

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407419

痕量 N_2O 气体检测中数字锁相放大器的设计*

杨云鹏 刘新楠 贾俊杰 郜峰 夏华 李奇峰 马翔云

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘要:针对笑气(N_2O)等气态物质的滥用,基于量子级联激光器与波长调制技术相结合的检测方法,可以对吸食人员呼出笑气浓度进行检测,实现吸食人员的现场快速鉴定。针对检测过程中激光器光强抖动带来的测量误差,提出一种适用于痕量 N_2O 气体检测中数字锁相放大器的设计。该锁相放大器中集成了激光器光强调制模块,当碲镉汞探测器接收到吸收后的光强信号后,同时在 FPGA 中进行一次和二次谐波的解调,并对二次谐波进行归一化处理,避免光强抖动对测量的影响。使用该锁相放大器对检测系统的性能进行评估,通过质量流量控制器配置不同浓度 N_2O 气体,当激光器调制频率为 5 kHz,测得归一化二次谐波峰值平均值与 N_2O 气体浓度值之间的线性拟合度为 0.992 1。使用 Allan 方差对检测系统的检出限进行评估,当系统的积分时间为 0.1 s 时, N_2O 气体的检出限为 17.7×10^{-9} ; 积分时间为 6.3 s 时, N_2O 气体的检出限达到最低为 8.9×10^{-9} 。该锁相放大器具有集成度高、检测速度快、信噪比高等优点,适用于痕量 N_2O 气体的现场快速检测。

关键词: 笑气;量子级联激光器;波长调制技术;FPGA

中图分类号: TP23;TM935.37 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010;510.5010

Design of digital lock-in amplifier in trace N_2O gas detection

Yang Yunpeng Liu Xinnan Jia Junjie Gao Feng Xia Hua Li Qifeng Ma Xiangyun

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the abuse of gaseous substances such as nitrous oxide (N_2O), the detection method based on the combination of quantum cascade laser and wavelength modulation technology can detect the concentration of nitrous oxide exhaled by users, and realize the rapid on-site identification of users. Aiming at the measurement error caused by laser light intensity jitter, a digital phase-locked amplifier for trace N_2O gas detection is proposed. The laser light stress modulator is integrated in the phase-locked amplifier. When the mercury cadmium telluride detector receives the absorbed light intensity signal, the first and second harmonics are demodulated in FPGA at the same time, and the second harmonics are normalized to avoid the influence of light intensity jitter on the measurement. The performance of the detection system is evaluated by using the phase-locked amplifier. The mass flow controller is used to set different concentrations of N_2O gas. When the laser modulation frequency is 5 kHz, the linear fitting degree between the normalized second harmonic peak value and the N_2O gas concentration is 0.992 1. The detection system detection limit is evaluated using Allan variance. When the system integration time is 0.1 s, the detection limit of N_2O gas is 17.7×10^{-9} ; when the integration time is 6.3 s, the detection limit of N_2O gas reached its lowest value of 8.9×10^{-9} . The phase-locked amplifier has the advantages of high integration, fast detection speed and high signal-to-noise ratio, and is suitable for the field rapid detection of trace N_2O gas.

Keywords: nitrous oxide; quantum cascade laser; wavelength modulation technology; FPGA

0 引言

N_2O 气体, 又称笑气, 是一种无色微甜的气体, 具有一定减轻疼痛效果, 因此笑气作为麻醉剂被广泛应用于外科手术中。人体吸食笑气后会刺激脑部分泌内酚酞, 从而产生短暂的兴奋愉快感。笑气作为一种滥用物具有较强的成瘾性^[1], 部分年轻人为追求刺激长期吸食高纯笑气, 进而导致神经系统受损, 肌肉不受控制的抽搐甚至身体瘫痪^[2]。同时, 吸食人员为筹集资金购买笑气会铤而走险, 实施抢劫、诈骗等违法行为, 严重危害社会治安。因此, 笑气作为一种新型流行滥用物质开始受到管制。

目前, 针对笑气滥用人员尚无快速的鉴定方法。针对传统的海洛因、冰毒、氯胺酮等固态毒品, 可以对吸食人员的血液、尿液或毛发进行检测, 判断其在短期内是否有吸食行为^[3]。笑气作为一种气态滥用物质, 其在体内代谢速度较快, 并且不会有任何生物转化或者降解, 因此无法使用传统的检测手段对吸食人员进行鉴定。由于吸食人员在停止使用笑气后一段时间内, 绝大部分笑气主要通过人体呼出气排出体外。因此, 可以对疑似吸食人员呼出气体中笑气含量进行检测来判断其是否有过吸食笑气的行为。

基于光谱学的检测方法可以实现人体呼出气中痕量笑气检测。光谱学检测方法基于朗伯-比尔定律, 利用气体的光谱特性对气体进行检测, 常见基于该方法的 N_2O 气体检测技术包括傅里叶变换红外光谱学 (Fourier transform in-frared spectroscopy, FTIR) 技术^[4]、非分散红外 (non-dispersive infrared, NDIR) 光谱技术^[5]、光腔衰荡光谱 (cavity ring-down spectroscopy, CRDS) 技术^[6] 等。以上方法检测范围大, 响应速度较快, 但存在灵敏度不足, 检出限较高等问题, 因此难以用于环境多变的滥用物检测现场。

基于量子级联激光器 (quantum cascade laser, QCL) 的波长调制光谱 (wavelength modulation spectroscopy, WMS) 技术是实现痕量呼出笑气检测的新方向。WMS 检测技术通过在光强信号上叠加高频正弦信号, 采用锁相放大器提取吸收光强中谐波分量, 从而反演出气体浓度信息^[7-8]。相较于传统的半导体激光器, 由于 N_2O 气体在中红外波段的吸收强度比近红外、可见光波段高出数个量级, 因此选用中红外波段量子级联激光器作为光源。该方法可以实现 10^{-9} 量级的检测灵敏度^[9-10], 但是在实际检测过程中, 由于激光器光强抖动会带来测量误差, 该方法在检测过程中稳定性、重复性会受到影响。

在现有的谐波解调技术基础上, 提出一种适用于痕

量 N_2O 气体检测的数字锁相放大器。该锁相放大器集成了光强调制与谐波解调的功能。当探测器接收到吸收后的光强信号后, 经过高精度 ADC 转成数字信号传输给 FPGA, 在 FPGA 中同时进行一次和二次谐波的解调, 并对二次谐波进行归一化处理, 避免光强抖动对测量的影响。该锁相放大器具有集成度高、检测速度快、信噪比高等优点。

1 工作原理

1.1 波长调制光谱技术原理

WMS 技术是通过在激光器输出扫描的三角波上叠加高频调制波形, 通过气体池后, 对待解调信号进行解调, 利用解调后的波形数据对气体浓度进行反演。调制技术可以有效抑制 $1/f$ 低频噪声的干扰, 该方法提高了系统的抗干扰能力与灵敏度。在叠加高频正弦波后, 激光器输出频率表达式如式 (1) 所示^[11-12]。

$$v(t) = v_0(t) + b \sin(2\pi f_w t) \quad (1)$$

式中: $v_0(t)$ 表示激光器输出的中心频率, b 表示调制幅度, f_w 表示调制频率。令 $\theta = 2\pi f_w t$, 根据式 (1) 可知, 经过待测气体后输出光强为:

$$I(t) = I_0(t) [1 + i_0 \sin(\theta + \varphi_1) + i_2 \sin(2\theta + \varphi_2)] \quad (2)$$

式中: $I_0(t)$ 表示激光器的输出光强, i_0 和 i_2 表示光强平均值的线性和非线性调制幅度, φ_1 和 φ_2 代表线性和非线性幅度的频率调制相位差值, 待测气体光强吸收率可以表示为:

$$\tau(v(t)) = \frac{I(t)}{I_0(t)} = \sum_{n=0}^{+\infty} H_n(v_0, b) \sin(n\theta) \quad (3)$$

其中, τ 表示光强透过率, 对其进行傅里叶级数展开, 可得:

$$H_n = -\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(v(t)) \sin(2\theta) d\theta \quad (4)$$

式中: H_n 表示 τ 的傅里叶系数, 经过化简, 二次谐波 H_2 可以表示为:

$$H_2 = -\frac{PS(T)CL}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sigma(v) \sin(2\theta) d\theta \quad (5)$$

式中: $S(T)$ 表示吸收谱线强度, $\sigma(\lambda)$ 表示线型函数, C 表示被测气体浓度, L 表示光程长度。通过式 (5) 可知, 傅里叶展开式中的二阶系数与气体浓度成正比关系。在检测过程中, 由于激光器光强抖动会带来测量误差, 因此, 本文没有直接选用二次谐波与气体浓度数据进行系统线性度分析, 而是对吸收后的光强信号同时进行一次谐波和二次谐波的解调, 并且利用一次谐波中心值 S_{1f} 对

二次谐波峰值 S_{2f} 进行归一化处理,可以得到^[13-14]:

$$C_{2f/1f} = \frac{S_{2f}}{S_{1f}} \approx \frac{1}{i_0} \left\{ \left[H_2 + \frac{i_0}{2} (H_1 + H_3) \cos \varphi_1 + i_2 \left(H_0 + \frac{H_4}{2} \right) \cos \varphi_2 \right]^2 + \left[\frac{i_0}{2} (H_1 - H_3) \sin \varphi_1 + i_2 \left(H_0 - \frac{H_4}{2} \right) \sin \varphi_2 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: $C_{2f/1f}$ 与待测气体浓度成正比,其值是激光器参数 $[i_0, i_2]$ 和 H_n 的函数,该方法得到的归一化二次谐波信号只与待测气体本身有关,因此可直接反演得到待测气体浓度。

1.2 正交锁相放大器原理

锁相放大器可以提取特定能量的谐波,并将探测器接收到的电信号进行解调以及低通滤波,可以实现噪声的过滤以及直流分量的提取^[15]。由式(6)可知,需要对吸收后的光强信号进行谐波提取来获取气体浓度信息。但是单相锁相放大器需要将参考信号与输入信号调整到同相状态,使用较为不便,因此,选用正交锁相放大器来进行谐波解调。其原理如图1所示。

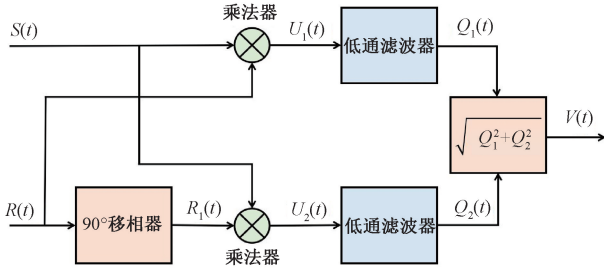


图1 正交锁相放大器原理框图

Fig. 1 Diagram of quadrature lock-in amplifier principle

正交锁相放大器的参考信号是由两路相位差为 90° 的信号组成^[16-18]。 A, w_1, ϕ_1 分别表示待测信号 $S(t)$ 的幅值、频率和相位, B, w_2, ϕ_2 分别表示参考信号 $R(t)$ 的幅值、频率和相位。这两路参考信号 $R(t)$ 和 $R_1(t)$ 分别与输入的待测信号 $S(t)$ 相乘,得到两路谐波分量 $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$ 。 $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$ 经过低通滤波器后变为两路直流信号 $Q_1(t)$ 和 $Q_2(t)$ 。随后这两路直流信号进行平方和运算,并对得到的结果进行开根号运算,最终得到包含气体浓度信息的信号 $V(t)$ 。参考信号 $R(t)$ 经过 90° 移相器后,得到参考信号 $R_1(t)$:

$$R_1(t) = B \cos(w_2 t + \phi_2) \quad (7)$$

当两路参考信号与待测信号相乘后,得到 $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$,低通滤波器将 $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$ 中的高频成分和噪声进行过滤,得到 $Q_1(t)$ 和 $Q_2(t)$:

$$Q_1(t) = \frac{AB}{2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (8)$$

$$Q_2(t) = \frac{AB}{2} \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (9)$$

$Q_1(t)$ 和 $Q_2(t)$ 经平方和以及开根号运算后,得到最终结果 $V(t)$:

$$V(t) = \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2} = \frac{AB}{2} \quad (10)$$

通过上述推导可知,由于正交锁相放大器两路参考信号相位差始终保持为 90° ,因此可以不考虑输入信号与参考信号之间的相位关系,极大提高检测结果的稳定性与准确性。

2 数字正交锁相放大器的设计与开发

2.1 总体方案设计

系统总体设计方案如图2所示,由激光器波长调制和谐波解调两部分组成。系统选用 Xilinx 公司 Zynq XCZU3EG 芯片作为主处理芯片。该芯片包含 PS (processing system) 端和 PL (programmable logic) 端两部分。PS 端包含 4 核心 Cortex-A53,用于上位机和人机交互开发,PL 端为一块 FPGA,包含 360 个 DSP 和 9.4 MB 的 Block RAM 存储,用于实时数据计算与缓存。实验涉及的数据处理功能均在 PL 端中开发完成。

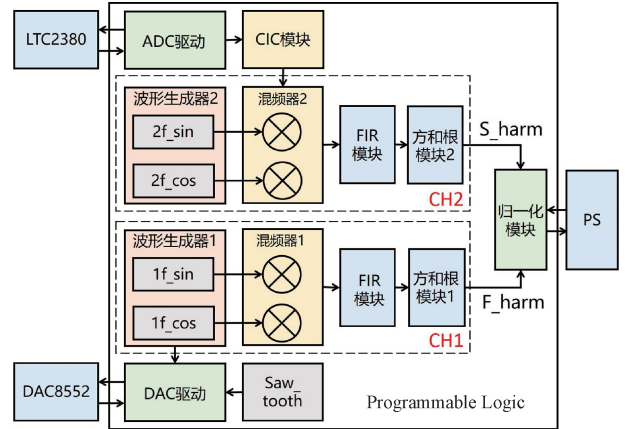


图2 系统总体设计图

Fig. 2 Overall system design

激光器波长调制部分选用 DAC8552 输出调制电压信号,该芯片数模转换速率为 1 MHz。片上 ROM 中存放着 16 进制的正弦波数据,通过与 Saw_tooth 模块产生低频三角波数据叠加后驱动 DAC 进行数模转换。在激光器处于关闭状态时,对系统及环境噪声进行频谱分析,最终选用调制频率为 5 kHz 正弦波作为调制信号,该正弦波与频率为 10 Hz 的三角波叠加构成 QCL 的驱动信号。

谐波解调部分选用 LTC2380 对吸收后的光强信号进行采集,该芯片采样率为 2 MSPS,分辨率为 16 bit,具有

低噪声、低功率的特点。采集的光强信号首先通过 CIC (cascaded integrator comb) 滤波器进行数字滤波,然后分别在 CH1 通道和 CH2 通道中进行一次谐波和二次谐波的解调。以 CH1 通道为例,波形生成器模块中 $1f_{\sin}$ 和 $1f_{\cos}$ 分别为 5 kHz 的正弦、余弦参考信号,与采集数据相乘后进行 FIR 低通滤波,经过方和根运算后得到一次谐波的结果 F_{harm} 。同理,CH2 通道参考信号为 10 kHz 的正弦与余弦信号,二次谐波的结果 S_{harm} 。将 S_{harm} 和 F_{harm} 进行除法运算后,将结果通过 AXI 总线发送至 PS 端进行浓度反演。

2.2 谐波解调功能设计

ADC 采集的光强数据 ADC_DATA 首先通过 CIC 滤波器。CIC 滤波器是一种级联积分梳状滤波器,通过多级积分和微分运算实现数字滤波^[19-20]。由于单级 CIC 滤波器旁瓣衰减为 13.36 dB,阻带衰减较差,因此本文选用如图 3 所示的三级 CIC 滤波器,该结构包含 3 个积分器与 3 个梳状滤波器,其阻带衰减为单级衰减的 3 倍,即 40.08 dB。抽取系数为 20,输出 CIC_DATA 采样率为 100 KSPS。

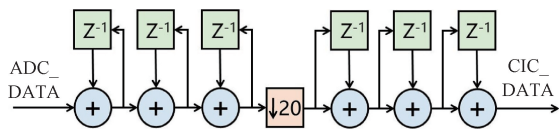


图3 三级CIC滤波器

Fig.3 Three-stage CIC filter

滤波后的 CIC_DATA 数据与两路参考信号相乘后,使用 FIR 滤波器来获取直流成分。本设计选择使用海明窗进行设计,由于海明窗旁瓣能量较小,在旁瓣衰减和频谱合成等方面具有优势。滤波器阶数设置为 1 024 阶,截止频率为 97.6 Hz。滤波后的两路信号分别进行平方,并进行求和运算。

在 FPGA 中进行开根运算需要消耗大量 DSP 资源,当计算数据的位数越多,对 DSP 资源的消耗越大。由于 CH1 通道和 CH2 通道均需要进行开根号运算来计算谐波,数据的位数高达 96 位,PL 端中的 DSP 资源不足以支撑大量的运算。Newton-Raphson 算法是一种逼近求解的方法,该方法仅使用寄存器和一些逻辑资源即可实现开根运算,节省大量 DSP 资源,算法原理如图 4 所示。

该方法首先需要设定一个 n 位期望值,通过比较期望值的平方与输入值的大小,确定 n 位期望值各 bit 位置是 0 还是 1,其赋值顺序从高位到低位。当输入值较大时,期望值的高位置为 1;当输入值较小时,期望值的高位置为 0。以此类推,直到期望值与输入值最接近为止。通过该方法可以计算得到一次谐波 F_{harm} 和二次谐波的结果 S_{harm} 。

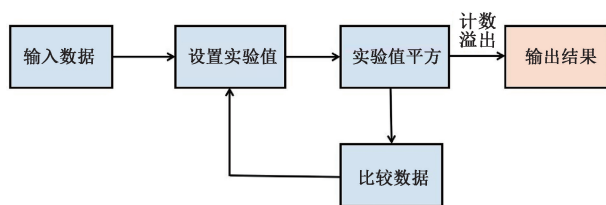


图4 Newton-Raphson 算法原理

Fig.4 Diagram of the Newton-Raphson algorithm

归一化模块提取 F_{harm} 和 S_{harm} 在吸收峰处数据值,并利用一次谐波对二次谐波峰值进行归一化处理,将计算结果 Con_data 发送至 PS 端,该值与待测气体浓度成正比关系。

3 功能验证与测试

3.1 数字正交锁相放大器性能测试

选用 RIGOL DG952 函数发生器对数字正交锁相放大器谐波解调的性能进行测试。将正弦波与不同比例白噪声叠加的混合波形输入至该板卡中。正弦波频率为 10 kHz,幅值依次为 170、136、102、68 和 34 mV,在正弦波上依次叠加 0%、20%、40%、60% 和 80% 比例的白噪声,如图 5(a1)~(a5)所示。数字正交锁相放大器谐波解调的输出信号如图 5(b1)~(b5)所示。随着噪声比例的增高,解调后的数据相对偏差也开始增大,但是相对偏差值均在 1% 以内。因此在该范围内,数字正交锁相放大器对输入信号解调得到的二次谐波结果较为稳定,抗干扰性较好。

3.2 N_2O 气体检测系统评估

N_2O 检测系统如图 6 所示。QCL 发出 $4.53 \mu\text{m}$ 中红外激光,经过镜片 M1、M2 反射进入气体池,在气体池内多次反射被探测器接收,该气体池光程为 15 m。探测器选用碲镉汞材料的光电敏感器件,具有较高的灵敏度和稳定性。

锁相放大器对探测器接收到的光强信号进行解调。实验选用 10 Hz 的三角波与 5 kHz 正弦信号叠加驱动 QCL 工作。图 7 为经过 Newton-Raphson 开根运算后得到的一、二次谐波图。由于 FPGA 可以实时对光强信号进行双通道解调,因此每 100 ms 可以得到一次检测结果。

使用质量流量控制器将 5×10^{-6} 浓度的 N_2O 标准气体与高纯氮气按照一定比例进行混合,得到一系列梯度痕量 N_2O 标准气体。将标准气体依次充入长光程气体池中,对笑气检测系统进行评估。实验配置了 54.6×10^{-9} 、 494.5×10^{-9} 、 575.2×10^{-9} 、 652.2×10^{-9} 、 726.5×10^{-9} 、 798.3×10^{-9} 、 867.8×10^{-9} 、 935.0×10^{-9} 、 1.0×10^{-6} 共计 9 种浓度测试气体。

在对不同浓度气体测试前,使用高纯度氮气清扫实

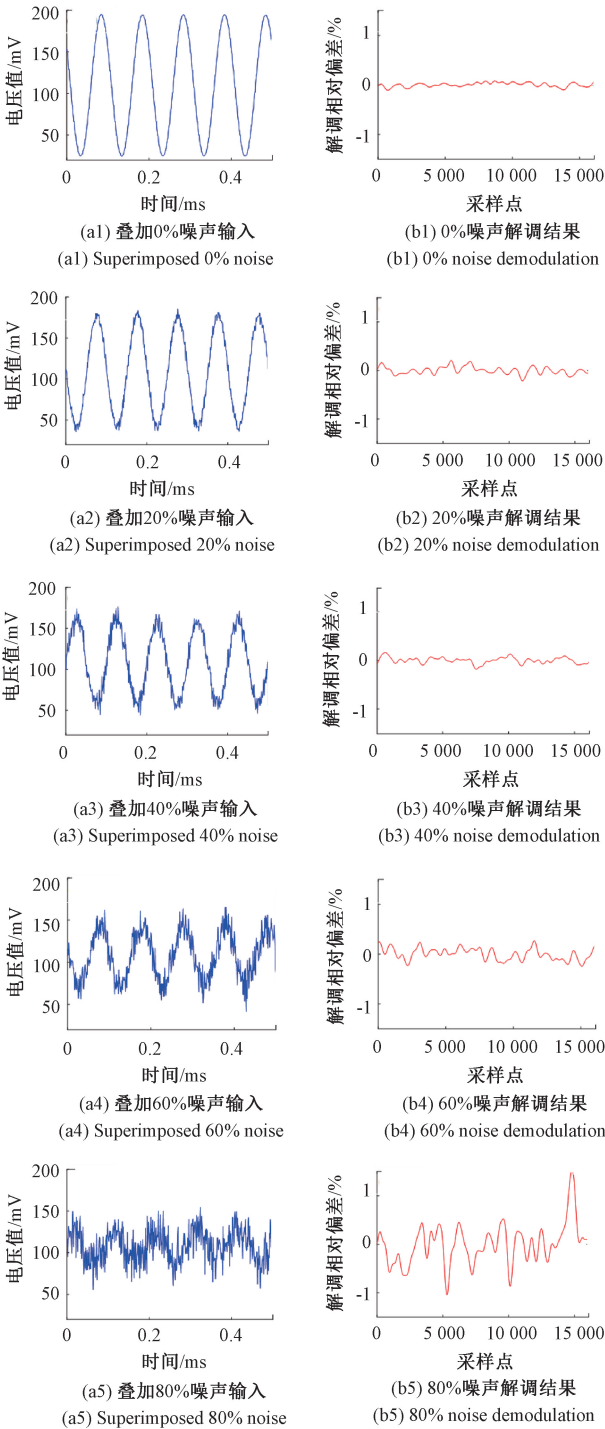


图 5 不同比例噪声的输入信号与二次谐波解调
Fig. 5 Input signals with different proportions of noise and second harmonic demodulation

验装置 3 min,排除气体池内残留气体对测试的影响,然后将待测气体依次充入到气体池中,并保持气体池稳定在一个大气压。将测量得到的归一化二次谐波峰值进行 100 次平均,并进行线性拟合,得到的拟合曲线如图 8 所示。使用该检测系统得到的归一化二次谐波峰值 $C_{2f/1f}$ 与

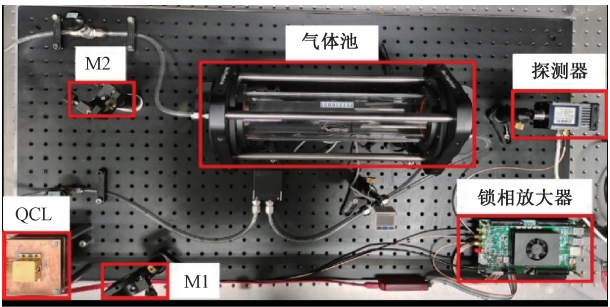


图 6 N_2O 检测系统
Fig. 6 N_2O detection system

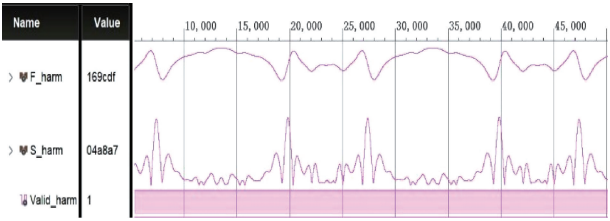


图 7 解调得到的一次谐波和二次谐波波形图
Fig. 7 First and second harmonic waveforms obtained by demodulation

N_2O 气体浓度 C 之间的表达式为 $C_{2f/1f} = 0.000\ 965\ 7C + 0.106\ 4$,线性拟合度 $R^2 = 0.992\ 1$,检测系统线性度较好。

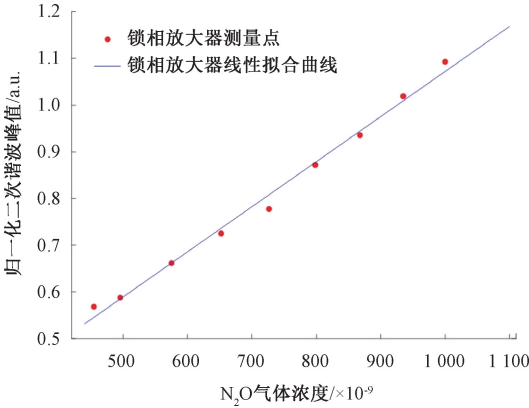
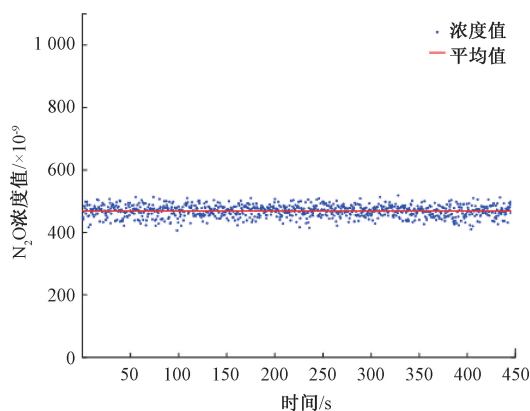


图 8 归一化二次谐波峰值平均值与不同浓度 N_2O 气体拟合曲线
Fig. 8 Normalized second harmonic peak average versus different concentrations of N_2O gas fitting curve

采用 454.55×10^{-9} 浓度气体对检测系统的稳定性进行测试。检测系统每 5 个扫描周期 $T = 0.5\ s$ 缓存一个数据点,对 N_2O 气体进行 7.5 min 的测量,总计缓存的点数 900 个,如图 9 所示。根据 $C_{2f/1f}$ 与浓度 C 之间的表达式将 N_2O 气体归一化二次谐波峰值转化为浓度值,采集数据标准差 σ^2 为 18.88×10^{-9} ,基于 ZYNQ 的数字正交锁相放大器系统稳定性良好。

图9 N_2O 的线性转化浓度值随测量时间分布图Fig. 9 Distribution of linearly transformed concentration values of N_2O with measurement time

使用 Allan 方差可以得到检测系统检出限。具体过程为:向气体池内充入高纯氮气,待气体稳定后进行检测。将得到的归一化二次谐波峰值转化为对应的 N_2O 气体浓度值。通过 Allan 方差计算,得到不同的积分时间下检测系统的检测极限。其结果如图 10 所示。

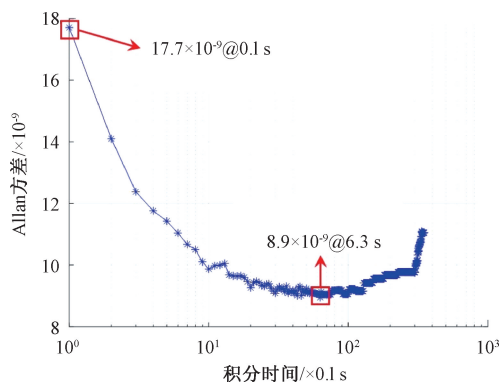


图10 系统 Allan 方差与积分时间的关系

Fig. 10 System Allan variance versus integration time

经过计算,当系统的积分时间为 0.1 s 时, N_2O 气体的检出限为 17.7×10^{-9} ;积分时间为 6.3 s 时, N_2O 气体的检出限达到最低为 8.9×10^{-9} 。该锁相放大器具有集成度高、检测速度快、信噪比高等优点,适用于痕量 N_2O 气体的现场快速检测。

4 结 论

针对波长调制技术检测过程中激光器光强抖动带来的测量误差,本文设计一种适用于痕量气体检测中数字正交锁相放大器,该锁相放大器集成了激光器光强调制与谐波解调的功能。当探测器接收到吸收后的光强信号后,同时在 FPGA 中进行一次和二次谐波的解调,并对二次谐波进行归一化处理,避免光强抖动对测量的影响。采用该锁相放大器的 N_2O 气体检测系统检出限可以达

到 10^{-9} 量级,适用于痕量 N_2O 气体浓度的快速、实时的现场检测。该锁相放大器具有集成度高、检测速度快、信噪比高等优点,适用于痕量 N_2O 气体的现场快速检测。

参考文献

- [1] XU J, ZHANG Y, LEI C, et al. Using machine learning to identify factors related to nitrous oxide (laughing gas) relapse among adolescents. [J]. General Psychiatry, 2023, 36(2): e101003.
- [2] GERNEZ E, LEE R G, NIGUET P J, et al. Nitrous oxide abuse: Clinical outcomes, pharmacology, pharmacokinetics, toxicity and impact on metabolism[J]. Toxics, 2023, 11 (12): 962.
- [3] MAAS A, LOSACKER M, HESS C. Chromatographic separation of R/S-enantiomers of amphetamine and methamphetamine: Pathways of methamphetamine synthesis and detection in blood samples by qualitative enantioselective LC - MS/MS analysis [J]. Forensic Science International, 2018, 291:138-143.
- [4] LIN C H, GRANT H R, HEBER J A, et al. Application of open-path Fourier transform infrared spectroscopy (OP-FTIR) to measure greenhouse gas concentrations from agricultural fields [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12 (6): 3403-3415.
- [5] BANDARA K, SAKAI K, NAKANDAKARI T, et al. A low-cost NDIR-based N_2O gas detection device for agricultural soils: Assembly, calibration model validation, and laboratory testing [J]. Sensors, 2021, 21(4): 1189.
- [6] WEI Q H, LI B C, WANG J, et al. Impact of residual water vapor on the simultaneous measurements of trace CH_4 and N_2O in air with cavity ring-down spectroscopy [J]. Atmosphere, 2021, 12 (2): 221-221.
- [7] ZHANG Y R, DING J X, ZHANG X J, et al. Open-path sensor based on QCL for atmospheric N_2O measurement[J]. Results in Physics, 2021. DOI: 10.1016/J.RINP.2021.104909.
- [8] LIU N W, XU L G, ZHOU S, et al. Simultaneous detection of multiple atmospheric components using an NIR and MIR laser hybrid gas sensing system[J]. ACS Sensors, 2020. DOI: 10.1021/acssensors.0c01910.
- [9] WEI R, JIANG W Z, TITTEL K F, et al. Single-QCL-based absorption sensor for simultaneous trace-gas detection of CH_4 and N_2O [J]. Applied Physics B, 2014, 117(1): 245-251.
- [10] ZHOU S, LIU N W, SHEN C Y, et al. An adaptive Kalman filtering algorithm based on back-propagation (BP) neural network applied for simultaneously detection of exhaled CO and N_2O [J]. Spectrochimica Acta Part

- A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019. DOI: 10.1016/j.saa. 2019. 117332.
- [11] 陈剑虹,孙超越,林志强,等. 基于TDLAS技术的CO₂浓度检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2022, 36(6):229-235.
CHEN J H, SUN CH Y, LIN ZH Q, et al, Research on CO₂ concentration detection method based on TDLAS technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 229-235.
- [12] CUI H B, WANG F, HUANG Q H, et al. Sensitive detection of NO using a compact portable CW DFB-QCL-based WMS sensor [J]. Applied Optics, 2020, 59 (30): 9491-9498.
- [13] LI H, RIEKER G B, LIU X, et al. Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases [J]. Applied Optics, 2006, 45 (5): 1052-1061.
- [14] YAO J Q, YUAN W Y, GONG P, et al. Frequency division multiplexing and normalized harmonic method for WMS detection system in multi-gas detection [J]. Photonics, 2022, 9 (11): 850-850.
- [15] 刘鹏程,马英起,韩建伟. 基于锁相放大的集成电路内部电信号光学探测方法[J]. 光学精密工程,2022, 30(18): 2178-2186.
LIU P CH, MA Y Q, HAN J W. Optical detection method of electrical signals inside integrated circuits based on lock-in amplifier [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30 (18): 2178-2186.
- [16] WANG Y F, CHENG Y H, CHEN K, et al. A software digital lock-in amplifier method with automatic frequency estimation for low SNR multi-frequency signal [J]. Applied Sciences, 2022, 12 (13): 6431-6431.
- [17] LI G L, JIANG Q Z, MA K, et al. Experimental study on methane detection based on cascaded integrator comb of digital orthogonal phase-locked in amplifier[J]. Acta Photonica Sinica, 2021. DOI: 10. 3788/GZXB 20215002. 0212001.
- [18] TANG Q, WANG J, ZHANG Y, et al. Detection of a weak near-Infrared signal using a digital orthogonal-vector lock-in amplifier[J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14 (5): P05011.
- [19] STOŠIĆ P B, MILIĆ N D, PAVLOVIĆ D V. New CIC filter architecture: design, parametric analysis and some comparisons [J]. IETE Journal of Research, 2015, 61 (3): 244-250.
- [20] AMRANE R, BRIK Y, ZEGHLACHE S, et al. Sampling rate optimization for improving the cascaded integrator comb filter characteristics [J]. Traitement du

Signal, 2021, 38(1): 97-103.

作者简介



杨云鹏,2020年于电子科技大学获得硕士学位,现为天津大学博士研究生,主要研究方向为光电检测技术。

E-mail: yunpengy1126@tju.edu.cn

Yang Yunpeng received his M. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Tianjin University. His main research interest includes photoelectric detection technology.



刘新楠,2021年于河北工业大学获得学士学位,主要研究方向为数据采集与处理。

E-mail: tju_liuxn@163.com

Liu Xinnan received his B. Sc. degree in 2021 from Hebei University of Technology. His main research interest includes data acquisition and processing.



贾俊杰,2022年于天津大学获得学士学位,现为天津大学硕士研究生,主要研究方向为光学检测技术。

E-mail: TJU2023JunjieJia@163.com

Jia Junjie received his B. Sc. degree in 2022 from Tianjin University. He is currently a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interest includes optical inspection technology.



郜峰,2023年于天津大学获得硕士学位,主要研究方向为光谱检测技术。

E-mail: gaofeng980803@163.com

Gao Feng received his M. Sc. degree in 2023 from Tianjin University. His main research interest includes spectral detection technology.



夏华,2021年于天津大学获得硕士学位,现为天津大学博士研究生,主要研究方向为生物医学光子学。

E-mail: xiahua@tju.edu.cn

Xia Hua received her M. Sc. degree from Tianjin University in 2021. She is currently a Ph. D. candidate at Tianjin University. Her main research interest includes biomedical photonics.



马翔云(通信作者),博士,天津大学精密仪器与光电子工程学院助理研究员,主要研究方向为光学仪器开发与微生物快速检测。

E-mail: mxy1994@tju.edu.cn

Ma Xiangyun (Corresponding author) PhD, assistant researcher, School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University. His main research interests include development of optical instruments and rapid detection of microorganisms.