

空域无源光纤腔衰荡乙炔体积分数检测仿真

闵锐, 成纯富, 贺洁

Simulation of space-domain passive fiber cavity ring-down acetylene gas volume fraction detection

引用本文:

闵锐,成纯富,贺洁. 空域无源光纤腔衰荡乙炔体积分数检测仿真[J]. [激光技术](#), 2023, 47(3): 366–371.

MIN Rui,CHENG Chunfu,HE Jie. Simulation of space-domain passive fiber cavity ring-down acetylene gas volume fraction detection[J]. [Laser Technology](#), 2023, 47(3): 366–371.

您可能感兴趣的其他文章

1. [变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感技术](#)

引用本文: 马凤翔, 赵跃, 李辰溪, 等. 变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感技术[J]. [激光技术](#), 2022, 46(6): 829–834.

2. [光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响](#)

引用本文: 陈强华, 丁锦红, 韩文远, 等. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响[J]. [激光技术](#), 2023, 47(3): 329–334.

3. [基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器](#)

引用本文: 孙哲, 郭子龙, 李虎, 等. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器[J]. [激光技术](#), 2023, 47(1): 41–45.

4. [基于免校准波长调制的多光程吸收光谱](#)

引用本文: 邵李刚, 邱选兵, 魏计林, 等. 基于免校准波长调制的多光程吸收光谱[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 795–799.

5. [飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感](#)

引用本文: 宁贵毅, 傅贵, 史萌, 等. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感[J]. [激光技术](#), 2017, 41(6): 916–920.

文章编号: 1001-3806(2023)03-0366-06

空域无源光纤腔衰荡乙炔体积分数检测仿真

闵 锐, 成纯富*, 贺 洁
(湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

摘要: 为了更准确地分析空域无源光纤腔衰荡乙炔体积分数检测系统, 建立了考虑系统噪声的气体体积分数传感理论模型。采用该模型对空域无源光纤腔衰荡乙炔体积分数检测系统的性能进行了仿真和讨论。结果表明, 利用空域无源光纤腔衰荡传感技术, 通过测量衰荡距离, 可实现灵敏度高达 56.226 km^{-1} 的乙炔体积分数的测量, 稳定性达 0.47% , 检测极限达 260.577×10^{-6} , 且稳定性和检测极限还可通过减少光纤腔的固有腔损耗得到进一步的提高。此研究对于体积分数传感系统的优化设计应用具有理论指导意义。

关键词: 传感器技术; 体积分数; 空域无源光纤腔衰荡传感系统; 频移干涉; 灵敏度

中图分类号: TP212; TN247

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.013

Simulation of space-domain passive fiber cavity ring-down acetylene gas volume fraction detection

MIN Rui, CHENG Chunfu, HE Jie

(School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to analyze space-domain passive fiber cavity ring-down acetylene gas volume fraction detection system more accurately, a theoretical model of gas volume fraction sensing system considering system noise was established in this paper. The performance of space-domain passive fiber cavity ring-down acetylene gas volume fraction detection system was simulated and discussed by using this model. Simulation results show that, by using the space-domain passive fiber cavity ring-down sensing technology, the acetylene volume fraction can be monitored by measuring the ring-down distance and the sensitivity of 56.226 km^{-1} is achieved, the corresponding stability and detection limit can reach 0.47% and 260.577×10^{-6} , which can be further improved by reducing the inherent cavity loss of the fiber cavity. This research has theoretical significance for the optimization design of volume fraction sensing system.

Key words: sensor technique; volume fraction; space-domain passive fiber cavity ring-down sensing system; frequency-shifted interferometry; sensitivity

引 言

随着现代工业的发展, 排放到空气中的有毒有害气体对人类带来了巨大的安全隐患。比如, 煤矿中的甲烷体积分数超过 0.05 时就会爆炸; 工业生产中常见的乙炔气体体积分数超过 0.025 时也容易引起爆炸事故。因此, 高灵敏度有毒有害气体的安全检测已成为当今环境保护、工业生产、航空航天和呼吸诊断等行业

亟待解决的关键问题之一。在众多的气体检测方法中, 腔衰荡光谱法凭借着灵敏度高、安全、响应快等优点已成为当今气体传感领域的研究热点^[1-2]。

1984 年, 腔衰荡技术首次被 ANDERSON 等人提出^[3], 并于 1998 年被 O'KEEFE 等人成功应用于气体检测^[4]。该技术将脉冲光耦合进充有待测气体的高反射率镜组成的衰荡腔中, 由于激光在光腔内的多次往返作用, 大大增加了吸收光程, 从而获得了极高的气体体积分数检测灵敏度, 此外, 该技术通过测量脉冲光强度的衰减速率(通常称为衰荡时间)来实现气体体积分数的检测, 而不是直接测量脉冲光的强度, 克服了传统光谱吸收法易受光源波动影响的不足。但该技术也存在调控难、腔稳定性较差以及需要考虑激光与光腔的模式匹配等问题。在上述背景下, 光纤腔衰荡传

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61805075; 61475044)

作者简介: 闵 锐(1976-), 男, 硕士, 讲师, 现主要从事光纤传感技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: chengchunfu@hbut.edu.cn

收稿日期: 2022-03-30; 收到修改稿日期: 2022-04-13

感技术应运而生,该技术通常采用两个高分光比的光纤耦合器取代传统高反射率腔镜来构成光纤腔,因避免了腔模式匹配和调腔难的问题而极大改善了传感系统的稳定性,从而前景被人们所看好,并成为当前传感领域的一个研究热点^[5-7]。2001 年,STEWART 等人首次提出时域有源光纤腔衰荡传感技术^[8],并将其应用于气体体积分数的检测,但受掺铒光纤放大器增益波动和自发辐射噪声的影响,传感系统的稳定性和精度较差。尽管人们采用增益钳制技术^[9]、差分探测技术来削弱增益波动和环境噪声的影响^[10-11],但效果仍然不佳。为了改善气体检测系统的稳定性,ZHAO 等人采用时域无源光纤腔衰荡传感技术实现了乙炔体积分数的高灵敏度检测^[12-13],并对该气体传感系统开展了深入的理论仿真和实验研究。由于在光纤腔中不再使用掺铒光纤放大器去补偿光纤腔的固有腔损耗,采用该技术,该研究小组获得了高达 1.02% 的稳定性。因稳定性好和精度高,该技术近年来受到了更多的关注。经过短短 10 余年的发展,除气体检测外,该技术已成功应用于液体、微流体、磁场、折射率、温度、压力、应变等不同学科不同参量的探测^[5-7]。虽然该技术展示出诸多优势,但也非尽善尽美:该技术通常需要昂贵的脉冲激光器、快速探测器和高速示波器来实现时域中观测衰荡现象,这使得传感系统成本过高,在一定程度上限制了其实用化。

为了降低传感系统的成本,2011 年,YE 等人将频移干涉技术引入到无源光纤腔衰荡传感方法中,提出了基于频移干涉技术的光纤腔衰荡传感方法^[14]。由于该技术是通过测量衰荡距离而非衰荡时间来实现外界参量的检测,故也称为空域无源光纤腔衰荡传感技术。利用该技术,人们只需要使用更加便宜的连续波激光器、低速光电探测器和低速的数据采集设备就可以实现外界参量的检测,故传感系统的成本更低。此外,该技术还采用差分检测和共路干涉,提高了传感系统的稳定性。基于上述优点,该技术迅速获得了相关研究学者的重点关注。2015 年,TIAN 等人首次将该技术应用于乙炔体积分数的检测^[15],获得了高达 0.29% 的稳定性。2019 年,FAN 等人又将该技术成功应用于甲烷气体的体积分数检测^[16],且获得了高达 4.13 dB 灵敏度。2018~2019 年,本文作者所在研究小组将该技术成功应用于气体组分和体积分数的同步测量^[17]以及准分布式气体体积分数的检测^[18]。

以上研究均是从实验的角度开展的,到目前为止,还少有针对性空域无源光纤腔衰荡气体体积分数检测系

统开展深入的理论仿真研究。为此,本文作者提出了考虑系统噪声的空域无源光纤腔衰荡气体体积分数传感理论模型,并开展了深入的理论仿真研究,以期实现对该气体体积分数检测系统的进一步优化设计,并最终使其走向实用化。

1 空域无源光纤腔衰荡气体传感系统的基本理论

空域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数检测系统如图 1 所示。它由可调谐半导体激光器(tunable semiconductor laser, TSL)、隔离器、环形器、3 dB 光纤耦合器(coupler, C) C_0 、光纤偏振控制器(polarization controller, PC) PC_1 、声光调制器(acousto-optic modulation, AOM)、光纤衰荡腔(fiber ring-down cavity, FRDC)、平衡探测器(balanced detector, BD)、数据采集卡(data acquisition board, DAQ)、计算机组成。其中,AOM 的功能为实现对激光产生频移,光纤衰荡腔通常采用如图 1 所示的光纤环形腔,它由两个高分光比光纤耦合器(C_1 和 C_2)、单模光纤、气室(gas cell, GC)和偏振控制器 PC_2 组成。

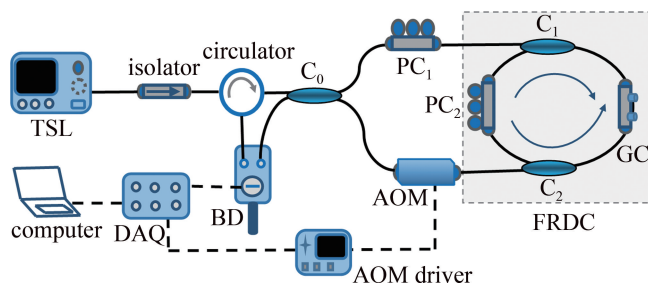


图 1 空域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数传感系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of space-domain passive fiber cavity ring-down acetylene gas volume fraction sensing system

由图 1 可以看出,本文作者提出的传感系统是在频移干涉仪的萨格奈克环中插入光纤环形腔而形成的,其传感原理可描述为:当可调谐激光器产生的连续光通过隔离器、环形器和 3 dB 光纤耦合器 C_0 后,分成顺时针和逆时针传播的两束连续光,接着这两束连续光分别从光纤耦合器 C_1 和 C_2 进入到光纤环形腔中循环传输。当它们在光纤环形腔内每传输 1 圈后,两束连续光均有少量连续光从光纤环形腔内返回到 3 dB 耦合器 C_0 。当可调谐激光器的相干长度比光纤环形腔的腔长短时,则从光纤环形腔内环行不同圈数的光返回到 C_0 处不会产生干涉,也就是说,只有环行相同圈数的光返回到 C_0 处才会产生干涉。由于逆时针传播的连续光较顺时针传播的连续光先经过频移器,因此这两束连续光产生的相位差不再为 0,从而在 3 dB

光纤耦合器 C_0 的左侧两个输出端均有干涉光输出,从而可采用差分探测来消除直流噪声,故传感系统的信噪比得到了极大的改善。由频移干涉技术的原理^[19-20],并考虑传感系统的噪声,差分信号的强度 ΔI 可表示为:

$$\Delta I = \sum_{m=0}^{\infty} I_m \cos \left[2\pi \frac{n(mL + L_0)}{c} f \right] = \sum_{m=0}^{\infty} I_m \cos(2\pi F_m f) + P_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中, L 是光纤衰荡腔的腔长; L_0 是顺时针传输的连续光在频移器前后所走的路程差; n 是纤芯的折射率; c 为光在真空中的速度; f 是声光调制器产生的频移量; P_{noise} 为系统的噪声,且可认为是高斯白噪声; $F_m = n(mL + L_0)/c$ 是光纤衰荡腔的振荡频率,由于 c 的值很大,所以传感系统的振荡频率较低,即无需快速探测器和高速采集卡,就能实现气体体积分数的灵敏度探测,从而降低了传感系统的成本; m 是连续光在光纤衰荡腔中往返的次数; I_m 是连续光经过 m 次往返之后的光强。

对采集到的干涉信号作快速傅里叶变换,就可以得到傅里叶谱的信息,且该傅里叶谱呈现出一系列谱峰的特征,每个谱峰的位置由振荡频率 F_m 决定,由于 F_m 是空间位置的函数,并且激光受到气体样品吸收的影响,这些谱峰的强度随空间位置呈现出指数的衰减规律,故将其称为空域的衰荡信号。对这些谱峰进行峰值提取和指数拟合,并调整好 PC_1 和 PC_2 的偏振态,就可以得到空域的衰荡曲线。

将衰荡曲线中的谱峰强度下到初始强度的 $1/e$ 时,激光在光纤环形腔内传输的长度定义为衰荡距离。当气室充入氮气时,衰荡距离 d_0 与固有腔损耗 α_c 之间的关系可表示为:

$$d_0 = \frac{L}{\alpha_c} \quad (2)$$

当气室充入待测气体时,气体产生吸收损耗 α_s ,此时,衰荡距离变为:

$$d = \frac{L}{\alpha_c + \alpha_s} \quad (3)$$

由(2)式和(3)式,可得衰荡距离的倒数差与待测气体的吸收损耗之间满足如下关系:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} = \frac{\alpha_s}{L} \quad (4)$$

式中,气体的吸收损耗与气体体积分数 φ 之间的关系为 $\alpha_s = \alpha_g L_{GC} \varphi$,其中, $\alpha_g = S_{\text{gas}} g(\nu) p / (k_B T)$ 是气体的吸

收系数, S_{gas} 是气体吸收线的强度, $g(\nu)$ 为线型函数, ν 为激光的频率, p 是气压, k_B 是玻尔兹曼常数, T 是温度, L_{GC} 是光纤型气室的长度。

将(4)式改写成与气体体积分数的关系,则可表示为:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} = k' \varphi \quad (5)$$

式中, $k' = \alpha_g L_{GC} / L$ 。(5)式表明:衰荡距离的倒数差与待测气体体积分数之间满足线性关系,所以,通过测量衰荡距离的倒数差就可以实现待测气体体积分数的检测,这就是空域无源光纤腔衰荡气体体积分数传感系统的工作原理。此外,斜率 k' 代表的是气体体积分数传感系统的灵敏度, k' 越大,灵敏度越高。

除灵敏度之外,检测极限(detection limit, DL)也是传感系统的关键指标。通常将气体检测系统的检测极限定义为最小可检测的气体体积分数,其大小表示为:

$$\varphi_{\min} = \frac{1}{\alpha_g L_{GC} h} \frac{\sigma_d}{\bar{d}} \quad (6)$$

式中, σ_d 为未充入待测气体时,衰荡距离的 1 阶标准偏差, \bar{d} 为衰荡距离的平均值。 σ_d / \bar{d} 代表气体体积分数检测系统的稳定性,很明显, σ_d / \bar{d} 的值越小,则表示气体体积分数检测系统的稳定性越好。 $h = d_0 / L$ 表示衰荡距离内连续光与气体发生相互作用的次数,显然,与传统的直接吸收光谱技术相比,空域无源光纤腔衰荡传感技术的检测极限提高了 h 倍。由(2)式可知,固有腔损耗 α_c 越小,衰荡距离 d_0 越长,则连续光与气体发生相互作用的次数越多,检测极限越高。所以,科研人员一般采用降低光纤环形腔的固有腔损耗或者用掺铒光纤放大器来补偿光纤腔固有腔损耗的方法以提高传感系统的检测极限。

仿真实验中,利用 MATLAB 中 randn 函数产生了均值为 0、方差为 8×10^{-6} 的高斯白噪声,用于模拟传感系统产生的噪声。为了获得较低的固有腔损耗,选用了两个耦合比为 99.5/0.5 的光纤耦合器来形成光纤环形腔,光纤环形腔的腔长为 65 m、气室长度为 5 cm。为了检测乙炔气体的体积分数,可调谐半导体激光器(型号为 Santec TSL-550)的中心波长为 1530.37 nm,即对着乙炔最强的吸收峰,输出功率为 8 mW。声光调制器(型号为美国 Brimrose 公司的 AMM-100-20-25-1550-2FP)的扫频范围是 90 MHz~110 MHz,扫描步长为 0.02 MHz。平衡探测器(型号为美国 New Focus 公

司的 Model 2117) 的增益设为为 10^3 , 数据采集卡 (型号为美国 NI 公司的 USB-6361) 的采样率为 $10^5/\text{s}$ 。

2 仿真结果与分析

首先模拟了气室充入氮气时所获得的差分干涉信号, 模拟结果如图 2a 所示。将差分干涉信号经过快速傅里叶变化后就可得到如图 2b 所示的蓝颜色实线标注的空域衰荡信号; 通过峰值提取和指数拟合算法, 得到了图 2b 中红色实线标注的指数拟合曲线, 也称为衰荡曲线。由衰荡距离的定义, 可计算出衰荡距离为 319.779 m, 再由 (2) 式可算出光纤环形腔的固有腔损耗为 0.883 dB, 这与 CHENG 等人前期实验报道的空域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数传感系统的固有腔损耗为 0.894 dB 吻合得较好^[17], 也反过来说明假设的高斯白噪声是可行的, 能很好地与实验系统产生的噪声相吻合。

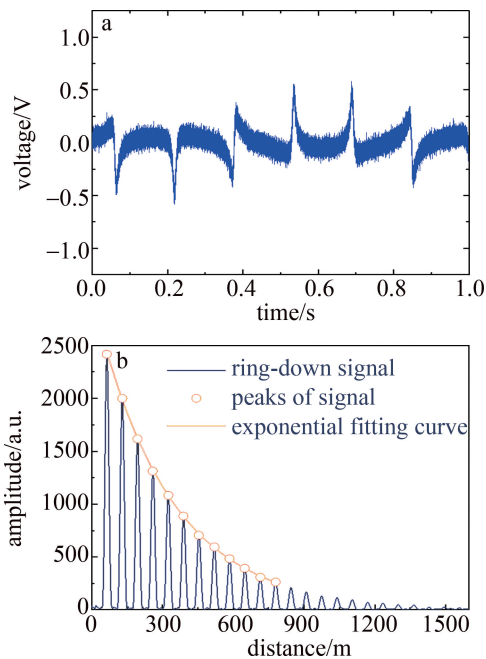


图2 空域无源光纤腔衰荡气体传感系统在充入纯氮气时的仿真信号
a—时域的差分干涉信号 b—空域的衰荡信号

Fig. 2 Simulation signals of space-domain passive fiber cavity ring-down gas sensing system when pure nitrogen was filled
a—differential interference signal in time domain b—ring-down signal in space domain

采用上述方法, 模拟了不同乙炔体积分数下的干涉信号和对应的衰荡曲线, 并利用衰荡距离的定义, 计算出了不同乙炔体积分数下的衰荡距离, 获得了如图 3 所示的模拟结果。为了进一步消除系统噪声的影响, 每个体积分数下的衰荡距离模拟了 20 次, 再取平均值。由图 3 可以看出, 当乙炔体积分数逐渐增加时,

对应的衰荡距离反而逐渐减小, 这是由于体积分数增大时, 光纤腔的腔损耗也逐渐增大所导致的。通过求解平均值可知, 当乙炔体积分数由 0 增加到 0.01 时, 平均衰荡距离由 320.126 m 减小到 272.056 m, 相应的平均腔损耗则由 0.882 dB 增大到 1.038 dB。为了表征传感系统的响应特性和灵敏度, 图 4 中给出了平均衰荡距离的倒数差 $(1/\bar{d} - 1/\bar{d}_0)$ 对乙炔体积分数的响应特性曲线。由图 4 可知, 曲线的线性拟合度高达 0.998, 这表明空域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数传感系统具有很好的线性响应特性, 该特性与理论方程 (5) 式也是吻合的。由图 4 还可知, 响应曲线的斜率为 56.226, 这表示该传感系统的灵敏度为 56.226 km^{-1} , 高于传统时域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数传感系统的灵敏度^[12]。

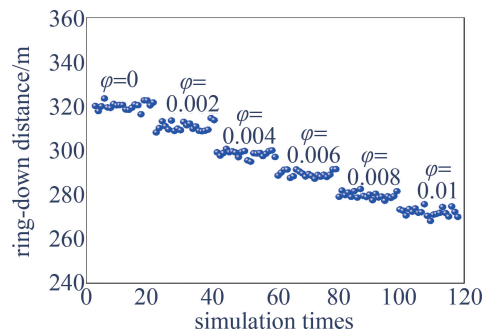


图3 乙炔体积分数对衰荡距离的影响

Fig. 3 Effect of acetylene volume fraction on the ring-down distance

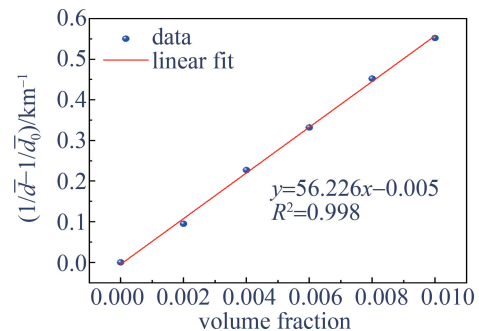


图4 平均衰荡距离倒数差对乙炔体积分数的响应曲线

Fig. 4 Response curve of reciprocal difference of average ring-down distance to the acetylene volume fraction

为了表征空域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数传感系统的稳定性, 对乙炔体积分数为 0 条件下的衰荡距离进行了 100 次的重复性仿真实验, 仿真结果如图 5 所示。通过计算可得, 该条件下平均衰荡距离 $\bar{d} = 320.941 \text{ m}$, 标准差 $\sigma_d = 1.503 \text{ m}$, 由传感系统的稳定性定义 (σ_d/\bar{d}) , 可得传感系统的稳定性为 0.47%, 优于参考文献 [12] 中报道的 1.02% 的稳定性, 这主要是由于空域无源光纤腔衰荡气体传感系统采用了差分探

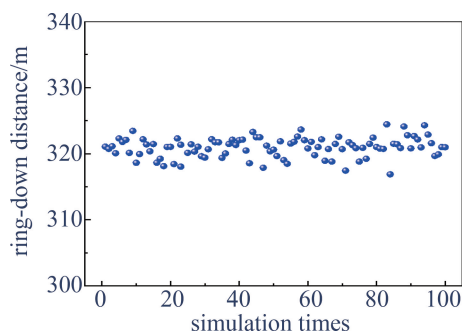


图5 气体传感系统稳定性仿真结果

Fig. 5 Stability simulation result of gas sensing system

测的方法来消除直流噪声以及共路干涉可消除共模噪声的结果。根据方程(6)定义的气体传感系统的体积分数检测极限,可计算出该乙炔气体体积分数传感系统的检测极限为 260.577×10^{-6} , 高于时域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数检测系统的检测极限^[12]。此外,通过计算可得 $h \approx 5$, 这表示连续光在 320.941 m 的衰荡距离内与乙炔气体发生了约 5 次相互作用,也就是说,与同等条件下的直接吸收型乙炔气体体积分数传感系统相比,空域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数传感系统的检测极限提高了 5 倍。进一步仿真研究发现:当降低光纤腔的固有腔损耗时,乙炔气体体积分数传感系统的检测极限和稳定性还可进一步提高,如图 6 所示。这主要是由于固有腔损耗越低,衰荡距离就会越长,连续光与待测气体相互作用的次数就越多,从而进一步提高了传感系统的检测极限和稳定性,这与理论方程(6)式预期的结果也是吻合的。

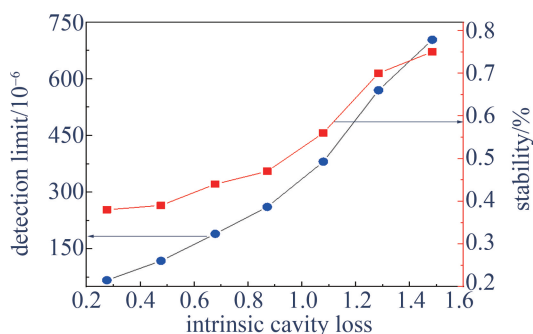


图6 固有腔损耗对探测极限和系统稳定性的影响

Fig. 6 Effect of inherent cavity loss on the detection limit and stability

3 结 论

以乙炔气体的体积分数为研究对象,对空域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数传感系统的线性响应、灵敏度、稳定性和检测极限方面的特性进行了较深入的仿真研究。仿真结果表明:利用空域无源光纤腔衰荡传感技术,通过测量衰荡距离,可实现灵敏度高达

56.226 km^{-1} 的乙炔体积分数的测量。通过稳定性仿真实验,得到传感系统的稳定性为 0.47%,检测极限为 260.577×10^{-6} ,与本课题组前期的实验结果吻合得很好,且高于时域无源光纤腔衰荡乙炔气体体积分数检测系统的稳定性和检测极限,这主要得益于该技术中采用的差分探测可消除直流噪声、共路干涉可消除共模噪声的结果。仿真结果表明:空域无源光纤腔衰荡气体体积分数检测系统具有成本低、灵敏度高和稳定性好等优点,在气体传感等应用方面具有潜在的应用价值。此外,通过适当修改吸收系数的表达式,该仿真模型还可拓展到磁场、折射率、压力、应力等参量的传感系统,从而可为这些传感系统的优化设计提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] LIU W Q, WANG X P, MA G Sh, *et al.* Research of high sensitivity cavity ring-down spectroscopy technology and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0130003 (in Chinese). 刘文清,王兴平,马国盛,等. 高灵敏腔衰荡光谱技术及其应用研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0130003.
- [2] CHEN L Y, JIANG H B, SHEN L F, *et al.* Research of detection of aerosol extinction coefficient based on pulse cavity ring-down technology [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(2): 241-244 (in Chinese). 陈莉英,姜洪波,沈利洋,等. 脉冲腔衰荡技术探测气溶胶消光系数的研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(2): 241-244.
- [3] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(8): 1238-1245.
- [4] O'KEEFE A, DEACON D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, 59(12): 2544-2550.
- [5] LIU Y P, ZHANG W G, JIANG M, *et al.* Development and recent progress of fiber cavity ring-down spectroscopy [J]. *Progress in Physics*, 2008, 28(4): 401-409 (in Chinese). 刘亚萍,张伟刚,姜萌,等. 光纤腔衰荡光谱技术及其最新进展[J]. *物理学进展*, 2008, 28(4): 401-409.
- [6] WANG C. Fiber loop ringdown—a time-domain sensing technique for multi-function fiber optic sensor platforms: Current status and design perspectives [J]. *Sensors*, 2009, 9(10): 7595-7621.
- [7] WANG Y, MA G M, ZHENG D Y, *et al.* Gas concentration sensing based on fiber loop ring-down spectroscopy: A review [J]. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 9509316.
- [8] STEWART G, ATHERTON K, YU H B, *et al.* An investigation of optical fiber amplifier loop for intra-cavity and ring-down cavity loss measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 843-849.
- [9] LI Zh Q, ZHU G F, CHEN X, *et al.* Dual-loop carbon monoxide concentration measurement system based on cavity ring-down technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 481-484 (in Chinese). 李志全,朱国芳,陈曦,等. 基于腔衰荡技术的光纤双环路一氧化

- 碳浓度监测系统研究[J]. 光子学报, 2010, 39(3): 481-484.
- [10] ZHU C G, WANG G W, ZHENG Z L, *et al.* A method for real-time monitoring of inherent system loss designed for FLRDS-based gas sensors[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 1-8.
- [11] ZHAO Y J, CHANG J, NI J Sh, *et al.* Novel gas sensor combined active fiber loop ring-down and dual wavelengths differential absorption method[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11244-11253.
- [12] ZHAO Y, BAI L, WANG Q. Gas concentration sensor based on fiber loop ring-down spectroscopy [J]. Optics Communications, 2013, 309: 328-332.
- [13] QIAN X L, ZHAO Y, ZHANG Y N, *et al.* Theoretical research of gas sensing method based on photonic crystal cavity and fiber loop ring-down technique[J]. Sensors and Actuators, 2016, B228(1): 665-672.
- [14] YE F, QI B, QIAN L. Continuous-wave fiber cavity ring-down measurements using frequency-shifted interferometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(11): 2080-2082.
- [15] TIAN H, ZHOU C M, FAN D, *et al.* Continuous-wave frequency-shifted interferometry cavity ring-down gas sensing with differential optical absorption[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-10.
- [16] FAN D, CHEN J, WU Zh Y, *et al.* Methane sensing system based on frequency-shifted interferometry fiber cavity ring-down technology [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(1): 150-154(in Chinese).
- 范典, 陈娇, 吴志勇, 等. 基于频移干涉光纤腔衰荡技术的甲烷传感系统[J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 150-154.
- [17] CHENG Ch F, YANG Zh Y, OU Y W, *et al.* Simultaneous measurement of gas composition and concentration combined fiber cavity ringdown and frequency-shifted interferometry [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48: 303-307.
- [18] YANG Zh Y, CHENG Ch F, LÜ H, *et al.* Multichannel continuous-wave fiber cavity ringdown gas sensing utilizing frequency-shifted interferometry[J]. Applied Optics, 2018, 57(35): 10224-10229.
- [19] YE F, QIAN L, QI B. Multipoint chemical gas sensing using frequency-shifted interferometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(23): 5356-5364.
- [20] CHEN Z H. Pressure/strain sensing method based on frequency-shift interferometry fiber cavity ring-down technique [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020: 15-17(in Chinese).
- 陈泽浩, 基于频移干涉光纤腔衰荡技术的压力/应力传感方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020: 15-17.