

文章编号 1004-924X(2018)08-1910-07

电域自适应中红外激光甲烷传感系统

宋芳^{1,2}, 杨硕^{1,2}, 余迪^{1,2}, 周言文^{1,2}, 郑传涛^{1,2*}, 王一丁^{1,2}

- (1. 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验吉林大学实验区, 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:为了抑制甲烷传感器中统计特性无法预知的电学噪声, 本文结合递归最小二乘自适应去噪算法和直接吸收光谱技术, 使用中心波长为 3 291 nm 的带间级联激光器和多反射吸收气室, 研制了一种电域自适应中红外甲烷传感器系统。在传统探测器输出信号(称为信号通道)的基础上, 增加了激光器电流驱动器的反馈信号作为噪声通道来感知电学噪声。利用 MATLAB 软件对最小二乘法在直接吸收光谱技术中的滤波效果进行了仿真。通过在激光器驱动信号中施加不同的噪声, 实验验证了最小二乘法的去噪效果。针对该传感器的 Allan 标准差结果表明, 当不使用自适应最小二乘法时, 系统在积分时间为 6 s 的检测下限为 78.8 nL/L; 使用 RLS 自适应算法时, 系统的检测下限为 43.9 nL/L。相比基于传统传感结构和滤波方法的中红外直接吸收光谱传感器, 本文所报道的中红外甲烷传感器由于采用了电域自适应滤波方法, 因而呈现出更好的抗干扰性和稳定性。

关键词:甲烷传感器; 红外光谱; 半导体激光器; 最小二乘法; 自适应去噪

中图分类号: TN21 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182608.1910

Electrical-domain self-adaptive mid-infrared laser-based methane sensor system

SONG Fang^{1,2}, YANG Shuo^{1,2}, YU Di^{1,2}, ZHOU Yan-wen^{1,2}, ZHENG Chuan-tao^{1,2*}, WANG Yi-ding^{1,2}

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

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

* Corresponding author, E-mail: zhengchuantao@jlu.edu.cn

Abstract: In order to suppress sensor noise with unknown statistical properties in an electrical domain, a novel mid-infrared CH₄ sensor was proposed based on a 3 291 nm interband cascade laser and a multipass gas cell. This sensor operates using Recursive Least Square (RLS) self-adaptive denoising algorithm and Direct Laser Absorption Spectroscopy (DLAS) technique. Based on the traditional detector output (called the signal channel), a noise channel was added to generate electrical noise using the feedback signal of the laser driver. Numerical simulation in MATLAB was performed to evaluate the

收稿日期: 2018-04-04; 修订日期: 2018-04-25.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFB0405300); 国家自然科学基金资助项目(No. 61775079, No. 61627823); 吉林省重点科技研发计划资助项目(No. 20180201046GX); 吉林省省级产业创新专项资金资助项目(No. 2017C027)

filtering performance of the RLS algorithm in the DLAS application. By adding different noise into the driving signal of the laser, potential denoising and sensing capabilities of the RLS algorithm were experimentally evaluated. Taking into account only the intrinsic noise of the sensor, the Allan deviation indicates a measurement precision of ~ 78.8 nL/L with a ~ 6 s averaging time without using any filter. For comparison, Allan deviation of ~ 43.9 nL/L was obtained with a ~ 6 s averaging time using self-adaptive filtering. The reported sensor, incorporating the RLS self-adaptive denoising algorithm, demonstrates enhanced noise immunity and sensitivity compared to the mid-infrared DLAS sensor using the traditional sensing architecture and the filtering method.

Key words: CH₄ sensor; infrared spectroscopy; semiconductor lasers; least square method; self-adaptive denoise

1 引 言

甲烷(CH₄)是大气中主要的温室气体,也是天然气的主要成分。准确实时的检测甲烷气体在环境监测、工业和生物医学领域具有十分重要的意义^[1-2]。与其他甲烷检测方法相比,红外光谱检测法具有高灵敏度、良好的选择性、不需要预处理等优点,并得到了广泛的应用^[3-6]。可调谐激光光谱技术(Tunable Laser Absorption Spectroscopy, TLAS)是一种较为常用的光谱检测技术,它采用变化的电流去调谐激光器,使激光器的出射光扫过特定的气体吸收谱线,因此具有良好的选择性。在 TLAS 技术中,激光器的选择至关重要。很多报道都采用分布反馈(DFB)量子阱激光器或量子级联激光器(QCL)实现甲烷 $\mu\text{L/L}$ 到 nL/L 量级的检测^[7-9]。近年来,随着室温连续的 $3\sim 6\ \mu\text{m}$ 的带间级联激光器(Interband Cascade Laser, ICL)的出现,中红外甲烷传感器的研究有了新的进展。2016 年,董磊等人采用 $3.3\ \mu\text{m}$ 的 ICL 结合长光程多反射气室,实现了 nL/L 量级的甲烷检测^[10]。同年,叶玮琳等人采用一个 $3.337\ \mu\text{m}$ 的 ICL 结合波长调制光谱(WMS)技术,实现了对甲烷和乙烷气体的同时检测^[11]。与 WMS 技术相比,直接吸收光谱(DAS)技术不需要进行标定^[12],可以进行定量测量,因此应用广泛。

在甲烷的实际测量中,光路和电路的噪声会影响传感器的性能。与传统的滤波器相比,自适应滤波算法能够实时地改变滤波器的参数,因此对于系统中统计特性未知的噪声有更好的滤波效果^[13]。本文将递归最小二乘(Recursive Least

Square, RLS)自适应算法应用于中红外甲烷传感器。该传感器将激光器驱动器的反馈通道作为提取噪声的来源,并结合了室温连续的 ICL 和长光程多反射气室。首先,通过仿真验证了自适应算法在中红外甲烷传感器中的滤波效果。然后,通过气体实验证明 RLS 自适应滤波算法在实际系统中的去噪性能。实验结果表明,即使在实验室应用环境下,RLS 自适应滤波算法也可以有效降低系统的检测下限,使传感器呈现出较好的抗干扰性能。

2 中红外甲烷传感器结构

2.1 甲烷吸收线的选择

甲烷是一种正四面体结构的分子,具有 4 个基频吸收带,它们分别是 $3.43, 6.55, 3.31$ 和 $7.65\ \mu\text{m}$ 。由于基频吸收强度比泛频吸收要强很多,所以对甲烷的检测大都选择基频吸收带。图 1 是根据 Hitran 数据库^[14]得到的甲烷气体分子在 1 个标准大气压、296 K 的温度条件下、 $2.8\sim 3.8\ \mu\text{m}$

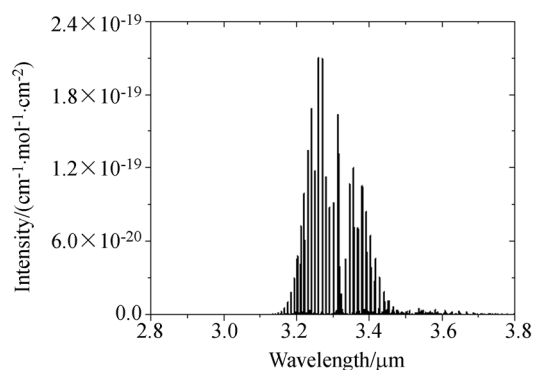


图 1 甲烷在 $2.8\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 的吸收谱线强度

Fig. 1 Intensity of CH₄ absorption lines from $2.8\ \mu\text{m}$ to $3.8\ \mu\text{m}$

的吸收谱线。由图 1 可以看到,基频吸收带 3.31 μm 的吸收谱线强度大于 3.43 μm 处的吸收。同时,为避开水汽对甲烷测量的影响,选择 3.291 μm 作为目标吸收线。

2.2 中红外甲烷传感器原理与结构

甲烷传感器结构如图 2 所示。该系统的基本工作原理遵循朗伯比尔定律^[15]。激光器发出的光波长扫过甲烷气体特定的吸收峰。当初始光强为 I_0 的入射光通过有效光程长度为 L 的气室时,被气室内浓度为 C 的甲烷气体吸收,出射光光强衰减为 I 。此时 I 和 I_0 有如下关系:

$$I = I_0 e^{-k(\lambda)CL}, \quad (1)$$

其中 $k(\lambda)$ 为甲烷在 λ 处的吸收系数。

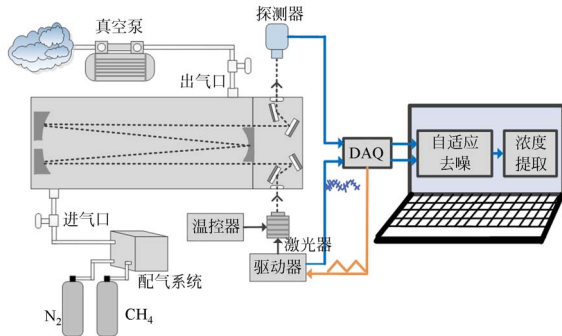


图 2 中红外甲烷传感器系统框图

Fig. 2 Block diagram of mid-infrared CH_4 sensor

根据甲烷在 3.31 μm 处的吸收,这里选择中心波长为 3 291 nm 的室温连续的带间级联激光器(德国 Nanoplus 公司)作为光源,中心波长为 3 291 nm,电流调制系数和温度调制系数分别为 0.172 5 nm/mA 和 0.33 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。激光器的工作温度为 15 $^{\circ}\text{C}$,工作电流为 (52 ± 5) mA。采用 Thorlabs 公司的激光器温控器(TED200C)和驱动器(LDC210C)控制激光器的温度和电流。采用波兰 VIGO 公司的红外探测器,型号为 PVI-4TE-5,探测灵敏度约为 1.2×10^{11} $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。采用湖北金为科技有限公司的长光程多反射气室作为吸收气室,其有效光程长为 16 m,物理尺寸为 45 cm \times 11 cm \times 11 cm。激光器发出的光经过多通池之后被探测器采集,探测器输出送入数据采集卡(Data Acquisition, DAQ)。同时,将激光器驱动器的反馈通道作为噪声通道送入 DAQ。利用 LabVIEW 平台进行自适应滤波及提取浓度信息,采用 Environics 4000 配气系统配备标准浓度的气体。

3 电域自适应算法

3.1 RLS 自适应算法原理

自适应滤波器是一种参数时变的滤波器,能够通过自适应算法自动调节滤波器参数,使输出的误差均方值最小。因为滤波器参数时变,所以与传统滤波器相比,自适应滤波器能够滤除统计特性未知的噪声从而使滤波效果更理想,因此得到了广泛的应用。

自适应去噪主要根据自适应干扰抵消模型^[16]。如图 3 所示,系统中 $x(n)$ 为纯净的甲烷浓度信号, $n_1(n)$ 为系统噪声, $n_2(n)$ 为提取到的电域噪声,令 $s(n) = x(n) + n_1(n)$ 。 $n_2(n)$ 经过自适应滤波之后的响应为 $y(n)$ 。误差信号 $e(n) = s(n) - y(n)$ 。通过自适应算法调制滤波器的参数,使 $y(n)$ 不断逼近于 $n_1(n)$ 的最佳估计,此时得到的 $e(n)$ 即为纯净的甲烷浓度信号。

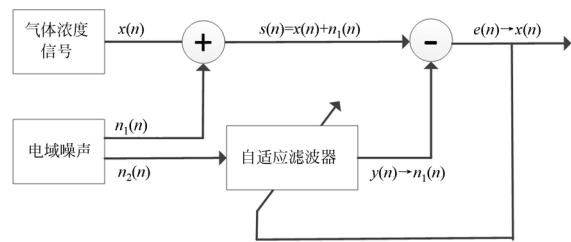


图 3 自适应干扰抵消系统模型

Fig. 3 Model of adaptive interference cancellation system

与最小均方误差算法(LMS)相比,RLS 自适应算法具有收敛速度快的优点,因此在时变系统中具有良好的滤波效果^[17]。RLS 算法的计算过程^[18]如下:

(1)初始化参数:令 δ 为初始常数, \mathbf{I} 为单位矩阵;

$$\mathbf{W}(0) = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{P}(0) = \delta^{-1} \mathbf{I}. \quad (3)$$

(2)迭代计算:

误差输出为:

$$e(n) = s(n) - y(n). \quad (4)$$

目标函数为:

$$\xi(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2, \quad (5)$$

其中 λ 为遗忘因子。 $\mathbf{n}_2(n) = [\mathbf{n}_2(n), \mathbf{n}_2(n-1), \dots, \mathbf{n}_2(n-M+1)]^T$, M 为滤波器的阶数。自适应算法训练的权系数 $\mathbf{W}(n)$ 使目标函数 $\xi(n)$ 取得最小值。

滤波器输出为:

$$y(n) = \mathbf{W}^H(n-1) \mathbf{n}_2(n). \quad (6)$$

增益计算:

$$\mathbf{k}(n) = \frac{\lambda^{-1} \mathbf{P}(n-1) \mathbf{s}(n)}{1 + \lambda^{-1} \mathbf{s}^H(n) \mathbf{P}(n-1) \mathbf{s}(n)}. \quad (7)$$

更新滤波器权系数 \mathbf{W} :

$$\mathbf{W}(n) = \mathbf{W}(n-1) + \mathbf{k}(n) e^*(n). \quad (8)$$

更新逆矩阵:

$$\mathbf{P}(n) = \lambda^{-1} \mathbf{P}(n-1) - \lambda^{-1} \mathbf{k}(n) \mathbf{s}^H(n) \mathbf{P}(n-1). \quad (9)$$

通过迭代计算,最终实现自适应滤波。滤波器阶数 M 越大,滤波效果越好,但是计算量越大,收敛速度越慢。实际中要结合滤波效果和收敛速度进行选择。

3.2 RLS 自适应算法仿真

利用 MATLAB 平台对 RLS 自适应算法在直接吸收光谱技术中的应用进行仿真。采用 MATLAB 模拟出甲烷气体在室温下、标准大气压时,通过 16 m 有效光程后,在 3 291 nm 处 2 $\mu\text{L/L}$ 的甲烷气体的吸光度。将 $V_{pp} = 0.06 \text{ V}$ 的 60 Hz 的低频噪声, $V_{pp} = 0.1 \text{ V}$ 的 60 kHz 的高频噪声及标准差为 0.05 V 的高斯白噪声加入模拟的 2 $\mu\text{L/L}$ 的甲烷气体吸收信号中。如图 4 所示,图 4(a) 为加入混合噪声后探测器的输出信号;图 4(b) 为采用 RLS 自适应算法之后的滤波效果。

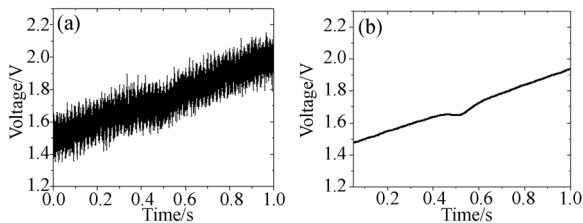


图 4 (a) 加入混合噪声的甲烷吸收信号 (b) RLS 自适应滤波后的信号

Fig. 4 (a) CH_4 absorption signal with hybrid noise; (b) CH_4 absorption signal after RLS denoising

图 5(a) 是未进行滤波时求出的吸收系数 $-\ln(I/I_0)$, 图 5(b) 是经过滤波之后计算得到的吸收系数。可以看到,经过自适应滤波之后,吸收

系数有了明显的改善,由此证明了 RLS 算法在直接吸收光谱技术中的有效性。

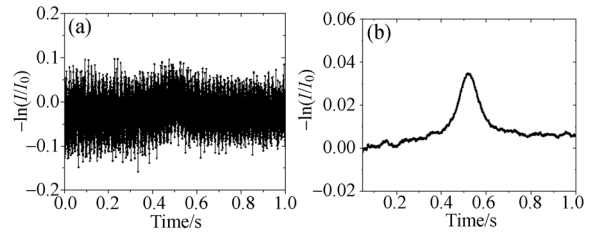


图 5 (a) 含混合噪声的甲烷吸收系数 (b) RLS 自适应滤波后的吸收系数

Fig. 5 (a) CH_4 absorbance with hybrid noise; (b) CH_4 absorbance after RLS denoising

4 实验与结果

实验中激光器的中心电流为 52 mA, 激光器温度控制在 15 $^{\circ}\text{C}$, 此时发光的中心位置为 3 038.5 cm^{-1} 。使用 DAQ 的数模转换器 (Digital to Analog Converter, DAC) 产生 $V_{pp} = 1.64 \text{ V}$ 、1 Hz 的三角波作为激光器驱动信号。同时,另一路 DAC 产生与扫描三角波同频同相的方波,送入 DAQ 的数字输入口用于触发采样。DAQ 的模数转换器 (Analog-Digital Converter, ADC) 采样率设置为 2 kHz。两路 ADC 分别采集探测器输出信号和激光器电流驱动器的反馈信号 (即噪声通道), 然后送入 LabVIEW 数据处理平台进行数据处理。每个周期的前 1 000 个数据点送入数据处理程序。下述实验是在室温 (约为 20 $^{\circ}\text{C}$) 环境下开展的,气室内压强约为一个标准大气压。系统的采样时间为 0.5 s, 加入自适应滤波和洛伦兹拟合等信号处理模块的处理时间约为 5.5 s, 每 6 s 得到一个浓度值。该处理过程包括噪声提取、自适应去噪、背景拟合、洛伦兹拟合及浓度提取。

4.1 不同噪声情况下的滤波效果

将不同类型的噪声加在激光器的驱动信号上,利用 RLS 自适应滤波算法进行去噪。首先将 $V_{pp} = 240 \text{ mV}$ 的 60 Hz 低频正弦信号加入到激光器的驱动信号上,由此在探测器端产生 $V_{pp} \approx 60 \text{ mV}$ 的噪声。通入纯氮气,观测 50 min。计算 Allan 标准差可以得到:在噪声的影响下,未加入自适应滤波器时,积分时间为 6 s 时系统的检测下限为 171.5 nL/L; 经过自适应滤波器之后,系

统的检测下限为 56.78 nL/L。同样的,将 $V_{pp} = 160$ mV 的 60 kHz 高频正弦信号加入激光器驱动。通入纯氮气,观测 50 min。计算 Allan 标准差可以得到:未加入 RLS 自适应滤波算法的情况下,积分时间为 6 s 时系统的检测下限为 113.6 nL/L;经过自适应算法,系统的检测下限为 83.1 nL/L。将标准差为 0.05 V 的高斯噪声加入激光器驱动信号,通入纯氮气观测 50 min,自适应算法滤波前后,检测下限由 107.4 nL/L@6 s 优化为 82.2 nL/L。3 种噪声的滤波情况如表 1 所示。

表 1 三种噪声的滤波结果

Tab. 1 Denoising performance under three kinds of noise

噪声类型	探测器输出 噪声水平	无 RLS 时 Allan 标准差	RLS 滤波后 Allan 标准差
60 Hz 低频	$V_{pp} = 60$ mV	171.5 nL/L@6s	56.78 nL/L@6s
60 kHz 高频	$V_{pp} = 40$ mV	113.6 nL/L@6s	83.1 nL/L@6s
高斯白噪声	标准差 12.5 mV	107.4 nL/L@6s	82.2 nL/L@6s

4.2 系统的 Allan 标准差分析

在无外加噪声的情况下,将 N_2 通入气室,测试系统的长期稳定性。经过 45 min 测试,得到具体的 Allan 标准差分析结果如图 6 和图 7 所示。

图 6 为无自适应滤波算法情况下的 Allan 标准差分析结果,可以看到,无自适应去噪情况下,积分时间为 6 s 时系统的检测下限为 78.8 nL/L。

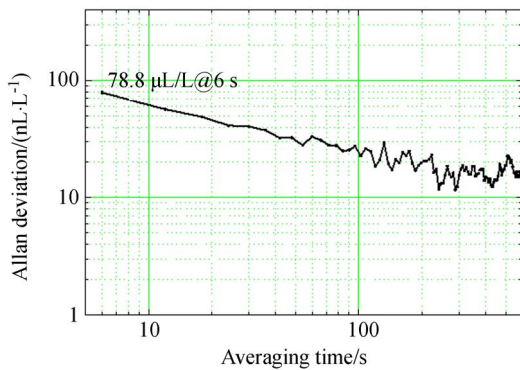


图 6 无自适应时系统的 Allan 标准差

Fig. 6 Allan-Werle deviation of system without RLS adaptive filter

图 7 为自适应滤波之后,在 N_2 环境下系统的长期稳定性。可以看到,当甲烷浓度为 0 时,系统测量结果的变化为 $-117.8 \sim 123.2$ nL/L。根

据图 7 的测量结果,计算得到系统的 Allan 标准差分析结果如图 8 所示。可以看到,在 RLS 自适应算法去噪之后,积分时间为 6 s 时系统的检测下限为 43.9 nL/L。

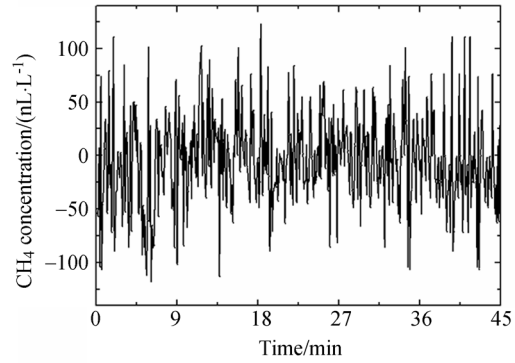


图 7 自适应滤波后纯 N_2 环境下系统的测量结果

Fig. 7 Measured concentration with RLS adaptive filter under pure N_2 environment

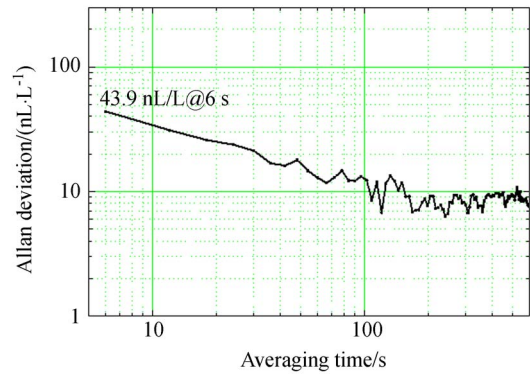


图 8 自适应滤波后系统的 Allan 标准差

Fig. 8 Allan-Werle deviation of system with RLS adaptive filter

5 结 论

本文在传统的直接吸收光谱技术中加入 RLS 自适应算法,以滤除中红外甲烷检测系统中的电学噪声。采用中心波长为 3 291 nm 的 ICL 和多反射吸收气室,研制了一种电域自适应中红外甲烷传感器系统。首先,利用 MATLAB 软件对 RLS 算法在直接吸收光谱技术中的滤波效果进行了仿真。然后通过在激光器驱动信号中施加不同的噪声,实验验证了 RLS 算法的去噪效果。

该传感器的 Allan 标准差结果表明,当不使用自适应 RLS 算法时,系统在积分时间为 6 s 的检测下限为 78.8 nL/L;使用 RLS 自适应算法时,系统的检测下限为 43.9 nL/L。该技术采用了电域自适应滤波方法,通过引入噪声通道滤除了信号通道中统计相关的电学噪声,使系统呈现出较好

的抗干扰性和稳定性。该电域自适应滤波方法可以应用于各种吸收光谱式气体传感器中,具有较好的应用前景。不过在实际应用中,吸收光谱气体传感器的光路噪声同样会影响传感器的性能,该电域自适应滤波方法还不能滤除光路噪声,这是拟开展的后续工作。

参考文献:

- [1] 宋磊,徐文佳,刘译阳. 甲烷排放检测技术应用现状综述[J]. 油气田环境保护, 2017, 27(3):1-4.
SONG L, XU W J, LIU Y Y. Introduction of technologies and application of methane emission monitoring[J]. *Environmental Protection of Oil and Gas Field*, 2017, 27(3):1-4. (in Chinese)
- [2] 张雪,胡凝,刘寿东,等. 南京城市交通甲烷排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(2):469-475.
ZHANG X, HU N, LIU SH D, *et al.*. Characteristics of methane emission from urban traffic in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2): 469-475. (in Chinese)
- [3] 郑守国,李森,张健,等. 痕量 N₂O 气体检测系统的设计与实现[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2154-2160.
ZHENG SH G, LI M, ZHANG J, *et al.*. Design and implementation of trace N₂O detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2154-2160. (in Chinese)
- [4] 陈俊英,林辉. 甲烷检测技术的研究现状[J]. 现代仪器与医疗, 2007, 13(5):1-3.
CHEN J Y, LIN H. The development of CH₄ detection technique [J]. *Modern Instruments & Medical Treatment*, 2007, 13(5):1-3. (in Chinese)
- [5] 郑玲娇,牛新涛,王嘉宁,等. 中红外二氧化碳传感器的研制及在农业中的应用[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 0812004.
ZHENG L J, NIU X T, WANG J N, *et al.*. Development and agricultural application of a mid-infrared carbon dioxide sensor system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(8):0812004. (in Chinese)
- [6] 刘志伟,李梓文,李亚飞,等. 用于中红外甲烷检测的压强测量与补偿[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 0230002.
LIU ZH W, LI Z W, LI Y F, *et al.*. Pressure measurement and compensation for mid-infrared methane detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0230002. (in Chinese)
- [7] CAO Y, SANCHEZ N P, JIANG W, *et al.*. Simultaneous atmospheric nitrous oxide, methane and water vapor detection with a single continuous wave quantum cascade laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23:2121-2132.
- [8] LI B, ZHENG C, LIU H, *et al.*. Development and measurement of a near-infrared CH₄ detection system using 1.654 μm wavelength-modulated diode laser and open reflective gas sensing probe[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2016, 225(7):188-198.
- [9] YU Y, SANCHEZ N P, GRIFFIN R J, *et al.*. CW EC-QCL-based sensor for simultaneous detection of H₂O, HDO, N₂O and CH₄ using multi-pass absorption spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2016, 24(10):10391-10401.
- [10] DONG L, LI CH G, SANCHEZ N P, *et al.*. Compact CH₄ sensor system based on a continuous-wave, low power consumption, room temperature interband cascade laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(1):65.
- [11] YE W L, LI CH G, ZHENG CH T, *et al.*. Mid-infrared dual-gas sensor for simultaneous detection of methane and ethane using a single continuous-wave interband cascade laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15):16973-16985.
- [12] LI J S, DENG H, SUN J, *et al.*. Simultaneous atmospheric CO, N₂O and H₂O detection using a single quantum cascade laser sensor based on dual-spectroscopy techniques[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2016, 231:723-732.
- [13] HAYKIN S. *Recursive Least-Squares Algorithm, Adaptive Filter Theory*[M]. 3rd ed.. Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [14] ROTHMAN L S, GORDON I E, BABIKOV Y, *et al.*. The Hitran 2012 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130:4-50.

- [15] 张志荣, 夏滑, 董凤忠, 等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱法同时在线监测多组分气体浓度[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11):2771-2777.
ZHANG ZH R, XIA H, DONG F ZH, *et al.*. Simultaneous and on-line detection of multiple gas concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11):2771-2777. (in Chinese)
- [16] 谭滋中. 基于自适应滤波的噪声抵消算法研究与应用[D]. 石家庄:河北科技大学, 2015.
TAN Z ZH. *The Study on Algorithms and Applications of Noise Cancelling Technology Based on Adaptive Filter* [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [17] EWEDA E, MACCHI O. Convergence of the RLS and LMS adaptive filters[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems*, 1987, 34(7):799-803.
- [18] CHENG X ZH, XU J D, WEI A Y, *et al.*. Application of RLS adaptive filtering in signal de-noising [J]. *Journal of Measurement Science and Instrument*, 2014, 5(1):32-36.

作者简介:



宋芳(1989—),女,河南南阳人,博士研究生,2011年于长春理工大学获得学士学位,2014年于吉林大学获得硕士学位,主要从事红外气体检测等方面的研究。E-mail: songfang369@163.com

通讯作者:



郑传涛(1982—),男,河南商丘人,博士,副教授,博士生导师,2005年、2007年、2010年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为红外激光光谱学与传感系统。E-mail: zhengchuantao@jlu.edu.cn