

文章编号 1004-924X(2026)15-2280-09

基于频率调制相位优化的激光稳频及其腔衰荡光谱应用

周月婷*, 王孟圆, 翟保杰, 邱选兵, 李传亮

(太原科技大学 应用科学学院 山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心,
山西 太原 030024)

摘要:针对腔衰荡光谱(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)系统中激光器频率漂移、线宽过宽以及传统稳频技术难以兼顾快速单点测量与硬件成本等问题,建立了频率调制光谱中调制频率与相位选择的对应关系,并将其应用于激光稳频及腔衰荡光谱系统,实现了乙炔气体的单点快速测量。从理论上系统提示了频率调制光谱中吸收与色散相位误差信号随调制频率变化的演变规律,阐述了以 300 MHz 为临界点择优选择不同解调相位的物理特性,在 300 MHz 以下吸收信号占优,而在高频段则色散信号更具优势。实验搭建了基于 FPGA 的激光稳频系统,经验证误差信号峰峰值的演变规律与理论高度一致。通过优化气压与浓度等参数,利用 PID 控制器将激光频率精准锁定至乙炔吸收线中心,实现了频率稳定与线宽压窄。将稳频后的激光应用于腔衰荡光谱测量,实验结果表明:在 9 MHz(吸收相位)与 350 MHz(色散相位)调制频率下,经 Allan 方差分析系统的检测极限分别达到 6.23×10^{-10} /cm 与 2.51×10^{-10} /cm,较未稳频的 1.55×10^{-9} /cm 提升了近一个数量级,相应的最低探测浓度为 5.09×10^{-12} mol/mol 与 1.26×10^{-11} mol/mol,同样较未稳频的 1.55×10^{-11} mol/mol 实现了近一个量级的性能提升。高频色散相位虽具有优越的性能,但相较于低频吸收相位,提升幅度有限;因此,实际应用中可综合衡量调制频率与硬件成本,以实现性能与成本的平衡,为环境监测与工业传感领域实现高精度、低成本的气体监测提供重要参考。

关键词:激光光谱;腔衰荡光谱;频率调制光谱;激光稳频;痕量气体检测

中图分类号:O433 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263415.2280

CSTR:32169.14.OPE.20263415.2280

Laser frequency stabilization based on phase optimization of frequency modulation and its application in cavity ring-down spectroscopy

ZHOU Yueting*, WANG Mengyuan, ZHAI Baojie, QIU Xuanbing, LI Chuanliang

(Shanxi Province Engineering Research Center of Precision Measurement and Online Detection Equipment, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

* Corresponding author, E-mail: zyt@tyust.edu.cn

Abstract: Laser-frequency drift and excessive linewidth limit rapid, cost-effective single-point measure-

收稿日期:2026-04-11;修订日期:2026-05-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62475182, No. 62505213, No. 52506204, No. 12304403);山西省重点研发计划资助项目(No. 202402150301012, No. 202402130501005, No. 202302150101006);中央引导地方科技发展资金项目(No. YDZJSX2025C026);山西省科技合作交流专项资助项目(No. 202304041101022)

ments in cavity ring-down spectroscopy (CRDS). This work investigates the relationship between modulation frequency and demodulation-phase selection in frequency-modulation spectroscopy (FMS) and applies it to laser-frequency stabilization for acetylene CRDS. The modulation-frequency dependence of absorption- and dispersion-phase error signals was analyzed theoretically. The analysis identified an approximately 300 MHz crossover: the absorption phase dominated below 300 MHz, whereas the dispersion phase provided a larger error signal at higher modulation frequencies. An FPGA-based frequency-stabilization system was developed, and the measured peak-to-peak error-signal variation agreed closely with the theoretical prediction. After optimizing gas pressure and concentration, a proportional-integral-derivative controller locked the laser to the center of the acetylene absorption line, thereby improving frequency stability and reducing the effective linewidth. The stabilized laser was then evaluated in CRDS measurements. Allan-variance analysis yielded detection limits of $6.23 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1}$ at 9 MHz in the absorption phase and $2.51 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1}$ at 350 MHz in the dispersion phase, compared with $1.55 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$ without stabilization. These values correspond to improvements by factors of 2.49 and 6.18, respectively. Although high-frequency dispersion-phase detection achieved the lower detection limit, its advantage should be balanced against increased hardware requirements. The approach supports high-precision, low-cost gas monitoring in environmental and industrial sensing applications.

Key words: Laser spectroscopy; cavity ring-down spectroscopy; frequency modulation spectroscopic; laser frequency stabilization; trace gas detection

1 引 言

腔衰荡光谱(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)作为一种高灵敏度的检测技术,广泛应用于大气环境分析^[1-4]、工业生产^[5-8]和医疗诊断^[9-10]等多个领域。CRDS技术基于高精度光学腔^[11]有效增长相互作用路径,通过测量时域信号抑制强度噪声,探测灵敏度可达到 $10^{-12}/\text{cm}$ 。然而,在CRDS系统中,常用的DFB激光器存在频率漂移和线宽过宽的问题,制约了系统探测灵敏度与测量精度,因此需要对激光频率进行稳定。

实现激光稳频的技术途径多样,例如PDH(Pound-Drever-Hall)^[12-14]技术以及光学反馈腔稳频^[15-18]等。2011年,Cygan等^[19]利用PDH技术将687 nm的激光波长锁定于高精度谐振腔,实现了 $2 \times 10^{-10}/\text{cm}$ 的探测灵敏度。2017年^[20]和2019年郭瑞民等^[21]在1 550~1 630 nm波长内将光学腔和激光频率同时锁定在光频梳上,探测灵敏度分别达到 $3 \times 10^{-12}/\text{cm}$ 和 $7.6 \times 10^{-12}/\text{cm}$ 。王兴平等^[22]在2022年利用光学反馈有效压窄1 654

nm的半导体激光器线宽,提高了激光到谐振腔的耦合效率,获得探测灵敏度为 $1.29 \times 10^{-10}/\text{cm}$ 。但是PDH技术和光学反馈技术仅仅是将激光频率锁定到腔模上,并未将激光频率直接稳定于气体吸收线中心频率处,无法实现CRDS技术的快速单点测量。相比之下,通过波长调制或者频率调制光谱锁定的优势尤为明显。贾梦源等^[23]在2016年通过381 MHz的频率调制技术将激光频率锁定于乙炔(C_2H_2)的1 531 nm吸收线,并同步应用PDH技术锁定光学腔,由此实现激光频率与腔长的双重稳定,获得 $4 \times 10^{-9}/\text{cm}$ 的灵敏度。胡迈等^[24]在2022年基于100 MHz频率调制产生一次谐波的腔衰荡光谱技术,将CRDS系统的最小检测极限提升至 $4.82 \times 10^{-10}/\text{cm}$,并且成功将激光的频率稳定在二氧化碳的吸收线上。贾良权等^[25]利用频率调制光谱技术与TDLAS技术相结合,得到了在积分时间347 s时,Allan方差为 $0.228 \text{ mL}/\text{m}^3$,实现了对待测气体的单点快速高精度测量。因此,在实现激光稳频的技术路径中,频率调制光谱(Frequency Modulation Spectroscopy, FMS)因其高信噪比和快速动态响应

特性而备受关注。频率调制技术是将光谱信息转移至高频区,从而避免 $1/f$ 噪声与环境低频干扰;同时,调制解调技术获取的奇次谐波信号在吸收线中心频率处具有理想的过零特性,能够为闭环反馈系统提供高线性度、正负对称的鉴频误差信号。然而,在构建 FMS 激光稳频系统时,调制频率与检测相位是决定锁定性能的核心因素,也是寻找系统最佳工作点、平衡探测灵敏度与硬件成本的关键。

本文研究了频率调制光谱中调制频率与相位选择的对应关系,并将其应用于激光稳频及腔衰荡光谱系统,实现了乙炔气体的单点快速测量。从理论上分析了频率调制光谱的原理,模拟并讨论了不同调制频率下吸收与色散相位误差信号峰峰值的演变规律。实验搭建了激光稳频系统,经验证其误差信号随频率的变化规律与理论高度一致。本研究为环境监测与工业传感领域的高精度气体测量提供了重要的理论依据与技术支持。

2 原 理

FMS 作为一种高灵敏度检测技术,通过对激光进行周期性调制并解调,可有效提取痕量气体或分子跃迁产生的微弱光谱信息。激光经光电调制器施加兆赫兹量级的正弦调制,从而产生对称分布的调制边带。当该调制光束通过样品时,若气体吸收谱线与载波或边带重叠,将导致各频率分量的振幅衰减与相位漂移,打破原有边带间的平衡,使拍频信号携带吸收与色散信息。利用高速光电探测器捕获拍频信号,在特定参考相位下进行解调,即可分别提取反映气体物理特性的吸收与色散相位信号。

频率调制常被看作电场相位的正弦调制。正弦相位调制的激光电场 E 的表达式如下:

$$E(t) = E_0 \exp \{ i [2\pi\nu_c t + \beta \sin(2\pi\nu_m t)] \}, \quad (1)$$

其中: ν_c 是激光频率, ν_m 是调制频率, β 是调制系数。当 β 较小时 (< 0.4), 可表示为频率调制三联体:

$$E(t) = E_0 \exp(i2\pi\nu_c t) [J_0(\beta) + J_1(\beta) \exp(i2\pi\nu_m t) - J_1(\beta) \exp(-i2\pi\nu_m t)]. \quad (2)$$

解调调制频率 ν_m , 即探测载频与边带的拍

频, 得出频率调制的探测信号, 可以表示为:

$$S_{A, \nu_m}^f(\Delta\nu, t) = \eta_{f_m} P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) S_{c_{rel}} pL \times \{ [\chi^{\text{disp}}(\nu_c - \nu_m)] - 2\chi^{\text{disp}}(\nu_c) + \chi^{\text{disp}}(\nu_c + \nu_m) \} \cos(\theta_{f_m}) + [\chi^{\text{disp}}(\nu_c - \nu_m) - \chi^{\text{disp}}(\nu_c + \nu_m)] \sin(\theta_{f_m}), \quad (3)$$

其中: η_{f_m} 是 FMS 的仪器因子, θ_{f_m} 是解调相位, χ^{disp} 是面积归一化的色散线型函数。如果三联体处于平衡状态, 则会得到零信号。如果频率调制三联体被衰减与相移, 则产生非零的误差信号。其中 $\theta_{f_m} = 0^\circ$, 则是吸收相位的误差信号, 公式如下:

$$S_{A, \nu_m}^f(\Delta\nu, t) = \eta_{f_m} P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) S_{c_{rel}} pL \times [\chi^{\text{disp}}(\nu_c) \nu_m - 2\chi^{\text{disp}}(\nu_c) + \chi^{\text{disp}}(\nu_c + \nu_m)]. \quad (4)$$

同理得到 $\theta_{f_m} = 90^\circ$, 是色散相位的误差信号, 其公式如下:

$$S_{A, \nu_m}^f(\Delta\nu, t) = \eta_{f_m} P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) S_{c_{rel}} pL \times [\chi^{\text{disp}}(\nu_c) \nu_m - \chi^{\text{disp}}(\nu_c - \nu_m)]. \quad (5)$$

根据式(4)与式(5), 本文模拟了不同调制频率下吸收与色散相位的误差信号线型函数, 并提取其峰峰值演变规律如图 1 所示。结果表明, 吸收相位的误差信号峰峰值随调制频率增加呈先快后慢的上升趋势, 并在 200 MHz 后趋于饱和; 而色散相位的峰峰值整体呈单调递增, 前期增长较为平缓, 后期增速显著加快, 呈现出明显的加速上升特征。对比分析可知, 两曲线在近 300 MHz 处存在交点: 在低频段 (< 300 MHz), 吸收相位信号强度占优, 更有利于实现频率锁定; 而

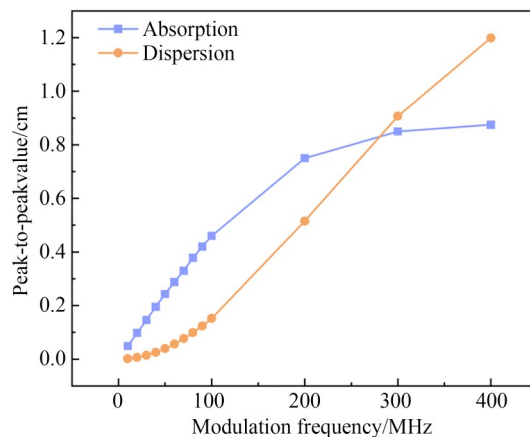


图 1 吸收与色散相位的误差信号线型函数峰峰值
Fig. 1 Peak-to-peak value of error signal lineshape function for absorption and dispersion phases

在高频段(>300 MHz),色散相位信号幅值更高,展现出更佳的鉴频优势。

3 实 验

图2展示了由频率调制稳频模块与CRDS测量模块组成的实验装置,分别负责激光频率锁定与 C_2H_2 浓度的测量。系统采用中心波长为 $1\,531$ nm的DFB激光器,针对乙炔在 $6\,529.17/\text{cm}$ 处的吸收线进行探测,由激光二极管驱动器(ILX Light-

wave LDC-3700C)精确调控其温控与电流。激光输出经1:9分束器分为两路:10%的光功率用于衰荡信号采集,90%则进入稳频模块。在稳频链路中,激光经光纤电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)产生 $1\sim 400$ MHz的频率调制,随后耦合进有效光程为 28 m的Herriott吸收池;透射信号经探测器PD1(model 1611)接收、放大后,在混频器中解调生成误差信号。该信号经低通滤波送入FPGA运行PID算法,输出伺服反馈至激光驱动器,将频率实时锁定于目标吸收线中心。

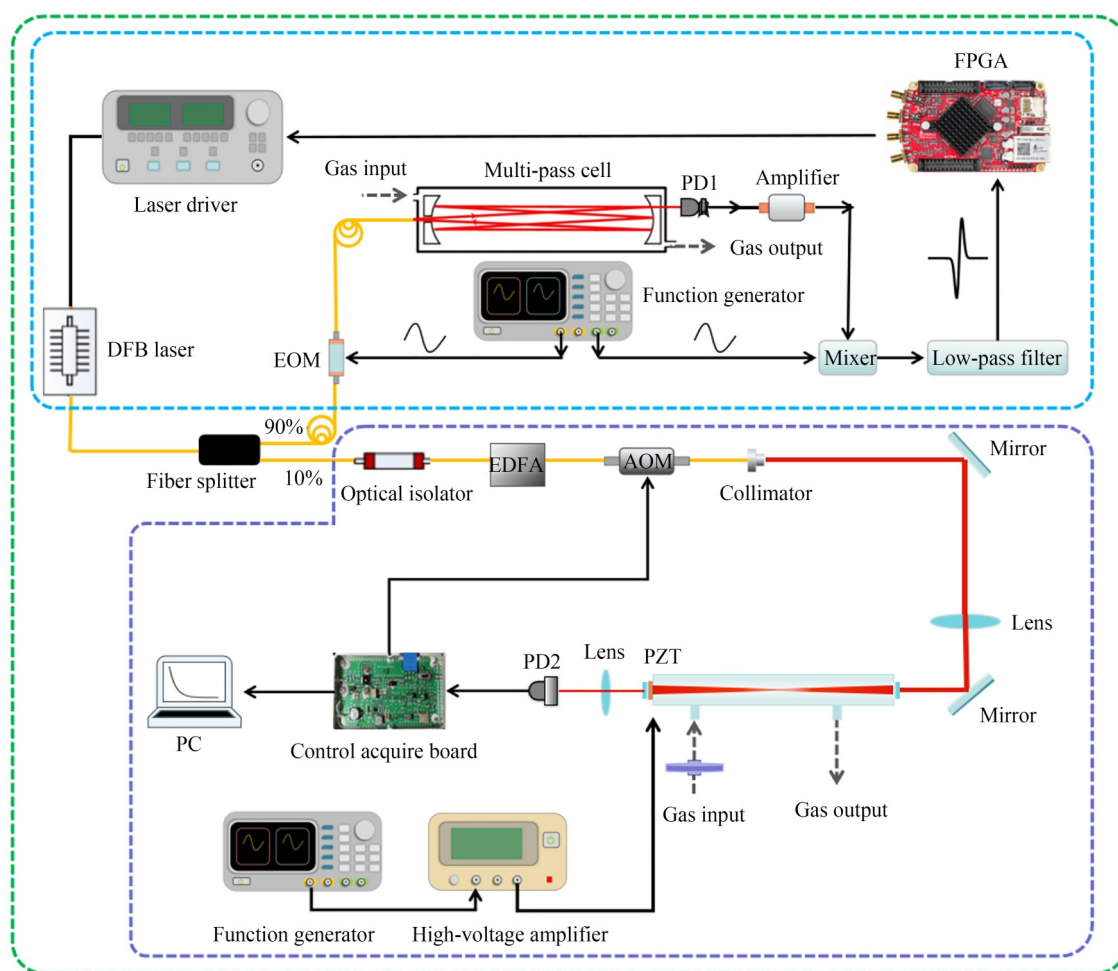


图2 激光锁定和腔衰荡光谱测量系统^[26]

Fig. 2 Laser locking and cavity ring-down spectroscopy measurement system^[26]

锁定后的激光进入CRDS模块,依次通过光纤隔离器与掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)以抑制光反馈并提升功率。声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)作为高速光开关,控制激光经准直后耦合

进高精度光学腔($F=17\,328$)。该腔由两块高反镜组成,腔长为 45 cm,并利用压电陶瓷(PZT)调节腔长以匹配共振频率。透射光由探测器PD2(APD350M)捕获,当光强触发控制板设定的阈值时,系统立即指令AOM切断光路。随后,

控制板同步采集激光关断后的衰荡序列,并传输至电脑端进行后续数据处理与分析。

4 实验结果与讨论

4.1 调制频率与相位

为了验证调制频率对吸收与色散相位的实际影响,本文利用信号发生器在 1~400 MHz 内对激光进行调谐,测得两种相位的误差信号峰峰值,如图 3 所示。实验结果与图 1 的理论模拟规律高度一致,吸收相位的信号幅值随调制频率增加呈现出先快速增长后趋于平稳(200 MHz 后)的态势;而色散相位的信号幅值则表现为单调递增,且在 100 MHz 后进入线性增长区。在 300 MHz 以下频段,吸收相位的误差信号强度显著优于色散相位,是实现稳定锁定的首选信号;一旦调制频率超过 300 MHz,色散相位信号则凭借更高的幅值增益展现出更强的鉴频优势。这一结果为不同调制频率下稳频系统的相位优化选择提供了可靠的实验依据。

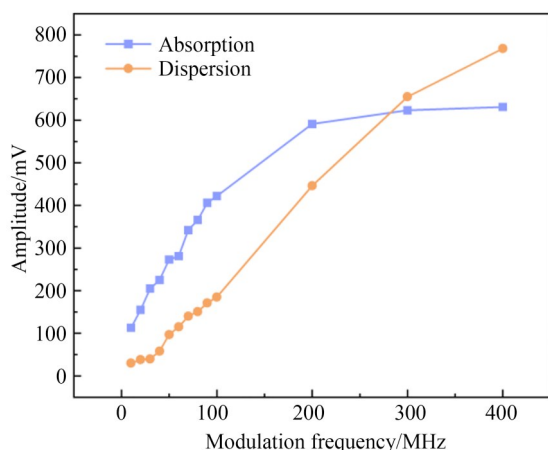


图 3 吸收与色散相位的误差信号峰峰值

Fig. 3 Peak-to-peak value of error signal for absorption and dispersion phases

4.2 锁定性能分析

频率调制光谱信号的展宽特性主要受限于目标气体的吸收谱线展宽。在气压大于 133.32 Pa 的条件下,吸收线型以洛伦兹展宽为主。由于 FMS 信号本质上是载频与边带分量产生的三路直接吸收信号的线性叠加,其误差信号的中心斜

率对气压极其敏感。误差信号过零点处的斜率代表了频率鉴频器的灵敏度,斜率越大,意味着激光频率只要发生极微小的漂移,系统就能产生很大的电压反馈信号,从而把频率迅速拉回来,锁定效果越好。图 4 展示了不同气压下模拟的误差信号中心斜率的变化,随着气压增加,谱线增宽导致信号变得平缓,中心斜率迅速下降并最终趋于稳定。为了保障闭环反馈系统具备足够的鉴频灵敏度,气压通常应控制在 26 664 Pa 以下。

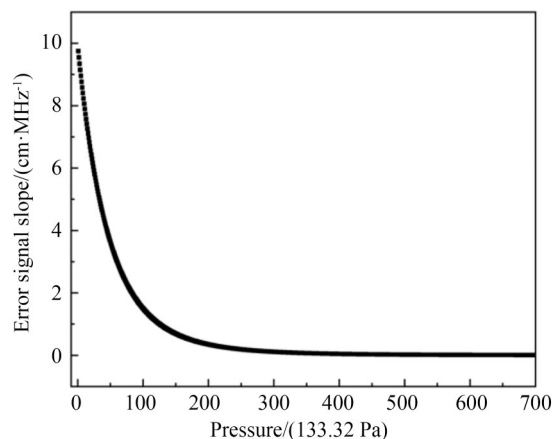


图 4 不同气压下的误差信号中心斜率

Fig. 4 Central slope of error signal under different gas pressures

然而,误差信号中心斜率并不能完全决定锁定性能。气压与浓度的提升虽然会降低斜率,但同时能显著增强误差信号的幅值(信噪比)。为寻找最佳平衡点,本文在不同的气压(1 333.2 Pa, 13 332 Pa)与浓度($1\ 000\sim 9\ 000\times 10^{-6}$)下进行了频率锁定。

为了分析锁定结果,通常评估锁定之后的频率偏移。频率偏移是通过把误差信号的电压值转化为频率值得到的。在此过程中,假设未锁定时误差信号的峰峰值为对应吸收谱线的半高全宽 $V_{pp}=FWHM$,则锁定之后的每一个电压值 V 对应的频率偏移 f 可以表达为:

$$f = V/V_{pp} \times FWHM. \quad (6)$$

由此可求出误差信号所对应的频率偏移,画出其直方图,使用高斯函数拟合得到锁定偏移 ω 。图 5 是锁频后的频率偏移及其分布直方

图,通过对频率偏移分布进行高斯拟合,发现在 1 333.2 Pa 与 $9\,000 \times 10^{-6}$ 条件下,频率锁定

最佳,拟合得到的锁定频率偏移为 3.59 MHz。

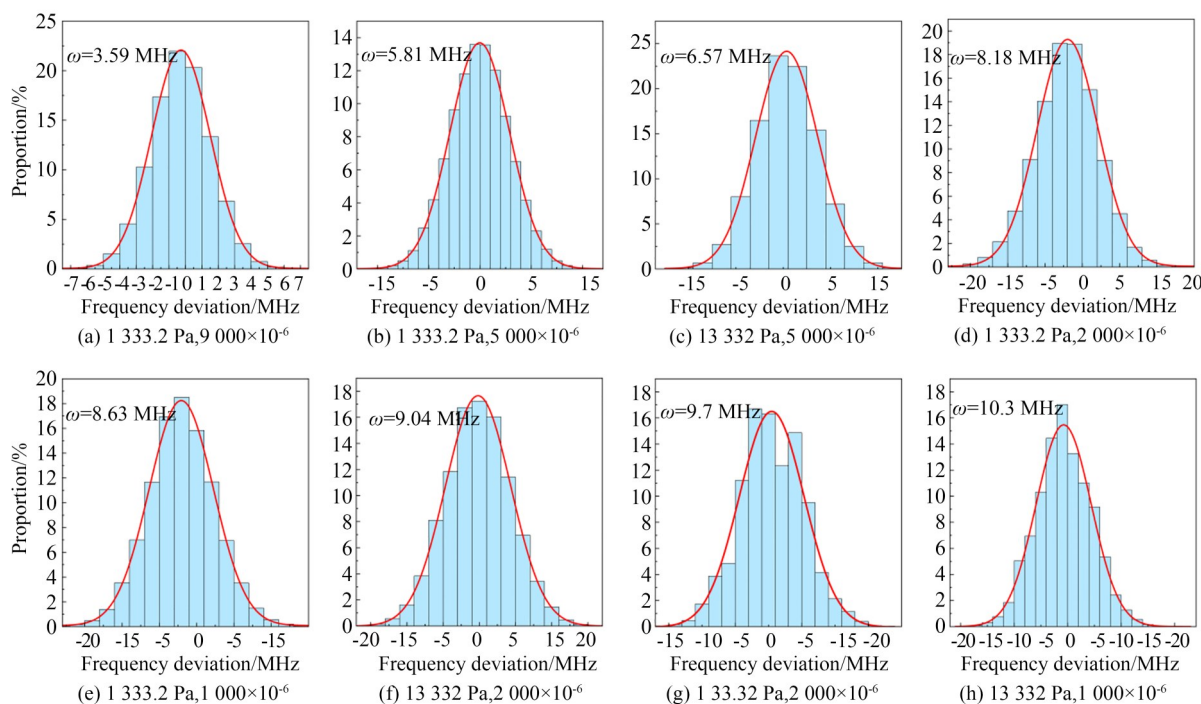


图 5 激光锁定后的频率偏移

Fig. 5 Frequency deviation after laser locking

为了进一步评估锁定性能,搭建了光强采集系统,对 DFB 激光器在锁定前后的输出光强进行了为期 100 min 的连续监测。本实验采用 DFB 激光器作为激光源。在恒定温度下,DFB 激光器的输出功率与注入电流(即激射频率)呈正相关,因此可通过光强波动表征激光频率的变化,实验结果如图 6 所示。未锁定状态下,频率波动峰峰值高达 180 MHz;采用 9 MHz 调制频率的吸收相位锁定后,频率波动降至 7.4 MHz;而采用 350 MHz 调制频率的色散相位锁定后,频率波动进一步抑制到 3.9 MHz。结果表明,频率锁定技术将频率稳定性提升了逾一个数量级,有效抑制了激光器的频率漂移。对比发现,高频色散相位在频率抑制方面表现更优,但与低频吸收相位相比,提升幅度相对有限。

4.2 CRDS 系统检测极限

CRDS 系统的检测极限 $\alpha_{\min}$ 定义为在空腔状态下,无吸收时可探测到的衰荡时间的最小变化值

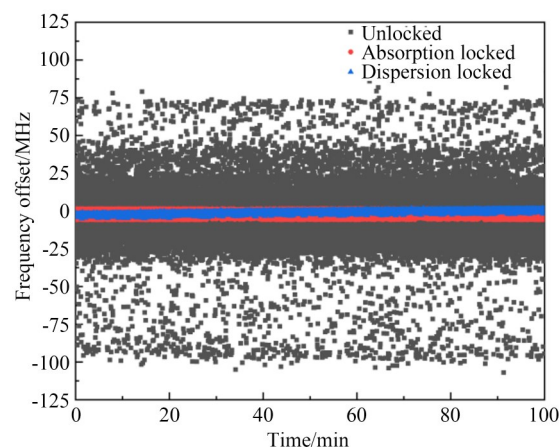


图 6 激光锁定前后的频率波动

Fig. 6 Frequency fluctuations before and after laser locking

$\Delta\tau_{\min}$ 与空腔衰荡时间平方的比值,其表达式为:

$$\alpha_{\min} = \frac{1}{c\tau_0} \cdot \frac{\Delta\tau_{\min}}{\tau_0}, \quad (7)$$

其中: τ_0 为空腔衰荡时间, c 为光速。

实验前,为彻底消除腔内残留 C_2H_2 对底噪的

干扰,首先利用真空泵将腔体抽至真空,随后采用高纯氮气对光学腔进行逾 30 min 的反复冲洗,以确保背景环境的纯净。为了评估系统的稳定性和探测灵敏度,对空腔衰荡时间进行了 80 min 的连续测量,测量结果如图 7 所示。其中,在未锁定状态下,激光器受固有频率漂移影响,与腔模的耦合效率极低且存在剧烈的随机波动;在引入频率锁定后,衰荡时间的漂移得到有效抑制,系统的长期稳定性显著提升。对比发现,350 MHz 调制频率下的色散相位锁定效果优于 9 MHz 的吸收相位。利用式(7)将衰荡时间转换为吸收系数,并引入 Allan 方差分析进行量化评估。在 9 MHz(吸收相位)与 350 MHz(色散相位)调制频率下,系统的检测极限分别达到 $6.23 \times 10^{-10}/\text{cm}$ 与 $2.51 \times 10^{-10}/\text{cm}$,较未稳频的 $1.55 \times 10^{-9}/\text{cm}$ 提升了近一个量级,相应的最低探测浓度为 $5.09 \times 10^{-12} \text{ mol/mol}$ 与 $1.26 \times 10^{-11} \text{ mol/mol}$,同样较未稳频的 $1.55 \times 10^{-11} \text{ mol/mol}$ 实现了近一个量级的性能提升。高频色散相位更具有优势,但相较于低频吸收相位,

其性能提升幅度有限。这一发现进一步证实了通过优化相位选择实现频率锁定,对于提升 CRDS 系统综合性能具有核心价值。

5 结 论

本文将激光稳频技术与腔衰荡光谱技术相结合,设计并搭建了一套基于频率调制稳频的检测系统,实现了乙炔气体在 $6\,529.17/\text{cm}$ 吸收线处的高灵敏快速检测。理论分析与实验验证共同揭示了误差信号随调制频率演变的物理特性,明确了 300 MHz 作为择优解调相位的临界点:在低于 300 MHz 的低频段,吸收相位信号更具增益优势,而高频段色散相位信号在鉴频性能上更优。通过 FPGA 的 PID 闭环反馈控制,在优化的 $1\,333.2 \text{ Pa}$ 与 $9\,000 \times 10^{-6}$ 的条件下,系统将频率偏移稳定在 3.59 MHz 以内,频率波动较锁定前降低了一个量级,并有效抑制了衰荡时间的长期漂移,显著提升了系统的长期稳定性。Allan 方差分析表明,在 9 MHz(吸收相位)与 350 MHz(色散相位)调制频率下,系统的检测极限分别达到 $6.23 \times 10^{-10}/\text{cm}$ 与 $2.51 \times 10^{-10}/\text{cm}$,较未稳频的 $1.55 \times 10^{-9}/\text{cm}$ 提升了近一个量级,最低探测浓度为 $5.09 \times 10^{-12} \text{ mol/mol}$ 与 $1.26 \times 10^{-11} \text{ mol/mol}$,同样较未稳频的 $1.55 \times 10^{-11} \text{ mol/mol}$ 实现了近一个量级的性能提升。尽管高频色散相位在灵敏度上具有最优表现,但其相对于低频吸收相位的性能提升幅度有限。因此,在实际工业传感与环境监测应用中,可综合衡量调制频率与硬件成本,通过灵活选择相位实现性能与成本的平衡。本文提出的基于调制频率与相位择优选择的稳频方案为实现高精度、低成本且支持快速单点测量的新型气体监测技术路径提供了重要的理论依据与技术支持。

作者贡献声明:

周月婷:方法提出,论文构思与撰写;
王孟圆:实验设计及数据整理与分析;
翟保杰:实验数据分析;
邱选兵、李传亮:论文审核与编辑。

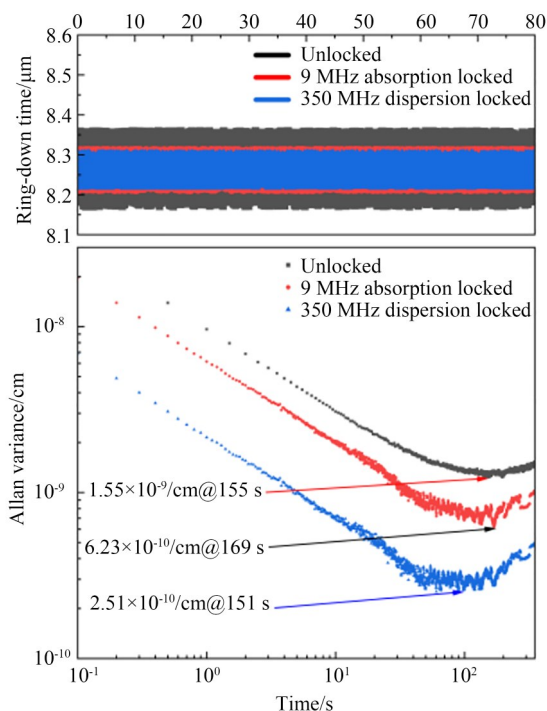


图 7 空腔长期测量结果与 Allan 方差

Fig. 7 Continuous measurement results of cavity and Allan variance

参考文献:

- [1] ATKINSON D B. Solving chemical problems of environmental importance using cavity ring-down spectroscopy [J]. *The Analyst*, 2003, 128 (2) : 117-125.
- [2] CROSSON E R. A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor [J]. *Applied Physics B*, 2008, 92(3) : 403-408.
- [3] 熊枫, 彭志敏, 王振, 等. CO₂/CO 干扰下基于腔衰荡吸收光谱的痕量 H₂S 浓度测量[J]. *物理学报*, 2023, 72(4) : 35-43.
- XIONG F, PENG ZH M, WANG ZH, *et al.* Accurate measurement of trace H₂S concentration based on cavity ring-down absorption spectroscopy under CO₂/CO disturbance[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(4) : 35-43. (in Chinese)
- [4] 罗鑫, 郭紫龙, 朱昊苏, 等. 基于周期离散傅里叶变换算法的光腔衰荡光谱气体检测技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2025, 62(13) : 1330002.
- LUO X, GUO Z L, ZHU H S, *et al.* Periodic discrete Fourier transform algorithm for gas detection in cavity ring-down spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025, 62(13) : 1330002. (in Chinese)
- [5] BECHTEL K L, ZARE R N, KACHANOV A A, *et al.* Moving beyond traditional UV-visible absorption detection: cavity ring-down spectroscopy for HPLC [J]. *Analytical Chemistry*, 2005, 77 (4) : 1177-1182.
- [6] MONDAL K, KAIPARA R, RAJAKUMAR B. Investigation of the absorption cross section of phenyl radical and its kinetics with methanol in the gas phase using cavity ring-down spectroscopy and theoretical methodologies [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2019, 123(45) : 9682-9692.
- [7] HOWARD T, GANLEY S E, MAHESHWARI S, *et al.* Buffer-gas cooling of hydrogen cyanide quantified by cavity-ringdown spectroscopy [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2024, 406 : 111953.
- [8] 许子怡, 刘硕. 基于质谱和光谱分析的同位素气体检测技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13) : 1300003.
- XU Z Y, LIU SH. Research progress in isotope gas detection techniques based on mass spectrometry and spectral analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(13) : 1300003. (in Chinese)
- [9] ZHOU S, HAN Y L, LI B C. Pressure optimization of an EC-QCL based cavity ring-down spectroscopy instrument for exhaled NO detection[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(2) : 27.
- [10] AI Y K, LI J, LI Q Y, *et al.* Cavity ringdown spectroscopy of nitric oxide in the ultraviolet region for human breath test [J]. *Journal of Breath Research*, 2020, 14(3) : 037101.
- [11] 王昊然. 线锁定光腔衰荡光谱温室气体测量技术[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2025.
- WANG H R. *Line Locked Cavity Ring-Down Spectroscopy Greenhouse Gas Measurement Technology* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2025. (in Chinese)
- [12] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, *et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2) : 97-105.
- [13] PAN H, CHENG C F, SUN Y R, *et al.* Laser-locked, continuously tunable high resolution cavity ring-down spectrometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(10) : 103110.
- [14] PALDUS B A, HARB C C, SPENCE T G, *et al.* Cavity-locked ring-down spectroscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83 (8) : 3991-3997.
- [15] MORVILLE J, ROMANINI D, KACHANOV A A, *et al.* Two schemes for trace detection using cavity ringdown spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(3) : 465-476.
- [16] HAMILTON D J, NIX M G D, BARAN S G, *et al.* *Optical Feedback Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy (OF-CEAS) in a Ring Cavity* [M]. TDLS 2009. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 1-10.
- [17] ZHAO G, TIAN J F, HODGES J T, *et al.* Frequency stabilization of a quantum cascade laser by weak resonant feedback from a Fabry-Perot cavity [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13) : 3057-3060.
- [18] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3) : 347-355.
- [19] CYGAN A, LISAK D, MASŁOWSKI P, *et al.*

- Pound-Drever-Hall-locked, frequency-stabilized cavity ring-down spectrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(6): 063107.
- [20] WANG J, SUN Y R, TAO L G, *et al.* Communication: Molecular near-infrared transitions determined with sub-kHz accuracy[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2017, 147(9): 091103.
- [21] GUO R M, TENG J H, CAO K, *et al.* Comb-assisted, Pound-Drever-Hall locked cavity ring-down spectrometer for high-performance retrieval of transition parameters [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31850-31863.
- [22] 王兴平, 赵刚, 焦康, 等. 光学反馈线性腔衰荡光谱技术不确定性[J]. *物理学报*, 2022, 71(12): 43-51.
- WANG X P, ZHAO G, JIAO K, *et al.* Uncertainty of optical feedback linear cavity ringdown spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(12): 43-51. (in Chinese)
- [23] 贾梦源, 赵刚, 侯佳佳, 等. 双重频率锁定的腔衰荡吸收光谱技术及信号处理[J]. *物理学报*, 2016, 65(12): 128701.
- JIA M Y, ZHAO G, HOU J J, *et al.* Research and data processing of double locked cavity ring-down absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(12): 128701. (in Chinese)
- [24] 胡迈, 陈祥, 张辉, 等. 一次谐波锁频的快速光腔衰荡光谱检测[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(4): 363-371.
- HU M, CHEN X, ZHANG H, *et al.* Fast optical cavity ring-down spectroscopy detection based on first harmonic frequency locking [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(4): 363-371. (in Chinese)
- [25] 李香格, 胡迈, 朱同宇, 等. 基于频率调制的煤矿高灵敏甲烷检测技术研究[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(24): 3537-3544.
- LI X G, HU M, ZHU T Y, *et al.* Research on high sensitivity methane detection technology in coal mines based on frequency modulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(24): 3537-3544. (in Chinese)
- [26] 翟保杰, 周月婷, 吴永前, 等. 基于频率调制的激光稳频及其在腔衰荡中的应用(特邀)[J]. *中国激光*, 2026, 53(11): 1101024.
- ZHAI B J, ZHOU Y T, WU Y Q, *et al.* Laser frequency stabilization based on frequency modulation and its application in cavity ring-down spectroscopy (Invited) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2026, 53(11): 1101024 (in Chinese)

作者简介:



周月婷(1970—),女,山西太原人,博士,讲师,2023年于山西大学获得博士学位,主要从事激光光谱学与痕量气体检测的研究。E-mail: zyt@tyust.edu.cn