

基于高频参考光的频分复用技术实现强干扰下的 气体浓度测量

连久翔¹, 周宾^{1*}, 王一红¹, 李剑²

¹东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096;

²南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 在利用激光吸收光谱技术测量气体参数时,复杂环境中存在的强干扰会对提取到的探测光强的谐波信号产生较大影响,导致气体参数检测不准确。为此,提出了一种基于高频参考光的频分复用技术。该技术利用高频参考信号实现了对干扰信号的提取与探测光强的修正,进而准确地提取到了探测光强的谐波信号,提高了气体参数测量的准确性,拓展了光谱吸收法的应用范围。通过数值仿真及搭建甲烷浓度实验系统,验证了所提方法具有高频干扰抑制效果好、气体参数测量准确性高的特点。

关键词 光谱学; 吸收光谱; 频分复用; 强干扰; 气体浓度测量

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1630001

Measurement of Gas Concentration Under Strong Interference by Frequency Multiplexing Based on High-Frequency Reference Signal

Lian Jiuxiang¹, Zhou Bin^{1*}, Wang Yihong¹, Li Jian²

¹ School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

² College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract In the harsh measurement environment, the high-frequency interference has a great impact on the harmonic signal and reduces the measurement accuracy of gas parameters when using absorption spectroscopy method. To improve the target detection performance, frequency multiplexing based on high-frequency reference signals is proposed. The method can extract interference signals and correct the transmitted intensity of reference signal by using a high-frequency reference signal, thereby accurately extracting the harmonic signal of detected signal, improving the accuracy of gas parameter measurement and expanding the application range of absorption spectroscopy method. The numerical simulation and the establishment of experimental measurement system to measure the molar fraction of methane verify that the method has the advantages of excellent high-frequency interference suppression and high measurement accuracy of gas parameters.

Key words spectroscopy; absorption spectroscopy; frequency multiplexing; strong interference; gas concentration measurement

OCIS codes 300.1030; 300.6260; 120.7280; 300.6380

1 引 言

可调谐半导体激光吸收光谱法(TDLAS)^[1]是一种新兴的高灵敏度、高响应速度、高分辨率的光学气体参数测量技术。当激光穿过气体分子时,气体分子吸收能量而发生量子化跃迁,从低能级跃迁到

高能级;同时,气体分子吸收等能级差的能量后,激光的强度发生衰减,其衰减的程度可以根据 Beer-Lambert 定律^[2]描述,由此可进一步定量获得激光光路上气体的温度、浓度、压力、速度等特征参数。相对于直接吸收法,波长调制光谱法^[3-5](WMS)具有信噪比高和测量灵敏度高等优点,已被广泛应用

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-05-12; 录用日期: 2020-05-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0603204)、国家自然科学基金(50976024)、国家自然科学基金青年科学基金(50906013)

* E-mail: zhoubinde@seu.edu.cn

于红外波段的痕量气体探测^[6-8]以及航空航天发动机燃烧场温度、组分浓度检测^[9]等方面。

在复杂环境下的气体参数检测中,由于环境中振动、湍流等因素的影响,WMS测量的频谱信号将失真,无法被用于提取有用的信息。例如,在航空发动机燃烧诊断过程中,发动机点火和燃烧阶段的强振动^[10]、燃烧流场的强湍流^[11]都将给透射光强带来严重干扰,影响发动机燃烧诊断的测量精度。对此,在对实验信号进行处理时,可以采用光强多周期平均的方式对噪声进行抑制^[12]。波长调制技术通过叠加高频调制信号,将高频吸收信号与低频噪声在频域上进行分离,借助锁相滤波技术将吸收信号在特定倍频处解调出来,从而有效地抑制了低频噪声的干扰^[13]。Rieker等^[14]从理论上推导出了谐波表达关系式,测量了分布反馈(DFB)激光器光强和波长的时间响应特性,使用一次谐波($1f$)归一化二次谐波($2f$)的方式消除了光强波动对测量结果的影响,并将仿真信号与实验测量信号进行对比,获得了气体温度、浓度的绝对值。Sun等^[15]在此基础上提出了一种谐波拟合的简化分析模型,首次利用实测的零气光强结合数字锁相、低通滤波技术来仿真测量信号,实现了高温高压环境下 H_2O 、 CO 和 CO_2 气体浓度的测量。Wang等^[16]采用带有自适应滤波器的经验模式分解方法对吸收光谱数据进行预处理,重建实际信号并消除噪声分量,实现了较高的信噪比。在强干扰环境下,人们通常采用提高传统WMS方法的调制频率来抑制噪声。然而,目前对航空发动机燃烧诊断使用的调制频率仍然较低,多在200 kHz以下^[17]。同时,提高调制频率又容易引起探测器带宽不足、信号采集要求过高、采集设施不能满足要求等问题。更为重要的是,提高调制频率将会使得激光控制器的带宽不足,从而导致激光器调制电流的波形失真,吸收信号发生衰减,无法提取出真实的谐波信号进行浓度、温度等参数的计算。此外,在机械振动和火焰抖动严重的测量环境中,尤其是对于超燃发动机的瞬态流场而言,当干扰频率与调制频率相当时,极易产生串扰,无法实现干扰和吸收信号在频域上的分离,从而严重影响测量精度。因此,从原始光强信号中提取出有效信息,实现复杂环境下气体参数的精确测量就显得尤为重要。

为了实现复杂环境下气体参数的精确测量,本文提出了一种基于高频参考光的频分复用技术。该技术通过高频参考光信号将干扰信号和参考光信号在频域上进行分离,实现频分复用,再结合数字锁相

低通滤波技术提取出干扰信号的特征,就可以实现对WMS探测光强信号的修正,从而准确地提取出探测光强的谐波信号,有效地提高复杂环境下气体参数测量的准确性。为了验证该方法的可行性和准确性,本文采用数值模拟研究了单频信号与滤波高斯白噪声信号^[18]对光强信号的影响,并选用中心波数为 6046.95 cm^{-1} (波长为 1653.72 nm)的DFB激光器搭建测量系统,采用该系统进行了甲烷浓度的测量实验。

2 基本原理

在激光器低频正弦扫描吸收谱线的基础上,向激光器中注入高频正弦调制信号,此时激光的瞬时光强 $I_0(t)$ 可以用数学模型表示为^[19]

$$I_0(t) = \bar{I}_0[1 + i_S \cos(\omega_S t + \varphi_S) + i_M \cos(\omega_M t + \varphi_M)], \quad (1)$$

式中:下标S和M分别表示与扫描、调制相关的激光参数; \bar{I}_0 为入射激光的中心光强; $\omega = 2\pi f$, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; f 为注入电流的频率,Hz; i 为注入电流引起的光强的幅值; t 为时间; φ 为光强的相位。

当入射激光经过一段均匀的气体介质时,气体对光的吸收作用会使光强发生衰减。由Beer-Lambert定律可知,透射光强 $I_t(t)$ 可以表示为

$$I_t(t) = I_0(t) \exp\{-\alpha[\nu(t)]\}, \quad (2)$$

式中: $\alpha[\nu(t)]$ 为光谱的吸收率。在实际测量过程中,透射光强会受到测量环境中热辐射、振动、湍流等的干扰,从而降低了测量的准确性。当测量环境中存在干扰时,用 $\beta(t)$ 来表示测该干扰信号,即

$$\beta(t) = \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{j,\text{noise}}), \quad (3)$$

式中: $\omega_{j,\text{noise}} = 2\pi f_{j,\text{noise}}$, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; $f_{j,\text{noise}}$ 为干扰频率,Hz; $\varphi_{j,\text{noise}}$ 为相应干扰频率下的干扰相位; A_j 表示相应干扰频率下的干扰幅值。

受干扰影响的光强信号可以表示为

$$\begin{aligned} \beta(t) \times I_t(t) &= \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{j,\text{noise}}) \times \\ &I_0(t) \exp\{-\alpha[\nu(t)]\} = \\ &\left[\bar{I}_0 \times \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{j,\text{noise}}) + \right. \\ &\frac{1}{2} \bar{I}_0 i_M \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_M t + \omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_M + \varphi_{j,\text{noise}}) + \\ &\left. \frac{1}{2} \bar{I}_0 i_M \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_M t - \omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_M - \varphi_{j,\text{noise}}) \right] \times \\ &\exp\{-\alpha[\nu(t)]\}, \quad (4) \end{aligned}$$

式中： $\alpha[\nu(t)]$ 为光谱吸收率。

对于干扰严重的场合，当 $\omega_{j,\text{noise}}$ 与 ω_M 相当时， $1f$ 信号与干扰信号在频谱上交叠，极易产生串扰，无法进行频分复用，也不能准确提取出吸收信号的谐波信号，严重影响了测量的准确性。对于测量环境中强振动、强湍流等的干扰，传统WMS方法很难消除其对透射光强谐波信号的影响。对此，可以利用频分复用技术通过高频调制参考光信号提取出干扰特征，对干扰进行抑制。具体模型分析如下：

参考光的瞬时入射光强 $I_{\text{ref}}(t)$ 可以表示为

$$I_{\text{ref}}(t) = \bar{I}_{\text{ref}} \left[1 + \sum_{k=1}^{+\infty} i_{k,\text{ref}} \cos(k \cdot \omega_{\text{ref}} t + \varphi_{k,\text{ref}}) \right], \quad (5)$$

式中： \bar{I}_{ref} 为参考光路中入射激光的中心光强； $\omega_{\text{ref}} = 2\pi f_{\text{ref}}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ； f_{ref} 为注入电流的频率； $i_{k,\text{ref}}$ 为注入电流引起的光强的第 k 阶幅值； $\varphi_{k,\text{ref}}$ 为注入电流引起的光强的第 k 阶相位。参考光信号的各阶项均与吸收无关，仅代表光强信号，都可以用来提取干扰信号。由于参考光信号的高阶项幅值较小，故利用参考光信号的一倍频来实现干扰信号的提取。因此，(5)式可以化简为

$$I_{\text{ref}}(t) = \bar{I}_{\text{ref}} [1 + i_{1,\text{ref}} \cos(\omega_{\text{ref}} t + \varphi_{1,\text{ref}})], \quad (6)$$

此时，受到扰动且包含吸收信息的探测光强信号 $I(t)$ 可以表示为

$$I(t) = \beta(t) \times [I_1(t) + I_{\text{ref}}(t)]. \quad (7)$$

参考光的瞬时入射光强 $I_{\text{ref}}(t)$ 与吸收无关，故可将 $I_{\text{ref}}(t)$ 与 $\beta(t)$ 单独进行分析。

$$I_1(t) = \beta(t) \times I_{\text{ref}}(t) =$$

$$\bar{I}_{\text{ref}} [1 + i_{1,\text{ref}} \cos(\omega_{\text{ref}} t + \varphi_{1,\text{ref}})] \times \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{j,\text{noise}}), \quad (8)$$

式中： $I_1(t)$ 为 $I_{\text{ref}}(t)$ 与 $\beta(t)$ 的乘积。将 $I_1(t)$ 分别与频率为 f_{ref} 的正弦参考信号和余弦参考信号相乘，然后进行数字锁相处理，再进行低通滤波器处理。低通滤波处理后得到的 $I_1(t)$ 的一次谐波信号的 X 分量为

$$X_{1f} = \frac{1}{2} \bar{I}_{\text{ref}} i_{1,\text{ref}} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{j,\text{noise}}) + \frac{1}{2} \bar{I}_{\text{ref}} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{\text{ref}} t + \omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{1,\text{ref}} + \varphi_{j,\text{noise}}) + \frac{1}{2} \bar{I}_{\text{ref}} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{\text{ref}} t - \omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{1,\text{ref}} - \varphi_{j,\text{noise}}), \quad (9)$$

Y 分量为

$$Y_{1f} = \frac{1}{2} \bar{I}_{\text{ref}} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \sin(\omega_{\text{ref}} t + \omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{1,\text{ref}} + \varphi_{j,\text{noise}}) - \frac{1}{2} \bar{I}_{\text{ref}} \sin(\omega_{\text{ref}} t - \omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{1,\text{ref}} - \varphi_{j,\text{noise}}). \quad (10)$$

若要将干扰信号与参考信号从频域上分开，(9)、(10)式需要满足下列条件：

$$\begin{cases} \omega_{\text{ref}} t + \omega_{j,\text{noise}} t \gg \omega_{j,\text{noise}} t \Rightarrow \begin{cases} \omega_{\text{ref}} \gg 0 \\ \omega_{\text{ref}} \gg 2\omega_{j,\text{noise}} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

当满足(11)式所示的 $\omega_{\text{ref}} \gg 2\omega_{j,\text{noise}}$ 条件时，干扰信号和参考信号在频域上不会发生重叠，可以实现频分复用。从(9)式中可以提取出

$$D_{1f} = \frac{1}{2} \bar{I}_{\text{ref}} i_{1,\text{ref}} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{j,\text{noise}} t + \varphi_{j,\text{noise}}) = \frac{1}{2} \bar{I}_{\text{ref}} i_{1,\text{ref}} \beta(t), \quad (12)$$

式中的 D_{1f} 与干扰信号 $\beta(t)$ 为倍数关系，不包含吸收信息，仅反映受扰动的光强信号。故对参考光信号进行数字锁相滤波就能有效地将干扰信号提取出来。在实际测量过程中，将(4)式代表的光强信号直接与频率为 f_{ref} 的正弦参考信号、余弦参考信号相乘后，再进行锁相滤波就可以进行干扰信号的提取。其中(4)式与吸收有关，可以表示为无数个谐波信号叠加的傅里叶级数。但在(4)式的傅里叶级数中，各项的幅值均随着频率的增加而减小。当参考光频率远大于调制频率时，(4)式中高阶项的幅值很小，可以忽略，不会对干扰信号的提取产生影响。在实际的信号处理过程中，也可以运用该方法。最后，根据(7)式，将探测光强信号 $I(t)$ 与提取出的干扰信号 $\beta(t)$ 相除，就可以得到修正后的透射光强 $I_1(t)$ 。

3 仿真验证与分析

3.1 验证方法

采用基于拟合方式的免标定波长调制方法^[20]进行验证。将无气体吸收时(如充入高纯 N_2)探测器测量到的信号 $I_0^{\text{measured}}(t)$ 作为背景光强信号，根据(2)式可以得到仿真的透射光强信号 $I_1^{\text{simulated}}(t)$ 。该算法将积分吸收面积 A 、谱线碰撞展宽 $\Delta\nu_C$ 、多普勒展宽 $\Delta\nu_D$ 和激光中心频率 ν_0 作为拟合参数参与对 $R_{2f/1f}^{\text{measured}}$ 的最小二乘拟合。需要注意的是，当温度已知时， $\Delta\nu_D$ 作为已知量，不再参与拟合。使用免标定测量方式对气体参数进行测量之前，需要预先确定激光器的频率响应特性关系，常用的做法是使

用光学标准具来获得激光器的时间频率的离散点响应曲线,借助一定的假设模型和自由谱间距(FSR)等信息实现光强信号在时域与频域间的转换。对仿真和实验的光强信号进行数字锁相低通滤波处理及扣除背景归一化处理,就可以得到相应光强信号的扣除背景归一化谐波信号 $R_{2f/1f}^{\text{simulated}}$ 和 $R_{2f/1f}^{\text{measured}}$ 。使用最小二乘算法将 $R_{2f/1f}^{\text{simulated}}$ 和 $R_{2f/1f}^{\text{measured}}$ 进行拟合,当 $R_{2f/1f}^{\text{simulated}}$ 和 $R_{2f/1f}^{\text{measured}}$ 的残差最小时收敛,此时可得到积分吸收面积 A ,然后可通过(13)式计算出甲烷气体的浓度。

$$X = \frac{A}{PLS(T)}, \quad (13)$$

式中: L 为气体吸收光程的长度,cm; P 为气体总压力,atm(1 atm=101325 Pa); $S(T)$ 为跃迁谱线的线强, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$; T 为气体温度,K; X 为气体的物质的量分数。

3.2 单频干扰仿真

将单频正弦信号与仿真的透射光强耦合,验证干扰信号频率对提取的谐波信号的影响。为了方便比较,将仿真参数与实验参数设定为一致,光强信号的扫描频率为 100 Hz,调制频率为 10 kHz,参考光信号的频率为 260 kHz。设定甲烷的物质的量分数为 2.000%,吸收光程为 20 cm,干扰信号(interference signal)幅值为无干扰信号(interference-free signal)幅值的 4%。采用不同频率的单频干扰信号以及不同频率范围的滤波高斯噪声信号进行数值仿真。

在单频干扰信号下的数值分析过程与结果如下:仿真的原始光强信号如图 1(a)所示。当加入频率为 1 kHz 的干扰时,光强信号如图 1(b)所示,光强信号受到干扰的影响比较明显。图 1(c)为经过参考光信号修正后的光强,可见,干扰对光强的影响基本去除。

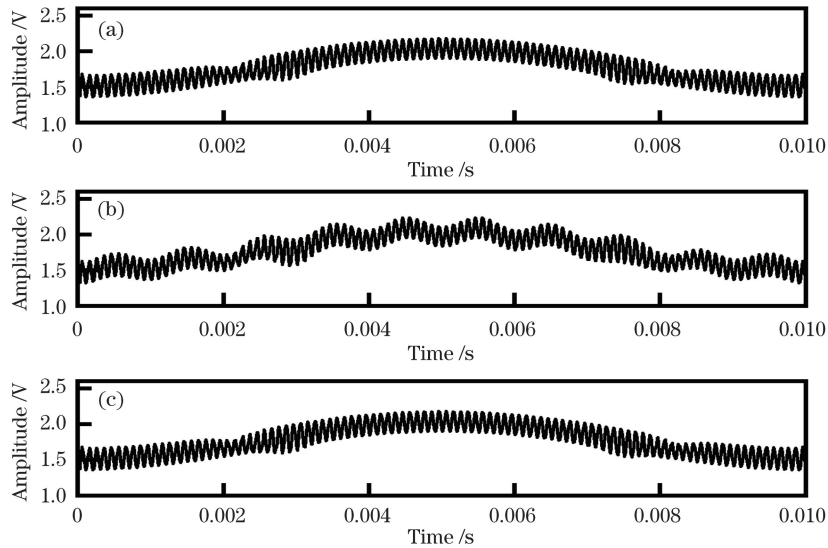


图 1 光强信号。(a)无干扰的光强信号;(b)有干扰($f=1$ kHz)的光强信号;(c)修正后的光强信号

Fig. 1 Light intensity signals. (a) Interference-free light intensity signal;

(b) interference ($f=1$ kHz) light intensity signal; (c) corrected light intensity signal

为进一步比较光强信号的快速傅里叶变换(FFT)频谱结果,将干扰光强信号和修正后的光强信号的频谱依次偏移 40 Hz 和 80 Hz 后作图。图 2 为有干扰($f=1$ kHz)时的光强信号在一倍频处的频谱,图 3 为有干扰($f=1$ kHz)的光强信号在二倍频处的频谱。

由图 2 和图 3 可以看出,干扰频率为 1 kHz 的信号、无干扰信号及修正后的频谱基本重叠在一起,光强信号受干扰的影响较小。

图 4 为光强信号的归一化二次谐波($2f$)信号及其残差,其中图 4(a)为归一化的二次谐波信号,

图 4(b)为有干扰($f=1$ kHz)时的 $2f/1f$ 信号、修正后的 $2f/1f$ 信号与无干扰时的 $2f/1f$ 信号的残差。可见: $2f/1f$ 信号、修正后的 $2f/1f$ 信号与无干扰时的 $2f/1f$ 信号的残差均在 $-0.002 \sim 0.002$ 以内,但修正后的 $2f/1f$ 信号比有干扰时的 $2f/1f$ 信号更平滑。此时,有干扰时甲烷物质的量分数的计算结果为 2.004%,相比仿真设定值(2.000%)提高了 0.2%;通过参考光信号修正后的甲烷物质的量分数的计算结果为 2.003%,相比仿真设定值(2.000%)提高了 0.15%,比未经光强修正时计算出的甲烷浓度小。当干扰频率为 1 kHz 时,干扰信

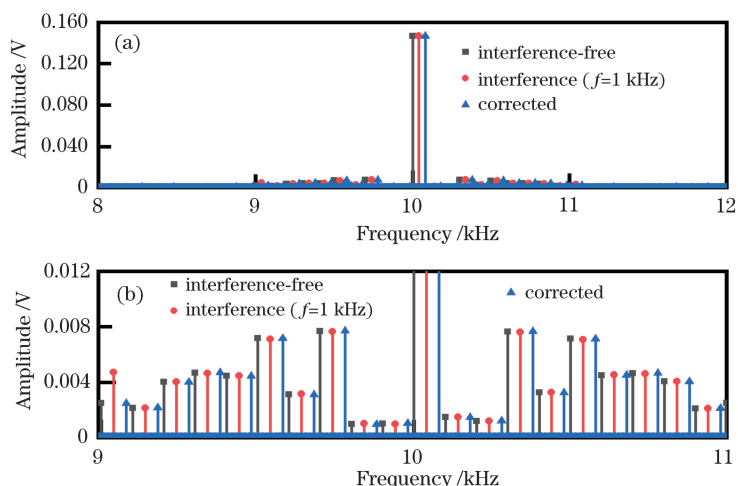


图 2 光强信号在一倍频处的频谱($f=1$ kHz)。(a)整体图;(b)细节图
Fig. 2 Spectra of light intensity signal at fundamental frequency ($f=1$ kHz).

(a) Overall view; (b) detailed view

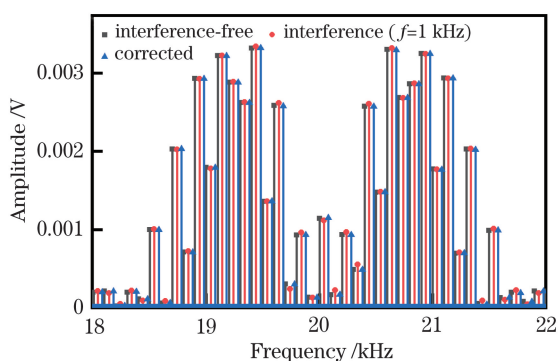


图 3 光强信号在二倍频处的频谱($f=1$ kHz)

Fig. 3 Spectra of light intensity signal at double-frequency ($f=1$ kHz)

号对光强信号的影响较小,对谐波信号提取准确性的影响也较小。

通过改变干扰信号的频率,可以进一步观察其对测量信号的影响。仿真的原始光强信号如图 5(a)所示。当加入频率为 8 kHz 的干扰时,光强信号如图 5(b)所示,可见,光强信号受到了比较明显的干扰,且此时光强的扰动情况比干扰频率为 1 kHz 时更加明显。图 5(c)为经过参考光信号修正后的光强,可见,干扰对光强的影响已基本去除。

为进一步比较光强信号的 FFT 频谱结果,将干扰光强信号和修正后光强信号的频谱也依次偏移 40 Hz 和 80 Hz 后作图。图 6 为有干扰($f=8$ kHz)

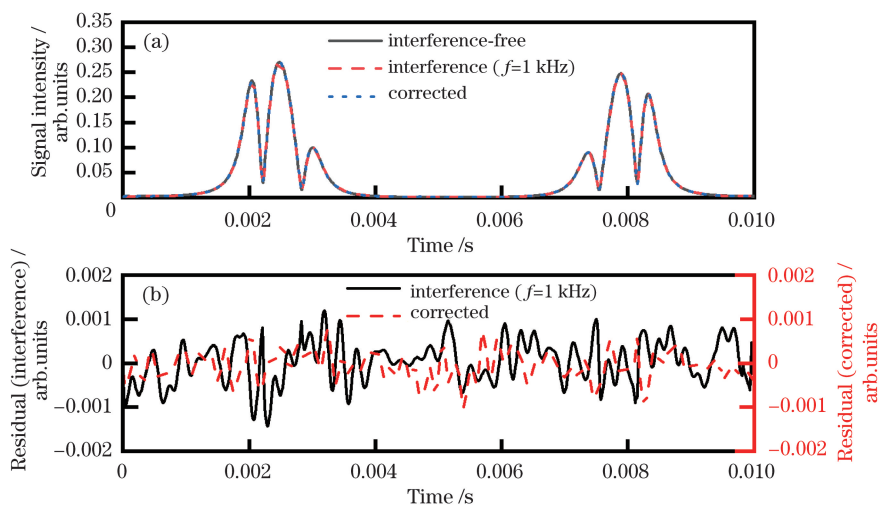


图 4 仿真得到的归一化的二次谐波信号及残差($f=1$ kHz)。(a) $2f/1f$ 信号;(b) $2f/1f$ 信号的残差

Fig. 4 Normalized second harmonic signal and residual obtained by simulation ($f=1$ kHz).

(a) $2f/1f$ signal; (b) residual of $2f/1f$ signal

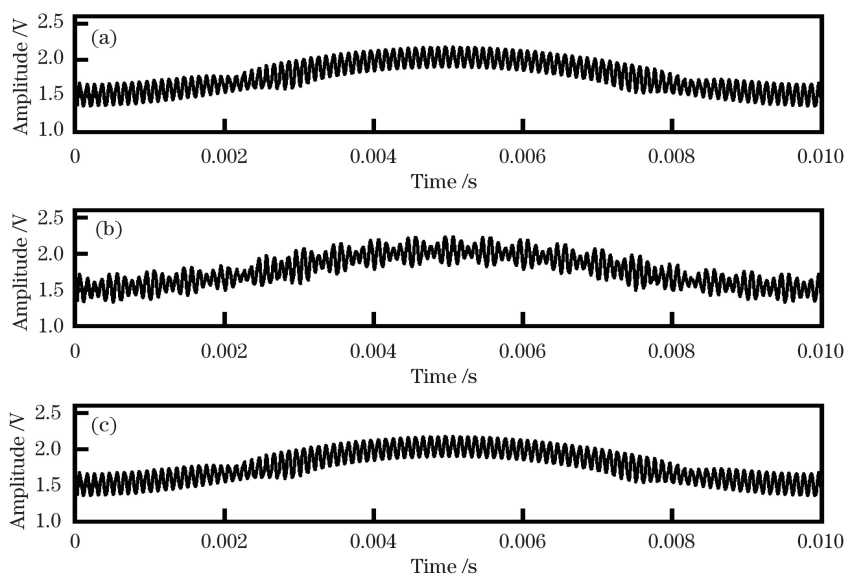


图 5 光强信号。(a)无干扰的光强信号;(b)有干扰($f=8$ kHz)的光强信号;(c)修正后的光强信号

Fig. 5 Light intensity signals. (a) Interference-free light intensity signal;

(b) interference ($f=8$ kHz) light intensity signal; (c) corrected light intensity signal

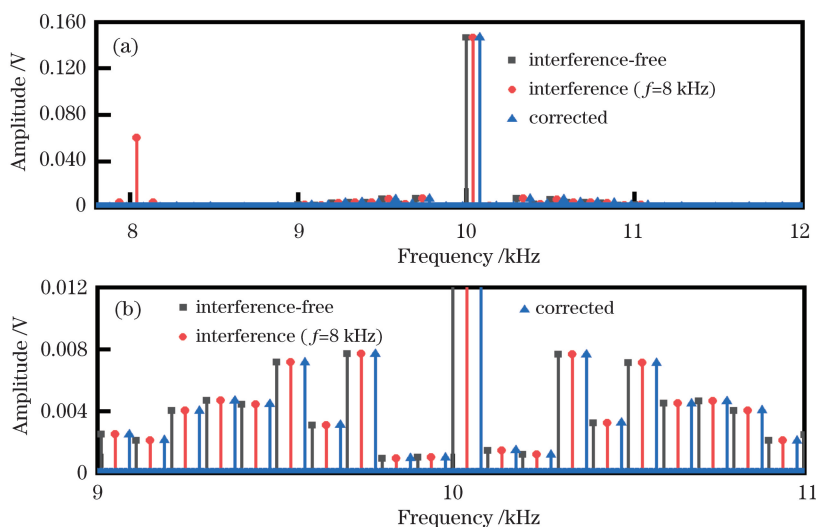


图 6 光强信号在一倍频处的频谱($f=8$ kHz)。(a)整体图;(b)细节图

Fig. 6 Spectra of light intensity signal at fundamental frequency ($f=8$ kHz). (a) Overall view; (b) detailed view

时的光强信号在一倍频处的频谱,图 7 为有干扰($f=8$ kHz)的光强信号在二倍频处的频谱。由图 6 和图 7 中 FFT 频谱的分析结果可知,在 8 kHz 频率处存在幅值较高的频率分布,它会对光强信号 $1f$ 及 $2f$ 处的频谱产生影响,从而会导致谐波信号提取不准确。无干扰时及修正后的频谱基本重叠在一起,提高了提取谐波信号的准确性。

图 8 为光强信号的归一化二次谐波($2f$)信号及残差。由图 8(b)可以看出,有干扰($f=1$ kHz)时的 $2f/1f$ 信号与无干扰时的 $2f/1f$ 信号的残差在 $-0.2\sim 0.2$ 以内,修正后的 $2f/1f$ 信号与有干扰

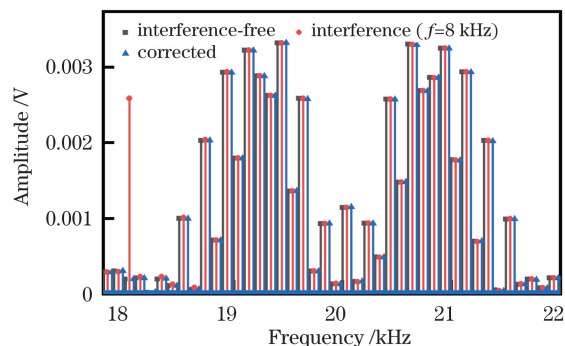


图 7 光强信号在二倍频处的频谱($f=8$ kHz)

Fig. 7 Spectra of light intensity signal at double-frequency ($f=8$ kHz)

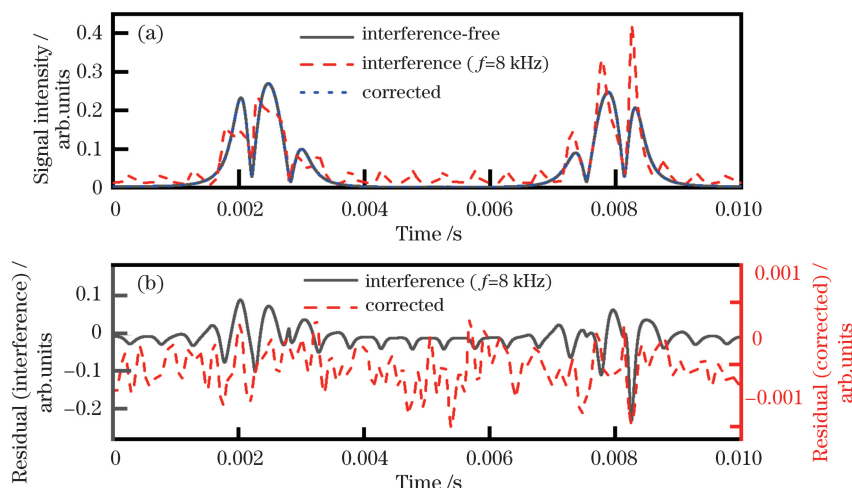


图 8 仿真得到的归一化二次谐波信号及残差($f=8$ kHz)。(a) $2f/1f$ 信号;(b) $2f/1f$ 信号的残差

Fig. 8 Normalized second harmonic signal and residual obtained by simulation ($f=8$ kHz).

(a) $2f/1f$ signal; (b) residual of $2f/1f$ signal

时的 $2f/1f$ 信号的残差在 $-0.001 \sim 0.001$ 以内,且更平滑。此时,有干扰时的甲烷的物质的量分数计算结果为 2.737%,与仿真设定值(2.000%)相比增大了 36.850%;通过参考光信号修正后的甲烷物质的量分数的计算结果为 2.012%,与仿真设定值(2.000%)相比增大了 0.600%。当干扰频率为 8 kHz 时,甲烷浓度的计算结果与无干扰时的测量值偏差过大,干扰信号对 WMS 光强信号的影响较大,导致提取的谐波信号不准确;而经过光强修正后,甲烷浓度的计算结果与仿真设定值基本一致。

图 9 是干扰信号频率不同时甲烷浓度和误差结果。当干扰信号的频率过大时,计算得到的甲烷浓度的误差较大。通过仿真单一频率的干扰信号对光强信号的影响以及分析甲烷浓度计算结果可以看出,当干扰频率与调制频率相当时,WMS 方法测量气体参数的准确度会下降。采用高频参考光信号提取干扰信号,再对光强进行修正可以有效提高气体参数测量的准确性。

3.3 环境干扰的仿真

在真实的测量环境中,干扰并不是单一频率的,而是在一定频率范围内都有。因此,模拟真实干扰对 WMS 信号的影响时,采用滤波高斯白噪声来仿真测量环境中的干扰。其中高斯白噪声^[20]可以表示为

$$G(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (14)$$

式中: a_k 是平均值为零、标准差为 σ_k 的高斯随机变

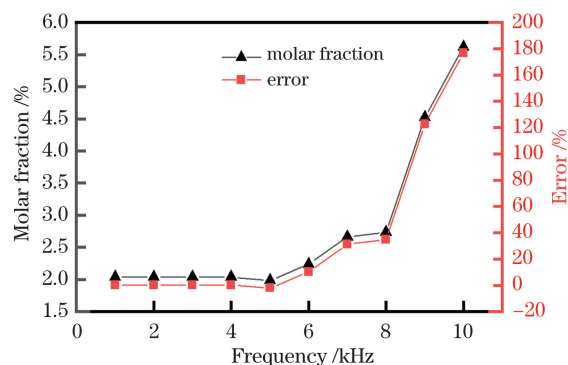


图 9 干扰频率不同时甲烷的物质的量分数及其误差

Fig. 9 Molar fraction and its error of methane at different interference frequencies

数,对于 $k=1,2,\dots$ 来说,该高斯随机变数是相互独立的; φ_k 是与 a_k 相互独立的、在 $[0, \pi]$ 区间内的随机变数, φ_k 本身对于 $k=1,2,\dots$ 来说也是相互独立的。高斯白噪声经过低通滤波器后即滤波高斯白噪声。仿真时所采用的滤波高斯白噪声由 MATLAB 中的 wgn 函数生成,所生成的高斯白噪声信号幅值为光强信号幅值的 4%。所产生的高斯白噪声经过低通滤波器(滤波器的截止频率设定为 200 Hz~10 kHz,每组间隔 200 Hz)后,共产生 50 组滤波高斯白噪声。计算不同滤波高斯白噪声干扰下的甲烷浓度,然后在每组干扰下,取 0.5 s 的数据进行分析,即用 50 个扫描周期计算出的 50 个甲烷浓度来计算甲烷浓度的平均值和标准差。

图 10 为未采用参考光信号对光强信号进行光强修正时计算得到的甲烷的物质的量分数。当干扰频率范围达到 $0 \sim 4.6$ kHz 时,甲烷物质的量分

数的波动性变大,并随着干扰频率范围的增大而增大。

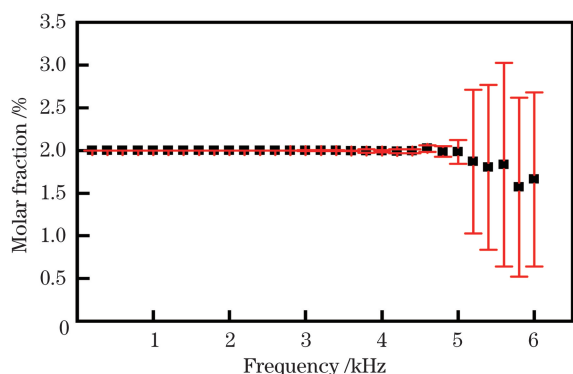


图 10 仿真得到的未修正时甲烷的物质的量分数
Fig. 10 Simulated molar fraction of methane without correction

图 11 为采用参考光信号对光强信号进行修正后计算得到的甲烷的物质的量分数。当干扰频率达到 100 kHz 以上时,甲烷物质的量分数的误差开始变大,其波动性也随着干扰频率范围的增大而增大。通过对比光强信号修正前后的计算结果可以看出,基于高频参考光的频分复用技术能有效抑制高频干扰对气体检测的影响。

通过滤波高斯白噪声来模拟真实环境中的干扰信号,分析干扰信号频率对光强信号及甲烷浓度计算结果的影响,可以看出,当干扰频率与调制频率达到同一量级时,WMS 方法测量的气体参数的准确性会下降。

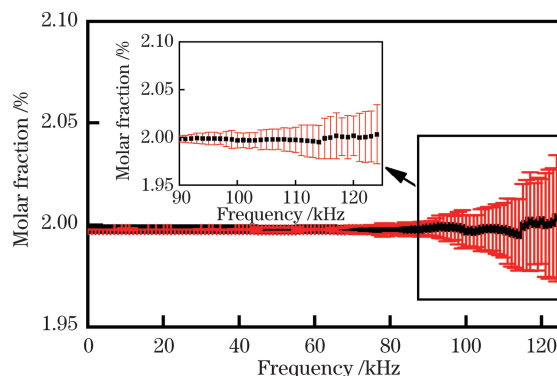


图 11 仿真得到的修正后的甲烷的物质的量分数
Fig. 11 Simulated molar fraction of methane with correction

4 实验验证与分析

4.1 实验系统

验证实验系统如图 12 所示。函数发生器(DG1062Z)通道 1 发出的正弦调制信号(扫描频率为 100 Hz,调制频率为 10 kHz,电压峰峰值为 3.12 V)进入到激光控制器(LDC501)中对 DFB 激光器 1(NLK1E5EAAA)的输出波长进行调谐,通道 2 发出的正弦信号(调制频率为 260 kHz,电压峰峰值为 2 V)进入到激光控制器(LDC501)中对 DFB 激光器 2(82020102)的输出波长进行调谐。DFB 激光器 1 中心波数选择甲烷吸收谱线的中心(6046.95 cm^{-1}),DFB 激光器 2 的中心波数选择甲烷无吸收处(6050.45 cm^{-1})。

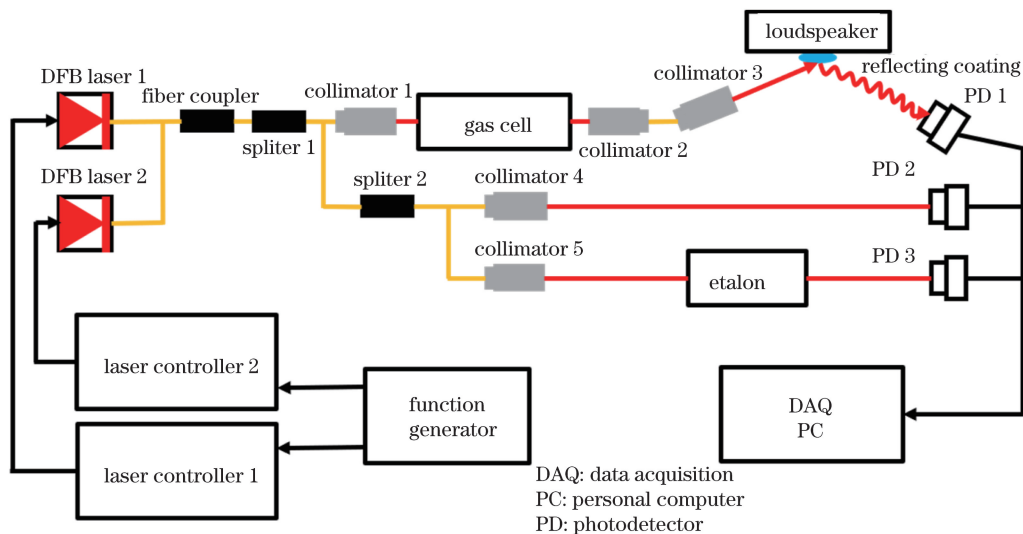


图 12 实验系统示意图

Fig. 12 Schematic of experimental system

两束激光经过光纤耦合器后分为两路。第一路激光通过长度为 20 cm 的气体吸收池后经光纤准直

器(F028APC-2000)准直,然后再经固定在扬声器(LS77W-35F-R8)上的反射膜反射,最终被光电探

测器(PDA10CS-EC)接收并被转换为电信号,最终可以获得透射光强。扬声器将电信号转换为声信号时会引起振膜、纸盆振动,贴于纸盆上的反射膜也会随之振动,通过改变电信号的频率及幅值,就可以产生不同频率及不同幅值的振动,使光入射在探测器靶面上的位置发生变化。探测器的靶面较小,因而由探测器采集到的光强信号会随之波动,从而能起到干扰光强的作用。第二路激光先经过光纤分束器分成两路,其中一路经准直后直接由探测器接收,获得入射光强,即获得无吸收的背景光强信号。利用 HITRAN^[21] 光谱数据库中的谱线参数,结合数字锁相低通滤波技术得到仿真的归一化二次谐波信号,将其与通过透射光强解调得到的归一化二次谐波信号进行拟合。另外一路激光经准直后通过光学标准具(自由谱间距为 0.01 cm^{-1})并由探测器接收得到标准具信号,获得激光器频率响应特性。在采集标准具信号的过程中,将 DFB 激光器 2 关闭,采集 DFB 激光器 1 的标准具信号,并进行频率响应特性的转换。在一定时间内,激光器的性能较为稳定,可以将获得的激光器的频率响应特性重复用于计算气体参数。利用数据采集卡(PXIe-5170R)记录探测器的信号。在实验过程中,气池温度由带有贴片式温度传感器的温度控制器(XMT-121)进行测量。

4.2 单频干扰实验

采用扬声器发出的频率为 1 kHz 的单频声源信号对光强进行干扰。通过探测器探测到的干扰信号

如图 13 所示,该信号是单频信号,可以验证单频干扰对光强的影响。

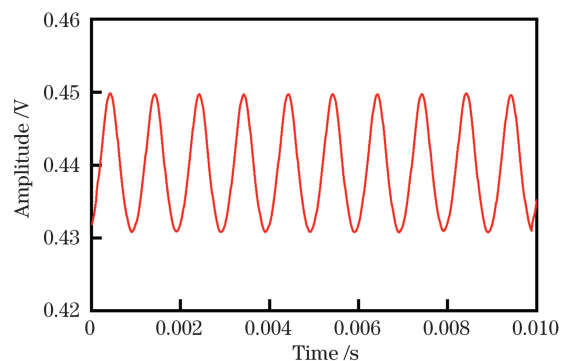


图 13 实验中的干扰信号($f=1\text{ kHz}$)

Fig. 13 Interference signal in experimental ($f=1\text{ kHz}$)

图 14 是干扰信号频率为 1 kHz 时的归一化谐波信号及残差。有干扰时的谐波信号与无干扰时的谐波信号的残差在 $-0.002\sim 0.002$ 以内,从修正后的光强中提取的谐波信号与无干扰时的谐波信号的残差也在 $-0.002\sim 0.002$ 以内。实验时,气池温度为 $19.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,计算出的有干扰时的甲烷物质的量分数为 2.011%,相比无干扰时的甲烷物质的量分数的测量值(2.005%)增大了 0.299%;计算得到的经参考光信号修正后的甲烷物质的量分数为 2.010%,相比无干扰时的甲烷物质的量分数的测量值(2.005%)增大了 0.249%。当干扰频率为 1 kHz 时,干扰信号对 WMS 光强信号的影响较小,对谐波信号的影响也较小。

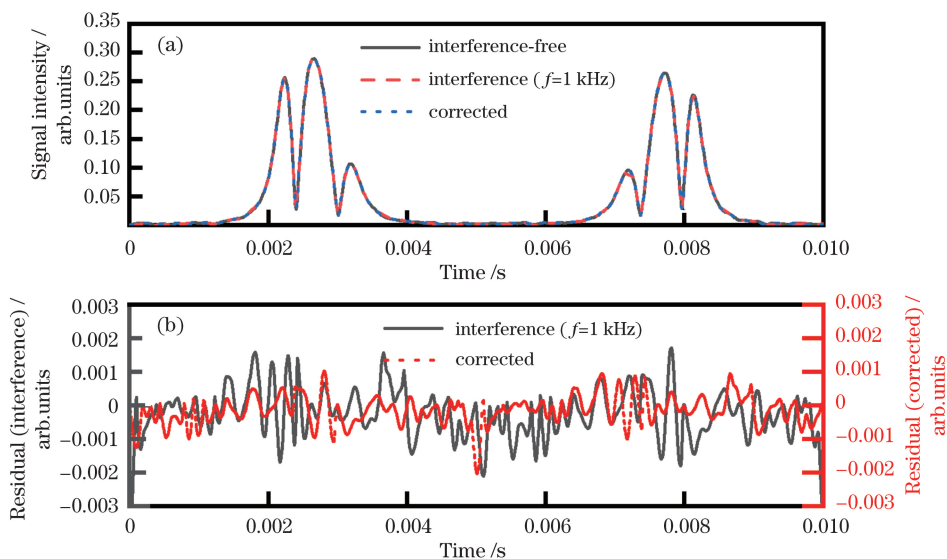


图 14 实验得到的归一化的二次谐波信号及残差($f=1\text{ kHz}$)。(a) $2f/1f$ 信号; (b) $2f/1f$ 信号的残差

Fig. 14 Normalized second harmonic signal and residual obtained by experiment ($f=1\text{ kHz}$).

(a) $2f/1f$ signal; (b) residual of $2f/1f$ signal

采用扬声器发出的频率为 8 kHz 的单频声源信号对光强进行干扰。探测器探测到的干扰信号如图 15 所示,该信号是单频信号,可以验证单频干扰对光强的影响。

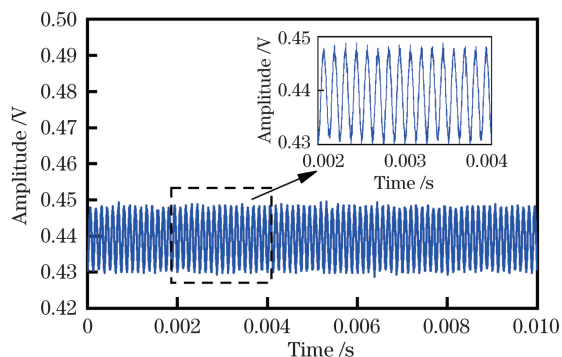


图 15 实验中的干扰信号 ($f=8\text{ kHz}$)

Fig. 15 Interference signal in experiment ($f=8\text{ kHz}$)

图 16 是干扰信号频率为 8 kHz 时的归一化谐波信号及残差。有干扰时的谐波信号与无干扰时的谐波信号的残差在 $-0.2\sim 0.2$ 以内,从修正后的光强中提取的谐波信号与无干扰时谐波信号的残差在 $-0.002\sim 0.002$ 以内。经光强修正后提取的谐波信号的残差与未经光强修正时提取的谐波信号的残差相差两个量级,说明参考光信号修正的效果明显。在此工况下,气池温度为 $19.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,计算出的有干扰时甲烷物质的量分数为 1.566% ,相比无干扰时的甲烷物质的量分数 (2.005%) 降低了 21.895% ;经参考光信号修正后的甲烷物质的量分数为 2.012% ,相比无干扰时的甲烷物质的量分数 (2.005%) 增大了 0.349% 。可见,当干扰频率为 8 kHz 时,光强信号受到干扰的影响较大,若不对光强信号进行修正,将导致测量结果不准确。

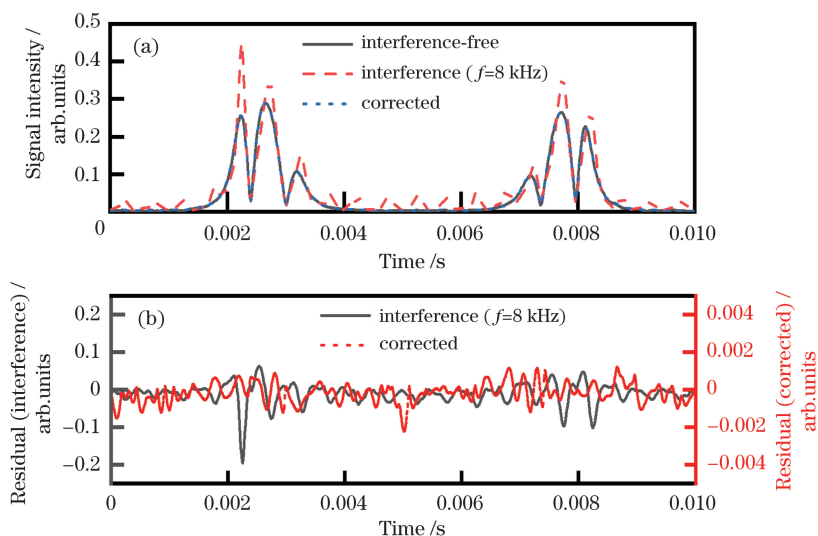


图 16 实验得到的归一化二次谐波信号及残差 ($f=8\text{ kHz}$)。 (a) $2f/1f$ 信号; (b) $2f/1f$ 信号的残差

Fig. 16 Normalized second harmonic signal and residual obtained by experiment ($f=8\text{ kHz}$).

(a) $2f/1f$ signal; (b) residual of $2f/1f$ signal

通过实验验证了单一频率干扰信号对光强信号的影响。从甲烷浓度的计算结果可以看出,当干扰信号频率与调制频率相近时,WMS 方法测量气体参数的准确性会受到影响,并且通过传统的 $2f$ 归一化 $1f$ 的方法并不能完全抑制干扰的影响。

4.3 环境干扰实验

采用扬声器发出截止频率在 200 Hz 到 10 kHz 的之间 50 组滤波高斯白噪声,对光强进行干扰。如表 1 所示,不同干扰工况下气池的温度在 $19.1\sim 19.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化,实验环境基本稳定。

图 17 为未采用参考光信号对光强信号进行修

正时计算出的甲烷的物质的量分数。当干扰频率范围未达到 $0\sim 5.0\text{ kHz}$ 时,甲烷物质的量分数的方差在 0.06% 以下,波动性较小;当干扰频率范围超过 $0\sim 5.0\text{ kHz}$ 时,甲烷物质的量分数的波动性变大;随着干扰频率范围增大,甲烷浓度的误差越来越大,浓度的波动性也越来越大。

图 18 为采用参考光信号对 WMS 信号进行光强修正后计算出的甲烷的物质的量分数。修正后的甲烷物质的量分数的误差均在 $-1\%\sim 1\%$ 以内,且方差都在 0.02% 以下,波动性较小。通过分析修正前后谐波信号及甲烷物质的量分数的计算结果可以看出,通过高频参考光信号提取干扰信号,再对

表 1 不同干扰频率范围时的实验温度

Table 1 Experimental temperature at different interference frequency ranges

Interference frequency range /kHz	Temperature /°C	Interference frequency range /kHz	Temperature /°C	Interference frequency range /kHz	Temperature /°C
0-0.2	19.1	0-3.6	19.3	0-7.0	19.3
0-0.4	19.1	0-3.8	19.3	0-7.2	19.3
0-0.6	19.1	0-4.0	19.2	0-7.4	19.3
0-0.8	19.1	0-4.2	19.2	0-7.6	19.3
0-1.0	19.1	0-4.4	19.2	0-7.8	19.3
0-1.2	19.2	0-4.6	19.2	0-8.0	19.3
0-1.4	19.1	0-4.8	19.3	0-8.2	19.4
0-1.6	19.1	0-5.0	19.3	0-8.4	19.4
0-1.8	19.1	0-5.2	19.3	0-8.6	19.4
0-2.0	19.2	0-5.4	19.3	0-8.8	19.3
0-2.2	19.2	0-5.6	19.3	0-9.0	19.4
0-2.4	19.2	0-5.8	19.4	0-9.2	19.4
0-2.6	19.2	0-6.0	19.4	0-9.4	19.4
0-2.8	19.2	0-6.2	19.4	0-9.6	19.4
0-3.0	19.3	0-6.4	19.4	0-9.8	19.4
0-3.2	19.3	0-6.6	19.4	0-10.0	19.4
0-3.4	19.3	0-6.8	19.4		

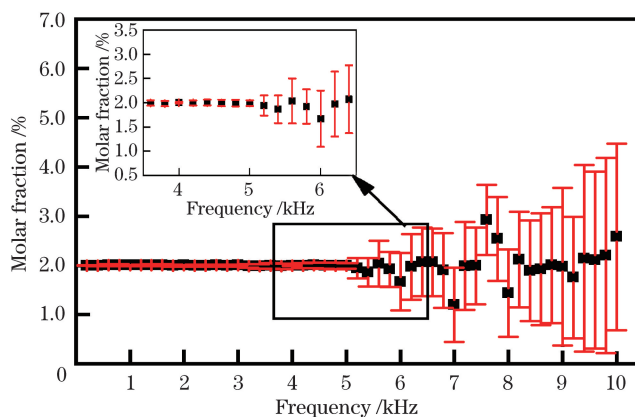


图 17 实验得到的未修正时甲烷的物质的量分数

Fig. 17 Measured molar fraction of methane without correction

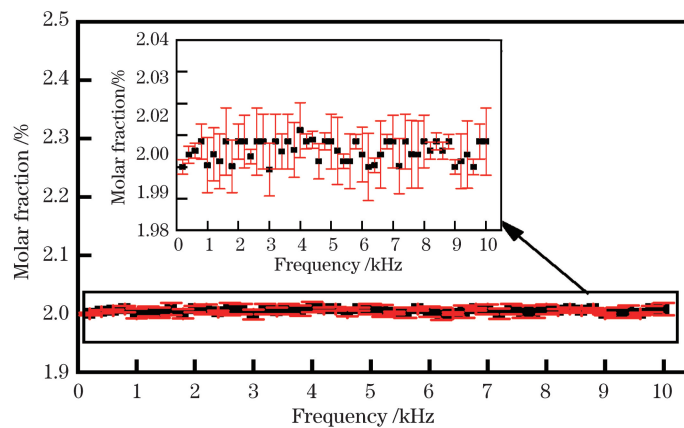


图 18 实验得到的修正后的甲烷的物质的量分数

Fig. 18 Measured molar fraction of methane with correction

WMS 信号进行修正的方法具有可行性,能有效抑制干扰信号对气体检测的影响。

5 结 论

针对复杂环境下光强信号易受高频干扰影响的问题,提出了一种基于高频参考光的频分复用技术。该技术先对探测光强信号在参考光信号频率下进行数字锁相滤波,将干扰信号提取出来;然后将探测光强信号与提取出的干扰信号相除,就可以实现透射光强的修正,从而提高了强干扰下气体浓度测量的准确性。首先,采用数值仿真方法研究了单一频率与不同频率范围下干扰信号对光强信号的影响,分析了甲烷浓度的仿真计算结果,从理论上初步验证了该方法的可行性;然后,搭建甲烷浓度实验验证系统,采集了单一频率干扰及不同频率范围干扰下的光强信号,将修正前的测量结果与采用所提方法进行光强修正后的测量结果进行对比,验证了该方法的可行性及有效性。

所提方法具有适用性好、应用场景广泛等特点。该方法在不同的干扰环境中应用时,通过调整参考光信号的频率即可对探测到的光强信号进行修正,从而能准确地提取谐波信号,提高气体参数测量的准确性。该方法可以应用于航空航天发动机燃烧诊断等具有强湍流、强振动的测量环境中。

参 考 文 献

- [1] Zhang G Y, Wang G Q, Huang Y, et al. Reconstruction and simulation of temperature and CO₂ concentration in an axisymmetric flame based on TDLAS[J]. *Optik*, 2018, 170: 166-177.
- [2] Sellerer T, Ehn S, Mechlem K, et al. A polychromatic adaption of the Beer-Lambert model for spectral decomposition[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 1013: 101323H.
- [3] Chen J J, Wang G S, Liu K, et al. Calibration-free wavelength modulation absorption spectroscopy for acetylene detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0930001.
陈家金, 王贵师, 刘锟, 等. 免标定波长调制吸收光谱技术用于乙炔探测的研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0930001.
- [4] He Q X, Dang P P, Liu Z W, et al. TDLAS-WMS based near-infrared methane sensor system using hollow-core photonic crystal fiber as gas-chamber[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49 (3): 115.
- [5] Xiong Y Q, Zhou B, Wang Y H, et al. Calibration-free one-line method based on wavelength modulation spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0930002.
熊涌泉, 周宾, 王一红, 等. 基于波长调制光谱技术的免标定单线测量法[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0930002.
- [6] Wang Q, Chang J, Zhu C G, et al. High-sensitive measurement of water vapor: shot-noise level performance via a noise canceller[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 1094.
- [7] Stritzke F, Diemel O, Wagner S. TDLAS-based NH₃ mole fraction measurement for exhaust diagnostics during selective catalytic reduction using a fiber-coupled 2.2- μ m DFB diode laser [J]. *Applied Physics B*, 2015, 119(1): 143-152.
- [8] Ruxton K, Chakraborty A L, Johnstone W, et al. Tunable diode laser spectroscopy with wavelength modulation: elimination of residual amplitude modulation in a phasor decomposition approach [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 150(1): 367-375.
- [9] Xu L J, Liu C, Jing W Y, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy-based tomography system for on-line monitoring of two-dimensional distributions of temperature and H₂O mole fraction[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1): 013101.
- [10] Ye K, Ye Z Y, Wu J, et al. Effects of plate vibration on the mixing and combustion of transverse hydrogen injection for scramjet [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(33): 21343-21359.
- [11] Liu Z K, Liu C W, Wei H Q, et al. Effect of turbulence intensity on flame propagation based on large eddy simulation[J]. *Vehicle Engine*, 2019(4): 22-26, 33.
刘宗宽, 刘昌文, 卫海桥, 等. 湍流强度对火焰传播影响的大涡模拟研究[J]. *车用发动机*, 2019(4): 22-26, 33.
- [12] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, et al. Infrared laser absorption sensors for multiple performance parameters in a detonation combustor [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3739-3747.
- [13] Goldenstein C S, Spearrin R M, Hanson R K. Fiber-coupled diode-laser sensors for calibration-free stand-off measurements of gas temperature, pressure, and composition[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): 479-484.
- [14] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K. Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(29):

- 5546-5560.
- [15] Sun K, Chao X, Sur R, et al. Analysis of calibration-free wavelength-scanned wavelength modulation spectroscopy for practical gas sensing using tunable diode lasers[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(12): 125203.
- [16] Wang S Y, Lv J, Zhou T, et al. TDLAS noise reduction algorithm for the raw spectral data under strong interference conditions[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9297: 92971U.
- [17] Goldenstein C S, Schultz I A, Spearrin R M, et al. Diode laser measurements of temperature and H₂O for monitoring pulse detonation combustor performance[C]//24th International Colloquium on Dynamics of Explosive and Reactive Systems. Taipei: [s. n.], 2013: 1-6.
- [18] Yin J, Chen X B, Wu L X, et al. Simulation method of road excitation in time domain using filtered white noise and dynamic analysis of suspension[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(3): 398-407.
- 殷珺, 陈辛波, 吴利鑫, 等. 滤波白噪声路面时域模拟方法与悬架性能仿真[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 398-407.
- [19] Goldenstein C S, Strand C L, Schultz I A, et al. Fitting of calibration-free scanned-wavelength-modulation spectroscopy spectra for determination of gas properties and absorption lineshapes[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(3): 356-367.
- [20] Cai K B, Wang C L, Chen Z H. A method for generating standard Gaussian white noise sequences [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(12): 207-211.
- 蔡坤宝, 王成良, 陈曾汉. 产生标准高斯白噪声序列的方法[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(12): 207-211.
- [21] Gordon I, Hill C, Kochanov R, et al. HITRAN2016: part I. Line lists for H₂O, CO₂, O₃, N₂O, CO, CH₄, and O₂ [C]//72nd International Symposium on Molecular Spectroscopy. [S.l.: s.n.], 2017.