

基于改进希尔伯特-黄变换的超窄带 激光器气体检测消噪研究

蒋善超 曹玉强 隋青美 王 静 王正方 王 宁

(山东大学光纤传感技术工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要 为降低电路及光路噪声等对痕量气体检测精度的影响, 达到进一步提高痕量气体检测系统精度的目的, 选用超窄带激光器作为系统光源并以谐波检测原理及改进希尔伯特-黄变换(IHHT)滤波算法作为数据处理的核心算法构建高精度痕量气体检测系统平台。选取甲烷作为被检测对象, 理论计算得当光源输出中心波长为 1650.959 nm 时, 该系统甲烷气体体积分数 C 与输出光强一、二次谐波比值 I_{2f}/I_f 的相关系数为 0.084639。将一定体积分数的甲烷气体通入平台光纤气室中进行灵敏度实验, 实验结果表明应用 IHHT 降噪处理后 C 与 I_{2f}/I_f 的相关系数由使用傅里叶变换(FFT)处理的 0.062585 提升到 0.074884, 且气体体积分数越低, IHHT 的降噪效果越好。

关键词 激光器; 超窄带激光器; 谐波检测; 甲烷; 改进希尔伯特-黄变换

中图分类号 TH83; TN247; O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0107001

Study on Improved Hilbert-Huang Transform-Based Ultra-Narrow-Bandwidth Laser Gas Detection Noise Elimination

Jiang Shanchao Cao Yuqiang Sui Qingmei Wang Jing Wang Zhengfang Wang Ning

(Optical Fiber Sensing Technology and Engineering Research Center, Shandong University,
Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract In order to reduce the effect of electric circuit and optical path noise on the trace gas detection and achieve the purpose that further improving the accuracy of trace gas detection system, ultra-narrow-bandwidth laser is utilized as the system light source, and harmonic detection and improved Hilbert-Huang transform (IHHT) filtering algorithm are applied as the key algorithms of the data processing to construct the high precision trace gas detection system. Methane is used as the detect object, and theoretical calculation result shows that when the output center wavelength of the system light is 1650.959 nm, the correlation coefficient between methane gas volume concentration C and the first, second harmonic generation ratio of the output intensity I_{2f}/I_f is 0.084639. The sensitivity experiment is carried out by inject specific fraction volume methane into the platform optical gas cell. The experimental data show that after the application of IHHT to reduce noise, the correlation coefficient between methane C and I_{2f}/I_f is upgraded from 0.062585 which is obtained by applying fast Fourier transform (FFT) to process the data to 0.074884. The better effect of improved IHHT noise reduction depends on the less methane gas volume fraction.

Key words lasers; ultra-narrow-bandwidth lasers; harmonic detection; methane; improved Hilbert-Huang transform

OCIS codes 070.1060; 070.2575; 070.2615

收稿日期: 2013-07-08; **收到修改稿日期**: 2013-08-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61174018)、国家自然科学基金青年项目(41202206)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2010FM001)

作者简介: 蒋善超(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事新型光纤传感器的研制与应用等方面的研究。

E-mail: jiangshanchao88624@126.com

导师简介: 曹玉强(1963—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事检测技术及应用方面的研究。

E-mail: caoyuqiang@hotmail.com(通信联系人)

1 引 言

高精度痕量气体检测广泛应用于各行各业: Bruce 等^[1]通过检测 CO 浓度揭示星系形成, Justin 等^[2]通过检测 CO₂ 的变化阐释植被发射率随季节等因素的变化规律, 陈霄^[3]通过检测 CO、CH₄ 等微量气体确定油浸式变压器的工作状态。近年来, 学者们为提高痕量气体的检测精度在气体监测方式、平台及仪器性能等方面做出了大量的研究, 例如: Wang 等^[4]基于回编程逻辑控制器(PLC)设计新型气体测量平台使得痕量气体检测不受温度及气压的影响, 检测精度提高了三个数量级; Joel 等^[5]详细分析了中红外激光气体检测系统各个性能参数对气体精度的影响; Ventrudo 等^[6]通过实验得出基于 GaSb 的分布反馈(DFB)光源温度高于或低于环境温度有利于提高痕量气体的检测精度, 但现有关于如何处理经过气体吸收后光强信号以降低干扰因素对气体检测精度的影响方面的报道则较少。

希尔伯特-黄变换(HHT)^[7-10]由于不受固定小波基限制、自适应信号处理等特点被广泛应用于处理非线性非稳定信号消噪滤波。张义平^[11]详细分析了 HHT 与傅里叶变换(FFT), 短时傅里叶(STFT)与小波变换(WT)在信号消噪滤波方面的优缺点。本文基于超窄带激光器构建甲烷气体检测平台, 采用改进 HHT(IHHT)分析气室输出光强信号提取谐波信号, 与直接采用谐波检测原理相比, 其信号一、二次谐波信号更易提取且气体检测误差由不降噪处理的 26.1%降低到 11.5%, 进一步实现了痕量气体的高精度测量。

2 工作原理

2.1 系统检测原理

当光源发射的波长与被测气体吸收波长相吻合时, 气体分子发生共振吸收, 其吸收强度与被测气体的浓度有关, 通过分析光源被气体吸收的光强信号就可以反演被测气体的气体浓度。当光源输出光强为 I_0 的平行光通过待测气体, 如果光源光谱覆盖一个或多个气体吸收谱线则光强通过气体时将发生吸收衰减, 根据比尔-朗伯特定律, 出射光强 $I(t)$ 与入射光强 I_0 及气体体积分数之间的关系为

$$I(t) = I_0 \exp[-\alpha(\nu)CL], \quad (1)$$

式中 $I(t)$ 为介质吸收后的透射光强, I_0 为入射到介质的光强, $\alpha(\nu)$ 为摩尔分子吸收系数, C 为被测介质的浓度, L 为光通过介质的长度。

当被测气体体积分数较小, 气体吸收峰低即需要实现精确测量较低气体浓度时, 直接利用上述原理检测气体精确性难以保证。光源输出光强不稳与光电器件的温漂等因素将给系统带来较大的测量误差, 因此为实现更精确的气体检测, 必须采取相应措施克服上述误差。选取输出光强稳定的超窄带激光器^[12-13]作为系统光源, 通过输入正弦信号对光源输出光强及中心波长进行调制实现谐波检测的先决条件, 在一定程度上消除上述影响因素引入的误差, 则此时光源输出光强为

$$I(t) = I_0(1 + \eta \sin \omega t) \exp[-\alpha(\nu)CL], \quad (2)$$

式中 η, ω 为外界调制信号的强度及频率, 光源输出波长为

$$\lambda = \lambda_0 + \nu_m \sin \omega t, \quad (3)$$

式中 ν_m 为波长调制系数, λ_0 为光源输出的中心波长。

在近红外波段, 气体吸收系数很小, 满足 $\alpha(\nu)CL \ll 1$, 可以将(2)式近似为

$$I(t) = I_0(1 + \eta \sin \omega t)[1 - \alpha(\nu)CL]. \quad (4)$$

当气体压力接近 1 atm(1 atm = 1.01 × 10⁵ Pa) 时, 红外光谱受特定波长红外激光激发以自然展宽为主, 因此气体分子的吸收线型可以用洛伦茨曲线描述^[14]:

$$\alpha(\nu) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{\nu - \nu_g}{\delta_\nu}}, \quad (5)$$

式中 α_0 表示纯气体在吸收线中心处的吸收系数, ν_g 和 δ_ν 分别为对应气体吸收峰的中心频率和吸收线半宽。将(3)~(5)式代入(2)式得

$$I(t) = I_0(1 + \eta \sin \omega t) \times \left[1 - \frac{\alpha_0 CL}{1 + \left(\frac{\nu_0 - \nu_g + \nu_m \sin \omega t}{\delta_\nu} \right)^2} \right]. \quad (6)$$

当光源输出中心波长被精确的锁定在气体吸收峰上, 即 $\nu_0 = \nu_g$ 时, 输出光强 $I(t)$ 的一次谐波 I_f 和二次谐波系数 I_{2f} 分别为

$$I_f = \eta I_0, \quad (7)$$

$$I_{2f} = \frac{2(2\delta_\nu^3 + \nu_m^2 \delta_\nu - 2\delta_\nu^2 \sqrt{\delta_\nu^2 + \nu_m^2})}{\nu_m^2 \sqrt{\delta_\nu^2 + \nu_m^2}} \alpha_0 CL I_0 = k \cdot \alpha_0 CL I_0, \quad (8)$$

式中气体浓度 C 与输出光强 $I(t)$ 一次、二次谐波系数之间的关系为

$$C = \frac{\eta}{k \alpha_0 L} \cdot \frac{I_{2f}}{I_f}. \quad (9)$$

由(9)式可得, 当检测系统调制信号、光源输出中心波长等参数确定后被测气体浓度 C 与 $I(t)$ 一

次、二次谐波系数的比值呈线性对应关系。

2.2 数据处理原理

HHT^[15]是一种更具适应性的时频局部化智能分析方法。该方法主要由经验模态分解(EMD)及希尔伯特变换组成,它没有固定的先验基底,具有自适应的独特优势。HHT降噪基本流程:

1)将原始数据 $x(t)$ 通过经验模态分解为若干固有模态函数(IMF) $c_i(t)$ 及残差 $r_n(t)$,即

$$x(t) = \sum_1^n c_i(t) + r_n(t), \quad (10)$$

式中 n 表示原始信号经 EMD 后所得信号本征模式分量的个数。

2) 通过带宽滤波器 $f_1(t)$ 及 $f_h(t)$ (滤波频率范围分别为 8~12 kHz 及 18~22 kHz) 对 IMF $c_i(t)$ 进行滤波,则

$$c_{il}(t) = c_i(t) \otimes f_1(t),$$

$$c_{ih}(t) = c_i(t) \otimes f_h(t), \quad (11)$$

式中 $c_{il}(t)$ 及 $c_{ih}(t)$ 分别为各个固有模态信号经过带宽滤波器 $f_1(t)$ 及 $f_h(t)$ 处理后的信号。以处理后的模态函数为基础重组原始信号提取含有气体浓度的一、二次谐波信号。

3 实验平台及关键探测参数的选取

构建甲烷气体检测实验平台,其框架及实物图如图 1 所示。实验平台主要由超窄带激光器(扫频可调谐激光器-TSL-510,波长范围 1560~1680 nm,稳定波长精度 1 pm)、信号发生器、光纤气室、光电转换器(New Focus 1811)和信号采集处理部分组成。

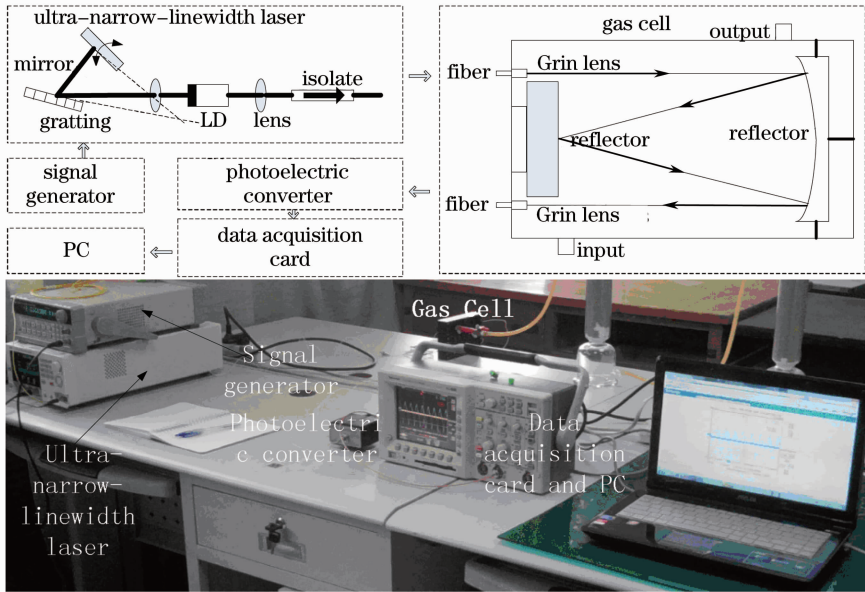


图 1 实验平台原理及实物图

Fig. 1 Schematic and material object graph of the experiment platform

通过查找 HITRAN 数据库得在标准大气压下,甲烷气体在 1650.959 nm 即 $6057.0861 \text{ cm}^{-1}$ 处分子吸收线吸收强度为 $1.28 \times 10^{-21} \text{ cm}$,吸收线半宽为 0.05 cm^{-1} ,进而计算可得甲烷气体在 1650.959 nm 处的吸收系数 $\alpha_0 = 0.219 \text{ cm}^{-1}$ ^[16]。平台所使用的光纤气室为并联式腔增强气室,长 200 mm,宽 40 mm,高 50 mm,由黑色不锈钢材料组成。实验中光路经过光纤气室的有效长度为 80 cm。选择 1650.959 nm 作为超窄带激光器的输出波长,外界光源调制信号强度 $\eta = 0.1 \text{ V}$,频率 $\omega = 10 \text{ kHz}$,波长调制系数为 40 pm,将以上参数代入(9)式得

$$C = 0.084639 \cdot \frac{I_{2f}}{I_f}. \quad (12)$$

4 实验及数据分析

4.1 实验及 FFT 数据分析

在室温、标准大气压下,首先用氮气(体积分数为 99.9999%)冲洗光纤气室,然后选用 10mL 医用注射器依次向气室中注射甲烷体积分数为 3.43% 的甲烷/氮气混合气体,直到冲入光纤气室中的甲烷/氮气混合气体积达 100 mL 为止。在整个实验过程中控制 $\alpha(\nu)CL \leq 0.1$ 即 $C \leq 2.85\%$ 以满足(4)式所要求的 $\alpha(\nu)CL \ll 1$ 。光纤气室容积为 160 mL,

计算每次冲入甲烷/氮气混合气后的甲烷气体浓度并记录输出光强信号 $I(t)$ 。甲烷体积分数 C 与输出光强信号 $I(t)$ 的傅里叶变换一、二次谐波幅值的对应实验数据如表 1 所示。图 2 为甲烷体积分数为

1.2863% 时输出光强的时域信号及其幅频图, 从图中可以观测到输出光强信号中掺杂较多的高频干扰信号。

表 1 甲烷检测实验数据

Table 1 Experimental data of methane detection

First harmonic amplitude $I_1/\mu\text{V}$	Second harmonic amplitude $I_{2f}/\mu\text{V}$	I_{2f}/I_1	Methane volume fraction / %
14.182	1.0848	0.0765	0.0000
13.9718	1.5497	0.1109	0.2144
14.526	2.0147	0.1387	0.4288
13.8922	2.4796	0.1785	0.6431
14.0927	2.9446	0.2089	0.8575
14.2844	3.4095	0.2387	1.0719
14.0918	3.8745	0.2749	1.2863
13.8627	4.3394	0.3130	1.5006
13.9624	4.8044	0.3441	1.7150
13.6572	5.2693	0.3858	1.9294
1.6809	5.7342	0.4191	2.1438

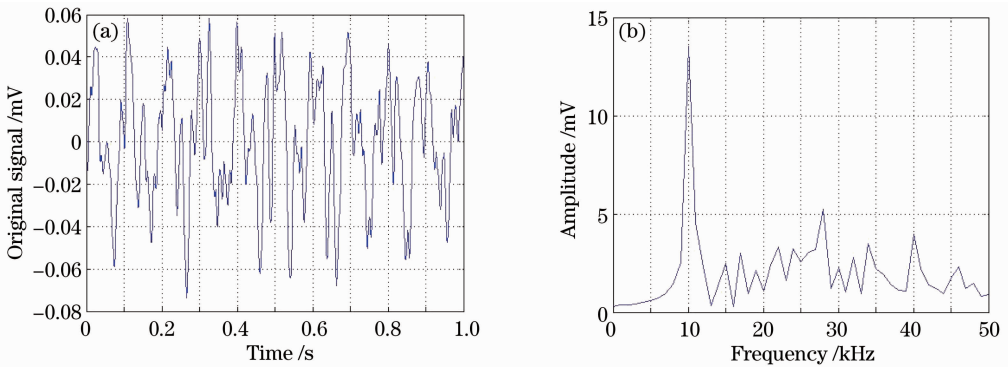


图 2 输出光强的时域信号及其幅频图。(a)时域信号; (b)幅频图

Fig. 2 Time-domain signal and amplitude-frequency map of output light intensity. (a) Time-domain signal; (b) amplitude-frequency map

由表 1 可得, 当光纤气室内冲入体积分数为 99.9999% 的氮气时, 输出光强信号的二次谐波幅值不为 0, 这主要由电路及光路噪声等因素引起的^[5]。对表 1 数据进行线性拟合得甲烷体积分数 C 和二次谐波幅值与一次谐波幅值比值 I_{2f}/I_1 的对应关系为 $C=0.062585 \cdot I_{2f}/I_1 - 0.4582$, 拟合公式的线性度 $R^2=0.9990$ 。通过 FFT 分析并线性拟合实测数据得 FFT 分析实测灵敏度系数为 0.062585, 与理论灵敏度系数 0.084639 的相对误差为 26.1%。

4.2 HHT 降噪性能分析

选取甲烷体积分数为 1.2863% 时输出光强 $I(t)$ 作为 HHT 降噪的原始信号, 概述 IHHT 的降噪流程。图 3 为甲烷体积分数为 1.2863% 时输出光强 $I(t)$ 的 EMD 分量及其幅频图。

由图 3 可知, 甲烷体积分数为 1.2863% 时输出光强 $I(t)$ 的 EMD 分量中 IMF1 主要包括了 40~80 kHz 之间信号, IMF2 主要包括了 20~40 kHz 之间的信号, IMF3 主要包括了 5~20 kHz 之间的甚低频信号, IMF4 主要包括了 2~12 kHz 之间的甚低频信号, 而 IMF5 及残差 $r_n(t)$ 主要包括了 8 kHz 以下的极低频信号。选取 IMF2、IMF3 及 IMF4 合成后的信号作为原始信号进行傅里叶变换分析, 如图 4 所示。由图 4 可得经过改进 HHT 滤波后输出光强的高频信号幅值明显降低且信号的一、二次谐波更加明显, 信噪比较图 2(b) 有显著性的提高。将实验所得 11 组数据经过 HHT 滤波处理后求取输出光强的一、二次谐波信号幅值与甲烷体积分数相对应的实验数据, 如表 2 所示。

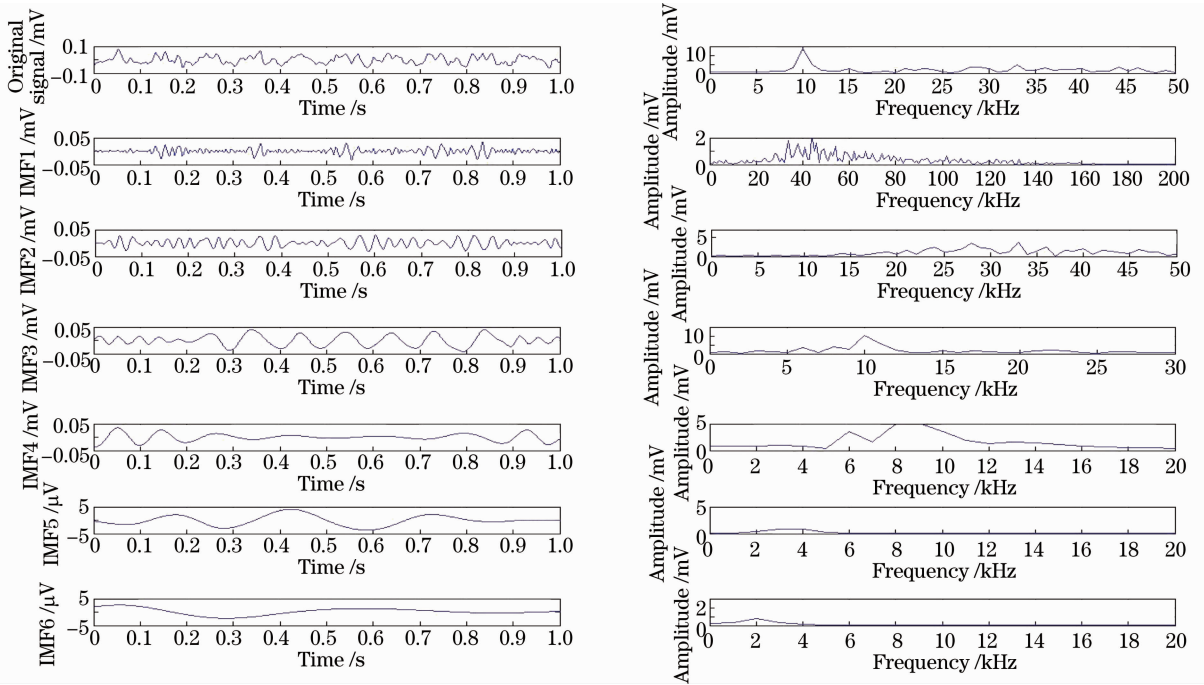


图3 甲烷体积分数为1.2863%时输出光强信号的EMD分量及其幅频图

Fig. 3 EMD components of output light intensity and its amplitude-frequency maps when the methane volume fraction is 1.2863%

表2 经IHHT滤波后的实验数据

Table 2 Experimental data after IHHT filtering

First harmonic amplitude $I_f/\mu\text{V}$	Second harmonic amplitude $I_{2f}/\mu\text{V}$	I_{2f}/I_f	Methane volume fraction / %
14.1820	1.696938035	0.119654353	0
14.1218	2.277371057	0.161266344	0.2144
14.3226	2.688221978	0.187690921	0.4288
14.0522	3.173804486	0.225858192	0.6431
14.0827	3.486599679	0.247580342	0.8575
14.1844	3.766104393	0.265510307	1.0719
14.1918	4.097238699	0.288704653	1.2863
14.1627	4.538703559	0.320468806	1.5006
14.2624	4.981145264	0.349250145	1.7150
14.3572	5.567386866	0.387776646	1.9294
14.1809	5.972084952	0.421135820	2.1438

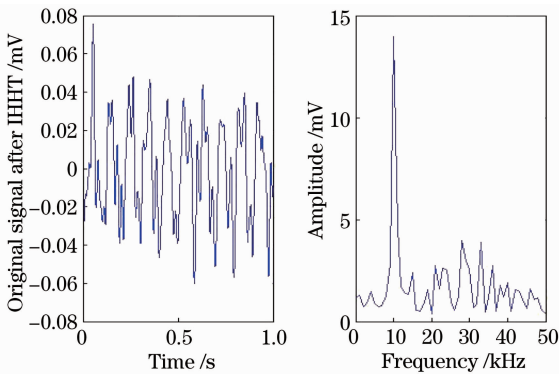


图4 经IHHT处理后输出光强的时域信号及其幅频图

Fig. 4 Time-domain signal and amplitude-frequency map of output light intensity after IHHT

由表2得甲烷体积分数 C 和一、二次谐波幅值比值 I_{2f}/I_f 之间的对应关系为： $C=0.074884 \cdot I_{2f}/I_f - 0.9533$ ， $R^2=0.9935$ ，其灵敏度系数为0.074884与理论值的相对误差为11.5%，即经IHHT处理后的实验数据误差由经FFT处理的26.1%降低到11.5%。图5为经过FFT与IHHT滤波处理实验数据所得气体浓度与一、二次谐波比值拟合曲线的对比图，由图5可以得出在甲烷体积分数较低时，IHHT的滤波效果较好，随着甲烷气体体积分数的增加，信号一、二次谐波信噪比增加，IHHT滤波效果有所下降。

综上所述，本文所设计的甲烷气体检测平台利用超窄带激光器作为光源，谐波检测原理，对所得实

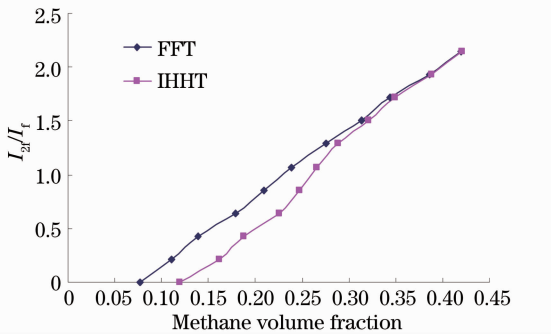


图5 使用IHHT和FFT去噪的 C 与 I_{2f}/I_1 拟合曲线对比图

Fig.5 Contrast diagram of C and I_{2f}/I_1

fitting curves between IHHT and FFT denoising

验数据做FFT提取一、二次谐波信号幅值时所得实验结果与理论值的误差为26.1%，而采用IHHT滤波处理之后的误差降低到11.5%。IHHT的滤波在甲烷体积分数较低时效果较好，随着甲烷气体体积分数的增加，信号一、二次谐波信号的信噪比增加，IHHT滤波效果有所下降。

5 结 论

选用超窄带激光器作为系统光源结合谐波检测原理及IHHT滤波算法构建高精度痕量气体检测系统平台以求更进一步提高痕量气体检测系统的精度。通过外加幅值0.1 V,频率10 kHz的信号调制输出中心波长为1650.959 nm的光源,理论计算得甲烷气体体积分数 C 与输出光强 $I(t)$ 一、二次谐波比值 I_{2f}/I_1 的相关系数为0.084639。基于高精度痕量气体检测系统平台进行甲烷气体检测实验,应用FFT处提取统输出光强信号的一、二次谐波幅值之比 I_{2f}/I_1 得其检测灵敏度系数0.062585与理论值的0.084639的相对误差为26.1%，误差主要来源于电路及光路噪声等。为降低检测平台的检测误差,采用IHHT对输出光强信号进行降噪处理,整理数据得检测灵敏度为0.074884,检测误差由26.1%降低到11.5%且甲烷气体体积分数越低,IHHT降噪的效果越好。

参 考 文 献

- Bruce G Elmgreen, Monica Rubio, Deidre A Hunter, *et al.*. Carbon monoxide in clouds at low metallic in the dwarf irregular galaxy WLM [J]. *Nature*, 2013, 495(7442): 487-489.
- Justin A Hogan, Joseph A Shaw, Rick L Lawrence, *et al.*. Detection of leaking CO₂ gas with vegetation reflectance measured by a low-cost multispectral imager [J]. *IEEE J Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(3): 699-706.
- Chen Xiao. Research on Multi-Parameters on-Line Detecting of

Oil-Immerse Power Transformer Condition Based on Optical Fiber Sensing Technology [M]. Shandong: Shandong University, 2012.

陈 霄. 基于光纤传感技术的油浸式电力变压器状态多参量在线检测研究[M]. 山东: 山东大学, 2012.

- Xiaodong Wang, Liang Huang, Wei Zhang, *et al.*. Development of a new type of testing platform for trace leakage detection of gas [C]. World Automation Congress (WAC), 2012. 1-4.
- Joel M Morris, Yi Xin. Results on gas detection and concentration estimation via mid-IR-based gas detection system analysis model [J]. *Sensors Journal IEEE*, 2012, 12(7): 2347-2354.
- B F Ventrudo, C Storey, J A Gupta, *et al.*. Temperature dependence of gas-detection sensitivity of InGaAsSb/AlGaAsSb distributed feedback lasers at 2396 nm [J]. *Electron Lett*, 2012, 48(2): 114-116.
- Yajuan Xue, Junxing Cao, Renfei Tian. A comparative study on hydrocarbon detection using three EMD-based time-frequency analysis methods [J]. *J Appl Geophys*, 2013, 89: 108-115.
- Chuanlong Xu, Cai Liang, Bin Zhou, *et al.*. HHT analysis of electrostatic fluctuation signals in dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal at high pressure [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(4): 1334-1344.
- He Junfeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. A denoising method for backscatter signal of laser ceilometer based on Hilbert-Huang transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0201001.
何俊峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于希尔伯特-黄变换的激光云高仪后向散射信号去噪方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0201001.
- Wang Chenxing, Da Feipeng. A novel adaptive windowed Fourier transform for phase retrieval in 3D shape measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0612005.
王辰星, 达飞鹏. 三维测量中一种新的自适应窗口傅里叶相位提取法[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0612005.
- Zhang Yiping. HHT Analysis of Blasting Vibration and Its Application [M]. Hunan: Zhongnan University, 2006.
张义平. 爆破震动信号的HHT分析与应用研究[M]. 湖南: 中南大学, 2006.
- Chen Xiao, Sui Qingmei, Miao Fei, *et al.*. Research of gas detection based on spectrum scanning technique of ultra-narrow-bandwidth laser [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(8): 2044-2048.
陈 霄, 隋青美, 苗 飞, 等. 基于超窄带激光器扫描技术的气体检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(8): 2044-2048.
- Chen Xiao, Sui Qingmei, Miao Fei, *et al.*. High sensitivity acetylene detection system based on cavity enhanced absorption technique [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 9-15.
陈 霄, 隋青美, 苗 飞, 等. 高灵敏度腔增强吸收式乙炔气体检测系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 9-15.
- Zhang Keke. Research on the Spectrum Absorptive Optical Gas Detection Theory and Technology [D]. Heilongjiang: Harbin University of Science and Technology, 2012.
张可可. 光谱吸收式光纤气体检测理论及技术研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨理工大学, 2012.
- N E Huang, Z Shen, S R Long, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proc R Soc Lond A*, 1998, 454(1971): 903-995.
- Phillp A Marth. Near-infrared diode laser spectroscopy in chemical process and environmental air monitoring [J]. *Chem Soc Rev*, 2002, 31(4): 201-210.

栏目编辑: 何卓铭