

doi:10.3788/gzxb20144311.1125001

# 红外气体检测中谐波信号正交锁相放大器设计与实现

翟冰,何启欣,黄渐强,郑传涛,王一丁

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

**摘 要:**基于可调谐激光光谱吸收法的红外气体检测,为了从差分信号中有效提取出一次和二次谐波信号,研发了一种谐波信号正交锁相放大器.采用正交锁相放大及谐波检测原理,利用 Simulink 软件平台构建了模拟实验系统,对其功能做了仿真和验证.采用数字信号处理器作为核心控制器,设计并制作出了谐波信号锁相放大器的系统实物,它主要由 90°移相器、两路模拟乘法器、两路低通滤波器、差分信号放大器、模数转换器等构成.实验中,首先利用幅度可调的标准正弦信号作为待测信号,对锁相放大器的输出信号幅度与标准正弦信号的幅度做实验测量与对比,二者线性拟合优度高达 0.999 94,最大误差小于 4%,具有良好线性度;其次,将模拟吸收产生的差分信号作为待测信号,利用基频方波和二倍频方波分别作为参考信号,提取谐波信号,因二次谐波信号微弱易受噪音干扰,其误差在 5%以内,一次谐波最大误差小于 3.5%.系统具有良好的稳定性和性价比,在红外气体检测中具有较好的应用前景.

**关键词:**光电检测;红外光谱学;气体检测;红外吸收;模拟实验系统;正交锁相放大器

中图分类号:TN21

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)11-1125001-6

## Design and Realization of Harmonic Signal Orthogonal Lock-in Amplifier Used in Infrared Gas Detection

ZHAI Bing, HE Qi-xin, HUANG Jian-qiang, ZHENG Chuan-tao, WANG Yi-ding

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** In order to efficiently extract the first and second harmonic signals from the differential signal in infrared gas detection based on tunable laser absorption spectroscopy, an orthogonal phase lock-in amplifier was developed. According to the principle of orthogonal lock-in amplifier and harmonic detection, the simulative experiment system based on Simulink platform was set up, and its functions were simulated and verified. The hardware system is designed and developed by adopting a digital signal processor as its core controller, which is mainly composed of a 90° phase shifter, two analog multiplier, two low pass filter, a differential signal amplifier and an AD converter. In experiment, firstly, by using standard sine-wave signals with tunable amplitudes as the signals to be measured, the amplitudes of the output signals from the fabricated lock-in amplifier and the standard amplitudes are both tested and compared. Good linear relationship is found between them, the linear fitting degree is as high as 0.999 94, and the maximum error is less than 4%. Secondly, using the simulated differential signal with gas absorption as the signal to be measured, and by using fundamental square wave signal and frequency-doubled square wave signals as reference signals, both first and second harmonic signal are extracted.

**基金项目:**国家科技支撑计划项目(No. 2013BAK06B04)、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, 201101036)和长春市国际合作项目(No. 11GH01)资助

**第一作者:**翟冰(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为红外气体检测仪. Email:bing137090227@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:wangyiding48@yahoo.com.cn

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

**收稿日期:**2014-03-11; **录用日期:**2014-04-29

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

Because the second harmonic signal is too weak and easy to be polluted by noises, its detection error is less than 5%, and that of the first harmonic signal is less than 3.5%. The proposed system has good applicative prospects in infrared gas detection due to good stability and high price ratio.

**Key words:** Optoelectronic detection; Infrared spectroscopy; Gas detection; Infrared absorption; Simulative experimental system; Orthogonal phase lock-in amplifier

**OCIS Codes:** 250.0040; 230.4480; 040.1880; 040.3060; 260.3060

## 0 引言

近年来,随着红外气体检测技术及半导体工艺技术飞速发展,分布反馈式(Distributed Feedback, DFB)半导体激光器<sup>[1-2]</sup>性能得到很大提升,因其对气体的选择性好而广泛应用于气体浓度检测中.可调谐激光二极管光谱吸收(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术是通过改变激光器中心工作波长使其扫过待测气体吸收峰.在现有的检测方法中,除直接光谱吸收法<sup>[3-5]</sup>和光声光谱法<sup>[6]</sup>外,基于DFB激光器的TDLAS方法以其选择性强、灵敏度高、速度快等优点成为气体检测的常用方法<sup>[7-10]</sup>.

在利用TDLAS对气体的检测中,二次谐波信号(相对于激光器调制信号频率)幅度与待测气体的浓度成正比,因此,有效提取出二次谐波信号成为气体浓度检测的关键.而提取该信号的核心技术就是锁相放大技术<sup>[11-14]</sup>.国外比较成熟的锁相放大器有美国斯坦福公司研制的SR830锁相放大器(市售三万元),日本NFCORP公司的LI5630/LI5640型锁相放大器,法国的TE9822C型锁相放大器等.南京大学是国内较早开始对锁相放大器进行研究的科研机构,他们开发出的HB-2311型双相锁定放大器在国内高校和科研机构受到广泛应用及好评.近年来,中国科学院物理研究所研制出FS-1,WS-1型锁相放大器,信息产业部电子第四十一研究所研制出AV3891型锁相放大器,此外,安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室的刘文清等人,燕山大学电气工程学院的张景超、王玉田等人在利用可调谐二极管激光器结合谐波检测技术方面做了大量工作.然而大部分商业化产品虽然性能优越,但是其体积庞大、价格昂贵,难以用于便携式仪器中.鉴于此,本文利用正交锁相放大技术,研制了一种便携式可用于红外气体检测中二次谐波信号提取的正交锁相放大器.首先给出正交锁相放大的原理;其次,利用Simulink平台验证了所设计方案在提取一次、二次谐波方面的可行性;最后,以DSP为核心处理器,对锁相放大系统的软件和硬件做了集成,并开展了一次和二次谐波的提取实验.

## 1 系统原理

### 1.1 谐波检测原理

激光器的线宽很窄,通过改变温度或者驱动电流

都能实现对发射波长的改变.在实验中,首先进行粗调,即通过调整激光器的工作温度使激光频率保持在吸收跃迁的中心位置附近,然后,调节驱动激光器的电流再对波长进行进一步精细调节,即细调,粗调和细调的目的是使激光器发射的中心波长尽可能与吸收谱线中心对准.采用正弦波信号驱动DFB激光器,相应的光强和光源频率也受到调制.

$$I_0(v, t) = I_0(v) [1 + n \sin(\omega t)] \quad (1)$$

式中  $v = v_0 + v_f \sin(\omega t)$ ,  $n$  为光强调制系数,  $v_0$  为光强未经调制的中心频率,  $v_f$  为频率调制幅度,  $\omega$  为调制角频率.当激光器输出光通过待测气体时,其强度将变为

$$I(v, t) = I_0(v, t) \exp(-\alpha(v)LC) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),当同时满足  $-\alpha(v)LC \ll 1$  和  $n \ll 1$  时,可做如下近似

$$I(v, t) = I_0 [1 + n \sin \omega t] \exp[-\alpha(v_0 + v_f \sin \omega t)LC] \approx I_0 [(1 + n \sin \omega t) - \alpha(v_0 + v_f \sin \omega t)LC] \quad (3)$$

对气体吸收线型采用 Lorentz 线型做近似,即

$$\alpha(v) = \frac{\alpha_0}{1 + \left(\frac{v - v_c}{\Delta v}\right)^2} \quad (4)$$

式中  $v_c$  为吸收峰的中心频率,  $\alpha_0$  为吸收峰处的吸收系数,  $\Delta v$  为吸收线半宽度.精确控制激光器的工作温度,即可将光源输出的中心频率锁定在气体吸收峰(即  $v_0 = v_c$ ).此时,将式(4)代入式(3)中,得到

$$I(v, t) = I_0 \left[ 1 + n \sin \omega t - \frac{\alpha_0 LC}{1 + m^2 \sin^2 \omega t} \right] \quad (5)$$

式中  $m = v_f / \Delta v$ .将式(5)展开成傅里叶级数,其一次谐波( $f$ )和二次谐波( $2f$ )的系数为

$$I_f = nI_0, I_{2f} = -k\alpha_0 LCI_0 \quad (6)$$

式中  $k = \frac{2[2 + m^2 - 2(1 + m^2)^{0.5}]}{m^2(1 + m^2)^{0.5}}$ ,其大小与  $m$  有关,

$dk/dm = 0$  时,二次谐波幅度达到最大值,此时  $m \approx 2.2, k = 3.43$ .从式(6)可以看到,一次谐波主要由光强调制引起,正比于光源平均功率;二次谐波与初始光强及气体浓度有关,提取二次谐波信号就可以得到气体浓度信息;利用二次谐波信号幅度与一次谐波信号幅度做比值处理,可以同时消除激光器初始光强波动的影响,进而提高稳定性.当激光器的调制频率过低时,待测信号频率比较低,此时系统的  $1/f$  噪音也较大,给检测带来困难;从检测系统设计角度出发,选择  $1 \text{ k} \sim 10 \text{ kHz}$  的调制频率更有利于正交锁相放大器的设计和信号的采样及处理.本文设计实验测试中,取激光器

的波长调制频率为 5 kHz.

## 1.2 相关检测与正交锁相放大原理

从待测信号中提取谐波信号主要采用相关检测及正交锁相放大原理. 相关检测器的原理如图 1(a)所示. 设输入信号为  $S(t) = A\sin(\omega_1 t) + N(t)$ , 参考信号为  $R(t) = B\sin(\omega_2 t + \varphi)$ ,  $N(t)$  为噪音且与信号不相关,  $A$  和  $B$  分别为两路信号的幅值. 两路信号经相敏检波后的输出信号为

$$U_0 = S(t) \times R(t) = \frac{AB}{2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \varphi] - \frac{AB}{2} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi] + N(t)B\sin(\omega_2 t + \varphi) \quad (7)$$

经低通滤波,  $V_{\text{out}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S(t)R(t)dt$ . 因为噪音与参考信号不相关, 则式(7)第三项积分为零; 第二项为高频分量, 积分也为零; 当  $\omega_1 = \omega_2$  时, 可得直流分量  $V_{\text{out}} = \frac{AB}{2} \cos \varphi$ . 当参考信号与输入信号同相时, 可得最大直流输出, 且  $V_{\text{out}}$  正比于两信号幅值.

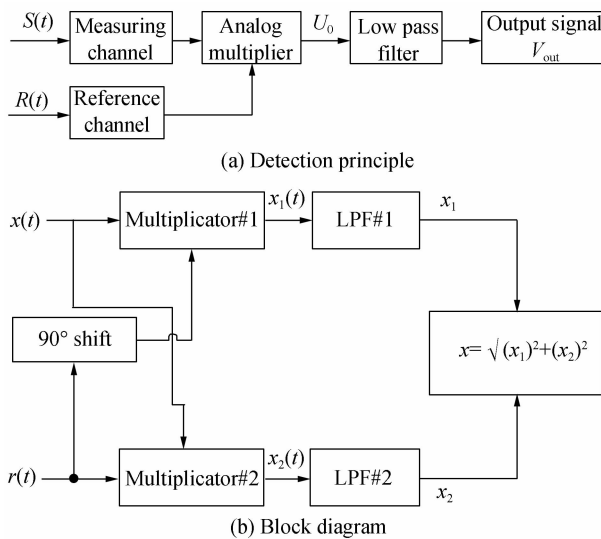


图 1 相关检测及正交锁相放大原理  
Fig. 1 Block diagram of principle of correlation detection and orthogonal lock-in amplifier

双通道正交锁相放大的原理如图 1(b). 对于信号通道, 待测信号通过模拟乘法器 #1 与参考信号移相  $90^\circ$  后的信号相乘, 得到输出信号  $x_1(t)$ , 表示为

$$x_1(t) = \frac{X_0 R}{2} \left\{ \cos \left[ 2\omega_0 t + \varphi_0 + \zeta + \frac{\pi}{2} \right] + \sin(\varphi_0 - \zeta) \right\} \quad (8)$$

对于参考通道, 待测信号通过模拟乘法器 #2 与参考信号相乘, 得到输出信号  $x_2(t)$ , 表示为

$$x_2(t) = \frac{X_0 R}{2} \left\{ \cos \left[ 2\omega_0 t + \varphi_0 + \zeta \right] + \cos(\varphi_0 - \zeta) \right\} \quad (9)$$

对模拟乘法器的输出信号进行低通滤波, 可得到二者的平均信号为

$$\bar{x}_1(t) \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{X_0 R}{2} \left\{ \cos \left[ 2\omega_0 t + \varphi_0 + \zeta + \frac{\pi}{2} \right] + \sin(\varphi_0 - \zeta) \right\} dt = \frac{X_0 R}{2} \sin(\varphi_0 - \zeta) = \bar{x}_1 \quad (10)$$

$$\bar{x}_2(t) \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{X_0 R}{2} \left\{ \cos \left[ 2\omega_0 t + \varphi_0 + \zeta \right] + \cos(\varphi_0 - \zeta) \right\} dt = \frac{X_0 R}{2} \cos(\varphi_0 - \zeta) = \bar{x}_2 \quad (11)$$

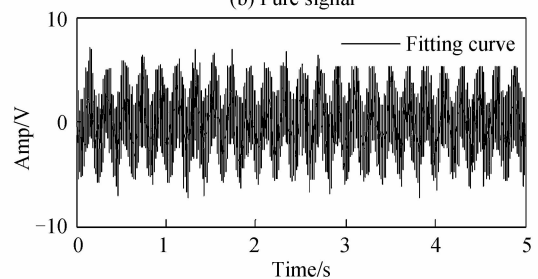
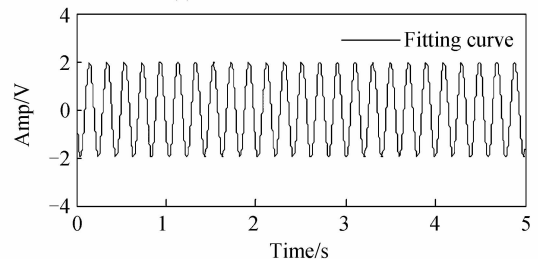
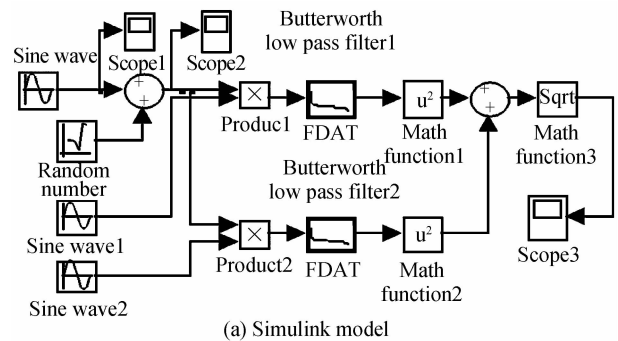
对比式(10)和式(11), 对两个均值信号平方求和后再求均方根可得

$$\bar{x} = \sqrt{(\bar{x}_1)^2 + (\bar{x}_2)^2} = \left\{ \left[ \frac{X_0 R}{2} \cos(\varphi_0 - \zeta) \right]^2 + \left[ \frac{X_0 R}{2} \sin(\varphi_0 - \zeta) \right]^2 \right\}^{1/2} = \frac{R}{2} X_0 \quad (12)$$

## 2 系统仿真设计

### 2.1 正交锁相模块设计及仿真

根据正交锁相原理, 利用 Simulink 软件建立了正交锁相放大系统的模型, 如图 2(a)所示, 其中低通滤波器为 8 阶巴特沃斯滤波器. 对各个模块及仿真求解器的参量进行设置: 采样时间 0.1 ms (采样频率 10 kHz)、待测信号的频率为 100 Hz、幅值为 2 V, 如图 2(b)所示. 图 2(c)中, 在待测信号中按信噪比 1:1 叠



(c) Polluted signal

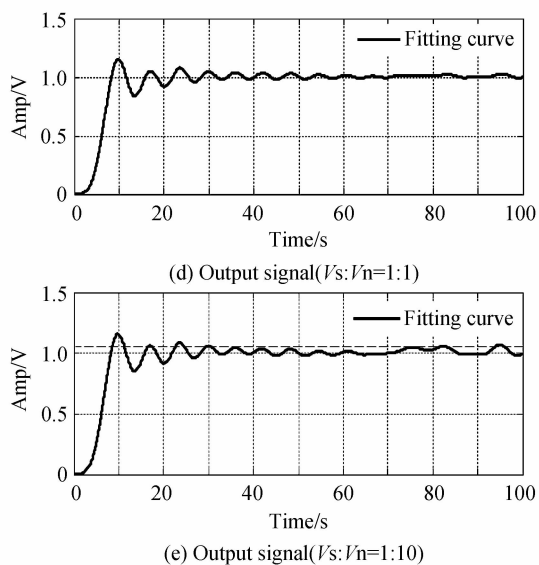


图2 单频信号的仿真与分析

Fig. 2 Simulation and analysis of single frequency signal  
加幅值为 2V 的随机噪音信号,利用所建立的仿真系统,提取出的待测信号幅度如图 2(d)所示,约为 1 V,这与理论分析结果一致,取不同信噪比进行试验,当信噪比低到 1:10 时,提取信号幅值出现较大误差为 7%,如图 2(e)所示,该系统具有很好的抑制噪音效果。

### 2.2 谐波信号提取模块设计及仿真

首先,利用 Simulink 软件建立了基于正交锁相放大的二次谐波信号提取系统,如图 3(a)。其次,利用正交锁相原理来提取一次及二次谐波信号时,将示波器测得的差分信号导入 Simulink 平台中作为输入信号,如图 3(b)。取参考信号频率为 5 kHz 及 10 kHz,提取差分信号中的一次谐波及二次谐波,得到的一次谐波信号如图 3(c),二次谐波信号如图 3(d)。由于具有时间收敛性,在提取谐波幅值时存在一定的偏移量,但并

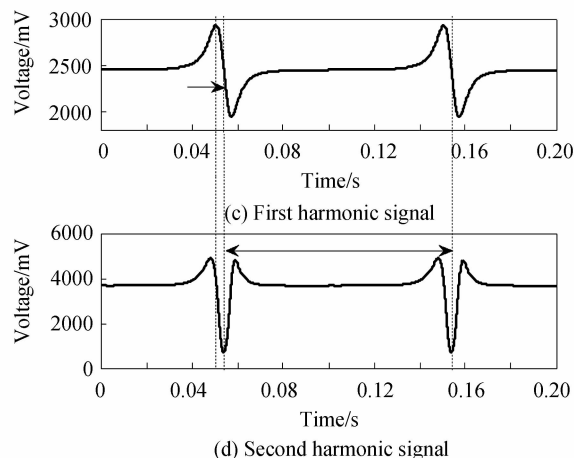
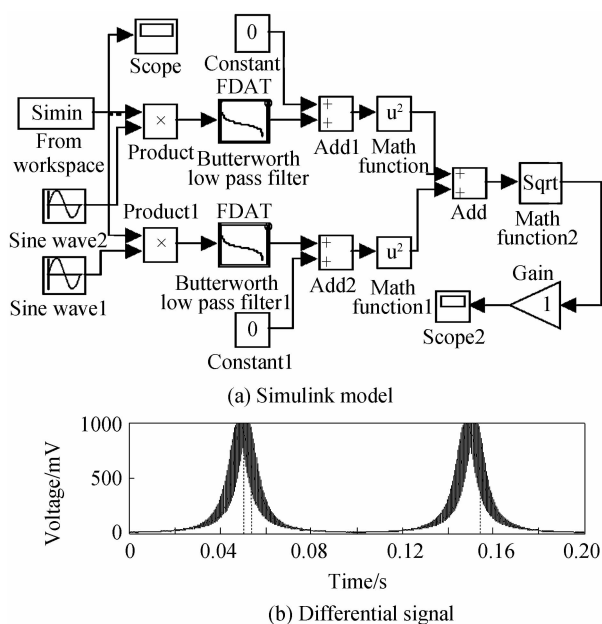


图3 谐波信号的仿真与分析

Fig. 3 Simulation and analysis of harmonic signal

不影响信号周期性。所构建的谐波信号放大系统在功能上是可行的。

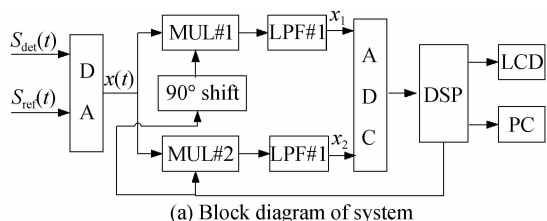
## 3 谐波锁相放大器研制与实验测试

### 3.1 锁相放大器研制

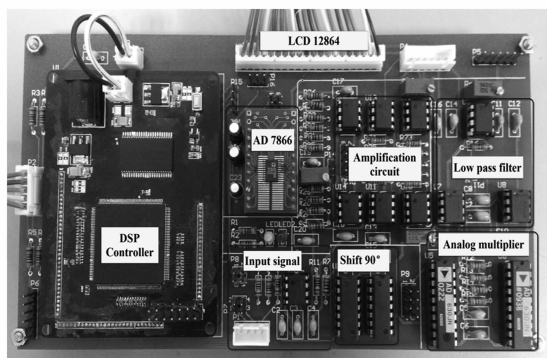
该系统主要设计指标为:对测量信号与幅度可调的标准正弦信号进行曲线拟合,线性度达到 0.99 以上,对 0~3.3V 的差分输入信号可以成功提取谐波信号,误差在 5% 以内。

按照上述指标及正交锁相放大原理,设计的谐波信号正交锁相放大器系统框图如图 4(a)。系统包含的各功能模块及工作过程如下:1) 信号差分及放大模块(DA):高模块的主要芯片为 OP07,其特点是低噪音、低失调电压,用于完成实际气体检测中两路探测器所输出信号(图示  $S_{ref}$  和  $S_{det}$ )的差分及放大功能。2)  $90^\circ$ 移相模块( $90^\circ$ shift):由 D 触发器构成,用于对 DSP 模块产生的 10 kHz 方波信号进行移相,从而得到与  $r(t)$  正交的信号  $r'(t)$ 。3) 乘法器模块(MUL # 1 和 MUL # 2):主芯片型号为 AD630,它具有较高的稳定性和准确度,用于对差分信号  $x(t)$  与两路相互正交的参考信号( $r(t)$  和  $r'(t)$ )分别做乘法处理。由于两个乘法器模块所用的参考信号相互正交,这确保了所设计锁相放大器的“正交性”。4) 低通滤波模块(LPF # 1 和 LPF # 2):主芯片型号为 MAX291,它是八阶 Butterworth 型有源低通滤波器,可通过外接方波或改变外置电容的方法来设置其截止频率(范围 0.1 Hz~25 kHz)。主要作用是对两乘法器模块输出的信号进行滤波,得到相互正交的  $\bar{x}_1$  和  $\bar{x}_2$  直流分量。5) 模数转换模块(ADC):型号为 AD7866,其内置两个采样保持和转换通道,在 DSP 模块的控制下,可对  $\bar{x}_1$  和  $\bar{x}_2$  做同步采样处理。6) DSP 主控模块:型号为 TMS320F28335,主要作用是:产生参考信号  $r(t)$ ;完成对采集到的  $\bar{x}_1$  和  $\bar{x}_2$  做平方、求和、开根号等处理(即  $\bar{x} = \sqrt{(\bar{x}_1)^2 + (\bar{x}_2)^2}$ );对

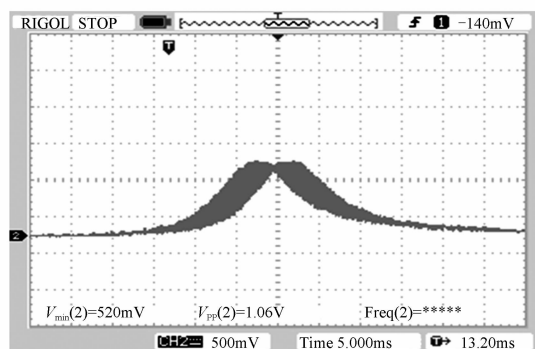
采集的结果做存储和显示处理;也可将处理结果直接发送至上位机观测.实验研制的正交锁相放大系统如图4(b).



(a) Block diagram of system



(b) Fabricated lock-in amplifier



(c) Measured differential signal

图4 锁相放大电路及相关信号

Fig. 4 Orthogonal lock-in amplifier and related signals

### 3.2 正交锁相放大系统的基本性能测试

为了测试所研制的锁相放大系统的基本性能,实验中分别对频率为1.0、2.5、5、7.5和10 kHz的不同幅度的信号进行了幅值提取,实验结果如表1.因为在电路后端对输出信号进行二倍放大,所以锁相输出信号理论上应与输入信号幅值相等.表中可见,正交锁相放大的输出信号与待测标准信号的真实幅值差异很

小,最大相对误差小于4%.对10 kHz的测量数据与标准信号进行曲线拟合,线性拟合曲线为  $V_{out} = -1.8 + 1.0012V_{in}$  通过  $R^2 = \frac{\sum(V_{in} - \bar{V})^2}{\sum(V_{out} - \bar{V})^2}$  计算其线性拟合优度,  $R$  越接近于1,表征自变量与因变量线性关系越好.本系统线性优度高达0.999 94.

表1 正交锁相放大器基本性能的实验测试结果

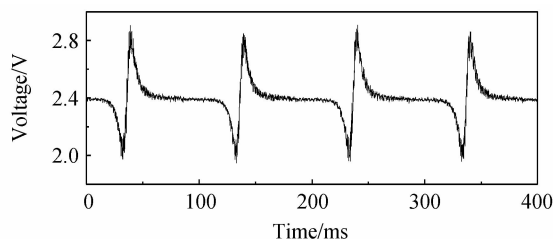
Table 1 Experimental results of the orthogonal lock-in amplifier

Input /mV	Output signal/mV				
	$f=1.0k$	$f=2.5k$	$f=5k$	$f=7.5k$	$f=10k$
50	51.4	51.6	49.5	51.9	49.7
100	102.7	103.4	98.32	103.8	100.8
150	148.6	145.9	148.2	152.5	146.7
200	197.1	196.4	199.6	199.8	197.6
250	250.4	246.2	249.3	245.6	246.7
300	295.3	300.2	301.1	297.4	297.7
350	346.7	349.3	349.1	347.0	347.9
400	399.5	395.1	400.1	401.6	397.5
450	447.5	448.7	452.0	448.7	449.7
500	496.9	498.9	500.7	498.3	501.0
Max error	2.8%	3.4%	1.32%	3.8%	2.2%

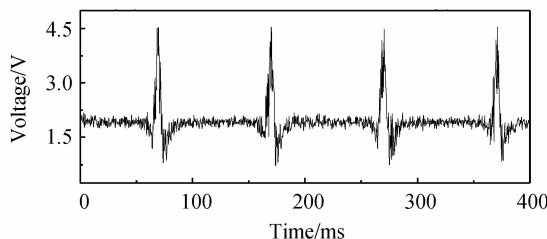
### 3.3 谐波信号的提取实验及结果分析

用MATLAB进行数学建模,模拟经过气体吸收后的波形信号,然后将采样点以数组的形式存储起来,运用ARM将数据经过D/A转换后将波形发送出来,模拟经气体吸收后信号,如图4(c),同时产生和模拟的激光器调制正弦信号同频同相的5 kHz方波信号,然后输入锁相放大器进行实验,经过AD采样和F28335处理后得出实验数据.

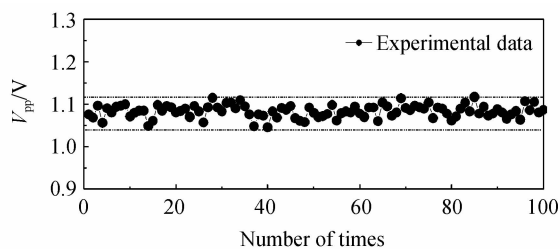
设定参考信号频率为5k,提取出的一次谐波信号如图5(a).设定参考信号频率为10 kHz,提取出的二次谐波信号如图5(b).可以看出,所提取出的谐波信号波形与图3(c)、(d)的结果基本吻合,这证实了所制作锁相放大器功能的正确性.连续开展实验,对一次及二次谐波信号峰峰值进行多次提取,测试结果如图5(c)和(d)所示,因二次谐波幅度小易受噪音干扰,除个别突变点外,其平均误差在5%以内,一次谐波测量误差在3.5%以内,这表明系统具有良好的稳定性.



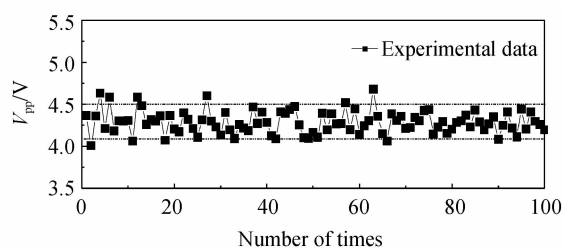
(a) Measured first harmonic signal



(b) Measured second harmonic signal



(c) Measured error of first harmonic signal



(d) Measured error of second harmonic signal

图5 谐波信号的测量与误差分析

Fig. 5 Measured harmonic signals and error analysis

## 4 总结

本文针对红外检测系统中的 TDLAS 技术设计了一款正交锁相放大系统,用来提取二次谐波信号.并结合 Simulink 平台搭建了整个系统,进行可行性分析,成功提取出谐波信号.通过硬件电路搭建整个系统,采用 DSP 控制器将系统硬件与软件相集成.实验结果表明系统具有良好的稳定性,较小的误差,平均误差在 5% 以下,满足红外气体检测的要求.

### 参考文献

- [1] CHEN Gang, ZHANG Fang-zheng, PAN Shi-long. An investigation on the multi-signal direct modulation of a reconstruction-equivalent-chirp distributed feedback laser diode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1-7.  
陈刚,张方正,潘时龙.一种新型分布反馈半导体激光器的多信号直调性能研究[J].光子学报,2013,**42**(9): 1-7.
- [2] QIAO Xue-guang, WANG Jia, JIA Zhen-an. 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.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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] YU Xin, GAO Zong-li, SONG Nan, et al. Design and experiment of pocket infrared gas detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 1-6.  
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):1-6.
- [6] KOSKINEN V, FONSEN J, KAUPPINEN J, et al. Extremely sensitive trace gas analysis with modern photoacoustic spectroscopy [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2006, **42**(2): 239-242.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] JIAO Bin-liang, Li Su-jing. Lock-in amplifier simulation analysis and correlation detection[J]. *Electronic Technology*, 2008, **45**(1): 110-112.  
焦斌亮,李素静.锁相放大器及其相关检测的仿真分析[J].电子技术,2008,**45**(1): 110-112.
- [12] LIANG L, CONG M, YU H, et al. A DSP lock-in amplifier based on Simulink[C]. 2010 2nd International Conference on Information Science and Engineering (ICISE), 2010, 6379-6382.
- [13] DE M A, FERRI G, D'AMICO A, et al. A fully-analog lock-in amplifier with automatic phase alignment for accurate measurements of ppb gas concentrations[J]. *Sensors Journal*, 2012, **12**(5): 1377-1383.
- [14] CAO Tian-shu. Lock-in amplifier of second harmonic in the TDLAS gas detection[D]. Jilin University, 2013.  
曹天书. TDLAS 气体检测中二次谐波的锁相放大器的研究[D].吉林大学,2013.