱仪相结合, 建立了用于甲烷检测的气体传感系统, 使用最小二乘拟合算法对去噪前后的甲烷吸收系数进行反演。结果表明, 采用小波去噪后, 反演浓度更接近真实值, 反演精度提高 7%, 信噪比提高 90%, 系统检测下限降低 45%, 证明小波去噪算法可以有效提高系统的检测精度。

关键词 光谱学; 宽带腔增强吸收光谱; 红外光谱; 小波去噪; 气体传感器

中图分类号 TN21

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0930006

Wavelet Denoising in Near-Infrared Broadband Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy

Yao Dan^{1,2}, Zheng Kaiyuan^{1,2}, Liu Zidi^{1,2}, Li Junhao^{1,2}, Zheng Chuantao^{1,2*}, Wang Yiding^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

² Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract In order to effectively suppress the noise in gas detection and improve the inversion precision of gas concentration, we investigate a wavelet denoising algorithm for near-infrared broadband cavity-enhanced gas sensing system. Optimization analysis of wavelet denoising shows that it can achieve the optimal denoising effect by using db2 wavelet function as the wavelet base to perform 6-layer denoising on the polluted signal, and at the same time, by using heursure threshold estimation method and local threshold to zero the noise part wavelet coefficient. The near-infrared broadband cavity-enhanced absorption spectroscopy technique combined with a high-resolution Fourier transform infrared spectrometer is used to establish a gas sensing system for methane detection. The concentration inversion of methane absorption coefficient before and after wavelet denoising is performed using a least square fitting algorithm. Experimental results show that the inversed concentration results with wavelet denoising are closer to the true value than those without denoising. The inversion accuracy is improved by 7%, the signal-to-noise ratio is increased by 90%, and the system detection limit is reduced by 45%. It is evidenced that the wavelet denoising algorithm can effectively improve the detection accuracy.

Key words spectroscopy; broadband cavity-enhanced absorption spectroscopy; infrared spectrum; wavelet denoising; gas sensor

OCIS codes 300.6340; 300.6360; 040.3060

1 引言

痕量气体检测在工业过程控制、环境监测等很

多领域都有重要应用。已有相关文献报道多种气体传感系统被用于监测痕量气体^[1-4], 如何提高检测系统的灵敏度、精度和稳健性吸引了众多关注。非相

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-05-01; 录用日期: 2019-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0700101)、国家自然科学基金(61775079, 61627823)、吉林省重点科技研发计划(20180201046GX)、吉林省中青年科技创新领军人才及团队项目(20190101016JH)、吉林省省级产业创新专项资金(2017C027)

* E-mail: zhengchunatao@jlu.edu.cn

干宽带腔增强吸收光谱 (IBBCEAS) 技术^[5-7] 以其高检测精度、低成本、高空间分辨率等优点, 在痕量气体检测领域得到了快速发展。为实现高分辨率的近红外气体检测, 将 IBBCEAS 技术与高分辨率傅里叶变换光谱相结合^[8-9], 可以提高近红外波段气体检测的灵敏度。

在非相干宽带腔增强传感系统中, 光源的功率波动、气室的机械振动以及光路干涉等干扰因素会产生光谱信号的背景噪声, 造成无气体吸收时光谱基线的波动或漂移, 影响系统的检测精度和检测限。传统方法采用低通滤波或者带通滤波技术去除光谱基线噪声, 或直接拟合背景吸收^[2-3], 这种方法虽然简单易行, 但其本质为平滑滤波, 无法抑制缓变噪声, 光谱基线仍存在波动。

近年来, 小波变换在物理学、工程学、生物医学、信号处理等许多领域中应用广泛。小波变换在时域和频域具有多级解析分辨率, 可以将信号频率分成一系列不同的子带, 因此小波去噪 (WD) 算法抑制噪声、增强信噪比 (SNR) 的能力较强。由于小波去噪算法可有效、便捷地优化系统性能, 已在图像和信号处理方面得到了应用^[10-13]。为了抑制光谱信号的基线噪声, 提高 IBBCEAS 系统检测灵敏度, 降低检测下限, 本文提出用于近红外宽带腔增强吸收光谱的小波去噪方法, 探讨小波参数的优化, 包括小波函数、分解层次、阈值估计及处理方法的选取。建立了 IBBCEAS 检测系统, 开展了甲烷气体检测实验, 验证了小波去噪算法可有效提高系统的检测精度。

2 近红外宽带腔增强气体传感系统

2.1 实验系统

基于小波去噪的宽带腔增强甲烷气体传感系统如图 1 所示。选用溴钨灯 (LSH-T150, Zolix, 中

国) 作为光源, 该光源具有发光功率大、效率高、寿命长、稳定性好等优点, 是近红外波段的理想光源, 可用于物质的吸收光谱分析。该溴钨灯光源由专用稳压恒流源 (LSP-T150, Zolix, 中国) 驱动, 功率达到 150 W, 光谱范围为 900~2500 nm。光源室中集成了收集反射镜 M1、溴钨灯和平凸透镜 L1, 从光源发出的光经过收集反射镜以及平凸透镜, 收集效率达到 60%, 最终以平行光的形式耦合进入谐振腔。

谐振腔是宽带腔增强系统的核心, 在谐振腔两端分别固定一块高反射率的平凹镜。反射镜性能参数如下: 直径 25.4 mm, 厚度 (6.35 ± 0.1) mm, 曲率半径 100 cm, 反射率 99.97% (1640~1700 nm)。腔体由一根长度为 40 cm 的套管构成, 在腔体上分别设有进气口与出气口。入射光进入谐振腔后在腔内多次反射, 增加了腔内介质的吸收路径, 增大了光程, 可以有效提高探测灵敏度。

从谐振腔透射出来的光进入傅里叶变换红外光谱仪 (Nicolet IS50, Thermo Fisher Scientific, 美国), 结合电脑端软件 (OMNIC) 对透射光谱进行采集和小波去噪处理, 进而反演气体浓度。实验中, 光谱分辨率设定为 0.5 cm^{-1} , 平均次数设置为 256, 采集时间为 20 min。利用配气系统 (Series 4000, Environics, 美国), 将纯氮气 (N_2) 与标准浓度的甲烷 (CH_4) 进行混合, 得到具有不同浓度梯度的甲烷气体样品。

2.2 浓度反演方法

在非相干宽带腔增强吸收光谱技术中, 腔内痕量气体的吸收系数 α_0 表示为^[14]

$$\alpha_0 = \left(\frac{I_0}{I} - 1 \right) \left(\frac{1-R}{L} \right), \quad (1)$$

式中: I 和 I_0 分别为腔中充满不同浓度的甲烷气体和纯氮气时测得的光谱信号; L 为腔长; R 为高反镜

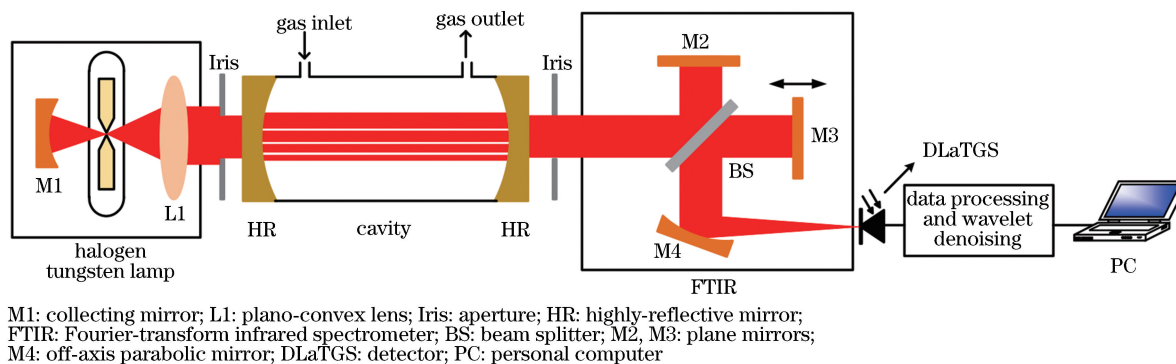


图 1 基于小波去噪的宽带腔增强甲烷气体传感系统

Fig. 1 System diagram of the WD based methane sensor system using broadband cavity-enhanced technique

的反射率。

对吸收系数 α_0 进行小波去噪处理,得到去噪后的吸收系数 α 为

$$\alpha = \text{WD}(\alpha_0), \quad (2)$$

式中:WD(\cdot)表示小波去噪算法。

利用(1)式计算得到甲烷气体的吸收系数并通过(2)式进行小波去噪,再对去噪后的吸收系数进行浓度反演。反演公式为

$$\alpha = \sum_i n_i \sigma_i + a\lambda^2 + b\lambda + c, \quad (3)$$

式中: n_i 表示拟合系数; σ_i 表示甲烷气体分子的理论吸收截面与光谱仪的仪器函数卷积后得到的吸收截面;二阶多项式 $a\lambda^2 + b\lambda + c$ 表示背景噪声,主要由光源光强的波动、系统机械振动以及光路干涉等造成。通过最小二乘拟合方法,可得到(3)式中各待定系数,从而求和拟合后的吸收光谱信号。对比去噪前后光谱残差信号的标准差,标准差越小表示去噪效果越好,从而优化选择去噪方法或参数。

3 小波去噪参数优化

3.1 小波去噪方法

小波去噪方法有三种:模极大值方法^[15],空间选择性噪声过滤技术^[16],阈值去噪方法^[17]。模极大值去噪的基础是有用信号的奇异特征与噪声之间的差异。由于其算法的复杂性,很难在实际应用中实现。空间选择性噪声过滤技术更适用于高信噪比的信号去噪。相比之下,小波阈值算法计算量小,适用于低信噪比的信号。因此本文采用小波阈值法进行去噪。

采用小波阈值方法进行去噪的基本思想是:含噪信号经过小波变换后,有用信号经小波分解的系数大于噪声的小波系数^[12,18]。选择一个介于信号与噪声小波系数之间的合适阈值,大于阈值的系数不作处理,即保留有用信号,小于阈值的噪声系数进行置零处理,从而实现去噪。最后再进行小波逆变换,重构去噪后的信号。

小波去噪过程中涉及三种信号:含噪信号 α_0 , 去噪信号 α , 理论值 α^* 。从 HITRAN 2012 数据库得到甲烷气体的高分辨率吸收截面,并与光谱仪的仪器函数进行卷积得到参考吸收截面,然后与标准气体浓度相乘即可得到理论吸收系数 α^* 。设信号采样点数为 N ,可用方均根误差值(E_{RMS})或去噪信噪比(R_{SN})来衡量小波去噪效果^[19]。具体表达式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (\alpha - \alpha^*)^2}, \quad (4)$$

$$R_{\text{SN}} = \sqrt{10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\alpha^*)^2}{\sum_{i=1}^N (\alpha - \alpha^*)^2} \right]}. \quad (5)$$

从(4)式和(5)式可以看出, E_{RMS} 越小, R_{SN} 越大,表示去噪之后的信号越接近理论值,去噪效果越好。分析可知,选择 E_{RMS} 值即可衡量小波去噪效果。

3.2 小波函数优化

常用的小波函数有 haar、db2、coif1、sym6、bior2.2 等。选择体积分数为 1×10^{-3} 的 CH_4 气体作为待测气体样品,实验所得的吸收光谱信号[图 2(c)中虚线]分别经过以上小波基函数的处理。观察无吸收的背景区间(波数范围 $6050 \sim 6055 \text{ cm}^{-1}$)以及有吸收处(波数范围 $6055 \sim 6060 \text{ cm}^{-1}$)的去噪效果,分别如图 2(a)和 2(b)所示。从图中可以看出,由于 haar 小波函数在时域内的不连续性^[20],利用 haar 小波基抑制奇异点的效果较差;sym6 和 coif1 小波函数的滤噪效果很不理想,存在较大波动;bior2.2 和 db2 小波函数去除噪声的效果较好。表 1 列出了利用不同小波函数去噪后得到的 E_{RMS} 值。从表 1 可见,选用 db2 小波函数去噪的 E_{RMS} 值最小,所以选择 db2 作为实验数据去噪的最优小波函数,去噪结果如图 2(c)实线所示。

表 1 采用不同小波函数得到的 E_{RMS} 值

Table 1 Obtained E_{RMS} values for different wavelet functions

Wavelet function	E_{RMS} (6050-6055 cm^{-1})	E_{RMS} (6055-6060 cm^{-1})
haar	1.37×10^{-6}	7.92×10^{-6}
coif1	1.10×10^{-6}	8.09×10^{-6}
sym6	1.39×10^{-6}	7.92×10^{-6}
bior2.2	1.02×10^{-6}	8.13×10^{-6}
db2	9.82×10^{-7}	7.81×10^{-6}

3.3 小波分解层次优化

合理选择小波分解层次是小波去噪中的一个关键问题。若分解层次较少,噪声与有用信号的小波分解系数相差不大,不能完全分离噪声;若分解层次较多,重构时会导致信号失真^[21]。可根据实验数据的去噪结果选择最优分解层数。实验所得吸收光谱信号[图 3(c)虚线]分别经过 3~7 级分层处理。无吸收的背景区间(波数范围 $6050 \sim 6055 \text{ cm}^{-1}$)以及有吸收处(波数范围 $6055 \sim 6060 \text{ cm}^{-1}$)的去噪效果,分别如图 3(a)和 3(b)所示。表 2 列出了利用不同分解层次去噪后得到的 E_{RMS} 值,可见分解层数为 5 或 6 时, E_{RMS} 值较小。为了更好地去除基线噪声,

降低检测下限,选择 6 级分解作为最优分解层次,去

噪结果如图 3(c)实线所示。

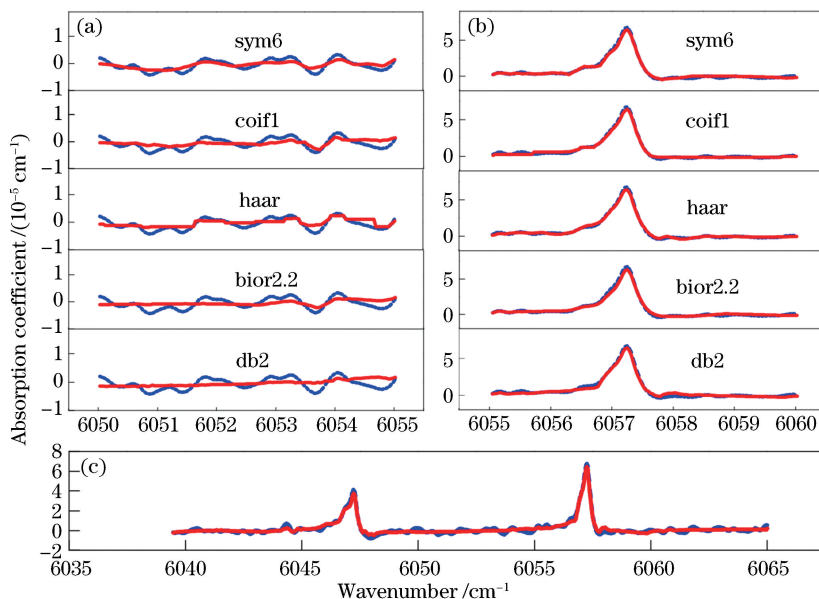


图 2 不同小波函数的去噪效果(含噪信号:虚线;去噪信号:实线)。(a)不同小波函数在无吸收背景区间的去噪效果;
(b)不同小波函数在有吸收处的去噪效果;(c)使用 db2 小波函数的去噪效果

Fig. 2 Denoising effect using different wavelet functions (polluted signal: dash line; denoised signal: solid line). (a) Denoising effect using different wavelet functions in the absorption free background interval; (b) denoising effect using different wavelet functions in the absorption interval; (c) denoising effect using db2 wavelet function

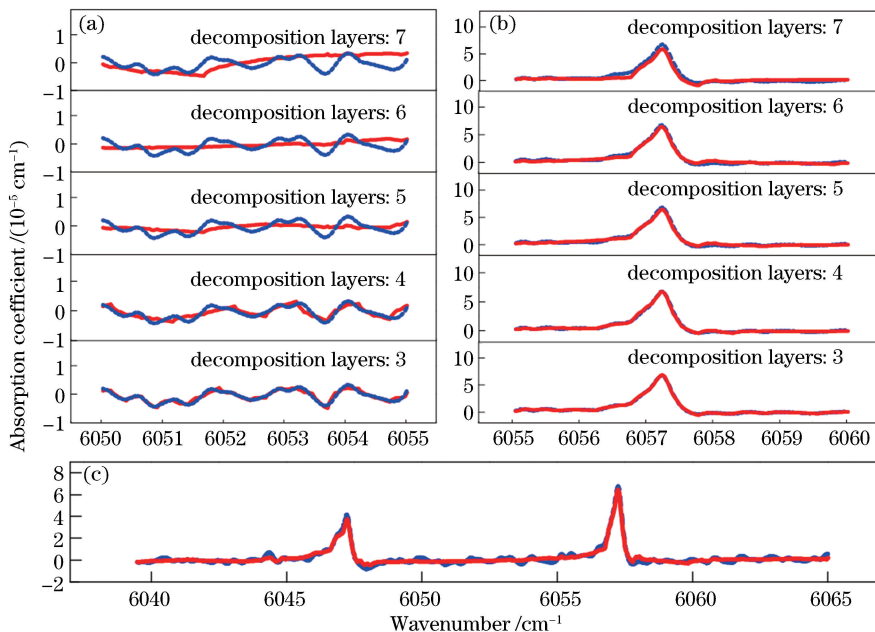


图 3 不同分解层数的去噪效果(含噪信号:虚线;去噪信号:实线)。(a)不同分解层数在无吸收背景区间的去噪效果;
(b)不同分解层数在有吸收处的去噪效果;(c)使用 6 级分解的去噪效果

Fig. 3 Denoising effect using different decomposition layers (polluted signal: dash line; denoised signal: solid line). (a) Denoising effect using different decomposition layers in the absorption free background interval; (b) denoising effect using different decomposition layers in the absorption interval; (c) denoising effect using 6 decomposition layers

3.4 小波阈值估计方法优化

确定最优小波基及分解层次后,应该选择一个合适的阈值估计方法。如果选择的阈值过小,无法

完全滤除噪声信号;若选择的阈值过大,会滤除有用信号^[22]。常用的阈值估计方法有 heursure 阈值、minimaxi 阈值、sqrtwolog 阈值、rigrsure 阈值 4 种。

实验所得吸收光谱信号[图 4(c)虚线]分别经过上述 4 种阈值处理,无吸收的背景区间(波数范围 6050~6055 cm^{-1})以及有吸收处(波数范围 6055~6060 cm^{-1})的去噪效果,分别如图 4(a)和 4(b)所示。表 3 列出了利用不同阈值估计准则去噪后得到的 E_{RMS} 值,其中 heursure 阈值是介于 sqtwolog 阈值与 rigrsure 阈值之间的一种阈值估计准则,可根据噪声水平灵活调整,所以选择 heursure 阈值作为最佳阈值估计准则,去噪效果如图 4(c)实线所示。

表 2 不同分解层数得到的 E_{RMS} 值
Table 2 Obtained E_{RMS} values for different decomposition layers

Number of decomposition layers	E_{RMS}	E_{RMS}
	(6050-6055 cm^{-1})	(6055-6060 cm^{-1})
3	2.15×10^{-6}	7.95×10^{-6}
4	1.98×10^{-6}	7.87×10^{-6}
5	1.19×10^{-6}	7.74×10^{-6}
6	9.82×10^{-7}	7.81×10^{-6}
7	2.46×10^{-6}	1.65×10^{-5}

小波去噪过程中,需根据噪声水平的变化选择不同的阈值处理方式,有局部阈值和全局阈值两种方式。全局阈值表示根据第一层的噪声水平调整阈值,选择后不可更改。局部阈值灵活性更佳,可以根据每一层信号的分解系数进行阈值调整,去噪效果更好。

综合上述分析,采用小波阈值去噪方法,选择 db2 小波函数作为小波基对含噪信号进行 6 级分层处理,同时选择 heursure 阈值估计准则、局部阈值处理方式对噪声部分小波系数进行置零处理,可以达到最优去噪效果。

表 3 不同阈值估计准则得到的 E_{RMS} 值
Table 3 Obtained E_{RMS} values for different threshold estimation criteria

Threshold estimation criterion	E_{RMS}	E_{RMS}
	(6050-6055 cm^{-1})	(6055-6060 cm^{-1})
rigrsure	9.82×10^{-7}	7.81×10^{-6}
sqtwolog	1.20×10^{-6}	8.43×10^{-6}
minimaxi	1.40×10^{-6}	8.01×10^{-6}
heursure	9.82×10^{-7}	7.81×10^{-6}

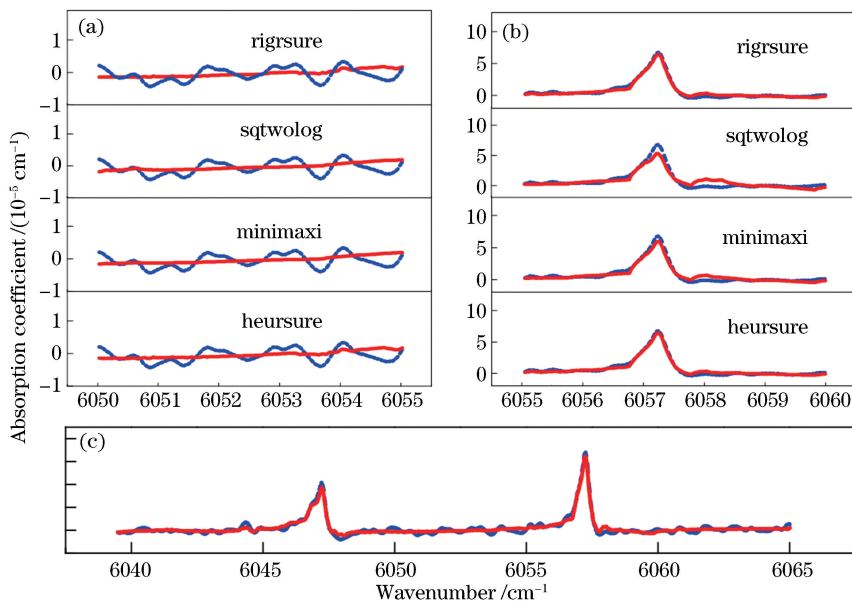


图 4 不同阈值估计准则的去噪效果(含噪信号:虚线;去噪信号:实线)。(a)不同阈值估计准则在无吸收背景区间的去噪效果;(b)不同阈值估计准则在有吸收处的去噪效果;(c)使用 heursure 阈值估计准则的去噪效果

Fig. 4 Denoising effect using different threshold estimation criteria (polluted signal: dash line; denoised signal: solid line).

(a) Denoising effect using different threshold estimation criteria in the absorption free background interval; (b) denoising effect using different threshold estimation criteria in the absorption interval; (c) denoising effect using heursure threshold estimation criterion

4 气体检测实验

将体积分数为 1×10^{-3} 的 CH_4 气体通入气室

中,使用最优小波参数对采集的吸收信号进行去噪处理。使用最小二乘拟合算法对去噪前后的甲烷吸收系数进行浓度反演,结果如图 5 所示。小波去噪

前的拟合残差标准差为 $3.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$, 使用最优参数进行小波去噪后, 拟合残差标准差降为 $1.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ 。去噪前反演浓度为 1.088×10^{-3} , 去噪后为 1.018×10^{-3} , 反演精度提高了 7%。吸收信号的信噪比可由拟合吸收系数最大值与拟合残差标准差的比值来估计, 去噪前信噪比为 17.3, 去噪后为 33, 系统信噪比提高了 90%。

使用 Allan 方差评估本传感器系统的稳定性, 并分析小波去噪对检测精度的影响。在纯 N_2 环境下测量甲烷浓度, 测试时间约 2 h。根据检测结果绘制 Allan 方差曲线, 如图 6 所示。在 2.5 min 的平

均时间(采集 32 个光谱信号并作平均)条件下, 使用小波去噪前的检测下限为 1.06×10^{-4} , 使用最优参数进行小波去噪后, 检测下限降到 5.5×10^{-5} 。此外, 当平均时间增加到 20 min 时(采集 256 个光谱信号并作平均), 使用小波去噪前的检测下限为 5.6×10^{-5} , 使用小波去噪后检测下限降到 3.1×10^{-5} , 检测下限降低了 45%。使用小波去噪前后的传感器检测性能如表 4 所示。实验结果表明, 小波去噪之后反演浓度更接近真实浓度, 信噪比提高了 90%, 检测下限降低了 45%, 这证实了小波去噪算法可有效提高传感系统的检测精度。

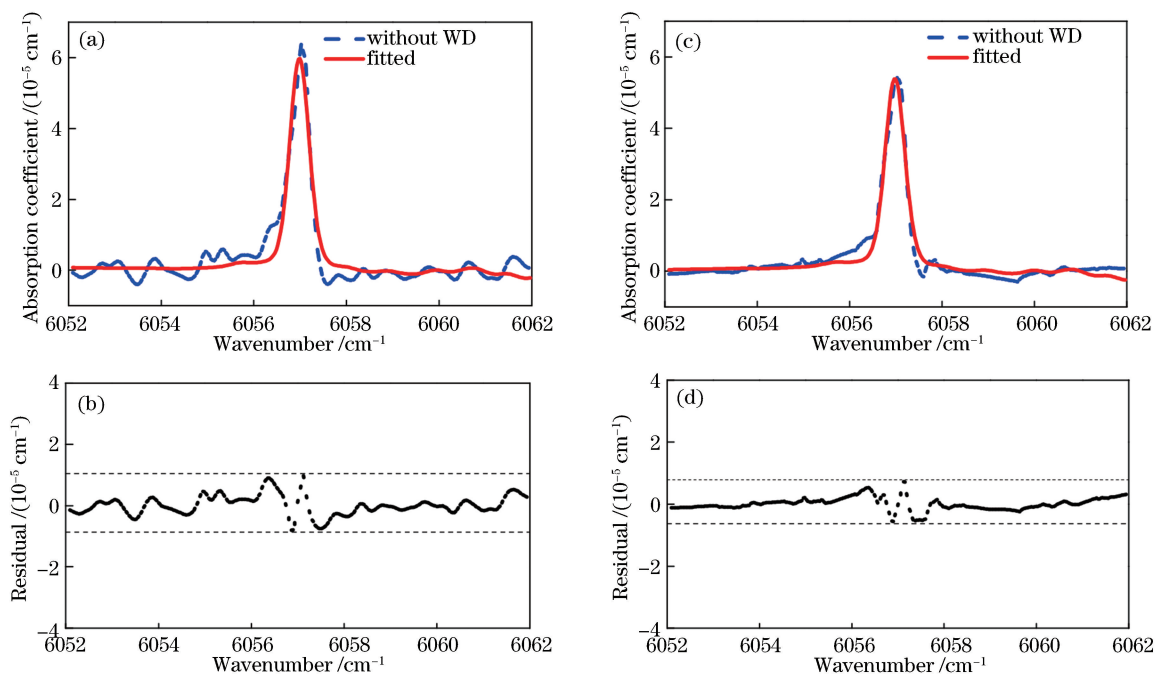


图 5 小波去噪前后甲烷的吸收系数、拟合吸收截面以及拟合残差。(a)未采用小波去噪的甲烷吸收系数以及拟合吸收截面; (b)未采用小波去噪的拟合残差;(c)采用小波去噪后的甲烷吸收系数以及拟合吸收截面;(d)采用小波去噪后的拟合残差
Fig. 5 Measured absorption coefficient of methane, fitted absorption coefficient, and fitted residual before and after WD.

(a) Measured and fitted absorption coefficients of methane without WD; (b) fitted residual without WD; (c) measured and fitted absorption coefficients of methane with WD; (d) fitted residual with WD

表 4 使用小波去噪前后传感器的性能对比

Table 4 Comparison of the sensor performance without and with WD

Scenario	Residual / cm^{-1}	Retrieved concentration	SNR	Detection limit (averaging time)
Without WD	3.3×10^{-6}	1.088×10^{-3}	17.3	5.6×10^{-5} (20 min)
With WD	1.7×10^{-6}	1.018×10^{-3}	33.0	3.1×10^{-5} (20 min)

5 结 论

将小波去噪算法与宽带腔增强吸收光谱技术相结合, 在近红外波段对甲烷气体进行高分辨率检测。利用小波去噪方法对实验数据进行处理来提高检测系统的精度。结果表明, 使用小波去噪算法后反演

浓度值更接近真实 CH_4 浓度值, 反演精度提高了 7%, 同时信噪比提高了 90%。Allan 方差结果表明, 系统检测下限由去噪前的 5.6×10^{-5} 下降为去噪后的 3.1×10^{-5} , 降低了 45%。实验结果证实小波去噪算法可以用于近红外宽带腔增强技术中, 并能有效提高传感器系统的性能, 为宽带腔增强技术在

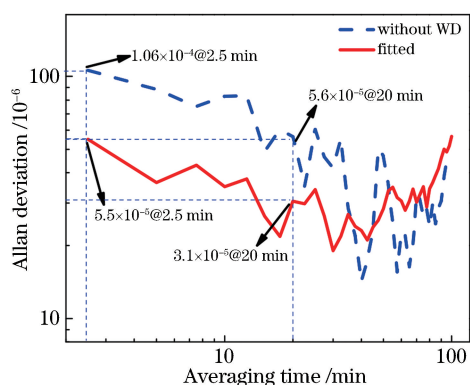


图 6 小波去噪前后甲烷传感器的 Allan 标准差曲线

Fig. 6 Allan deviation curves of the methane sensor system before and after WD

大气痕量气体检测等高精度需求领域中的应用提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Zheng K Y, Zheng C T, He Q X, *et al.* Near-infrared acetylene sensor system using off-axis integrated-cavity output spectroscopy and two measurement schemes[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26205-26216.
- [2] Song F, Zheng C T, Yu D, *et al.* Interband cascade laser-based ppbv-level mid-infrared methane detection using two digital lock-in amplifier schemes [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(3): 51.
- [3] Dong M, Zheng C T, Yao D, *et al.* Double-range near-infrared acetylene detection using a dual spot-ring Herriott cell (DSR-HC) [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12081-12091.
- [4] Miao S Z, Yao D, Zhong G Q, *et al.* Infrared acetylene sensor based on orthogonal lock-in amplifier and segmental fast Fourier transformation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911014. 苗澍茁, 姚丹, 钟国强, 等. 基于正交锁相放大器与分段快速傅里叶变换的红外乙炔传感器[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0911014.
- [5] Zheng K Y, Zheng C T, Zhang Y, *et al.* Review of incoherent broadband cavity-enhanced absorption spectroscopy (IBBCEAS) for gas sensing [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3646-3670.
- [6] Zheng K Y, Zheng C T, Liu Z D, *et al.* Near-infrared broadband cavity-enhanced sensor system for methane detection using a wavelet-denoising assisted Fourier-transform spectrometer [J]. *The Analyst*, 2018, 143(19): 4699-4706.
- [7] Fang B, Zhao W X, Xu X Z, *et al.* Portable broadband cavity-enhanced spectrometer utilizing Kalman filtering: application to real-time, *in situ* monitoring of glyoxal and nitrogen dioxide[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26910-26922.
- [8] Denzer W, Hancock G, Islam M, *et al.* Trace species detection in the near infrared using Fourier transform broadband cavity enhanced absorption spectroscopy: initial studies on potential breath analytes[J]. *Analyst*, 2011, 136(4): 801-806.
- [9] Aalto A, Genty G, Laurila T, *et al.* Incoherent broadband cavity enhanced absorption spectroscopy using supercontinuum and superluminescent diode sources[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25225-25234.
- [10] Li J S, Yu B L, Zhao W X, *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.
- [11] Li C L, Guo X Q, Ji W H, *et al.* Etalon fringe removal of tunable diode laser multi-pass spectroscopy by wavelet transforms[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(7): 275-285.
- [12] Zheng C T, Ye W L, Huang J Q, *et al.* Performance improvement of a near-infrared CH₄ detection device using wavelet-denoising-assisted wavelength modulation technique[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 190: 249-258.
- [13] Tian G, Li G S. Tunable diode laser spectrometry signal de-noising using discrete wavelet transform for molecular spectroscopy study[J]. *Optica Applicata*, 2013, XLIII(4): 803-815.
- [14] Varma R M, Venables D S, Ruth A A, *et al.* Long optical cavities for open-path monitoring of atmospheric trace gases and aerosol extinction [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): B159-B171.
- [15] Wang Z L, Chang J, Zhang S S, *et al.* An improved denoising method in RDTS based on wavelet transform modulus maxima [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(2): 1061-1067.
- [16] Xu Y S, Weaver J B, Healy D M, *et al.* Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, 3(6): 747-758.
- [17] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [18] Mapped-Fogaing I, Joly L, Durry G, *et al.* Wavelet denoising for infrared laser spectroscopy and gas detection[J]. *Applied Spectroscopy*, 2012, 66(6): 700-710.
- [19] Wen H Y. Research on deformation analysis model based on wavelet transform theory [D]. Wuhan:

- Wuhan University, 2004: 41-84.
- 文鸿雁. 基于小波理论的变形分析模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 41-84.
- [20] Wang X F. Selection and optimization of wavelet base [J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2003, 17(5): 33-35.
- 汪新凡. 小波基选择及其优化[J]. 株洲工学院学报, 2003, 17(5): 33-35.
- [21] She P G. Based on signal matching and the optimal decomposition level of wavelet denoising method research [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014: 46-56.
- 余鹏果. 基于信号匹配和最优分解层的小波去噪方法研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014: 46-56.
- [22] Zhang T X, Huang X X. Realization of wavelet threshold denoising method based on Matlab for image processing[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(5): 103-105.
- 张天祥, 黄小欣. 基于 Matlab 实现小波阈值去噪的图像处理方法[J]. 现代电子技术, 2013, 36(5): 103-105.