

基于中空波导光纤的 CO₂ 气体传感器稳定性的研究

张倩倩, 吴涛*, 孙城林, 叶湛雯, 王梦宇, 范乐康, 刘洋, 何兴道

南昌航空大学无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063

摘要 激光器受到诸如热波动和机械振动等低频因素扰动时会发生激光波长漂移和光强波动, 进而会影响系统的测量精度。使用波长为 2.73 μm 的分布式反馈(DFB)激光器作为探测光源, 搭建一套基于中空波导光纤的 CO₂ 气体传感系统, 该系统采用 CO₂ 的三次谐波吸收信号(3f)来实现激光器的稳频, 再利用谐波信号来反演 CO₂ 的浓度。实验中对标准 CO₂ 气体进行长时间测量, 分别利用二次谐波(2f)、稳频条件下的二次谐波(2f-lock)、二次谐波比一次谐波(2f/1f)、稳频条件下二次谐波比一次谐波(2f/1f-lock)4 种测量方法对系统进行分析。2f-lock 条件下得到的系统测量精度为 0.001255, 比 2f 条件下的提高了 2.4 倍; 2f/1f-lock 条件下得到的系统测量精度为 0.00138, 比 2f/1f 条件下的提高了 2.34 倍。2f/1f-lock 方法得到的系统稳定时间最长, 为 210 s, 探测极限最低, 为 4.24×10⁻⁵。综合分析, 2f/1f-lock 是 4 种方法中最优的。在 2f/1f-lock 条件下, 对测得的数据进行 Kalman 滤波, 得到滤波后系统的测量精度为 0.0002786, 相较于未滤波前提高了 4.95 倍。

关键词 传感器; 激光吸收光谱; 稳频技术; 谐波技术; 二氧化碳

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1528001

Stability of CO₂ Gas Sensor Based on Hollow Waveguide FiberZhang Qianqian, Wu Tao*, Sun Chenglin, Ye Chenwen, Wang Mengyu,
Fan Lekang, Liu Yang, He Xingdao

Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract When a laser is disturbed by low-frequency factors (e. g., thermal fluctuations and mechanical vibrations), laser wavelength drift and light intensity fluctuations occur, which affect the measurement accuracy of the system. In this study, a 2.73-μm distributed feedback (DFB) laser is used as the detection light source and a set of CO₂ gas-sensing system based on hollow waveguide fiber is built. The proposed system uses the third harmonic absorption signal (3f) of CO₂ to achieve the frequency stabilization of the laser and then uses the harmonic signal to reverse the concentration of CO₂. In the experiment, the standard CO₂ gas is measured for a long time and the system is analyzed according to four measurement methods: second harmonic (2f), stabilized second harmonic (2f-lock), second harmonic ratio first harmonic (2f/1f), and stabilized second harmonic ratio first harmonic (2f/1f-lock). The system measurement accuracy obtained under the 2f-lock condition is 0.001255, which is 2.4 times higher than that under the 2f condition. The system measurement accuracy obtained under 2f/1f-lock condition is 0.00138, which is 2.34 times higher than that under 2f/1f condition. It can be seen that the 2f/1f-lock method has the longest stable time of 210 s and the lowest detection limit of 4.24×10⁻⁵. Comprehensive analyses reveal that 2f/1f-lock is the most optimal among the four methods. Kalman filtering is performed on the measured data under the 2f/1f-lock condition, and the measurement accuracy of the filtered system is 0.0002786, which is 4.95 times higher than that before the filtering.

收稿日期: 2021-01-15; 修回日期: 2021-02-14; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61865013)、江西省自然科学基金(20203BBG73039, 20192BBH80019, 20202BABL212011)、科技部重点研发项目(2018YFE0115700)、南昌航空大学研究生创新基金(YC2019062)

通信作者: *wutccnu@nchu.edu.cn

Key words sensors; laser absorption spectroscopy; frequency stabilization technology; harmonic technology; carbon dioxide

OCIS codes 280.3420; 300.6340; 140.3520; 060.2630; 140.3470

1 引言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术因具有高选择性、高灵敏度、实时快速等特点,被广泛地应用于痕量气体探测、环境监测、燃烧室检测和医疗诊断等领域^[1-5]。TDLAS 技术包括直接吸收技术与波长调制技术,一般使用半导体激光器作为光源,其中直接吸收技术容易受到背景信号的影响,信噪比不高,波长调制技术由于采用高频调制,有效地降低了 $1/f$ 噪声对测量结果的影响。

波长调制光谱技术^[6-9]需要将激光器的波长对准待测气体的特征吸收峰,然后对低频扫描信号与高频调制信号进行叠加;对激光器的输出波长进行调谐,调谐后的光束与待测气体发生作用产生吸收信号;然后利用锁相放大器对吸收信号进行解调,产生不同调制频率的各次谐波;最后利用谐波分量反演出待测气体浓度^[10-11]。然而在半导体激光器长期的自由运行过程中,由于环境中温度和湿度的变化或者是机械振动等因素的影响,激光器的中心频率会影响待测气体的特征吸收峰使之偏移,进而影响到测量结果的准确性和稳定性。解决激光波长漂移的其中一个有效方法就是扫描波长实现谱线的测量。在激光器波长扫描过程中,将测得的待测气体完整的直接吸收信号通过锁相放大器,解调出待测气体的一个完整的二次谐波吸收谱线,将这个二次谐波信号作为测量结果,但需要对波长漂移进行周期性的校正。另外一种办法就是采用锁频技术^[12-14]。激光器发出的激光通过参考气池或高稳定谐振腔后,使用锁相放大器解调的一次谐波信号或谐振腔反射信号作为激光频率稳定的误差参考信号,利用反馈电路来调节激光器的电流、温度或对压电陶瓷等其他被控对象进行反馈稳频,将激光波长锁定在参考气体特征吸收峰中心或谐振腔的腔模位置。

Galzerano 等^[15]在 $1.384 \mu\text{m}$ 附近、低压情况下对水的同位素 H_2^{17}O 进行了测量,利用相位调制光外差技术实现对激光器频率的锁定。Wang 等^[16]搭建了一套基于光声光谱技术的气体传感装置,利用数字比例积分微分控制器将 $1.6 \mu\text{m}$ 激光器的出射波长锁定在甲烷的吸收峰位置,在 10 s 的积分时间

内得到系统的探测极限为 11.5×10^{-6} 。虽然光声光谱技术在痕量气体检测中具有很高的系统灵敏度,可以达到很低的探测极限,但是由于检测过程中需要把待测气体放置在密闭的光声池内,无法实现实时测量,在实际检测时有很大的局限性。即使实现流动状态的气体检测,气体交换速度会很慢,如果气流速度加快,会对传声器产生一定的干扰。Hodges 等^[17-18]将腔衰荡技术与锁频技术结合,分别对水汽和 CO_2 同位素进行了测量,虽然谐振腔可以增加光程使吸收信号增强,但是在进行实验之前需要仔细调节,难度较大。Wang 等^[19]报道了一种用于波长调制光谱气体传感器系统中激光频率锁定和强度归一化的新方法,在 1 个大气压的条件下对甲烷进行了测量,其中在频率锁定的情况下引入强度归一化方法后的信噪比比常用的 $1f$ 归一化方法提高了约 3 倍,探测精度达到了 2.5×10^{-9} ,该实验利用多通池作为气池,有效光程达到 26.4 m 。

本文选择 CO_2 气体作为研究气体,对 CO_2 气体进行测量^[20]在多个领域具有重要的研究意义。其中在医疗诊断中,通过测量呼吸气体中 CO_2 气体的含量^[21-22],可以判断人体的健康状况。在对病人的呼吸气体中 CO_2 气体成分的浓度进行检测时,由于人的呼吸时间短且存在呼吸不规律的情况,会对检测结果造成影响,这就需要检测设备响应时间特别快,但是传统的气池体积较大,响应时间慢,无法实现实时测量。中空波导光纤^[23-25]凭借体积小、响应时间快等特点,广泛地应用于痕量气体检测。它既能充当气体样品池,又可以进行光路的传输,而且柔韧性好,便于器件小型化,适用于现场测量,因此利用中空波导光纤对 CO_2 气体进行实时测量具有广泛的应用前景。

本文提出了一种将电流反馈稳频技术与中空波导光纤相结合的测量方案。采用中心波长为 $2.73 \mu\text{m}$ 的分布式反馈(DFB)激光器作为探测光源,搭建了一套 CO_2 气体传感器系统。在锁频和未锁频两种状态下,分别利用 $2f$ 方法和 $2f/1f$ 方法对标准气体进行长时间测量;然后对 4 种方法进行对比,并分析 4 种方法所测量到的系统的稳定时间和探测极限;最后利用 Kalman 滤波方法来进一步提高测量系统的测量精度。

2 基本原理

以频率 f 对半导体激光器的输入电流进行正弦调制时,激光的瞬时频率为

$$\nu = \nu_0 + \nu_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

式中: ν_0 为激光器中心频率; ν_m 为调制振幅;角频率 $\omega = 2\pi f$; t 为时间。此时激光的强度调制可表示为

$$I'_0(t) = I_0[1 + n \sin(\omega t)], \quad (2)$$

式中: I_0 为初始激光强度; n 为光强调制系数。根据比尔-朗伯定律,经过气体吸收后探测的光强为

$$I(t) = I_0[1 + n \sin(\omega t)] \exp[-\alpha(\nu)LC], \quad (3)$$

式中: $\alpha(\nu)$ 为吸光度; L 为吸收程长; C 为待测气体浓度。

当激光发射波长处于 CO_2 的吸收峰中心位置时,有

$$I(t) = I_0 \left\{ 1 + n \sin(\omega t) - \frac{\alpha_0 LC}{1 + \left[\frac{\nu_m \sin(\omega t)}{r} \right]^2} \right\}, \quad (4)$$

式中: r 为吸收谱线的线宽。探测器接收的信号经锁相放大,通过傅里叶分析,得到一次谐波分量和二次谐波分量,可分别表示为

$$I_{1f} = nI_0, \quad (5)$$

$$I_{2f} = -k\alpha_0 LCI_0, \quad (6)$$

式中: k 为吸收系数 α_0 展开的二次谐波的傅里叶系数。从(5)、(6)式可以看出, $1f$ 和 $2f$ 的振幅都和激光的初始强度有关,激光在传输过程中往往会因为周围环境的变化而发生改变。为了消除这种影响,用 I_{2f} 和 I_{1f} 的比值来表示 CO_2 气体的浓度:

$$\frac{I_{2f}}{I_{1f}} = -\frac{k\alpha_0 LC}{n}. \quad (7)$$

因此,可以利用二次谐波 I_{2f} 与一次谐波 I_{1f} 的比值反演出待测 CO_2 气体,消除系统中激光器强度波动和中空波导光纤中传输模式对光强的影响。

3 实验结果与分析

3.1 实验装置

采用中心波长为 $2.73 \mu\text{m}$ 的 DFB 激光器 (Nanoplus GmbH 公司) 作为探测光源,如图 1 所示,利用激光控制器 (LDC-3724C, ILX Lightwave 公司) 控制 DFB 激光器的温度和电流。激光控制器设定的温度和电流分别为 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 116.5 mA 。激光器发出的光经 $1/2$ 分光镜后分成互为垂直的两束

光,一束光进入中空波导光纤后在其内部壁间反射,出射光被光电探测器 1 (PVI-4TE-10.6, VIGO system 公司) 接收,另一束光通过 CO_2 气体参考池后被光电探测器 2 接收。其中光电探测器 2 的信号经锁相放大器 1 (SR830, Stanford Research Systems) 解调后,输出的三次谐波信号 ($3f$) 作为误差信号输入到 PID 伺服控制器 (LB-1005, New Focus) 的 error in 接口,锁相放大器 1 输出的高频正弦信号 (1.6 kHz , 0.2 V) 输入到伺服控制器的 mod 接口,函数信号发生器产生的锯齿波信号 (20 Hz , 0.4 V) 输入到伺服控制器的 sweep in 接口。最后伺服控制器的输出信号输入到激光控制器的电流调制端。光电探测器 1 的信号经锁相放大器 2 和锁相放大器 3 后分别解调输出 $1f$ 和 $2f$ 信号,利用上位机内的采集卡结合 LabWindows 程序,采集到锁相放大器解调出的 $1f$ 和 $2f$ 信号,经过计算后获得待测气体 CO_2 浓度。气体样品池由长度为 1 m 的中空波导光纤 (HWEA1000160, Polymicro Technologies) 组成,利用压强控制器和流量计控制中空波导光纤内的压强和流速分别为 32.89 kPa 和 350 mL/min ,使得待测气体 CO_2 进入中空波导光纤内,使用 1.2 L 真空泵 (DIVAC) 抽出中空波导光纤内的待测气体 CO_2 ,以保证中空波导光纤内部动态平衡。使用单通池作为气体参考池,用分子泵将单通池内部的气压抽到真空状态,然后向单通池内通入高纯度 CO_2 气体,使腔内压力达到 19.73 kPa 。

3.2 反馈控制

采用 New Focus 公司的 LB-1005 高速伺服 PID 控制器,其具有扫描输入、低通滤波和低频增益等功能。将参考腔内得到的气体直接吸收信号送入到锁相放大器中解调出二次谐波信号和三次谐波信号,然后将解调出的三次谐波信号作为误差信号输入到 PID 伺服回路中。通常伺服回路会将信号锁定在零点位置,对应于三次谐波的中间位置,另外三次谐波的中间位置也对应于二次谐波的峰值位置,便于后面待测气体信号的采集。在实验过程中,将激光控制器的温度和电流分别设置为 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 116.5 mA ,将激光器的中心波长调节到 CO_2 吸收峰中心附近 (3663.85 cm^{-1})。激光器发出的光经分光镜后,其中一束经单通参考气池后被光电探测器接收。探测器探测的信号在锁相放大器中解调得到三次谐波信号,将三次谐波信号送至 PID 伺服控制器作为误差参考信号,并反馈到激光控制器,将激光波长定位到 CO_2 吸收线中心位置上。定位到

CO₂ 吸收峰中心位置后,控制器会反复调节误差信号值直至到达 0 V,随后控制器开启锁定模式,扫描

输入关闭,调节增益旋钮,优化反馈效果。

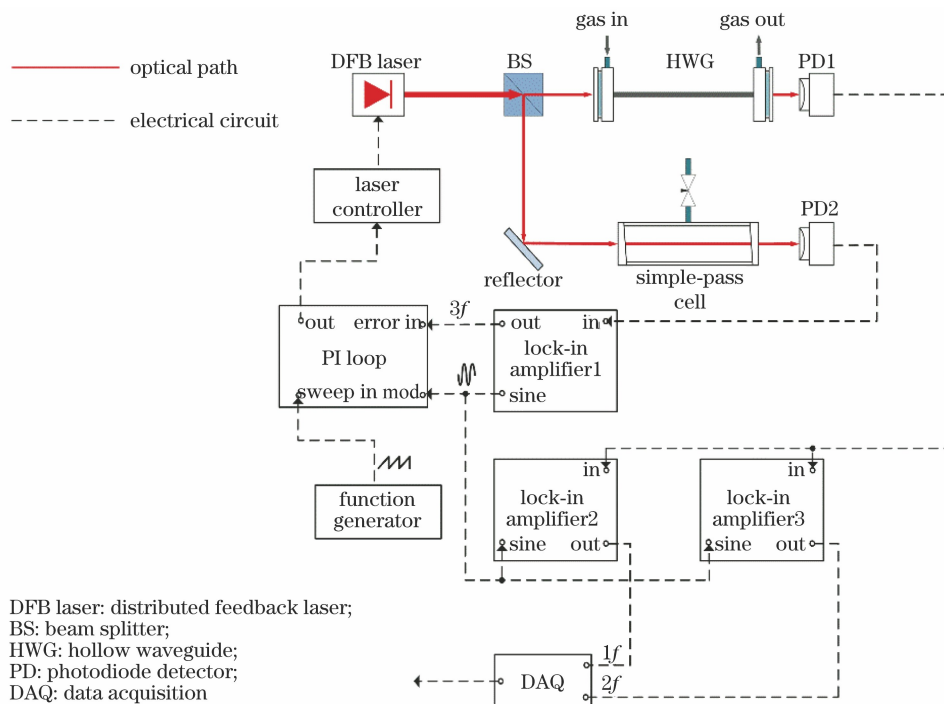


图 1 基于中空波导光纤的 CO₂ 气体检测系统

Fig. 1 CO₂ gas detection system based on hollow waveguide fiber

3.3 浓度定标

实验中使用高纯 N₂ (≥99.99%) 与高纯 CO₂ (≥99.99%), 利用两台流量计配比得到体积分数分别为 3.03%, 3.64%, 4.24%, 4.84%, 5.45%, 5.88% 的 CO₂ 气体, 利用压力控制器将中空波导光纤的压力保持在 32.89 kPa, 流量计控制气体流速

为 350 mL/min。CO₂ 体积分数与 2f 信号峰值的定标结果如图 2(a) 所示, 线性度为 0.99669。按照同样的方法利用流量计配比了体积分数分别为 3.03%, 3.64%, 4.24%, 4.84%, 5.45% 的 CO₂ 气体, 得到 2f/1f 信号峰值与 CO₂ 体积分数之间的关系, 如图 2(b) 所示。其中 WMS 指波长调制技术。

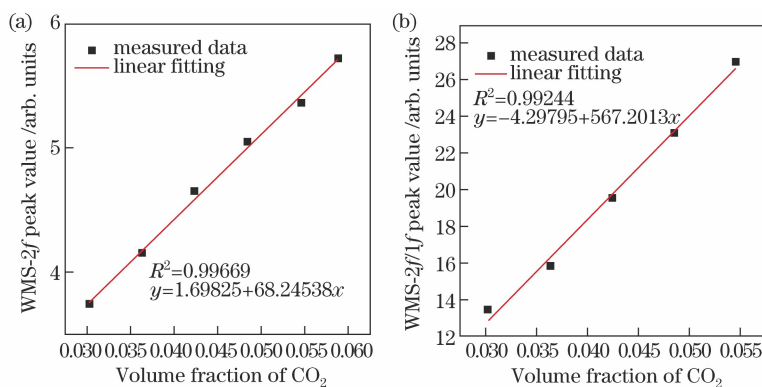


图 2 谐波信号峰值与不同 CO₂ 体积分数之间的关系。(a) 2f 信号; (b) 2f/1f 信号

Fig. 2 Relationship between the peak value of the harmonic signal and different CO₂ volume fraction.

(a) 2f signal; (b) 2f/1f signal

3.4 系统长期稳定性测量

为了验证该传感器的长期稳定性, 在温度 $T = 296.15$ K, 压强 $P = 32.89$ kPa 的实验条件下, 利用高纯度 N₂ (99.99%) 和高纯度 CO₂ (99.99%) 配制

出体积分数为 3.4% 的 CO₂ 气体。使用压强控制器和流量计控制中空波导光纤内的压强和流速分别为 32.89 kPa 和 350 mL/min, 使得待测气体 CO₂ 进入中空波导光纤内, 每隔 1 s 采集一个吸收谱线, 测

量时长约为 10 h。通过对气体浓度进行定标得到拟合曲线,利用拟合曲线可以反演得到连续测量的体积分数值。图 3 为在锁频(即频率锁定在 3663.85 cm^{-1} 处)和未锁频两种状态下, CO_2 体积分数值随时间变化的分布情况。图 3(a)中,0~10 h 区间的曲线是利用 $2f$ 方法反演得到 CO_2 体积分数值随时间变化的数据,经计算得到标准偏差为 0.00281;10~20 h 区间的曲线是利用 $2f$ -lock 方法反演得到 CO_2 体积分数值随时间变化的数据,经计算得到标准偏差为 0.00154。图 3(b)中,0~10 h 区间的曲线是利用 $2f/1f$ 方法反演得到 CO_2 体积分数值随时间变化的数据,经计算得到标准偏差为 0.00239;10~20 h 区间的曲线是利用 $2f/1f$ -lock 方法反演得到 CO_2 体积分数值随时间变化的数据,经计算得到标准偏差为 0.00118。从得到的结果可知: $2f$ 方法测量得到的 CO_2 体积分数值漂移比 $2f/1f$ 方法测得的大,主要是由于 $2f/1f$ 方法消除了激光光强波动对实验结果的影响;相比未锁频状态,锁频的状态能够在一定程度上减小测量值的波动, $2f/1f$ -lock 方法测量到的 CO_2 体积分数值漂移比 $2f$ -lock 方法测得的结果更小,因此 $2f/1f$ -lock 方法是提高测量准确度的最佳方案。除了激光光强波动的影响之外,测量结果还受到室内温度的波动、中空波导光纤的耦合程度、中空波导光纤内的干涉效应等因素的影响。

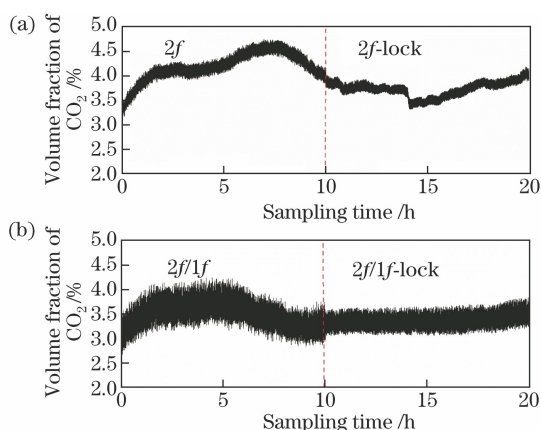


图 3 在不同测量条件下 CO_2 体积分数值随时间的变化。

(a) $2f$ 条件下锁频与不锁频测得的结果;(b) $2f/1f$ 条件下锁频与不锁频测得的结果

Fig. 3 CO_2 volume fraction changing with time under different measurement conditions. (a) Locked frequency and non-locked frequency measured results under $2f$ condition; (b) locked frequency and non-locked frequency measured results under $2f/1f$ condition

3.5 测量精度

为了评估所提系统长时间的测量精度,在 $T=296.15\text{ K}$, $P=32.89\text{ kPa}$ 的实验条件下,利用高纯度 N_2 和高纯度 CO_2 配制出体积分数值为 3.4% 的 CO_2 ,每隔 1 s 采集一个吸收谱线。分别在频率锁定和不锁定条件下利用 $2f$ 方法和 $2f/1f$ 方法对实验测量结果进行数据处理,可获得连续测量的体积分数值。图 4 显示了不同测量条件下 CO_2 体积分数值的频数分布直方图和高斯线型拟合,测量精度由高斯拟合函数的半峰半宽(HWHM)决定。由图 4(a)可知, $2f$ 方法的测量精度为 0.00302,对应的体积分数值为 $(4.21 \pm 0.302)\%$,相对误差为 0.238;由图 4(b)可知, $2f$ -lock 方法的测量精度为 0.001255,对应的体积分数值为 $(3.77 \pm 0.1255)\%$,相对误差为 0.1088;由图 4(c)可知, $2f/1f$ 方法的测量精度为 0.003235,对应的体积分数值为 $(3.49 \pm 0.3235)\%$,相对误差为 0.02647;由图 4(d)可知, $2f/1f$ -lock 方法的测量精度为 0.00138,对应的体积分数值为 $(3.348 \pm 0.138)\%$,相对误差为 -0.01529。从拟合结果来看,频率锁定条件下得到的系统探测精度相较于频率未锁定时有明显的改善,4 种方法中, $2f$ -lock 方法得到系统的探测精度最低, $2f/1f$ -lock 方法虽然消除了光强波动对实验结果的影响,却引入了 $1f$ 信号中的噪声。通过相对误差比较可知, $2f/1f$ -lock 方法得到的测量结果的相对误差最小,为 -0.01529。

3.6 Allan 方差

Allan 方差是一种常用于 TDLAS 系统探测极限评估的指标。在 $T=296.15\text{ K}$, $P=32.89\text{ kPa}$ 的实验条件下,利用流量计配比体积分数值为 3.4% 的 CO_2 ,在锁频和未锁频两种状态下,分别利用 $2f$ 方法和 $2f/1f$ 方法对实验测量结果进行数据处理,可分别获得连续测量结果对应的体积分数值。将各自对应的体积分数值导入到 Allan 方差评估程序中,可获得对应的 Allan 评估结果,如图 5 所示。由图 5 可知: $2f$ 和 $2f$ -lock 的最佳积分时间分别为 120 s 和 165 s,相应的探测极限为 5.89×10^{-5} 和 7.7×10^{-5} ; $2f/1f$ 和 $2f/1f$ -lock 的最佳积分时间为 120 s 和 210 s,相对应的探测极限为 1.2×10^{-4} 和 4.24×10^{-5} 。其中频率锁定条件下系统的稳定时间相较于未锁定时有了显著的提高,在 4 种方法中, $2f/1f$ -lock 方法使得系统稳定时间最长,探测极限最低,在长时间的测量过程中能够始终保证信号的稳定。

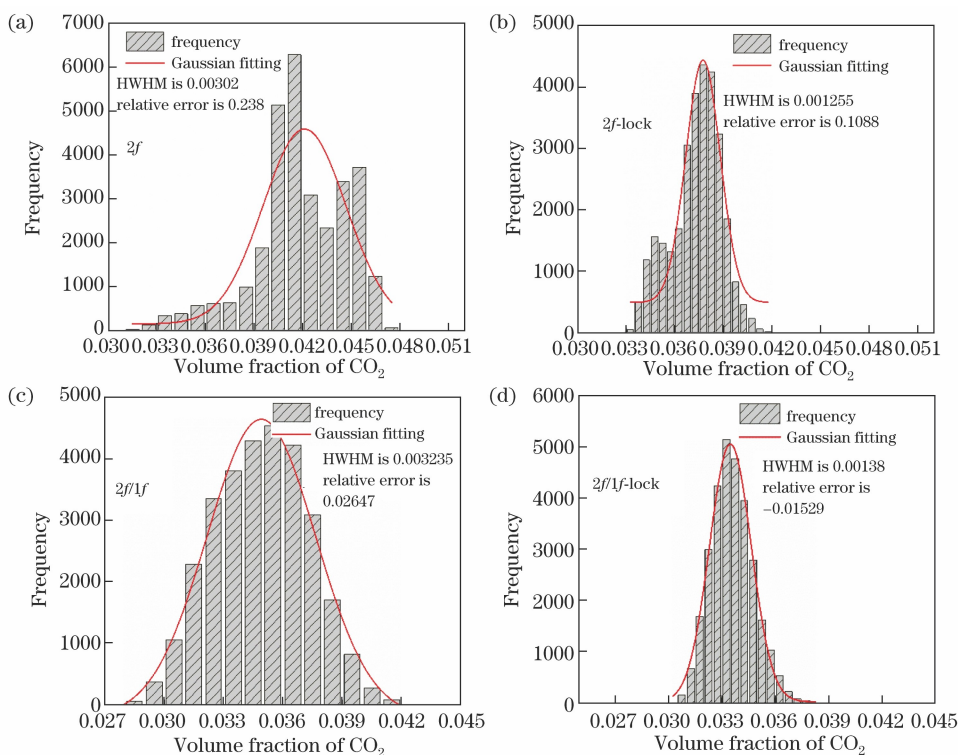


图 4 不同测量条件下 CO₂ 体积分数的频数分布直方图和高斯线型拟合。(a) 2f 条件; (b) 2f-lock 条件; (c) 2f/1f 条件; (d) 2f/1f-lock 条件

Fig. 4 CO₂ volume fraction frequency distribution histogram and Gaussian line fitting under different measurement conditions. (a) 2f condition; (b) 2f-lock condition; (c) 2f/1f condition; (d) 2f/1f-lock condition

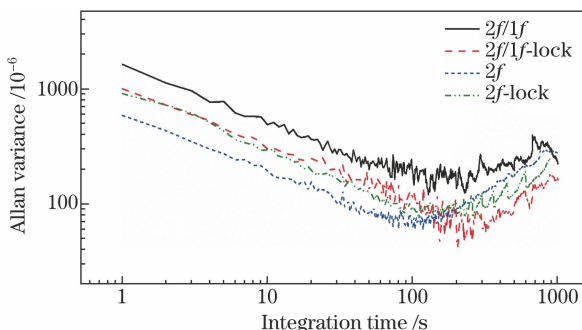


图 5 四种方法得到的系统的 Allan 方差

Fig. 5 Allan variance of the system obtained by four methods

3.7 Kalman 滤波

为了提高系统的测量精度,可以通过对 2f/1f 信号使用多次平均或者采用 Kalman 滤波等方法来降低系统噪声。图 6 为 2f/1f-lock 方法下 CO₂ 体积分长时间测量结果以及 Kalman 滤波后的结果,可知,经 Kalman 滤波后,体积分数上下波动变得更小。图 7 为 Kalman 滤波后 CO₂ 体积分数的频数分布直方图以及高斯线型拟合图,得到系统的测量精度为 2.786×10^{-4} , 对应的体积分数值为 $(3.33 \pm 0.02786)\%$, 测量精度相比未滤波之前提高

了 4.95 倍,有效地降低了系统噪声对测量结果的影响。

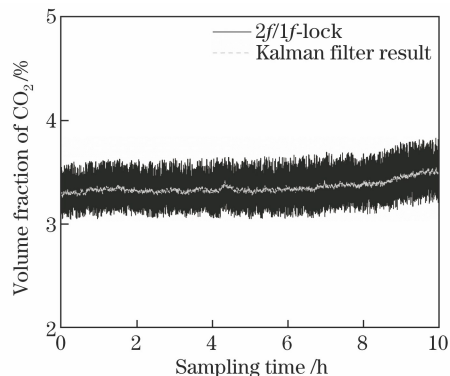


图 6 2f/1f-lock 条件下 CO₂ 体积分长时间测量结果及 Kalman 滤波后的结果

Fig. 6 Long-term measurement results of CO₂ volume fraction under 2f/1f-lock condition and Kalman filtering result

4 结 论

采用中心波长为 2.73 μm 的 DFB 激光器作为光源,对 CO₂ 气体进行了研究。在锁频和未锁频两种状态下,分别利用 2f 方法和 2f/1f 方法对标准气体进行长时间测量。实验结果表明,在对 CO₂ 气

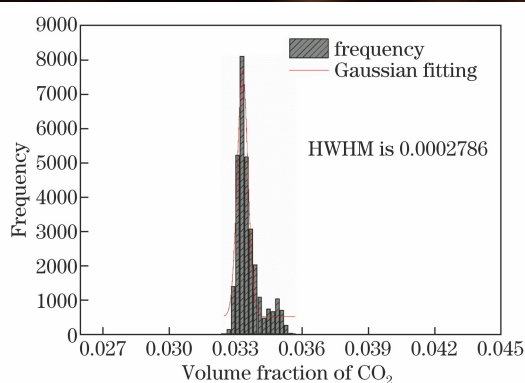


图 7 Kalman 滤波后的 CO_2 体积分数的频数分布直方图及高斯线型拟合图

Fig. 7 Frequency distribution histogram and Gaussian line fitting graph of CO_2 volume fraction after Kalman filtering

体进行长时间测量时,锁频条件下得到的系统探测精度相较于未锁频条件下得到的探测精度更低。此外由 Allan 方差分析可知, $2f$ 和 $2f$ -lock 的最佳积分时间分别为 120 s 和 165 s,相应的探测极限为 5.89×10^{-5} 和 7.7×10^{-5} , $2f/1f$ 和 $2f/1f$ -lock 的最佳积分时间为 120 s 和 210 s,相对应的探测极限为 1.2×10^{-4} 和 4.24×10^{-5} 。锁频条件下系统的稳定时间更长,探测极限更低。实验中对采集的数据仅平均了 10 次, CO_2 体积分数的测量结果仍存在比较大的波动,通过使用 Kalman 滤波将 $2f/1f$ -lock 的测量结果滤波后,进一步减小了信号误差波动,相较于未滤波前系统的探测精度提高了 4.95 倍。该气体传感系统使用的中空波导光纤气池具有体积小、重量轻等特点,便于实现集成化和小型化,未来在空气质量监测、植物生长分析等 CO_2 长期监测方面具有广泛的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Le Barbu T, Parvitte B, Zéninari V, et al. Diode laser spectroscopy of H_2O and CO_2 in the 1.877- μm region for the *in situ* monitoring of the Martian atmosphere[J]. Applied Physics B, 2006, 82(1): 133-140.
- [2] Nasim H, Jamil Y. Recent advancements in spectroscopy using tunable diode lasers [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(4): 043001.
- [3] Liu C, Xu L J. Laser absorption spectroscopy for combustion diagnosis in reactive flows: a review[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2019, 54(1): 1-44.
- [4] McBirney S E, Trinh K, Wong-Beringer A, et al. Wavelength-normalized spectroscopic analysis of staphylococcus aureus and pseudomonas aeruginosa growth rates[J]. Biomedical Optics Express, 2016, 7(10): 4034-4042.
- [5] Zhang Z R, Pang T, Sun P S, et al. Measurement of carbon isotope of methane and analysis of its genesis type using laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1211001. 张志荣, 庞涛, 孙鹏帅, 等. 基于激光吸收光谱技术的甲烷碳同位素测量及其成因类型分析[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1211001.
- [6] Supplee J M, Whittaker E A, Lenth W. Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy[J]. Applied Optics, 1994, 33(27): 6294-6302.
- [7] Schilt S, Thévenaz L, Robert P. Wavelength modulation spectroscopy: combined frequency and intensity laser modulation[J]. Applied Optics, 2003, 42(33): 6728-6738.
- [8] Kluczynski P, Gustafsson J, Lindberg A M, et al. Wavelength modulation absorption spectrometry: an extensive scrutiny of the generation of signals [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2001, 56(8): 1277-1354.
- [9] Li H, Rieker G B, Liu X, et al. Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases [J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 1052-1061.
- [10] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers: comparison of experiment and theory[J]. Applied Physics B, 1981, 26(3): 203-210.
- [11] Liu J T C, Jeffries J B, Hanson R K. Wavelength modulation absorption spectroscopy with $2f$ detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows[J]. Applied Physics B, 2004, 78(3/4): 503-511.
- [12] Uehara K, Tai H. Remote detection of methane with a 1.66- μm diode laser [J]. Applied Optics, 1992, 31(6): 809-814.
- [13] Yanagawa T, Saito S, Yamamoto Y. Frequency stabilization of 1.5- μm InGaAsP distributed feedback laser to NH_3 absorption lines [J]. Applied Physics Letters, 1984, 45(8): 826-828.
- [14] Yan Q, Yuan M, He T T, et al. Pulse laser frequency locking method based on molecular absorption[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1028005. 闫庆, 袁萌, 何甜甜, 等. 基于分子吸收的脉冲激光锁频方法研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1028005.
- [15] Galzerano G, Fasci E, Castrillo A, et al. Absolute frequency stabilization of an extended-cavity diode

- laser against Doppler-free H_2O_{17} absorption lines at 1.384 microm [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3107-3109.
- [16] Wang Q, Wang Z, Ren W. Wavelength-stabilization-based photoacoustic spectroscopy for methane detection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(6): 065102.
- [17] Hodges J T, Lisak D. Frequency-stabilized cavity ring-down spectrometer for high-sensitivity measurements of water vapor concentration [J]. *Applied Physics B*, 2006, 85(2/3): 375-382.
- [18] Long D A, Okumura M, Miller C E, et al. Frequency-stabilized cavity ring-down spectroscopy measurements of carbon dioxide isotopic ratios [J]. *Applied Physics B*, 2011, 105(2): 471-477.
- [19] Wang G S, Mei J X, Tian X, et al. Laser frequency locking and intensity normalization in wavelength modulation spectroscopy for sensitive gas sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4878-4885.
- [20] Li W D, Liu J Q, Zhu Y D, et al. LEO-LEO infrared laser occultation technique to measure atmospheric carbon dioxide concentration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0810001.
李文冬, 刘继桥, 朱亚丹, 等. LEO-LEO 红外激光掩星 CO_2 浓度测量技术研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0810001.
- [21] Ma S, Wu T, Sun C L, et al. Real-time exhaled CO_2 gas measurement using a mid-infrared hollow waveguide fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1130001.
马帅, 吴涛, 孙城林, 等. 基于中红外中空波导光纤的呼吸气体 CO_2 实时测量 [J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1130001.
- [22] Wang X, Jing C R, Hou K X, et al. Online detection of human-exhaled end-tidal carbon dioxide using tunable semiconductor absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0311002.
王鑫, 荆聪蕊, 侯凯旋, 等. 基于 TDLAS 技术的人体呼气末 CO_2 在线检测 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0311002.
- [23] Li J Y, Luo G, Du Z H, et al. Hollow waveguide enhanced dimethyl sulfide sensor based on a 3.3 μm interband cascade laser [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 255: 3550-3557.
- [24] Worrell C A, Giles I P, Adatia N A. Remote gas sensing with mid-infra-red hollow waveguide [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(7): 615-617.
- [25] Chen J, Hangauer A, Strzoda R, et al. Resolution limits of laser spectroscopic absorption measurements with hollow glass waveguides [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28): 5254-5261.