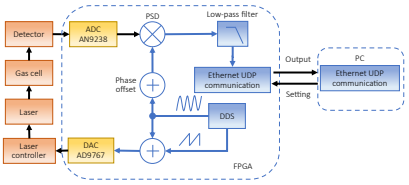
OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering

Article

2026 年 2 月, 第 53 卷, 第 2 期

基于 LabVIEW FPGA 的数字锁相放大器设计与 TDLAS 氧气浓度测量



景婉洋[1,2], 蒋　源[1,2], 吴檀彬[1,2], 曹亚亮[1,2], 苏殿强[1,2*], 姬中华[1,2], 王陈浩[1,2], 赵延霆[1,2]

[1]山西大学激光光谱研究所光量子技术与器件全国重点实验室, 山西 太原 030006;

[2]山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要：本文针对传统锁相放大器硬件扩展性不足、软件灵活性有限的问题，提出一种基于 LabVIEW FPGA 架构的可编程锁相放大系统。采用 LabVIEW 图形化编程实现任意波形生成、相敏检波以及低通滤波等功能，将待测信号传输进 FPGA 后，与本地振荡信号混频得到解调信号，完成数字锁相放大的基本功能。调用上位机通信 UDP 的 IP 核完成四线握手，通过 FPGA 千兆以太网通信，软硬件协同设计，实现调制参数的动态优化及实时监测。将该数字锁相放大器结合 TDLAS 技术开展痕量氧气的探测，使用中心波长为 760.59 nm 激光器对 0.02%~15.00% 浓度范围内的氧气进行二次谐波信号的实时探测与标定实验，验证了系统的可行性和实用性。氧气浓度和二次谐波信号的拟合相关系数 R^2 高达 0.999，计算分析得到该系统的氧气检测极限为 2.8×10^{-5}。该设计能够在多参数连续可调、高实时性要求的光谱分析场景中展现出显著优势，对微弱信号检测技术的应用发展具有推动作用。

关键词：调制解调；LabVIEW；锁相放大；FPGA；TDLAS 技术

The English title and abstract appear at the end of the paper.

DOI: 10.12086/oee.2026.250245 | CSTR: 32245.14.oee.2026.250245 | 中图分类号：TN247 | 文献标识码：A

景婉洋，蒋源，吴檀彬等. 基于 LabVIEW FPGA 的数字锁相放大器设计与 TDLAS 氧气浓度测量 [J]. 光电工程，2026，**53**(2): 250245

Jing W Y, Jiang Y, Wu T B et al. Design and verification of digital lock-in amplifier based on LabVIEW FPGA and oxygen detection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(2): 250245

1 引　言

在现代工业发展中，氧气浓度 (体积分数，下文同) 测量技术已被广泛应用于医疗健康、食品工程，以及航空航天等多个关键领域[1-4]。因此，精确监测和控制环境中氧气浓度的能力变得尤为重要。在现有的氧气浓度测量技术中，基于可调谐二极管激光吸收光谱 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 的光学检测技术展现出独特的优势[5-8]。该技术是一种近红外吸收光谱分析技术，利用分子“选频”吸收形成吸收光谱的工作原理，通过发射特定波长的激光束穿透待测气体，并根据激光强度衰减程度计算氧气浓度[9-10]。其中锁相放大器 (lock-in amplifier, LIA) 是 TDLAS 系统中的核心器件，使用调制解调、滤波放大等信号处理技术可以从背景噪

收稿日期：2025-08-19；修回日期：2025-10-20；录用日期：2025-10-23；网络出版日期：2026-02-13

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (62105191, 62175139)

*通信作者：苏殿强，dianqiangsu@sxu.edu.cn

版权所有©2026 中国科学院光电技术研究所

声中提取出微弱的吸收信号[11]，提高检测灵敏度，从而在复杂的背景信号中分离出有用的光谱信息。

锁相放大作为微弱信号检测的核心技术，自 20 世纪 40 年代提出以来，在工业应用、生物医学、环境监测[12] 等领域发挥了不可替代的作用。早期的锁相放大器以模拟电路为核心实现其功能，其主要结构由输入输出通道、参考信号输入通道、相敏检波器 (phase-sensitive detector, PSD)、微处理器、电流电压转换、放大器和滤波器组成。然而模拟电路存在温度漂移、元器件噪声大等问题[13-16]。随着测量精度需求的增加，锁相放大器逐渐向数字化、软件化方向演进。数字锁相放大器 (digital lock-in amplifier, DLIA) 与模拟锁相放大器相比，其优势在于相敏检波器和低通滤波器 (low-pass filter, LPF) 是用数字信号处理的方式实现的[17]，解决了模拟锁相放大器不可避免的温漂问题，同时降低参考信号不稳定所带来的误差，通过算法优化显著提升系统的灵活性与抗干扰能力[18]。

数字锁相放大器可分为模拟下变频和直接数字采样两种实现方案[19]。模拟下变频的主要过程：让经中频调制的本地载波与输入信号混频；随后由带通滤波器提取差频分量，从而将目标信号迁移至中频段，在中频段进行低噪声放大和精密滤波；通过模拟数字转化 (analog-to-digital conversion, ADC) 模块后，实现提取基带信号并抑制噪声的作用。这种方案系统复杂，模拟前端的设计精度要求很高，并且需要严格屏蔽本振的干扰。直接数字采样方案可以直接通过 ADC 将信号数字化为输入信号，并与自身生成的参考信号混频实现频谱搬移，通过数字低通滤波器和数字相敏检波器解调出待测信号[20]。这种方案可以实现全数字化处理，同时降低了硬件设计难度，避免模拟电路中混频器噪声和漂移的问题，使用更为广泛。

本研究针对痕量气体检测中二次谐波[21] 信号提取的需求，结合 TDLAS 技术，提出一种基于 LabVIEW FPGA 架构的数字锁相放大系统。该系统采用直接数字采样方案，通过 LabVIEW 程序实现任意波形生成，数字低通滤波器获得较好滤波效果，并通过 LabVIEW 程序框架设计上位机，实现人机交互界面，支持调制频率、相位及谐波阶次的动态配置，从而满足复杂气体光谱分析的检测需求。通过软硬件协同设计实现调制解调功能的可编程控制与实时信号处理，为高精度痕量气体检测仪器的开发提供新思路。

2 锁相放大器原理及设计

2.1 混频原理

相敏检波器是数字锁相放大器的核心，其本质上起到一个混频的作用。设定参考信号与待测信号具有相同的频率和固定的相位差，将待测的微弱信号与参考信号相乘，通过一系列滤波处理后提取出有用信号，可有效放大参考信号和输入信号同频的部分[22-23]。

设被测信号为

$$x(t) = A_{\mathrm{i}} \sin(\omega t + \varphi) + B(t)\,. \tag{1}$$

参考信号为

$$r(t) = A_{\mathrm{R}} \sin(\omega t + \sigma)\,, \tag{2}$$

式中：A_{i}为被测信号的幅度；A_{R}为参考信号的幅度；ω为被测信号和参考信号的频率；φ和σ分别为被测信号和参考信号的初始相位；$B(t)$为外部噪声。测量信号与参考信号经过相敏检波后得到

$$\begin{aligned} S(t) =& x(t) \times r(t) = [A_{\mathrm{i}} \sin(\omega t + \varphi) + B(t)] \\ & [A_{\mathrm{R}} \sin(\omega t + \sigma)] \\ =& \frac{1}{2} A_{\mathrm{i}} A_{\mathrm{R}} \cos(\varphi - \sigma) \\ & - \frac{1}{2} A_{\mathrm{i}} A_{\mathrm{R}} \cos(2\omega t + \varphi + \sigma) \\ & + B(t) A_{\mathrm{R}} \sin(\omega t + \sigma)\,. \end{aligned} \tag{3}$$

由于噪声与参考信号相干性为零，因此在时域上的积分结果通常为零，再由低通滤波器滤除高频信号$-\frac{1}{2} A_{\mathrm{i}} A_{\mathrm{R}} \cos(2\omega t + \varphi + \sigma)$，输出的信号$S_{\mathrm{output}}(t)$为

$$S_{\mathrm{output}}(t) = \frac{1}{2} A_{\mathrm{i}} A_{\mathrm{R}} \cos(\varphi - \sigma)\,. \tag{4}$$

综上可知，当被测信号和参考信号的相位差稳定情况下，即$\varphi - \sigma = 0$时，输出信号为直流信号。如果参考信号的幅度A_{R}已知，则可以确定被测信号的幅度A_{i}。

2.2 算法设计

数字锁相放大器的结构方案如图 1 所示，包含直接数字合成 (direct digital synthesis, DDS) 波形发生器、ADC 信号采集模块、相敏检波器、低通滤波器等关键模块。该系统硬件由 ALINX 公司开发的 FPGA 底板 AX7202、核心板 AC7200 (FPGA 芯片型号：XILINX XC7A200T 2FBG484I)、12 位分辨率 65 M 采样率 ADC 模块 AN9238 和 14 位分辨率 125 M采样率 DAC 模块 AD9767 构成。FPGA 芯片经第三方组件封装后，可利

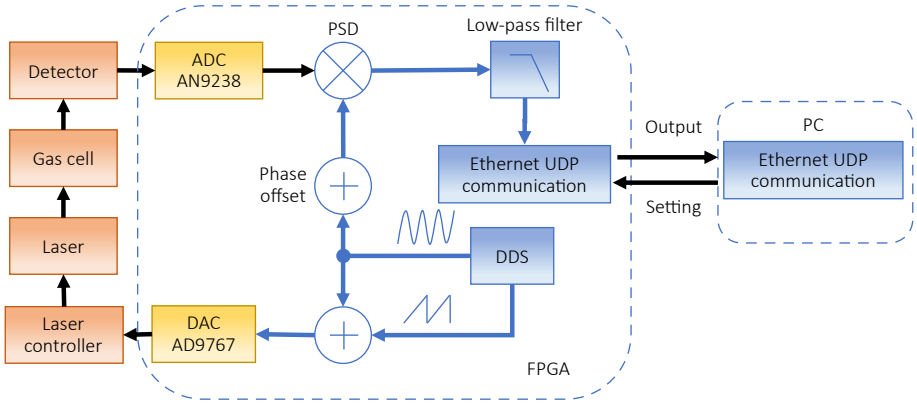


图 1 数字锁相放大器结构框图

Fig. 1 Block diagram of digital phase-locked amplifier structure

用 LabVIEW 编程平台直接进行上位机和下位机软件设计，数据上传与命令下发通过 FPGA 开发板的千兆以太网模块完成。DDS 模块分别产生锯齿波与正弦波信号，经加法器叠加后通过 AD9767 DAC 模块输出到分布式反馈 (distributed feedback, DFB) 激光器电流控制接口，扫描和调制 DFB 激光频率，经过多通气体池中的氧气吸收后，由光电探测器探测透射共振探测光信息，光电信号经 AN9238 ADC 模块采集，在 FPGA 芯片中进行相敏检波和滤波处理后，通过千兆以太网用户数据报协议 (UDP) 上传至上位机，对解调信号进行实时显示。

LabVIEW 编程平台设计的下位机主要编写了 DDS 技术、相敏检波和低通滤波等程序，实现了调制解调和滤波的功能。DDS 是一种用于产生波形信号的技术[24-25]，相比于电压控制振荡器 (voltage-controlled oscillator, VCO) 调制技术，具有更低相位噪声，实现方式也更加灵活有效，可由 FPGA 直接生成。DDS 波形发生器的核心是累加器，累加器中的实时计数器用于储存当前相位值，输出的相位值对应了正弦波形查找表的地址，这些地址又一一对应了正弦波相位点，包含了正弦波形的一个完整周期。

本次设计创新性地采用 LabVIEW 编程平台中的高吞吐率函数运算实现 DDS 功能，使用时钟源频率为 120 MHz 的定时循环结构，根据实时采集的数据动态改变正弦波形的相位，计算不同位置的幅值离散点，不使用传统的查表法就能依据参数生成新的正弦函数。相比于传统查表法，该方法利用高吞吐率运算函数实时生成波形数据，具有耗费 FPGA 资源少、数据延迟低、相位设置灵活等优势。运算过程如图 2 所示，利用移位寄存器做计数器实现累加器的功能，DDS 频率 $f_{\sin}$ 由数值控件 N 决定 $f_{\sin}=120\ \text{MHz}/N$，利用高吞吐率除法进行归一化处理后，范围变为 0~1。高吞吐率正弦函数输入 x 为 0~2 时，输出 $\sin(x)$ 为 $\sin(0)$~$\sin(2\pi)$。随后通过 amplitude 控件控制正弦函数幅值。高吞吐率乘法、除法、加法以及 sin 函数全部通过标准四线握手制串联起来，如图 2(a) 所示。与正弦函数同理，本地振荡信号与锯齿波同样通过 120 M 时钟源定时循环内的高吞吐率函数实现，如图 2(b, c) 所示。高吞吐率加法模块将正弦信号和锯齿波叠加后，得到调制信号，通过 DAC 模块 AD9767 芯片传输至激光器控制电路中。图 2(b) 中红框为本振与调制信号的相对相位功能实现部分。

根据锁相放大器的结构原理[26] 分析，低通滤波器的性能指标直接决定了锁相放大器的相位检测精度与噪声抑制能力[27]。在 LabVIEW 编程平台中，数字低通滤波器采用均值滤波器和巴特沃思滤波器相结合的设计，可以有效抑制随机噪声。相乘后的信号首先经过均值滤波器，对于离散信号 $x(n)$，均值滤波器的输出 $y(n)$ 可以表示为

$$y(n)=\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}x(n-i)\,, \tag{5}$$

式中：N 是窗口内样本的数量，在 LabVIEW 中设定滤波器为 Mean 模式，设置 N=60。该滤波器配置为计算 60 个样本的均值，执行模式为在单周期定时循环内，延迟为 6 个周期，同样采用四线握手的连接方式与解调信号串联。对相乘后的信号进行均值滤波，能够初步去除高频噪声，使得信号更加平滑，为后续的处理提供相对干净的输入。

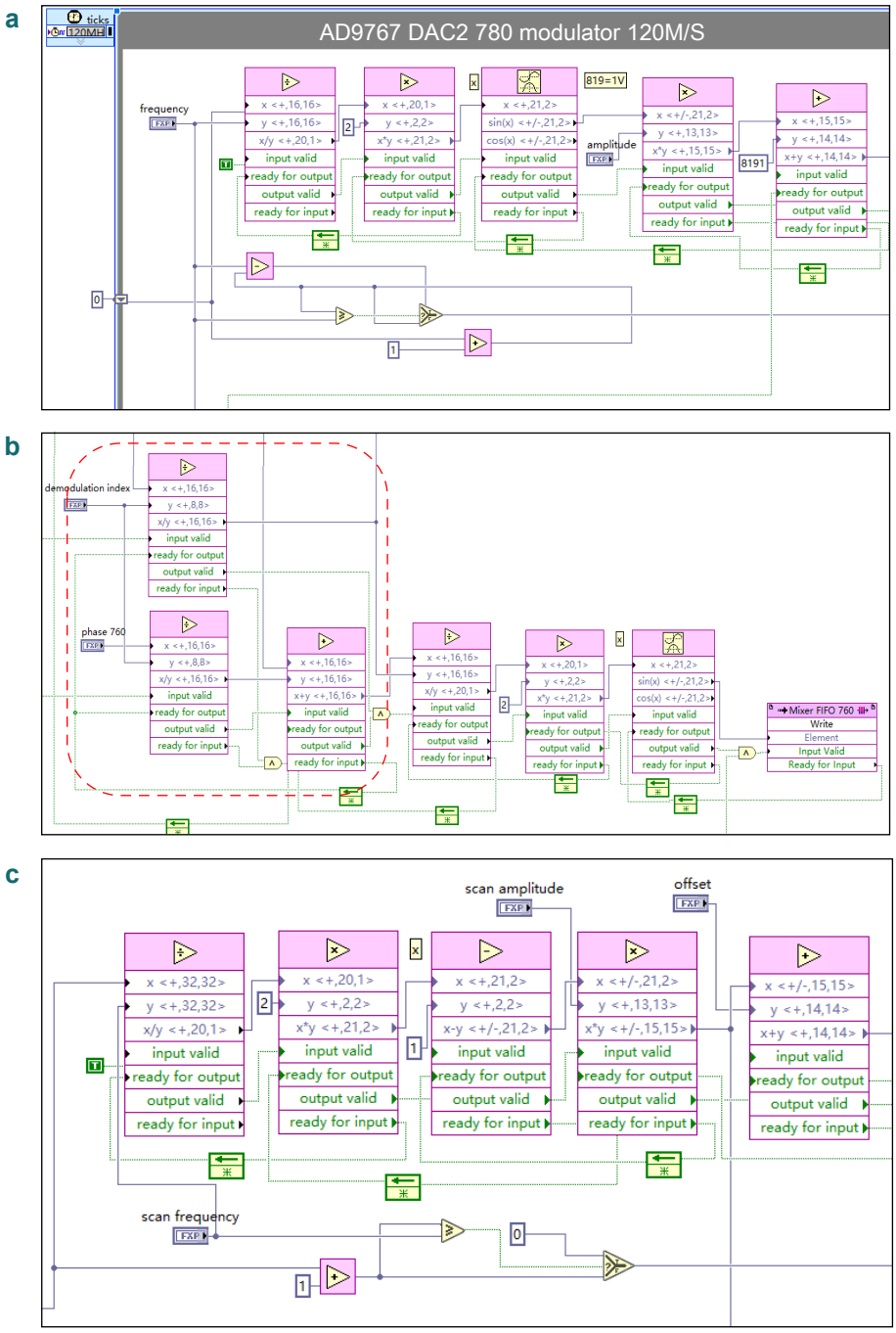


图 2 下位机生成调制信号的程序框图。(a) 正弦信号生成程序框图；(b) 本地振荡信号生成过程；(c) 锯齿波信号生成程序框图

Fig. 2 Block diagram of the program for generating modulated signals on the lower computer. (a) Sine signal generation program block diagram; (b) Local oscillation signal generation process; (c) Sawtooth wave signal generation program block diagram

滤波后的信号经过先进先出 (FIFO) 缓冲传输到巴特沃思滤波器。巴特沃斯滤波器是一种具有最大平坦幅度响应的滤波器，是一种常用的 IIR (无限长单位冲激响应) 滤波器。对于低通巴特沃斯滤波器，其幅度平方响应 $|H(\mathrm{j}\Omega)|^2$ 为

$$|H(\mathrm{j}\Omega)|^2=\frac{1}{1+(\Omega/\Omega_{\mathrm{c}})^{2\xi}}, \tag{6}$$

式中：Ω 是角频率；Ω_{c} 是截止角频率；ξ 是滤波器的阶数。在 TDLAS 实际应用中，对滤波器的阶数与低通截止频率的选择，需要在信噪比与响应速度之间进行取舍，考虑到解调信号波形、信噪比，保留 2~3 倍的带宽余

量对截止频率进行设置，滤波阶数设置为 4，以防信号失真。由于均值滤波器是 60 次采样生成一次样本，结合 FPGA 时钟速率为 60 MHz 可知，预期采样率应为 1 MHz。经过两组滤波器，高频信号被有效滤除。

上位机与下位机能够通信的重点在于 UDP 以太网的传输，解调后的数据通过 UDP 传输到上位机 PC 端并实时显示出来。上位机的命令参数也可以实时下发到下位机 FPGA 中，这就需要用到基于 edf 格式的 Ethernet 通信 IP 核，再利用 LabVIEW 里的 IP Block 集成节点调用即可。接着需要将 FPGA 的物理引脚、Ethernet 缓冲区 FIFO 与 UDP 通信 IP 集成节点用四线握手的方式串联起来。完整的 UDP 接收/发送程序如图 3 所示。

LabVIEW 编程平台设计的上位机主要起到实时显示信号以及更改参数的作用。为了实现完整的操作界面和显示界面这一功能，需要选中指定的网卡设备接收 IP 包，并提取 MAC 地址、IP 地址、端口号、数据长度以及数据内容等信息。上位机前面板设有扫描信号和调制信号的频率、幅值及相位，同时包含解调信号的增益、相位以及解调指数等参数的输入。如图 4 所示，还添加了实时波形显示，以便观察。

3 功能验证及结果分析

本研究基于上述数字锁相放大器，构建了高精度氧气浓度测量系统。该系统通过精确调节调制信号幅度、0°~360°连续可调的参考信号相位以及可切换的巴特沃斯数字带通滤波器阶数等核心参数，结合标准空气样本[28]的对比测试，验证了系统功能可行性，并对本设计的检测极限进行分析。

TDLAS 实验系统架构如图 5 所示，采用中心波长 760 nm 的分布式反馈激光器作为光源，配合长度 20 cm 的 Herriott 型多通气体吸收池[29]，通过多次反射的

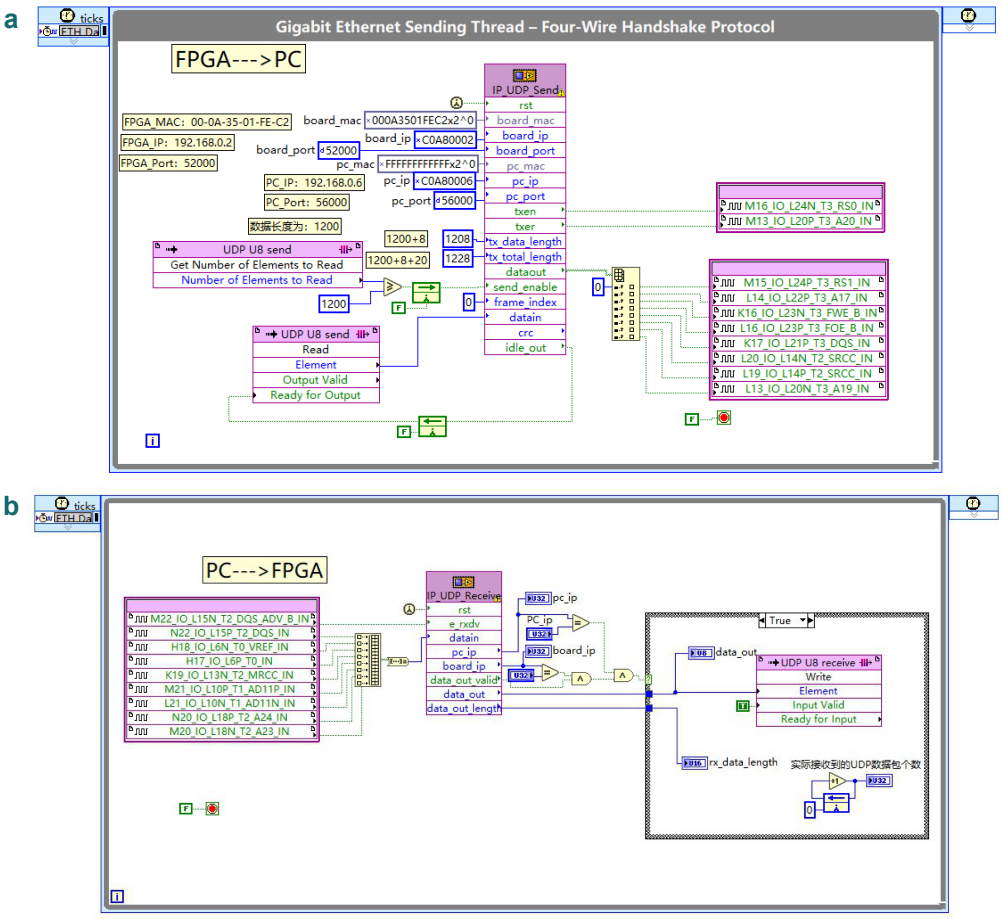


图 3 UDP 接收/发送程序。(a) UDP 数据发送程序；(b) UDP 数据接收程序

Fig. 3 Data transmission program. (a) UDP data sending program; (b) UDP data receiving program

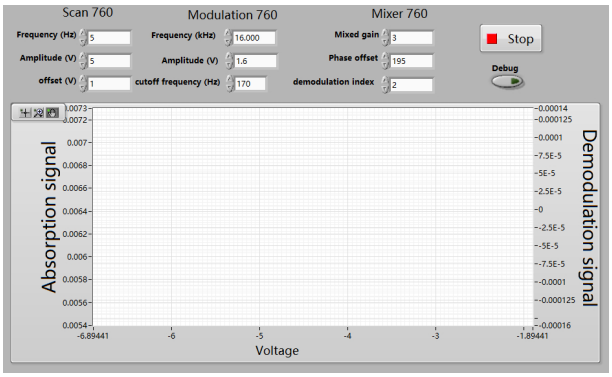


图 4 上位机程序前面板界面

Fig. 4 Front panel interface of the host computer program

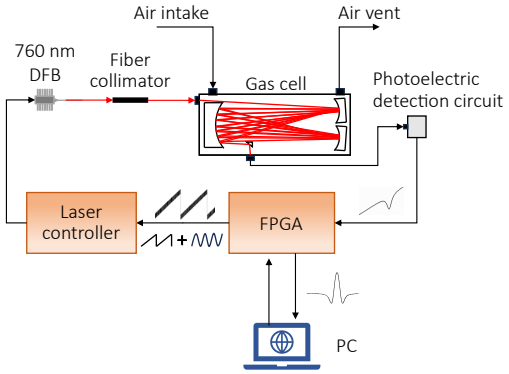


图 5 TDLAS 系统组成结构

Fig. 5 Composition structure of TDLAS system

光学结构，实现 3.2 m 等效吸收光程。使用实验室自主研发的激光器温控驱动电路对 DFB 激光器的温度、电流精密控制，其中激光器温度控制精度达±0.01 ℃，在 70 mA 驱动电流条件下的 1 h 稳定性优于 10 μA。透射光信号使用 Thorlabs 公司的 FDS010 型号的硅基光电探测器采集，将光信号转换为电信号，经前置放大器输入信号处理模块。

通过激光器上位机控制软件设置温度为 25 ℃、电流值为 70 mA，此时激光器中心波长为 760.59 nm，LabVIEW 上位机设定频率为 5 Hz 锯齿波扫描信号与频率为 10 kHz 正弦波调制信号，扫描与调制信号叠加后接入激光控制器的电流调制接口。当光路处于以空气为传播介质的环境中时，通过控制调制阶数，可以得到解调出的谐波信号，如图 6 所示：一次谐波 (1f)、二次谐波 (2f)、三次谐波 (3f)、四次谐波 (4f)。一次谐波信号和三次谐波信号呈现误差信号的结构，一般用作激光频率的锁定；二次谐波信号和四次谐波信号中间呈现峰值结构，适合作为气体测量的信号。随着谐波信号阶数的增加，其幅值会持续降低，因此通常选用二次谐波作为气体浓度测量的依据。

由于二次谐波信号幅度与信号的信噪比呈正相关，而改变调制幅度会直接影响二次谐波信号幅值。为研究调制幅度对检测灵敏度的影响，设定扫描频率为 5 Hz，调制频率为 16 kHz，相对相位设定为 210°，滤波器带宽 200 Hz 条件下，通过建立范围在 0.3~1.8 V 的调制系数梯度实验，获取二次谐波幅值变化曲线，如图 7 所示。实验数据表明：二次谐波幅值与调制幅度呈典型非线性关系，其变化趋势符合预期。定量分析揭示系统存在唯一最优调制幅度为 1.4 V，此时二次谐波幅值达到最大值V_{max}=125.09 mV，故选定 1.4 V 作为后续实验的标准调制参数。

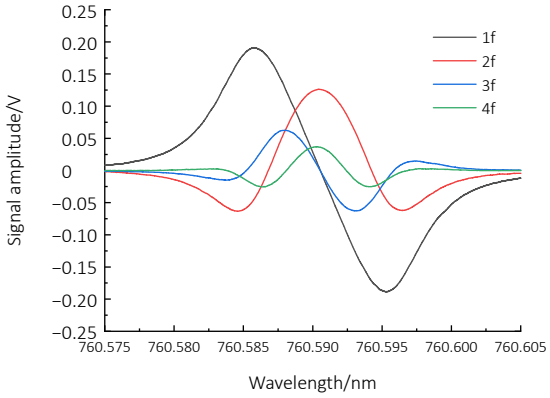


图 6 多次谐波信号

Fig. 6 Harmonic signals of multiple orders

确定最优调制幅度后，将纯N_2与浓度为 20.80% 的O_2混合，制作浓度范围在 0.02%~15.00% 的O_2样本，进行氧气浓度的标定与拟合实验。在图 7(a) 中，当氧气浓度为 15.00% 时，二次谐波幅值为 53.4 mV，噪声信号的强度为 0.14 mV，计算后得信噪比约为 51.628 dB。由于浓度跨度较大，需要修改滤波器参数，区分为低浓度与高浓度实验。在浓度范围为 1.00%~15.00% 时，其余参数保持不变，设置滤波器截止频率为 170 Hz，经过 LabVIEW 程序实时处理后得到二次谐波信号，如图 8 所示。进一步验证了氧气浓度与二次谐波信号幅度的线性映射关系。通过关系式$y = 0.005465x + 0.002973$得到二次谐波信号与标定浓度之间的线性拟合度$R^2 \approx 0.999$，其中 y 是二次谐波信号峰值，x 是氧气浓度，表明该系统在氧气测量方面的可靠性，由此得到氧气浓度的计算

表达式为$x = 182.93y - 0.54401$。

在氧气浓度梯度为 0.02%~1.00% 时，调整滤波器参数为 100 Hz，在同等条件下测量了低浓度范围内的二次谐波信号，测试结果如图 9 所示。二次谐波信号与标定浓度之间的线性拟合度高达$R^2 \approx 0.999$。选取图 8 中较为理想浓度 C 的 0.5% (5.0×10^{-3}) 浓度的二次谐波信号，其幅值V_{P-P}=3.466 mV，背景噪声信号的标准偏差$\sigma = 1.996\times10^{-5}$，计算可得：$C\times\sigma/V_{P-P} = 2.8794\times10^{-5}$，因此，该装置理论可检测到的最低氧气浓度约为$2.8\times10^{-5}$。

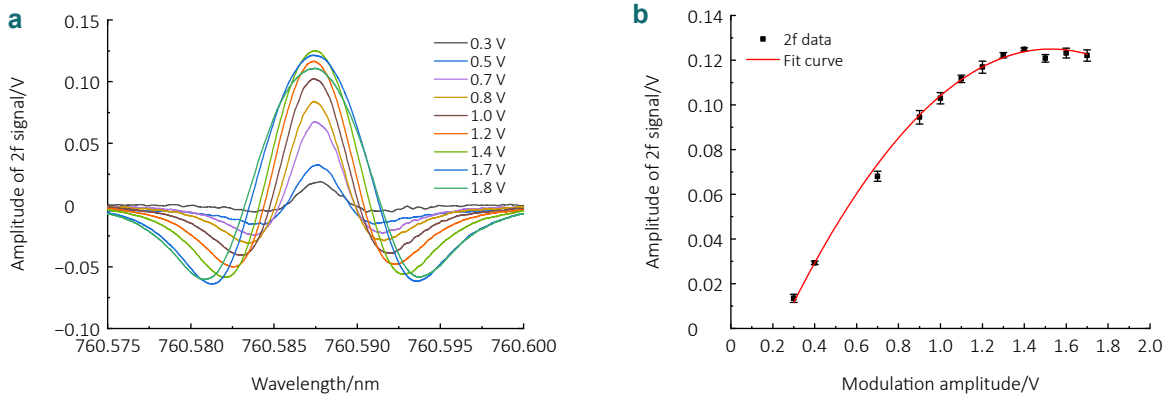


图 7 二次谐波信号幅值。(a) 不同调制幅度下的二次谐波；(b) 调制幅度和二次谐波信号幅值的关系

Fig. 7 Second harmonic signal amplitude. (a) Second harmonics under different modulation amplitudes; (b) Relationship between modulation amplitude and amplitude of second harmonic signals

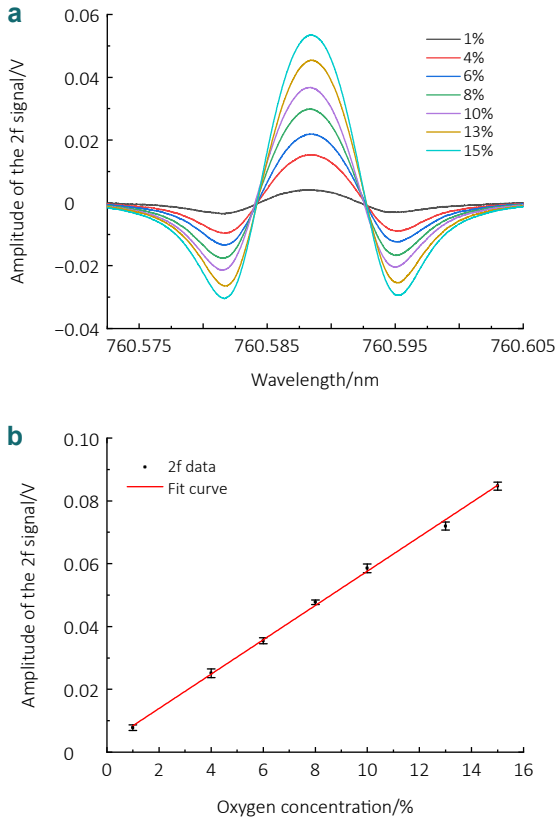


图 8 1.00%~15.00% 的氧气浓度检测结果。(a) 二次谐波信号；(b) 线性拟合曲线

Fig. 8 1.00%-15.00% oxygen concentration detection results. (a) Second harmonic signals; (b) Linear fitting curve

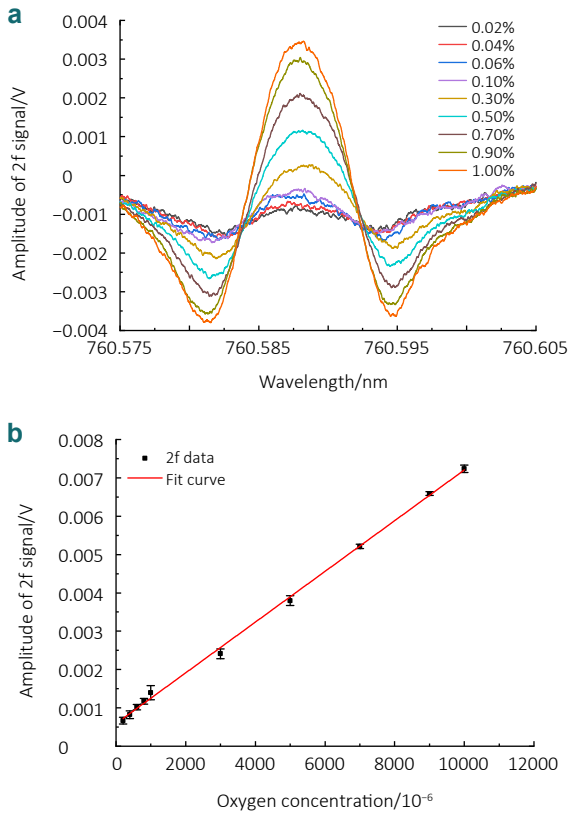


图 9 0.02%~1.00% 的氧气浓度检测结果。(a) 二次谐波信号；(b) 线性拟合曲线

Fig. 9 0.02% -1.00% oxygen concentration detection results. (a) Second harmonic signal; (b) Linear fitting curve

4 结 论

本文针对传统锁相放大器灵活性不足的问题，提出一种以 FPGA 为硬件基础，采用 LabVIEW 平台开发了可编程的调制解调系统架构，并通过千兆以太网通信在 FPGA 与 PC 端实现了实时信号响应。同时将该系统应用在 TDLAS 系统中，通过中心波长为 760.59 nm 的 DFB 激光器，成功实现了氧气浓度检测的调制解调功能。实验数据表明，二次谐波信号幅度与气体浓度呈正相关，线性拟合度高达 0.999，验证了该算法在微弱信号提取中的有效性。最优调制幅度下，分析计算出检测氧气浓度的极限约为 2.8×10^{-5}。为复杂环境下痕量气体检测的工程化应用奠定了实验基础，特别是在需要兼顾处理速度与算法灵活性的光谱分析领域展现出显著优势。

作者贡献

景婉洋：论文方法的提出，实验方案的设计、实验数据的处理和分析，论文撰写与修改；蒋源、吴檀彬、曹亚亮：对论文研究方向进行国内外调查、收集与分析，整理实验数据；苏殿强、姬中华、王陈浩、赵延霆：论文方向的确定以及论文的审核与指导。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

1. Smith P A, Lockhart B, Besser B W, et al. Exposure of unsuspecting workers to deadly atmospheres in below-ground confined spaces and investigation of related whole-air sample composition using adsorption gas chromatography[J]. *J Occup Environ Hyg*, 2014, **11**(12): 800−808.
2. Wei Y B, Chang J, Lian J, et al. Multi-point optical fibre oxygen sensor based on laser absorption spectroscopy[J]. *Optik*, 2015, **126**(20): 2394−2397.
3. Sun K, Sur R, Jeffries J B, et al. Application of wavelength-scanned wavelength-modulation spectroscopy H_2O absorption measurements in an engineering-scale high-pressure coal gasifier[J]. *Appl Phys B*, 2014, **117**(1): 411−421.
4. Luo Q W, Yang C H, Song C, et al. TDLAS/WMS embedded system for oxygen concentration detection of glass vials with variational mode decomposition[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, **53**(2): 11626−11631.
5. He X L, Pan Y G. The current development status and application research of TDLAS technology[J]. *J Ezhou Univ*, 2017, **24**(1): 102−104,109.
   何祥林, 潘勇刚. TDLAS 技术的发展现状及其应用研究[J]. 鄂州大学学报, 2017, **24**(1): 102−104,109.
6. Wang G C, Zhang S, Lu S. Spectroscopic detections of atmospheric microconstituents and recent process[J]. *Optoelectron Technol Inf*, 1997, (5): 1−8.
   王广昌, 张曙, 陆水. 大气微量成分的光谱探测及其发展趋势[J]. 光电子技术与信息, 1997, (5): 1−8.
7. Li N, Wang F, Yan J H, et al. The tunable diode laser absorption spectroscopy for gas concentration measurement[J]. *Proc CSEE*, 2005, **25**(15): 121−126.
   李宁, 王飞, 严建华, 等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱技术对气体浓度的测量[J]. 中国电机工程学报, 2005, **25**(15): 121−126.
8. 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]. *Appl Opt*, 2009, **48**(29): 5546−5560.
9. Peng J J. Research on methane gas detection system based on TDLAS technology[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023. https://doi.org/10.26918/d.cnki.ghngc.2023.000035.
   彭晶晶. 基于 TDLAS 技术的甲烷气体检测系统研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023. https://doi.org/10.26918/d.cnki.ghngc.2023.000035.
10. Chang J Q. Research and application of on-line oxygen concentration detection system based on TDLAS technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023. https://doi.org/10.26944/d.cnki.gbfju.2023.002644.
    常聚强. 基于 TDLAS 技术的氧气浓度在线检测系统研究与应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2023. https://doi.org/10.26944/d.cnki.gbfju.2023.002644.
11. Tian C. Research on gas detection technology based on absorption spectroscopy[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. https://doi.org/10.27391/d.cnki.gxagu.2023.000159.
    田晨. 基于吸收光谱的气体检测技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023. https://doi.org/10.27391/d.cnki.gxagu.2023.000159.
12. Yang Y P, Liu X N, Jia J J, et al. Design of digital lock-in amplifier in trace N_2O gas detection[J]. *J Electron Meas Instrum*, 2024, **38**(7): 116−122.
    杨云鹏, 刘新楠, 贾俊杰, 等. 痕量 N_2O 气体检测中数字锁相放大器的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, **38**(7): 116−122.
13. Xie X L, Xia Q K. Research and simulation analysis of weak signal detection method based on lock-in amplifier[J]. *Pract Electron*, 2024, **32**(19): 39−42.
    谢勋兰, 夏庆康. 基于锁相放大器的微弱信号检测方法研究与仿真分析[J]. 电子制作, 2024, **32**(19): 39−42.
14. Sonnaillon M O, Bonetto F J. A low-cost, high-performance, digital signal processor-based lock-in amplifier capable of measuring multiple frequency sweeps simultaneously[J]. *Rev Sci Instrum*, 2005, **76**(2): 024703.
15. Zhao J J. Research and implementaion of digital lock-in amplifier[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
    赵俊杰. 数字锁相放大器的实现研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
16. Sun Z B, Chen J G. Advance of lock-in amplifier[J]. *Physics*, 2006, **35**(10): 879−884.
    孙志斌, 陈佳圭. 锁相放大器的新进展[J]. 物理, 2006, **35**(10): 879−884.
17. Galaviz-Aguilar J A, Vargas-Rosales C, Falcone F, et al. Field-programmable gate array (FPGA)-based lock-in amplifier system with signal enhancement: a comprehensive review on the design for advanced measurement applications[J]. *Sensors*, 2025, **25**(2): 584.
18. Li S, Jiang S. Digital locked-in amplifier design based on FPGA[J]. *Metrol Meas Tech*, 2025, **51**(1): 83−85,89.
    李硕, 江晟. 基于 FPGA 的数字锁相放大器设计与实现[J]. 计量与测试技术, 2025, **51**(1): 83−85,89.

19. Yang J Y. Study of lock-in amplifiers based on FPGA[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
杨俊义. 基于 FPGA 的数字锁相放大器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
20. Zhang C, Liu H, Ge J, et al. FPGA-based digital lock-in amplifier with high-precision automatic frequency tracking[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 123114−123122.
21. Li H, Liu J G, He Y B, et al. Simulation and analysis of second-harmonic signal based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2013, **33**(4): 881−885.
李晗, 刘建国, 何亚柏, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱二次谐波信号的模拟与分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(4): 881−885.
22. Shi J, Cao W F, Xu F Y, et al. The realization of digital phase sensitivity detection technique in DSP[J]. *J Zhengzhou Univ Light Ind (Nat Sci)*, 2010, **25**(2): 85−87.
石军, 曹卫锋, 徐方友, 等. 数字相敏检波在 DSP 中的实现[J]. 郑州轻工业学院学报 (自然科学版), 2010, **25**(2): 85−87.
23. Jia Z A, Wang P P, Qiao X G, et al. Research on near-infrared spectrum detecting circuit with LIA[J]. *Instrum Tech Sens*, 2012, (4): 104−106.
贾振安, 王培培, 乔学光, 等. 基于锁相放大的近红外光谱信号提取电路研究[J]. 仪表技术与传感器, 2012, (4): 104−106.
24. Pan J, Shen F, Zhang J, et al. Design of control software of arbitrary waveform signal generator[J]. *Instrum Tech Sens*, 2024, (10): 32−38.
潘晶, 申飞, 张俊, 等. 任意波形信号发生器控制软件设计[J]. 仪表技术与传感器, 2024, (10): 32−38.
25. Ren Q Y, Tuo Z Y, Huang X Z, et al. Portable PWM signal generator based on FPGA[J]. *Phys Exp Coll*, 2024, **37**(4): 108−114.
任青颖, 庹忠曜, 黄洵桢, 等. 基于 FPGA 的便携式 PWM 方波信号发生器[J]. 大学物理实验, 2024, **37**(4): 108−114.
26. Horcas I, Moreno-Salinas D, Sánchez-Moreno J. A cost-effective design for a mid-range microcontroller-based lock-in amplifier[J]. *Microprocess Microsyst*, 2025, **113**: 105145.
27. Zheng C K, Liu X Y, Meng G, et al. Optimization of lock-in amplifier for photoacoustic gas detection based on wavelength modulation[J]. *Infrared*, 2011, **32**(11): 14−18,32.
郑成坤, 刘先勇, 蒙瑰, 等. 波长调制光声气体检测用锁相放大器的优化设计[J]. 红外, 2011, **32**(11): 14−18,32.
28. Yan J, Zhai C, Wang X N, et al. The industrial process oxygen analyzer based on TDLAS[J]. *China Instrum*, 2014, (9): 67−71.
阎杰, 翟畅, 王晓牛, 等. 基于 TDLAS 的工业过程氧气分析仪[J]. 中国仪器仪表, 2014, (9): 67−71.
29. Niu M S, Jiang B S, Wang R, et al. Development and application of TDLAS optical multipass cell in monitoring trace gas[J]. *Mod Chem Res*, 2024, (15): 5−7.
牛明生, 蒋本帅, 王锐, 等. TDLAS 光学多通池痕量气体监测研究进展[J]. 当代化工研究, 2024, (15): 5−7.

作者简介



景婉洋 (2000-)，女，硕士研究生，主要从事痕量气体检测方面的研究。

E-mail：jingwanyang@sxu.edu.cn



【通信作者】苏殿强 (1990-)，男，博士，副教授，硕士生导师，主要从事纳米光纤光机械冷却、基于纳米光纤的光与物质相互作用方面的研究。

E-mail：dianqiangsu@sxu.edu.cn

Design and verification of digital lock-in amplifier based on LabVIEW FPGA and oxygen detection

Jing Wanyang[1,2], Jiang Yuan[1,2], Wu Tanbin[1,2], Cao Yaliang[1,2], Su Dianqiang[1,2*], Ji Zhonghua[1,2], Wang Chenhao[1,2], Zhao Yanting[1,2]

[1] State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

[2] Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract

Objective Weak signal detection under complex backgrounds is a key technology in fields such as medical healthcare, aerospace engineering, and other related areas. The phase-locked amplifier (LIA) can effectively extract the sinusoidal signal of a specified frequency from noise, featuring advantages of a narrow passband and high signal-to-noise ratio (SNR). However, traditional lock-in amplifiers face multiple issues including insufficient hardware scalability and limited software flexibility. Especially in precision measurement tasks requiring real-time adjustment of modulation parameters, the limitations of their fixed hardware architecture and single control logic become increasingly prominent. To address these problems, this paper proposes a programmable lock-in amplifier system based on the LabVIEW FPGA architecture, which realizes the collaborative work of hardware and software.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62105191, 62175139)

*Correspondence: Su D Q, E-mail: dianqiangsu@sxu.edu.cn

Methods In terms of hardware, the system takes the XILINX XC7A200T FPGA chip as the hardware core, and constructs a highly reliable hardware platform with the ALINX AX7202 backplane and AC7200 core board. Meanwhile, the ADC module AN9238 (12-bit resolution, 65 MSps sampling rate) and DAC module AD9767 (14-bit resolution, 125 MSps sampling rate) are selected to ensure high fidelity of signal acquisition and output.

In terms of software, with the LabVIEW graphical programming platform as the core, the system can flexibly configure the entire signal processing workflow. For the modulation and demodulation function: first, high-throughput function operations are innovatively adopted to realize waveform generation. This scheme is based on a 120 MHz clock-driven timing cycle structure, implements the accumulator function via a shift register, and dynamically generates waveform data using high-throughput multiplication, division, and sine function operations. This not only reduces FPGA resource consumption but also achieves flexible phase configuration and minimized data delay, laying the foundation for the dynamic optimization of subsequent modulation parameters. Second, in the phase-sensitive detection (PSD) module, weak signal demodulation and extraction are realized based on the mixing principle: the signal under test collected by the ADC is multiplied with the reference signal generated internally in the FPGA, and useful signals are initially separated from noise by leveraging the characteristics of coherent same-frequency signals and non-coherent noise. According to phase-locked amplification theory, when the frequency of the signal under test matches that of the reference signal with a fixed phase difference, multiplication generates a DC component and a frequency-doubled component. The DC component is proportional to the amplitude of the signal under test, providing a theoretical basis for signal extraction. Finally, in the filtering module, a cascaded design of a mean filter and Butterworth low-pass filter is adopted: the mean filter is configured with a 60-sample window, performing signal smoothing within a single-cycle timing loop to initially filter out high-frequency random noise; the subsequent 4th-order Butterworth filter adopts a cutoff frequency configuration strategy with a bandwidth margin of two to three times, further suppressing residual high-frequency components without signal distortion, thus achieving an optimal balance between SNR and response speed.

In the information transmission part, the UDP communication IP core of the host computer is invoked, which is interconnected with the physical pins and FIFO buffer in the FPGA through a four-wire handshaking mechanism. The host computer software is developed based on LabVIEW, featuring a comprehensive human-machine interface (HMI) that supports real-time configuration of core parameters (modulation frequency: 5 Hz–16 kHz adjustable; signal amplitude; phase: 0°–360° continuously adjustable; filter order) and provides a real-time waveform display function, significantly improving the real-time performance and stability of signal processing.

Results and Discussions To verify the feasibility and practical value of the system, this paper deeply integrates the programmable lock-in amplifier with TDLAS technology to construct a high-precision trace oxygen detection system. A laser with a central wavelength of 760.59 nm and a Herriott-type multi-pass gas absorption cell are employed. First, a modulation amplitude optimization experiment is conducted, constructing a 0.3–1.8 V modulation coefficient gradient test under the conditions of 5 Hz scanning frequency, 16 kHz modulation frequency, 210° relative phase, and 200 Hz filter bandwidth. The results verify that the relationship between the second harmonic amplitude and modulation amplitude meets expectations, i.e., an optimal modulation amplitude exists. Second, concentration calibration and linearity verification experiments are performed: with a 5 Hz scanning frequency and 16 kHz laser modulation frequency, standard oxygen samples with concentrations ranging from 0.02% to 15% are prepared, and real-time detection and calibration of the second harmonic signals are conducted. The fitting correlation coefficient (R^2) between oxygen concentration and the second harmonic signal is approximately 0.999, verifying the system's feasibility and practicality. Finally, detection limit analysis is carried out, and calculations show that the system's oxygen detection limit is 2.8×10^{-5}.

Conclusions This lock-in amplifier has the advantages of high integration, fast detection speed, and high SNR, making it suitable for on-site detection of trace oxygen. This design can exhibit significant advantages in spectral analysis scenarios requiring multi-parameter continuous adjustability and high real-time performance, promote the application and development of weak signal detection technology, enrich the implementation pathways of digital lock-in amplification technology, and provide a new design idea for the development of high-flexibility weak signal detection systems.

Keywords: modulation and demodulation; LabVIEW; phase-locked amplification; FPGA; TDLAS technology

Jing W Y, Jiang Y, Wu T B et al. Design and verification of digital lock-in amplifier based on LabVIEW FPGA and oxygen detection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(2): 250245; DOI: 10.12086/oee.2026.250245

Opto-Electronic Journals Group
www.oejournal.org

扫描二维码，获取 PDF 全文