

doi: 10. 3788/gzxb20164504. 0423004

# 数字正交锁相放大器的研制及其在甲烷检测中的应用

刘慧芳<sup>1</sup>, 李彬<sup>1</sup>, 何启欣<sup>1</sup>, 党敬民<sup>1</sup>, 于红艳<sup>2</sup>, 郑传涛<sup>1</sup>, 王一丁<sup>1</sup>, 潘教青<sup>2</sup>

(1 吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130012)

(2 中国科学院半导体所 材料科学重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 利用可调谐二极管激光吸收光谱技术检测气体浓度时, 为了从红外传感信号中提取一次及二次谐波信号来表征气体浓度, 研发了一种基于数字信号处理器的数字正交锁相放大器. 介绍正交锁相放大原理, 设计谐波提取算法, 给出数字正交锁相放大器的软硬件实现方案. 利用配备的浓度为 1%~5% 的甲烷样品以及研制的锁相放大器, 开展气体实验. 实验结果显示, 当甲烷浓度为 5% 时, 在二次谐波对应的频率点处, 测得的系统信噪比为 34 dB, 表明设计的锁相放大器具有较好的性能; 测得的二次与一次谐波信号峰峰值的比值与气体浓度成线性关系; 考虑动态配气以及气体沿管道传输的时间, 检测系统的响应时间约为 96~98 s; 气体浓度为 20 000 ppm 时, 测试浓度波动范围为 -92 ppm ~ +118 ppm; 根据 Allan 方差预测的系统检测下限为 29.52 ppm. 与模拟锁相放大器以及商用锁相放大器相比, 本文研制的数字正交锁相放大器硬件结构简单、体积小、成本低、易于集成, 在红外气体检测领域具有很好的应用前景.

**关键词:** 光电子学; 红外光谱学; 气体检测仪; 红外吸收; 数字锁相放大器; 谐波分析; 数字信号处理器

中图分类号: TN21

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0423004-6

## Development of a Digital Orthogonal Lock-in Amplifier and Its Application in Methane Detection

LIU Hui-fang<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, HE Qi-xin<sup>1</sup>, DANG Jing-min<sup>1</sup>,

YU Hong-yan<sup>2</sup>, ZHENG Chuan-tao<sup>1</sup>, WANG Yi-ding<sup>1</sup>, PAN Jiao-qing<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics,

College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

(2 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** By using Digital Signal Processor (DSP), a digital lock-in amplifier was experimentally demonstrated for extracting  $1f$  and  $2f$  signals in gas detection based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS). The orthogonal lock-in amplifying theory was introduced, the algorithm for extracting harmonic signals was designed, and both hardware structure and DSP software were proposed. By using the prepared  $\text{CH}_4$  samples within the concentration range of 1%~5% and the developed lock-in amplifier, detailed experiments were carried out to derive the device's performances. As shown by experimental results, the system's signal-to-noise ratio at the frequency of  $2f$  signal is 34 dB under the  $\text{CH}_4$  concentration of 5%, which indicates good functions of the lock-in amplifier. The amplitude ratio between  $2f$  and  $1f$  signals is linear to gas concentration. Considering gas preparation and diffusion time,

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目 (Nos. 2013BAK06B04, 2014BAD08B03-4), 国家自然科学基金项目 (No. 61307124), 吉林省科技发展计划项目 (Nos. 20120707, 20140307014SF), 长春市科技发展计划项目 (Nos. 11GH01, 14KG022) 资助

**第一作者:** 刘慧芳 (1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为红外气体检测系统. Email: 18744023975@163.com

**导 师:** 王一丁 (1956-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为红外光电子学. Email: ydwang@jlu.edu.cn

**通讯作者:** 郑传涛 (1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电子器件与系统. Email: zhengchuantao@jlu.edu.cn

**收稿日期:** 2015-10-19; **录用日期:** 2015-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

the response time of the detection system is about 96 ~ 98 s. The concentration variation is -92 ppm ~ +118 ppm for the measured CH<sub>4</sub> sample with a concentration of 20000 ppm. The limit of detection obtained from the Allan variance is 29.52 ppm. Compared with analog and commercial lock-in amplifiers, the self-developed device shows great applications in infrared gas detection because of its simple structure, small size, low cost and easy integration.

**Key words:** Optoelectronics; Infrared spectroscopy; Gas detectors; Infrared absorption; Digital lock-in amplifier; Harmonic analysis; Digital signal processors

**OCIS Codes:** 230.3120; 230.4480; 120.1880; 120.2440; 040.3060; 140.2020

## 0 引言

近年来,检测有害气体<sup>[1-4]</sup>越来越受到人们关注.在众多的气体检测方法中,红外吸收光谱法应用广泛.可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术<sup>[5-7]</sup>是一种将激光应用于吸收光谱测量技术的光学和光谱学测量方法,它通过改变激光器中心工作波长使其扫过待测气体吸收峰.基于分布反馈激光器<sup>[8,9]</sup>(Distributed Feedback Laser, DFB)的 TDLAS 方法以其选择性强、灵敏度高、响应速度快等优点成为气体检测的常用方法.

在 TDLAS 检测技术中,改变 DFB 激光器的工作温度,使其发光波长稳定在气体吸收峰附近,再对激光器的驱动电流进行调节,使其发光波长扫过气体吸收峰.通常用正弦波对激光器的驱动电流进行调制.经过气体吸收后,二次谐波信号的幅值与被测气体浓度成正比,因此用锁相放大器提取谐波信号,就可以得到被测气体浓度.本课题组已研发的锁相放大器是基于模拟电路设计的,由于模拟器件在带宽、温度漂移、直流偏置及器件老化等方面的限制<sup>[10]</sup>,模拟锁相放大器在测量准确度、稳定性和抗噪声能力等方面均受到很大的影响.数字锁相放大器利用数字信号处理器<sup>[11-13]</sup>(Digital Signal Processor, DSP),将模拟信号转换到数字域进行处理,具有动态范围大、测量误差小、不受温度漂移和偏置影响等优势.随着数字信号处理技术的发展,数字锁相放大器已经逐渐取代模拟锁相放大器.市场上已有基于 DSP 设计的商用数字式双相锁相放大器,技术成熟,性能良好,如 Signal Recovery 公司的 7265,Stanford 的 SR830 等.但这些设备体积大,价格昂贵,不便于用于气体检测仪的集成.国内天津大学、山西大学等高校也在进行数字锁相放大器方面的研究,设计新型的数字锁相放大器结构、优化数字算法、扩展数字锁相放大器的应用范围是主要的研究方向<sup>[14-16]</sup>.本文自主设计了一种基于 DSP 的数字正交锁相放大器.给出正交锁相放大原理并且设计数字锁相放大器的硬件电路;设计数字正交锁相算法,并利用 MATLAB 对其功能进行仿真,提取谐波信号;最后,开展甲烷气体实验,测试数字锁相放大器的性能.

## 1 正交锁相放大器的研制

### 1.1 正交锁相放大原理

从差分输入信号中提取谐波信号,主要用到正交锁相放大原理,其原理框图如图 1 所示.

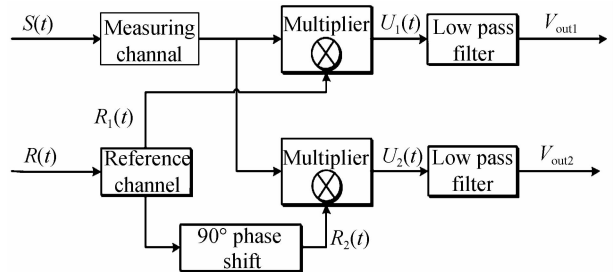


图 1 正交锁相放大原理框图

Fig. 1 Block diagram of orthogonal lock-in amplifier

设输入信号  $S(t) = A \sin(\omega t + \phi) + N(t)$ , 其中的正弦波分量  $A \sin(\omega t + \phi)$  表示输入信号中的被提取信号,  $N(t)$  表示输入信号中的噪声分量. 参考信号与被提取信号同频, 为  $R_1(t) = R(t) = B \sin \omega t$ , 将参考信号移相  $90^\circ$ , 得到正交参考信号  $R_2(t) = -B \cos \omega t$ . 经过相乘器之后的输出为

$$U_1(t) = S(t) \times R_1(t) = \frac{AB}{2} \cos \phi - \frac{AB}{2} \cos(2\omega t + \phi) + N(t) \times B \sin \omega t \quad (1)$$

$$U_2(t) = S(t) \times R_2(t) = -\frac{AB}{2} \sin \phi - \frac{AB}{2} \sin(2\omega t + \phi) - N(t) \times B \cos \omega t$$

将以上两路信号各经过一个低通滤波器, 得到的输出为

$$V_{out1} = \frac{AB}{2} \cos \phi \quad (2)$$

$$V_{out2} = -\frac{AB}{2} \sin \phi$$

由式(2)中两路输出信号的幅值就可以得到被提取信号的幅值和相位, 令  $B=1$ , 则

$$A = 2 \sqrt{(V_{out1})^2 + (V_{out2})^2}$$

$$\phi = \arctan\left(-\frac{V_{out2}}{V_{out1}}\right) \quad (3)$$

当参考信号的频率为  $2\omega$  时, 可提取输入信号中的二次谐波信号.

## 1.2 锁相放大器的硬件结构

本文所设计的数字正交锁相放大器的系统框图和实物图分别如图 2(a)、(b)所示。两个光电探测器模块(Photoelectric Detector 1&2)的输出信号经减法器电路(Subtractor)相减,得到差分输入信号。由 AD 芯片(AD7866)对差分输入信号采样,送入 DSP,同样送入 DSP 的还有由激光器驱动模块(Laser driving module)产生的、与差分信号同频的参考信号。在 DSP 中由数字算法实现正交锁相的运算,由按键(KEYS)选择提取一次或二次谐波信号,并将谐波信号通过液晶显示屏(LCD)显示或经串口(SCI)输出至计算机。

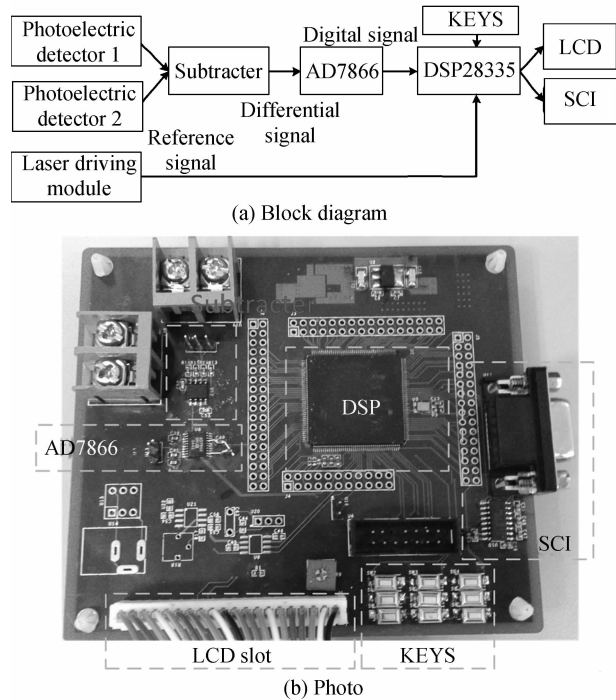


图 2 数字正交锁相放大器系统框图及实物图  
Fig.2 Block diagram and photo of digital orthogonal lock-in amplifier

## 1.3 谐波信号提取算法及功能仿真

该系统采用的激光器驱动信号为 10 Hz 的锯齿波信号调制 5 kHz 的正弦波信号。核心处理器为 DSP,型号为 TMS320F28335。采用方波信号代替正弦波信号作为参考信号,可以避免参考信号采样误差对谐波检测造成的影响。本系统中采用与差分信号同频的方波信号作为参考信号,提取一次谐波时,将其移相  $90^\circ$  得到正交参考信号;提取二次谐波时,将其二倍频,得到同相参考信号,再移相  $90^\circ$  得到正交参考信号。

### 1) 一次谐波提取算法

Step 1: 将参考信号输入到 DSP 的捕获单元,捕获其上升沿,作为开始对差分信号采样的标志。

Step 2: 捕获到参考信号的上升沿,开始采样,记这时采样点的状态为  $flag=1$ ,同时启动定时器,定时时间为正弦波周期的  $1/4$ 。定时时间到,响应定时器中

断,开始采样,并退出中断,记这时采样点的状态为  $flag=2$ 。重复该过程直到采样点状态记为  $flag=4$  时,关闭定时器。

Step 3: 重新等待捕获参考信号的上升沿,并重复 Step 2,直到完成对差分信号一个周期的采样。判断每个采样点的状态,根据状态求乘法信号  $multi\_1$  和  $multi\_2$ 。(sample 表示采样值)

如果  $flag=1$ ,

$$multi\_1 = sample * 1; multi\_2 = sample * (-1);$$

如果  $flag=2$ ,

$$multi\_1 = sample * 1; multi\_2 = sample * 1;$$

如果  $flag=3$ ,

$$multi\_1 = sample * (-1); multi\_2 = sample * 1;$$

如果  $flag=4$ ,

$$multi\_1 = sample * (-1); multi\_2 = sample * (-1)。$$

Step 4: 将一个正弦波周期内的乘法信号求和,得到两路一次谐波信号  $V_{out1}$  和  $V_{out2}$ 。按照式(3)对两路谐波信号做正交运算,得到一次谐波信号。

Step 5: 返回 Step 2。

### 2) 二次谐波提取算法

Step 1: 将参考信号输入到 DSP 的捕获单元,捕获其上升沿,作为开始对差分信号采样的标志。

Step 2: 捕获到参考信号的上升沿,开始采样,记这时采样点的状态为  $flag=1$ ,同时启动定时器,定时时间为正弦波周期的  $1/8$ 。定时时间到,响应定时器中断,开始采样,并退出中断,记这时采样点的状态为  $flag=2$ 。重复该过程直到采样点状态记为  $flag=4$  时,关闭定时器。

Step 3: 等待捕获参考信号的下降沿,捕获到后开始采样,采样点的状态与定时器的定时周期与 Step 2 相同。当  $flag=4$  时,关闭定时器。

Step 4: 重复步骤 2、3,直到完成对差分信号一个周期的采样。判断每个采样点的状态,根据状态求乘法信号  $multi\_1$  和  $multi\_2$ 。

Step 5: 将一个正弦波周期内的乘法信号求和,得到两路二次谐波信号  $V_{out1}$  和  $V_{out2}$ 。按照式(3)对两路谐波信号做正交运算,得到二次谐波信号。

Step 6: 返回 Step 2。

### 3) 提取谐波信号功能仿真

激光器驱动信号的锯齿波信号周期为 0.1 s,正弦波信号周期为 0.2 ms;激光器发光波长为 1 654 nm;气体吸收线型采用洛仑兹线型。得到仿真的差分信号如图 3(a)。仿真算法所用的两路正交的参考信号如图 3(b)中 Reference Signal 1&2(用来提取一次谐波,周期为 0.2 ms)和 3(c)中 Reference Signal 1&2(用来提取二次谐波,周期为 0.1 ms)。仿真得到的一次和二次谐波信号分别如图 3(d)、(e)。在做正交运算时,因谐波信

号的值有负值,需先将其抬高为正值,再按照式(3)计算.

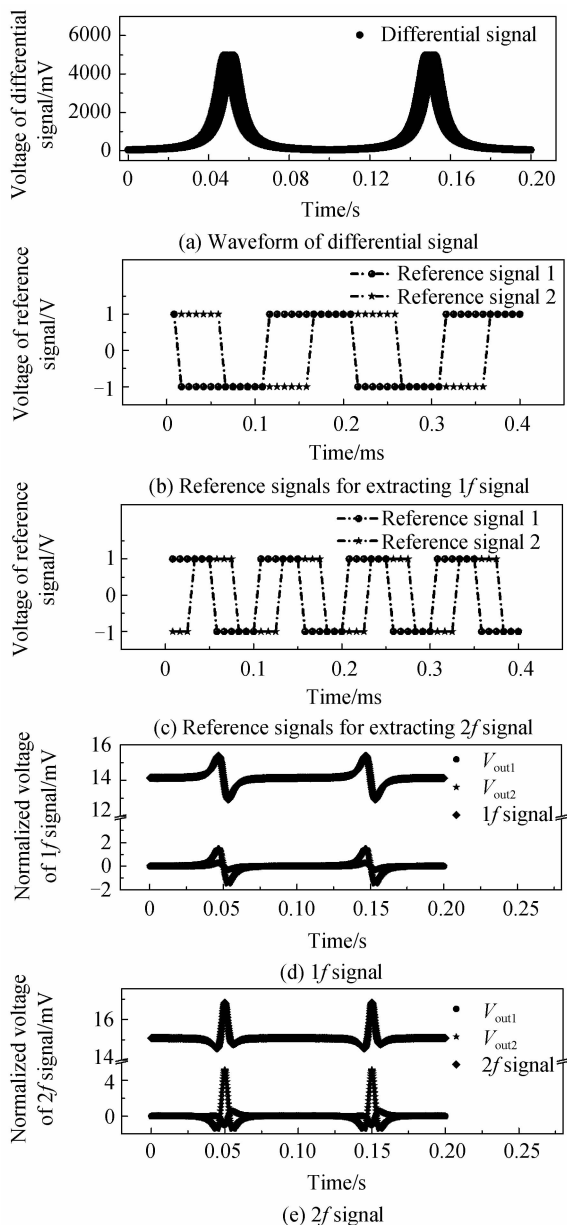


图3 谐波信号提取算法设计及仿真

Fig. 3 Design and simulation of harmonic signals extracting algorithm

## 2 甲烷检测实验

### 2.1 实验装置

实验中采用北京中科院半导体所提供的DFB激光器,中心波长为1654 nm.通过主控制器(MCU)控制激光器的温度控制电路、电流控制及波形调制电路,对激光器进行驱动.激光器的工作温度设定在17℃,驱动信号为10 Hz锯齿波和5 kHz正弦波的复合信号.输出光信号通过光纤进行传输,经过光分束器分为两路信号,一路经过气室,参与气体吸收,另一路经过光衰减器作为参考信号.气室内置了开放式光学探头,经

过一次反射,使有效光程达到40 cm.系统采用高灵敏度的钢镓砷(InGaAs)光电探测器,截止波长为2.2 μm,光敏面直径为1 mm,峰值响应度为1.1 A/W.经过减法电路对两路信号进行差分,即可利用设计的数字正交锁相放大器对差分信号提取一次和二次谐波信号.同时需要将激光器驱动模块输出的5 kHz方波信号输入到锁相放大器,作为提取谐波的参考信号.经过数字正交锁相算法运算之后,可通过按键选择将得到的谐波波形和数据显示在液晶显示屏(LCD)上或者通过串口传输至计算机.

### 2.2 谐波信号提取实验

采用AD芯片AD7866对差分信号采样,采样率为120 ksp/s.在主控芯片DSP中采用设计的数字正交锁相算法,对差分信号提取一次和二次谐波信号,如图4(a)、(b).其中,X轴表示采样时间,每个信号周期共250个采样点.可以看到,本文所研制的数字锁相放大器具有正常的谐波信号提取功能.

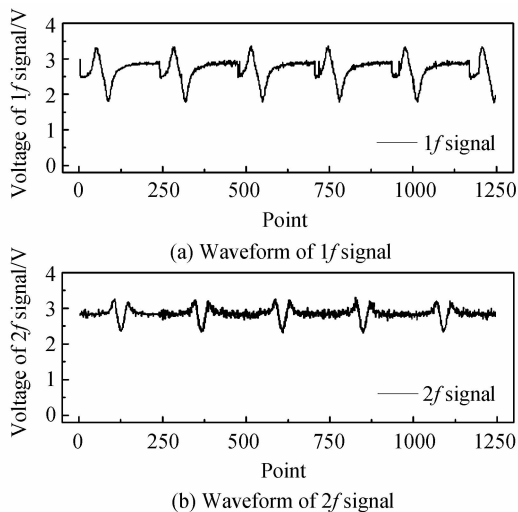
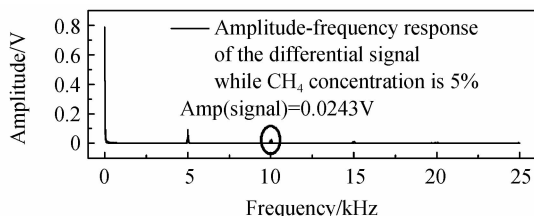


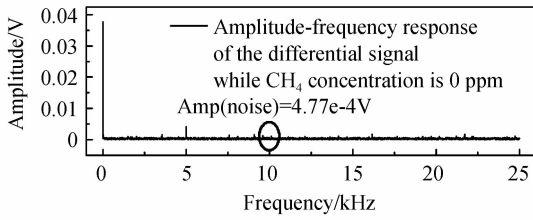
图4 一次、二次谐波信号

Fig. 4 Extracted 1f and 2f signals

为了计算检测系统的信噪比,分别对气体浓度为5%和0 ppm时的差分信号做频谱分析,得到的幅频响应分别如图5(a)和(b).激光器驱动信号的锯齿波信号频率为10 Hz,调制信号频率为5 kHz.从图5(a)、(b)看出,气体浓度为5%时,二次谐波信号(频率为10 kHz)的幅值为0.0243 V,气体浓度为0 ppm时,二次谐波信号(频率为10 kHz)的幅值为 $4.77 \times 10^{-4}$  V.由此,计算出检测系统的信噪比为34 dB.



(a) Amplitude-frequency response @ C=5%



(b) Amplitude-frequency response @ C=0 ppm

图5 不同浓度下,差分信号的幅频响应

Fig. 5 Amplitude-frequency response of the differential signal under two concentrations

### 2.3 气体标定实验

使用动态配气法,分别配制浓度为1%,2%,3%,4%,5%的五种甲烷样品,并采用研制的锁相放大器分别提取一次和二次谐波信号,如图6.由图6(a)、(b)可见,谐波信号的峰峰值正比于气体浓度,这与理论相符.由于一次谐波信号的峰峰值正比于初始光强,二次谐波信号的峰峰值正比于初始光强和气体浓度,使用 $2f/1f$ (峰峰值的比值)即可消除光强波动的影响.得到的峰峰值的比值随浓度的变化曲线如图6(c).根据图中结果,该比值与气体浓度呈现出良好的线性关系,拟合公式为 $Amp(2f)/Amp(1f)=0.02489 \cdot C+0.68099$ .

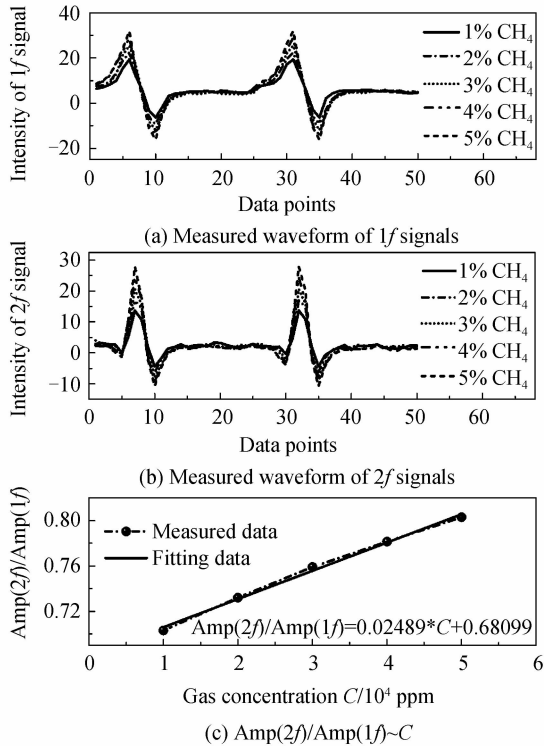


图6 不同甲烷浓度下,测得的一次和二次谐波信号波形及 $2f$ 与 $1f$ 信号峰峰值的比值曲线  
Fig. 6 Measured waveforms of  $1f$  and  $2f$  harmonic signals and the amplitude ratio between the  $2f$  and  $1f$  signals under different  $CH_4$  concentrations

### 2.4 响应时间测试

检测系统的响应时间取决于气室结构、流过气室的气体流速和处理器处理数据的时间.该系统所用气

室体积为1.5 L,气体流速选择3 slm(Standard Litre per Minute).DSP对10个周期的谐波幅值平均后输出,时间间隔约为2 s.为测试系统的响应时间,在0 ppm时,提取二次谐波信号,连续测试300 s后,通入浓度为1%的甲烷样品,待显示结果稳定后再保持300 s,接着通入浓度为5%的甲烷样品,待显示结果稳定后,保持300 s.实验结果如图7.从图中可以看出,系统的响应时间约为96~98 s.

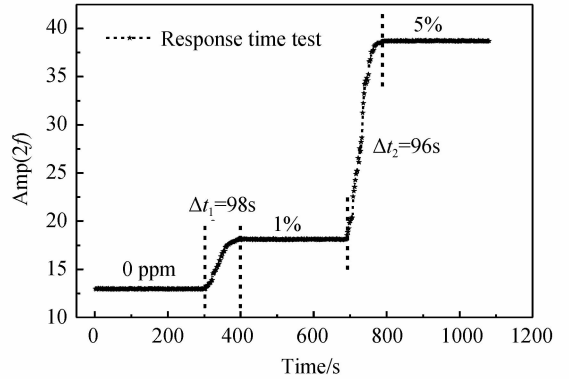


图7 响应时间  
Fig. 7 Response time

### 2.5 检测准确度及下限

当甲烷浓度为2%时,测试一次和二次谐波信号的幅值,并根据标定曲线计算出相应的浓度变化曲线.图8(a)为该浓度下,连续测试2000 s,测得气体浓度的波动范围.从图中可以看出,浓度波动范围为-92 ppm~+118 ppm.

在 $N_2$ 环境下,测试二次谐波信号的幅值,连续测得1200个点,时间间隔为2 s.计算得到Allan方差曲线,如图8(b).从图中可以看出,在积分时间为2 s时,系统的Allan方差为 $871.5001 \text{ ppm}^2$ ,预测此时系统检测下限为29.52 ppm.另外从曲线可以看出,当积分时间为112 s时,Allan方差最小,此时系统稳定性最好,预测系统检测下限可以达到4.94 ppm.

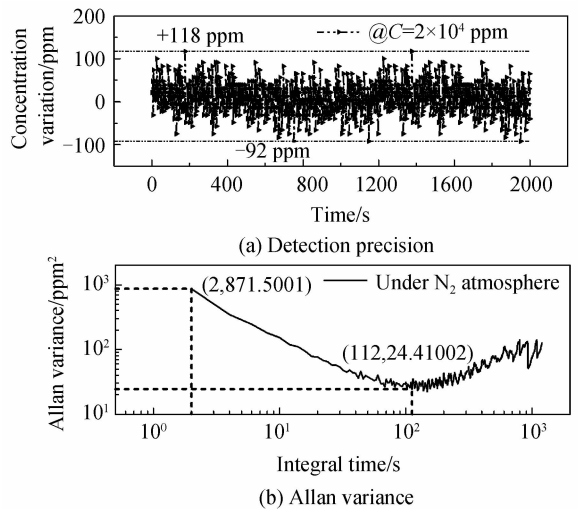


图8 检测准确度及阿伦方差  
Fig. 8 Detection precision and Allan variance

### 3 总结

设计了一种数字正交锁相放大器,用来从气体吸收信号中提取谐波信号,获得气体的浓度信息.甲烷气体实验结果表明,数字正交锁相放大器可以从差分信号中提取出谐波信号,且二次与一次谐波信号峰峰值的比值与气体浓度成线性关系;气体浓度为5%时,系统的信噪比为34 dB;检测系统的响应时间为96~98 s;气体浓度为2%时,测得浓度波动范围为-92 ppm~+118 ppm;根据Allan方差曲线预测系统检测下限为29.52 ppm.数字锁相放大器性能稳定,测量误差小,满足甲烷气体检测的要求.所设计的数字正交锁相放大器除了用于本文所提的基于TDLAS技术的气体检测系统以外,还可用于基于腔增强光谱、腔衰荡光谱等技术<sup>[17]</sup>的检测系统,实现在系统后端检测微弱信号的功能,进而实现仪器的小型化和便携化.

#### 参考文献

- [1] QIAO Xue-guang, WANG Jia, JIA Zhen-an, *et al.* Experiment research for optical fiber methane gas sensor[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, **20**(7): 851-854.  
乔学光, 王佳, 贾振安, 等. 光纤CH<sub>4</sub>气体传感器的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(7): 851-854.
- [2] YE Wei-lin, ZHENG Chuan-tao, YU Xin, *et al.* Design and performances of a mid-infrared CH<sub>4</sub> detection device with novel three-channel-based LS-FTF self-adaptive denoising structure[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, **155**(1): 37-45.
- [3] ZHENG Chuan-tao, YE Wei-lin, LI Guo-lin, *et al.* Performance enhancement of mid-infrared CH<sub>4</sub> detection sensor by optimizing an asymmetric ellipsoid gas-cell and reducing voltage-fluctuation: Theory, design and experiment[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, **160**(1): 389-398.
- [4] ZHANG Jing-chao, GUAN Li-jun, XIAO Chang-jiang, *et al.* Research on two optical path CH<sub>4</sub> sensor based on harmonic detection[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, **18**(12): 1442-1444.  
张景超, 管立君, 肖长江, 等. 基于谐波检测原理的双光路CH<sub>4</sub>检测研究[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(12): 1442-1444.
- [5] CAO Tian-shu. Lock-in amplifier of second harmonic in the TDLAS gas detection[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 1-60.  
曹天书. TDLAS气体检测中二次谐波的锁相放大器的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-60.
- [6] YE Wei-lin, ZHENG Chuan-tao, WANG Yi-ding. Experimental research on wavelet denoising in infrared humidity detection based on TDLAS technique[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, **24**(1): 104-111.  
叶玮琳, 郑传涛, 王一丁. 基于TDLAS的红外湿度检测中的小波去噪实验研究[J]. *光电子·激光*, 2013, **24**(1): 104-111.
- [7] TU Xing-hua, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, *et al.* 1.58 μm band of CO and CO<sub>2</sub> second harmonic detection with tunable diode laser absorption spectroscopy study [J].

*Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(7): 1190-1194.

涂兴华, 刘文清, 张玉钧, 等. CO和CO<sub>2</sub>的1.58 μm波段可调谐二极管激光吸收光谱的二次谐波检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(7): 1190-1194.

- [8] ZHAI Bing, HE Qi-xin, HUANG Jian-qiang, *et al.* Design and realization of harmonic signal orthogonal lock-in amplifier used in infrared gas detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **34**(11): 1125001.  
翟冰, 何启欣, 黄渐强, 等. 红外气体检测中谐波信号正交锁相放大器设计与实现[J]. *光子学报*, 2014, **34**(11): 1125001.
- [9] LI Bin, HE Qi-xin, FU Yang, *et al.* Development of near infrared distributed feedback laser temperature control system for CO detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(s2): s214002.  
李彬, 何启欣, 付洋, 等. 用于CO气体检测的近红外分布式反馈激光器温控系统[J]. *光学学报*, 2014, **34**(s2): s214002.
- [10] ANDREA D M, GIUSEPPE F, ARNALDO D A, *et al.* A fully-analog lock-in amplifier with automatic phase alignment for accurate measurements of ppb gas concentrations[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(5): 1377-1383.
- [11] LIANG Lei, CONG Meng-long, YU Hai, *et al.* A DSP lock-in amplifier based on Simulink [C]. 2nd International Conference on Information Science and Engineering, ICISE2010, 2010: 6379-6382.
- [12] YU Xin, GAO Zong-li, SONG Nan, *et al.* Design and experiment of pocket infrared gas detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0104001.  
于鑫, 高宗丽, 宋楠, 等. 袖珍式红外瓦斯检测仪的设计与实验[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 0104001.
- [13] WANG Ren-bao, FENG Hong-yan. Laser absorption spectrometer methane detection system based on digital signal processor[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **21**(1): 38-41.  
王仁宝, 冯红艳. 基于数字信号处理器的激光光谱瓦斯监测系统[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(1): 38-41.
- [14] LI Gang, ZHANG Li-jun, LIN Ling. Design of a new digital lock-in amplifier and its optimization algorithm[J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, **41**(4): 429-432.  
李刚, 张丽君, 林凌. 一种新型数字锁相放大器的设计及其优化算法[J]. *天津大学学报*, 2008, **41**(4): 429-432.
- [15] LI Gang, ZHOU Mei, HE Feng, *et al.* An optimization algorithm based on computation structure of correlation in digital lock-in detection [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, **34**(3): 744-748.  
李刚, 周梅, 何峰, 等. 基于数字锁相相关计算结构的优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, **34**(3): 744-748.
- [16] DONG Lei, MA Wei-guang, YIN Wang-bao, *et al.* Experimental study on harmonic detection of methane by use of a digital lock-in amplifier[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(3): 473-476.  
董磊, 马维光, 尹王保, 等. 利用数字锁相放大器对甲烷气体进行谐波探测的实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(3): 473-476.
- [17] WU Hong-peng, DONG Lei, ZHENG Hua-dan, *et al.* Enhanced near-infrared QEPAS sensor for sub-ppm level H<sub>2</sub>S detection by means of a fiber amplified 1582 nm DFB laser [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, **221**: 666-672.

**Foundation item:** The National Key Technology R&D Program of China (Nos. 2013BAK06B04, 2014BAD08B03-4), the National Natural Science Foundation of China (No. 61307124), the Science and Technology Department of Jilin Province of China (Nos. 20120707 and 20140307014SF), the Changchun Municipal Science and Technology Bureau (Nos. 11GH01, 14KG022)