

文章编号 1004-924X(2026)15-2302-15

基于辐射本底扣除和对数放大的 TDLAS 燃烧温度快速反演

李玉涵^{1,2}, 胡佳屹², 姚路^{2*}, 许振宇², 黄安², 阚瑞峰²

(1. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 针对传统可调谐半导体激光吸收光谱 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 系统因复杂谱线拟合与数值反演算法导致处理速度难以满足发动机毫秒级瞬态燃烧测量需求的问题, 提出并研制了一种基于对数放大的快速硬件光谱处理系统, 并围绕系统总体方案设计、背景辐射自动扣除电路设计、对数放大电路设计、算法修正以及实时数据处理架构等方面展开研究。该系统在模拟前端引入自主设计的背景辐射自动扣除电路和基于 LOG114 芯片的对数比放大电路, 直接输出与吸光度成正比的电压信号; 数字部分采用现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 完成高速数据采集与吸光度积分累加, 再由微控制器实现温度反演。实验结果表明, 在 100 kHz 扫描频率下, 系统可实现背景辐射稳定扣除, 单次温度计算时间约为 2.5 ms。该系统可实现毫秒级的高温流场快速测量, 具备捕捉发动机瞬态燃烧变化的潜力。

关键词: TDLAS; 燃烧场; 高频响; 对数比放大; 背景辐射扣除; 快速测量

中图分类号: O433.1; TN247 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263415.2302 **CSTR:** 32169.14.OPE.20263415.2302

Rapid inversion of combustion temperature based on background radiation subtraction and logarithmic amplification in TDLAS

LI Yuhuan^{1,2}, HU Jiayi², YAO Lu^{2*}, XU Zhenyu², HUANG An², KAN Ruifeng²

(1. Science Island Branch, Graduate School of USTC, Hefei 230026, China;

2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: lyao@aiofm.ac.cn

Abstract: To address the limitation that traditional TDLAS systems fail to meet the millisecond-scale transient combustion measurement requirements of engines because of processing delays introduced by complex spectral line fitting and numerical inversion algorithms, a rapid hardware-based spectral processing system using logarithmic amplification is proposed and developed. The study covers the overall system architecture, the design of an automatic background radiation subtraction circuit, the logarithmic amplification circuit, algorithmic correction methods, and the real-time data processing framework. In the analog front end, a proprietary background radiation subtraction circuit and a logarithmic ratio amplifier based on

收稿日期: 2026-03-04; 修订日期: 2026-04-03.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2023YFF0716400); 安徽省科技创新攻坚计划资助项目 (No. 202523j08050005)

the LOG114 chip are employed to directly output a voltage signal proportional to absorbance. In the digital section, a field-programmable gate array (FPGA) is used for high-speed data acquisition and absorbance integration accumulation, followed by temperature inversion calculations implemented on a microcontroller. Experimental results show that, at a scanning frequency of 100 kHz, stable background radiation subtraction is achieved, and a single temperature calculation requires approximately 2.5 ms. The system is therefore capable of rapidly measuring high-temperature flow fields at millisecond intervals and is expected to capture transient combustion variations in engines.

Key words: TDLAS; combustion field; high frequency response; logarithmic ratio amplification; background radiation subtraction; quick measurement

1 引 言

航空发动机及燃气轮机的高效稳定运行是现代航空工业的核心追求。实时监测燃烧过程中的温度、气体组分浓度及压力参数,不仅是评价发动机燃烧效率的重要依据,更是改进燃烧室结构设计、实现闭环控制的关键基础。可调谐半导体激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)凭借其高选择性、高灵敏度及非侵入式探测的优势,已成为极端燃烧环境下在线诊断的重要技术^[1-3]。然而,在航空发动机向高性能、高推重比发展的过程中,燃烧不稳定性导致的贫油熄火(Lean Blow-Out, LBO)瞬态现象成为制约其可靠性的瓶颈^[4-6]。基于线型拟合或波长调制原理的 TDLAS 系统由于依赖复杂的线型拟合过程与解调算法,数据处理反馈周期较长,通常难以实时捕获演变过程仅为毫秒级的瞬态特征。因此,开发一种能够跳过繁琐软件解调、实现毫秒级在线运算的硬件快速光谱处理系统,对于提升航空发动机的安全监测能力具有重要的工程意义与学术价值。

围绕 TDLAS 的高速处理与实时应用,国内外研究人员已开展了大量研究,其技术路线整体经历了由“基于上位机的软件后处理”向“基于嵌入式硬件的实时光谱解算”逐步演进。基于波长调制光谱的免校准技术为恶劣环境气体传感提供了重要进展。美国斯坦福大学的 Rieker^[7-8]在其 2009 年提交的博士论文中提出了波长调制、谐波解调(WMS-2f/1f)的方法,通过激光光谱特性建模与谐波归一化,实现了无需现场标定的温度

与浓度测量。该系统在内燃机中实现了 15 kHz (响应时间约为 67 μ s) 的实时监测,在超燃冲压发动机中达到 4 kHz (响应时间为 250 μ s),并首次通过吸收光谱非均匀性波动实现了对燃烧不稳定性的实时预警。该技术为发动机燃烧诊断与闭环控制提供了可靠的光学传感方案。英国爱丁堡大学等^[9]在 2023 年开发的高速非侵入式 TDLAS 传感器系统在燃气轮机排气中实现了温度与水浓度测量,系统整体时间分辨率达到 4 ms,能够在毫秒尺度上捕捉传统方法无法观测的瞬态燃烧动态与发动机行为。美国加州大学的 Schwarm 等^[10]在 2023 年利用 FPGA 实现了 10 kHz 实时 TDLAS 信号处理,并结合机器学习模型在片上完成了光谱解算,从而显著降低了对传统上位机后处理的依赖,并提升了对发动机瞬态燃烧变化的捕获能力。西安理工大学^[11]于 2023 年的研究展示了利用 FPGA 实现 TDLAS 系统的扫描调制信号生成、高速采集及数字锁相解调,有效缩短了信号调理链路,系统可在每 100 ms (10 Hz 扫描周期)内完成一次完整的光谱扫描与信号采集。长春理工大学张鑫等^[12]在 2024 年研制了一套基于 FPGA 的全数字化 WM-TDLAS 气体浓度检测系统。系统集成了数字锁相放大器、直接数字频率合成(Direct Digital Synthesis, DDS)及信号调制/解调功能于单一 FPGA 平台,单次浓度测量时间仅需 0.1 s。

现有国内外研究在理论和实验层面已充分说明了硬件加速对于实现 TDLAS 高速测量的必要性,然而在系统集成度、处理链路简化、设备便携化以及毫秒级实时反馈能力等方面仍存在明显不足。使用对数比检测器电路的平衡比率检

测^[13]已被提出作为实用二极管激光吸收光谱系统的一种方便的检测技术^[14-15]。与其他检测方案相比,对数比检测具有许多优点,包括共模噪声抑制,灵敏度高,并且由于输出信号与吸光度成正比,因此对后处理的需求很少。对数比检测消除了检测信号的强度调制,大大降低了测量系统的模数数据采集动态范围要求。这种强度调制会占据数字化系统很大一部分的动态范围,尤其是在吸收线较弱的情况下。国外也有将对数检测运用到超燃冲压发动机的气压和温度的测量,但本质上也是对数据进行离线处理^[14],尚未有研究将对数比检测运用到高频响即时在线处理中。对数比检测方案能够直接硬件获取含增益因子的吸光度信号,但输入通道如果存在辐射背景、直流偏置会引起输出信号畸变,即吸光度信号失真,后处理很难消除失真影响,因此针对存在随时间变化的强辐射背景燃烧场,国内外尚无对数比检测应用研究。

针对上述问题,结合对数比检测器电路的优点,本文拟提出并研制一种基于对数放大的硬件快速光谱处理系统。针对高温燃烧环境中强背景辐射导致的信号偏置问题,在模拟前端引入背景辐射自动扣除电路,实现对慢变直流本底的实时跟踪与去除,有效避免了本底偏置对对数放大输出基线的干扰,保障了吸光度计算的准确性,为燃烧场对数比检测方法提供了新的思路。对数比检测通过在前端硬件层面直接完成吸光度计算,最大限度地跳过传统复杂的软件解调流程,并用 100 kHz 的高速扫描实现快速测量,在保证一定测量精度的同时显著降低系统延迟和运算负担,从而为航空发动机贫油熄火等毫秒级燃烧瞬态的在线监测提供一种更具工程可行性的解决方案^[16]。

2 TDLAS 测温原理

根据比尔-朗伯定律,当强度为 I_0 的入射激光束通过吸收介质时,透射强度 I 为:

$$I = I_0 \exp(-A), \quad (1)$$

其中: A 是介质的吸光度。因此,吸光度 A 被定义为:

$$A = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right). \quad (2)$$

在频域内对吸光度进行积分可得积分吸光度:

$$A = S(T)PXL, \quad (3)$$

其中: P 表示气体的压强, X 为气体浓度, $S(T)$ 为分子吸收线强,为温度 T 的函数,可以表示为:

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE''}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left(\frac{T_0}{T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{hcv_0}{k_B T}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{hcv_0}{k_B T_0}\right)\right]^{-1}, \quad (4)$$

其中: T_0 为参考温度,通常 $T_0 = 296$ K, $Q(T)$ 为内配分函数, E'' 为吸收线的低态能级, v_0 为吸收线中心波数, h 为普朗克常数, c 为光速, k_B 为玻尔兹曼常数。通常选取同一气体分子的两条吸收线进行测温,由于其低态能级不同,线强对温度的依赖特性存在差异。在 TDLAS 实际探测过程中,直接吸收技术是一种简单且符合物理原理的吸光度获取手段,通常采用波长扫描方式实现。通过驱动电路向激光器注入周期性变化的锯齿波或三角波电流,使激光输出波长在中心波长附近连续调谐,扫描范围覆盖目标吸收谱线及其邻近基线区域。在每个扫描周期内,透射光强信号随时间变化被高速采集,从而获得包含吸收信息的时域信号,结合无吸收区域的基线,即可由公式(2)计算吸光度。

通常是先用多项式进行波长标定,完成时域到频域的转换,再进行 Voigt 线型拟合得到积分吸光度。为提高 MCU 在温度反演算法中的处理效率,本文省略了传统的谱线线型拟合过程,直接对吸光度进行积分计算。选取 H_2O 在 1 392 nm 和 1 343 nm 附近的吸收线作为研究对象,基于 HITRAN 数据库,模拟光谱如图 1 所示,模拟温度为 1 000 K,压力为 101.325 kPa。这两条吸收线的低态能级差较大,有利于提高温度反演的灵敏度,但是两条吸收线均受到其他弱谱线叠加的影响,所以本文采用合并多线的修正算法对其影响进行补偿和校正。

本文将单支激光器的波长扫描频率设置为 200 kHz,为避免信号串扰并确保光谱信息的准确分离,采用分时复用技术对两支激光器进行交替控制,系统整体的扫描频率为 100 kHz。同时,为了提高硬件处理速度,计划将吸光度累加过程放在 FPGA 中完成。

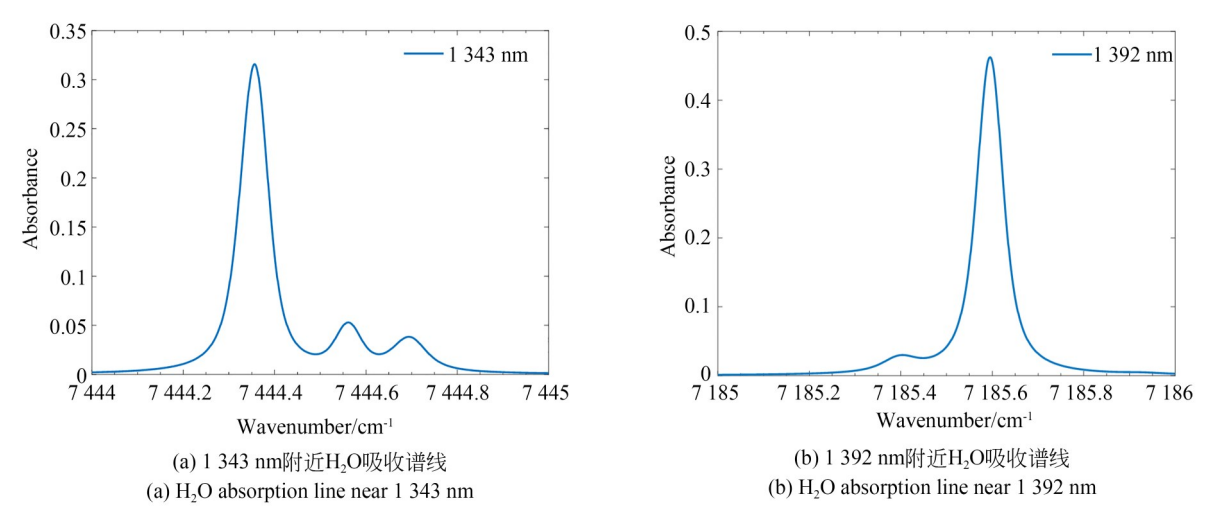


图 1 模拟光谱
Fig. 1 Simulated spectrum

3 检测方法与实时处理系统

本文提出了适用于即时快速需求的设计方案,

控制系统原理构成如图 2 所示。在已完成的系统中,实现了扫描波形生成,背景辐射自动扣除,对数放大电路,修正算法和实时数据处理等功能。

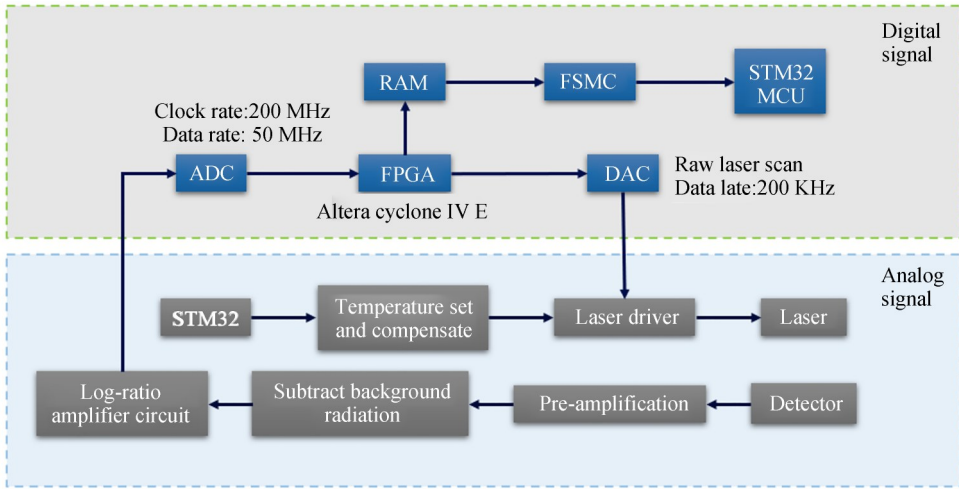


图 2 基于对数放大的快速硬件光谱处理系统整体框图
Fig. 2 Overall block diagram of fast hardware spectral processing system based on logarithmic amplification

3.1 背景辐射自动扣除

基于对数比放大的测量方法是一种双光束检测方法,一路是不经过测试段,直接照射到参考光电二极管的参考信号;一路是经过测试段以后照射到测量光电二极管的样品信号^[13]。通常来说,来自参考光电二极管和测量光电二极管的光电流信号应直接施加到放大器的输入,但是在发动机燃烧等高温应用环境中,测量光路中不可

避免地会叠加较强的背景辐射信号。该背景辐射主要来源于发动机内部炽热颗粒(如碳烟)以及高温固体壁面。相对于系统 100 kHz 的扫描频率,背景辐射变化相对缓慢,因此可近似视为叠加在有效吸收信号上的慢变直流分量。图 3 为高温炉 800 K 时的透射信号和常温下的透射信号,可以看到 800 K 时的透射信号相对常温下的透射信号确实有一个抬高。在传统 TDLAS 系统中,

背景辐射的影响通常通过离线数据处理方式进行校正,即在数据采集完成后再扣除背景信号,然而,该方法难以满足实时在线测量和快速反馈控制的应用需求。尤其是在本文所采用的对数比放大检测架构中,对数放大器的输出本质上为透射光信号与入射光信号之比的对数值,若测量通道中仍包含背景辐射引入的直流偏置,将直接导致对数放大输出产生明显的弯曲畸变,从而严重影响吸光度计算的准确性,下文的实验也证实了畸变的存在。因此,在对数放大之前对背景辐射进行有效扣除,是保证系统正常工作的关键前提。

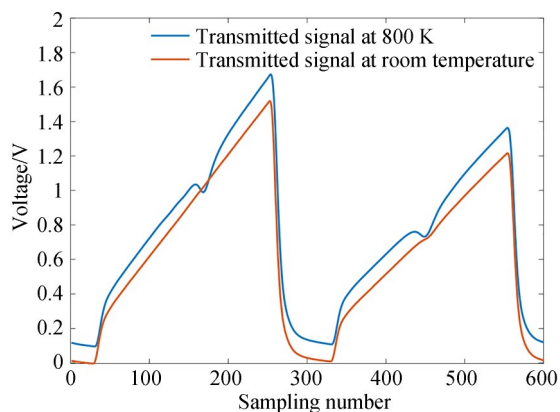


图3 高温炉 800 K 时的透射信号和常温下的透射信号

Fig. 3 Transmitted signal at 800 K in the high-temperature furnace and transmitted signal at room temperature

针对上述问题,本文自主设计并实现了一种用于 TDLAS 系统的背景辐射自动扣除模拟电路。该电路基于背景辐射“宽带、慢变”的特性,

通过对输入信号中的低频分量进行实时提取,实现对背景辐射直流偏置的动态跟踪,并将其从原始测量信号中即时扣除,从而获得仅包含有效吸收信息的交流信号。该方法无需引入复杂的数字算法或离线处理步骤,可在模拟前端直接完成背景辐射补偿,显著提高了系统的实时性与稳定性。

如图 4 所示,背景辐射自动扣除电路主要由前置放大电路、谷值检测模块、减法器及电压补偿模块组成,其核心思想是对测量信号中的慢变直流背景辐射进行实时提取并扣除,从而为后续对数比放大提供无背景偏置的有效吸收信号。由于系统采用单支频率为 200 kHz 的高频锯齿波对激光波长进行扫描,且对数比电路对信号带宽具有较高要求,因此背景辐射自动扣除电路的带宽设计必须能够满足扫描频率的要求。单支激光器以 200 kHz,对称性 95% 的锯齿波进行扫描,下降时间为:

$$T_f = 0.05T = 0.05 \times \frac{1}{200 \text{ kHz}} = 0.05 \times 5\mu_s = 0.25\mu_s, \quad (5)$$

其中: T 是扫描周期,对于线性边沿,边沿时间 τ_{rise} (10% 到 90%) 与带宽的关系为:

$$B = \frac{0.35}{\tau_{\text{rise}}}. \quad (6)$$

其中:下降沿时间 $T_f = 250 \text{ ns}$,是全 0%~100% 的时间,对于线性变化,10%~90% 的下降沿时间 $\tau_{\text{rise}} \approx 0.8 \times T_f = 200 \text{ ns}$,因此,所需带宽为 $B = 0.35/200 \text{ ns} = 1.75 \text{ MHz}$,为保证带宽足够,将目标带宽设定在 5 MHz,查阅对数比集成电路 LOG114 手册^[17],5 MHz 也足以满足对数比电路的带宽需求。

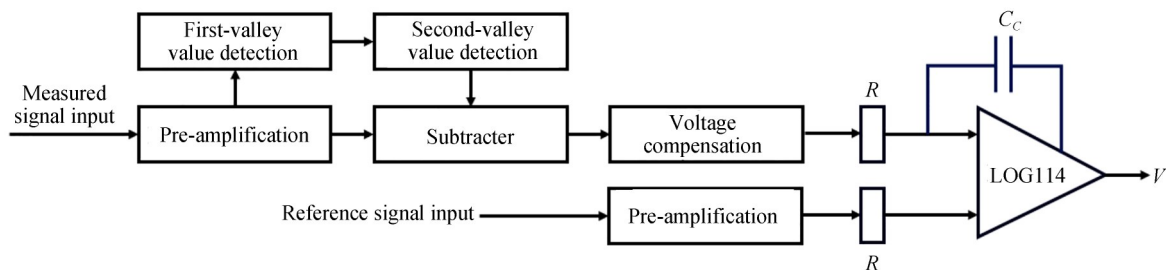


图4 背景辐射自动扣除及对数放大原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram illustrating the principle of automatic background radiation subtraction and logarithmic amplification

测量通道的采样信号首先进入前置放大电路,将光电探测器输出的微弱电信号放大至后续电路可处理的电平范围。前置放大电路主要由 AD8066 运算放大器及电阻电容构成,AD8066 运算放大器具有极高的带宽与压摆率,经测试,前放电路的带宽可以达到 9 MHz。放大后的信号被送入第一谷值检测模块,用于捕获激光扫描周期内信号的最低谷值。谷值检测模块主要是由运算放大器及二极管构成,谷值期间电容经过二极管迅速地放电到谷值电压,运算放大器依然选用 AD8066,二极管选用 1N4148,1N4148 是一款高速开关二极管,满足 200 kHz 的高频响应。随后,该谷值信息进一步送入第二谷值检测模块,对慢变直流分量进行稳定跟踪,从而获得背景辐射引起的直流偏置信号。但是实际上获得的信号会比实际直流偏

置信号高出一个定值,这是因为谷值检测模块中二极管自身压降的存在,所以需要进行电压补偿。与此同时,主信号通路中放大后的采样信号进入减法器,将实时跟踪得到的背景辐射直流偏置从原始测量信号中扣除,实现对背景辐射的在线扣除,扣除背景辐射后的信号随后进入电压补偿模块,电路原理图如图 5 所示。虽然本文注入电流扫描是由注入电流 0 点跳变上去扫描,但探测器本底噪声的存在也会导致参考光路中存在本底,当输入信号的峰值在 1 V 至 3 V 之间时,本底的实际测量在 10 mV 以内,由后续实验可知,背景辐射自动扣除会因为二极管压降波动而留有一个残余偏置,这个残余偏置在 -10~18 mV 之间,反而大于参考光路自身的本底,所以经慎重考虑,本文不对参考光路做扣除本底的处理。

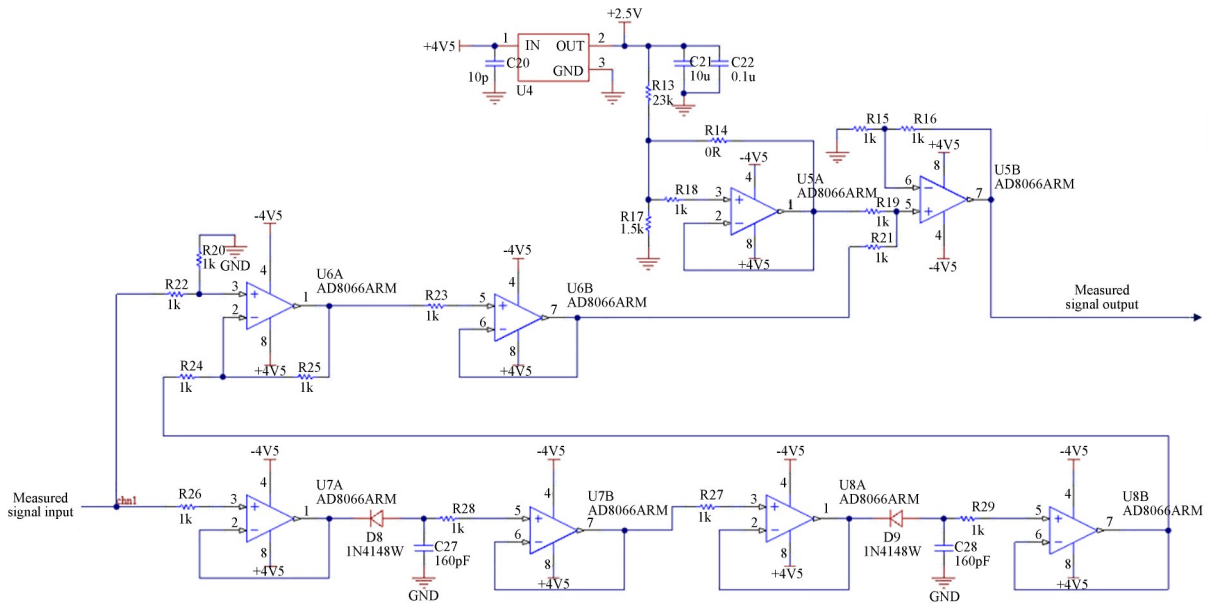


图 5 背景辐射自动扣除电路原理图

Fig. 5 schematic diagram of automatic background radiation subtraction circuit

测试结果表明,背景辐射自动扣除电路的带宽可达到 10 MHz,能够有效保证扫描波形的完整性,并满足后续对数放大电路的带宽需求。通过上述结构设计,该电路能够在模拟前端实时、自动地扣除测量信号中的慢变背景辐射分量,可有效减小背景辐射对对数放大输出基线的影响,为后续吸光度计算和温度反演提供稳定可靠的输入信号。

3.2 对数放大电路

对数放大电路基于德州仪器公司的单片对数比集成电路 LOG114 构成。从对数放大器 V 输出的信号值为:

$$V = G \log_{10} \left(\frac{I_{\text{ref}}}{I_{\text{samp}}} \right) = G \ln \left(\frac{I_{\text{ref}}}{I_{\text{samp}}} \right) \times \log_{10} e, \quad (7)$$

其中:G 是对数放大器的内置增益, $G = 0.375$, I_{samp} 和 I_{ref} 分别是测量通道和参考通道的输入电

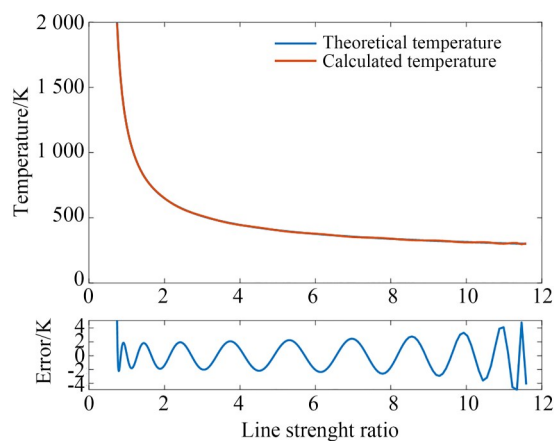
流。通常来说,来自参考光电二极管和样品光电二极管的光电流信号应直接施加到放大器的输入,这些光电流一般在 10 到 100 μA 之间,集成电路 LOG114 产生以伏为单位的输出,作为输入电流比率的对数(以 10 为底)。但是因为本文要扣除背景辐射,先用前置放大电路对光电流信号做了放大调理,使得电流信号转换成了电压信号,所以在进入对数放大电路之前要重新将电压信号转换为电流信号。又因为集成电路 LOG114 的带宽在信号幅度较小时较好,所以用电阻 R 将电压信号重新转换为 mA 级别的电流信号,用于对信号幅值进行适当调整和匹配,以满足后级对数比放大电路的输入动态范围要求,如图 4 所示。补偿电容 C_c 是抑制输出振荡所必需的,它的值被调整以优化输出信号的信噪比,同时保持足够的带宽来分辨所有采集的谱线,并且由于检测电路的带宽限制而使展宽最小。测量通道的输入已经在背景辐射自动扣除技术中讨论过了,在参考通道中,为与样品通道对称,参考光信号同样经过独立的前置放大模块处理后,通过电阻 R ,直接作为对数比放大器的参考输入端。最终,经过背景辐射扣除和电压补偿处理后的测量信号,与参考通道信号一同输入至对数比放大电路,实现透射光与参考光信号比值的对数运算。

理想情况下,对数比检测器给出的电压输出与吸光度 A 成正比,吸收光谱的基线是在没有吸收的情况下获得的信号。根据这一定义,基于对数比的二极管激光传感器的基线在理想条件下应该是平坦的,在检测完全平衡时应该为零。但是在实际情况中,使用的分束器不可能完全对称,对数比放大器两个输入通道信号强度的不对称性以及探测器响应的差别会导致基线不平坦不为零^[18],所以在后续计算的时候要扣除基线,本文扣除基线的方式就是在 FPGA 中对基线采样平均。

本文所选 1 392 nm 和 1 343 nm 附近 H_2O 吸收线存在邻近弱谱线叠加,导致积分吸光度测量产生偏差,进而引入温度反演误差,为此,拟采用以下合并多线的修正算法。因为本文是对吸光度直接进行积分,并没有进行线型拟合,故所得

的积分吸光度包含了吸收线及其邻近小吸收的积分吸光度,且选择的积分段数据两侧不受其他气体的吸收谱线干扰。又因为吸收峰的面积即积分吸光度与线强成正比,因此面积比值应该等于线强比值,此时的积分吸光度包含了吸收线及其邻近小吸收的积分吸光度,故此时的面积比值可以认为近似等于吸收线及其邻近小吸收的线强之和的比值。因此,用两条吸收线各自吸收线加邻近弱线的线强之和的比值代替单一线强的比值,能够部分补偿弱线叠加带来的系统误差。

首先通过循环遍历预设的温度范围,在每一个温度点,分别计算 1 392 nm 和 1 343 nm 两条吸收线的吸收光谱和每条吸收线及其邻近小吸收的线强之和,然后计算每个温度下两个线强之和的比值,并将这个比值与对应的温度值存储起来。这样,就建立了一个从线强比值到温度的映射关系,接下来用 20 次多项式拟合线强比值与温度之间的关系曲线,线强之和的比值与温度在 300~2 000 K 之间是单调的,如图 6(a) 所示。再将每个温度下直接积分的积分吸光度的比值代入该多项式,用直接积分的吸光度比值反演出的温度与实际温度的误差如图 6(b),温度误差在 1.8% 以内。误差主要来源于直接积分的积分吸光度的比值是用线强之和的比值近似的,线强之和的比值拟合多项式也会带来近似误差。



(a) 线强之和比值与温度的关系

(a) Relationship between ratio of sum of line strengths and temperature

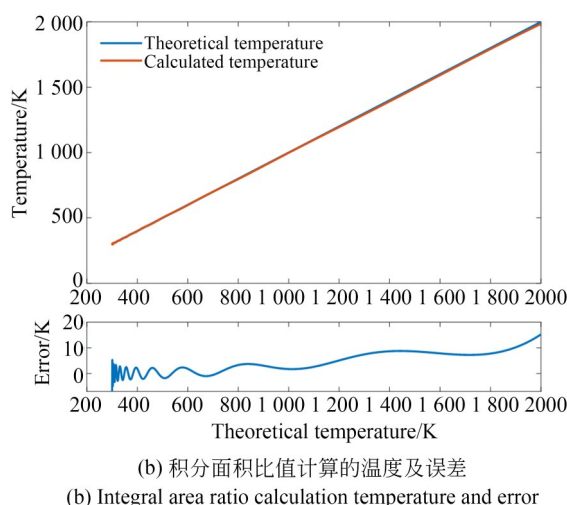


图6 基于线强之和比值的温度反演修正算法

Fig. 6 Corrected algorithm for temperature retrieval based on ratio of sum of line strengths

3.3 实时数据处理

FPGA实现对ADC的控制和对数放大电路输出信号的快速精准采集,FPGA 凭借其强大的并行处理能力,确保了数据采集的实时性与精确性。选用的16位AD转换速率最高为50 MHz/s,在100 KHz的扫描速率下,每个周期能采集500个数据点。FPGA实现对数放大输出信号的数据读取,并分别完成基线信号累加平均及扣除,两个吸收峰的吸光度数值累加。数据处理完成后,为实现数据的高效处理与协同操作,采用Flexible Static Memory Controller(FSMC)通信方式将250组两个吸收峰的吸光度之和传输至微控制器(MCU)。在FSMC通信过程中,FPGA的部分逻辑资源被虚拟为符合FSMC时序要求的存储器设备,通过合理地设置读写操作向MCU发送中断请求,通过FSMC接口发送地址、数据及控制信号,完成FPGA到MCU之间的数据传输。

将修正算法写入MCU中,MCU在接收到FPGA发送的数据后,执行光谱分析算法,主要步骤包括:对250组吸光度数据平均、吸收峰积分面积计算,以及基于修正算法拟合多项式的温度反演。经实际系统测试,从FPGA完成光谱采集与实时处理,到通过FSMC接口完成数据传输,再到MCU执行算法并输出温度结果,全过程耗

时约为2.5 ms,且2.5 ms的速度依然具有提高空间。数据处理流程如图7所示,温度参数的测量结果可为燃烧状态监测及发动机闭环反馈控制提供参考。

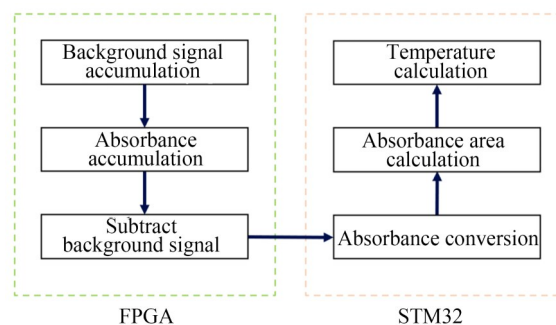


图7 实时温度反演数据处理流程

Fig. 7 Flowchart of data processing for real-time temperature retrieval

4 实验与结果

4.1 背景辐射自动扣除实验

4.1.1 实验装置

本研究中系统光源部分选用中心波长分别为1 392 nm和1 343 nm的DFB激光器,扫描波长范围约为0.3 nm。激光是使用自行设计的激光驱动电路和温度控制电路驱动和稳定的。由FPGA产生的锯齿波用于改变半导体激光器的波长,并通过分时复用的方法控制两支激光器交替出光。单支激光器的波长扫描频率设置为200 kHz,以满足系统对快速测量的需求。自研的激光器驱动电路的带宽可以达到10 MHz,满足扫描频率和扫描波形的要求。通过非保偏光纤耦合器将两束光耦合后,再用一分二的非保偏分束器将光束分成两束:参考激光光束和测量激光光束,参考激光光束直接用光纤接到对数放大电路的参考探测器上。因为实际情况中很难控制背景辐射的大小,难以对不同的背景辐射进行测试,所以再用一支1 381 nm的激光器,通过不同幅值的直流信号驱动,以模拟不同大小的背景辐射,再与测量激光光束耦合,穿过高温炉以后接到对数放大电路的测量探测器上,采集原始信号的两个探测器都使用InGaAs光电二极管型探测器(型号GAP1000,厂家GPD)。背景辐射扣除模拟测试及对数放大测试装置示意图如图8所示。

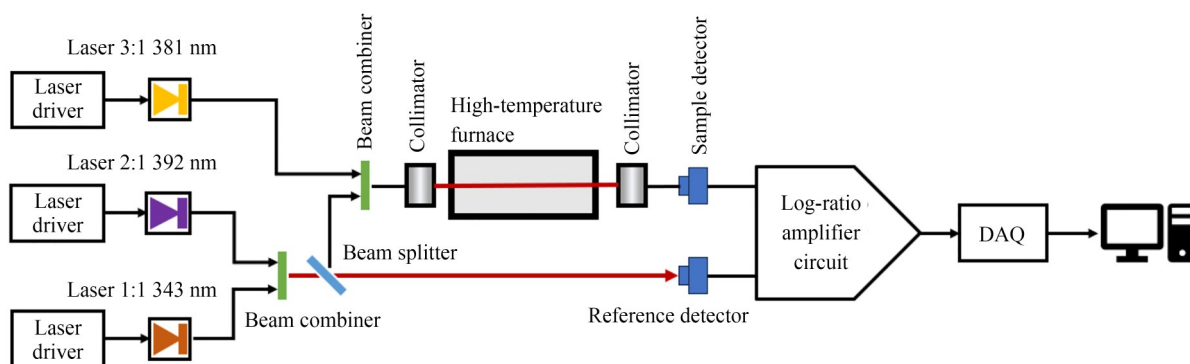


图 8 背景辐射扣除模拟测试及对数放大测试装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of background radiation subtraction simulation test and logarithmic amplification test apparatus

4.1.2 背景辐射自动扣除验证实验结果

用采集卡采集数据,采样率为 60 MHz。图 9 显示了常温下三种叠加了不同幅值的直流偏置(模拟不同幅值的背景辐射)的透射信号及经过背景辐射自动扣除电路扣除以后的信号情况以及跟踪到的直流偏置的情况。直流偏置就是用直流信号驱动 1 381 nm 激光器再合束得到的,用不同幅值的直流信号驱动 1 381 nm 激光器就可以得到不同幅值的直流偏置, N 为辐射大小与激光信号幅值比例。放大后的光强信号的峰值通常在 1 V 至 3 V 之间,由表 1 可以看出,跟踪到的

直流偏置与叠加的直流偏置之间确实有一个差值,这个差值在 0.11~0.15 V,且随着光强信号的增加,该差值也略有增加。这个差值就是由二极管压降带来的,二极管本身存在体电阻,电压越大,则电流越大,在体电阻上损失的电压就越多,因此二极管两端的总压降也就越大。用加法器做一个定值的电压补偿,补偿值给 0.13 V,经过电压补偿以后,不同幅值的直流偏置均可稳定扣除,在光强信号的峰值在 1 V 至 3 V 这个应用范围内,扣除以后的信号会残余 -10~18 mV 的一个偏置,这个残余偏置就是二极管压降波动导

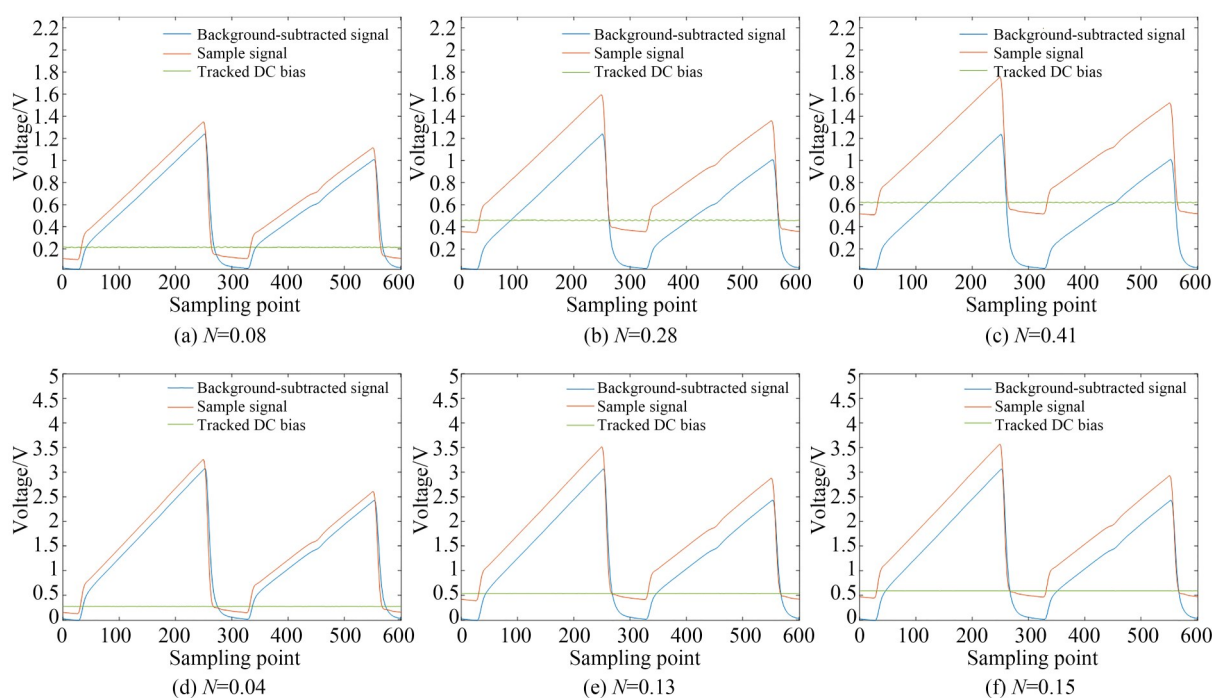


图 9 背景辐射自动扣除结果

Fig. 9 Background radiation automatic subtraction results

表 1 直流偏置测量结果

Tab. 1 DC bias measurement results (V)

信号强度	<i>N</i>	模拟的直流偏置	跟踪到的直流偏置	跟踪偏差	补偿后残留的直流偏置
<i>V</i> =1.24	0.08	0.102	0.214	0.112	0.015
	0.28	0.348	0.459	0.111	0.018
	0.41	0.508	0.623	0.115	0.0145
<i>V</i> =2.66	0.04	0.101	0.241	0.140	−0.003
	0.14	0.364	0.504	0.140	−0.005
	0.19	0.513	0.651	0.138	−0.006
<i>V</i> =3.06	0.04	0.123	0.269	0.146	−0.011
	0.13	0.389	0.536	0.147	−0.010
	0.15	0.443	0.589	0.146	−0.009

致的。为进一步评估电路对时变背景辐射的抑制能力,实验利用函数发生器产生不同频率的正弦波信号驱动辅助激光器(1 381 nm),以模拟高温燃烧场中由热辐射波动引起的动态光强背景。将调制后的背景信号与测量光耦合后输入所设计的扣除电路,考察其对动态背景的实时跟踪与扣除效果。实验结果表明,在 100 Hz 频率范围内,该电路能够对正弦波调制的背景辐射实现稳定跟踪与扣除,输出信号基线未出现明显的残余波动或失真。

测试结果表明,该背景辐射自动扣除电路在 200 kHz 的扫描频率下,能够对幅值在 0.52 V 以内的慢变直流偏置实现有效的跟踪与扣除,且不会对吸收信号中的快速变化成分产生明显削弱或失真。该电路的引入有效降低了背景辐射对对数放大输出基线的影响,为后续吸光度计算和温度反演提供了可靠的信号基础。

4. 1. 3 对数放大测试结果

将高温炉设置到 1 000 K,用采集卡采集对数放大输出信号及进入对数放大的两路信号,如图 10 所示。将对数放大输出信号除以增益 $G=0.375$,再扣除基线得到吸光度,比较对数放大输出处理以后的吸光度与传统透射信号基线拟合等处理后得到的吸光度,如图 11(a)、(b)所示。

可以看到,对数放大输出处理以后的吸光度略有延迟,基线也不完全平坦。延迟是因为对数放大器自身响应时间以及信号链路的相位

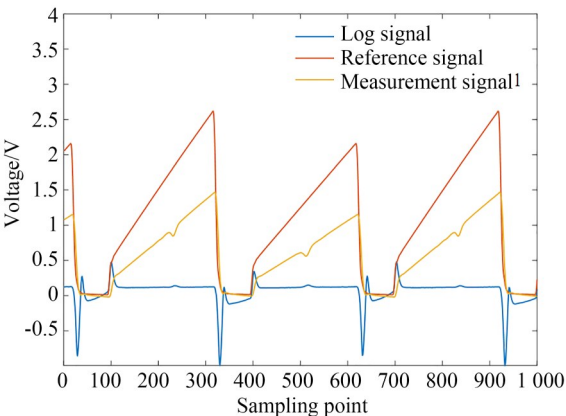


图 10 采集的原始信号

Fig. 10 Raw signal data

延迟。对采集下来的两路输入信号进行分析,透射信号经过背景辐射扣除的处理以后,时序上比参考信号略有延迟,且背景辐射的扣除仍然有残留,对两路输入信号进行时序对齐,且对背景重新进行扣除以后处理得到的吸光度如图 12(a)、(b)所示,可以看到基线平坦,所以时序延迟与背景残留这两者共同作用导致基线不平坦。

从上述对背景辐射自动扣除的分析可知,在电子学上,很难保证两路通道时序完全对齐且背景辐射完全扣除,然而微弱的背景残留及时序偏移都会导致基线不平坦,所以尝试用基线拟合并扣除的方法对基线不平坦进行校正,基线拟合扣除后的吸光度如图 13(a)、(b)所示,计算校正方法下的积分吸光度,如表 2 所示。

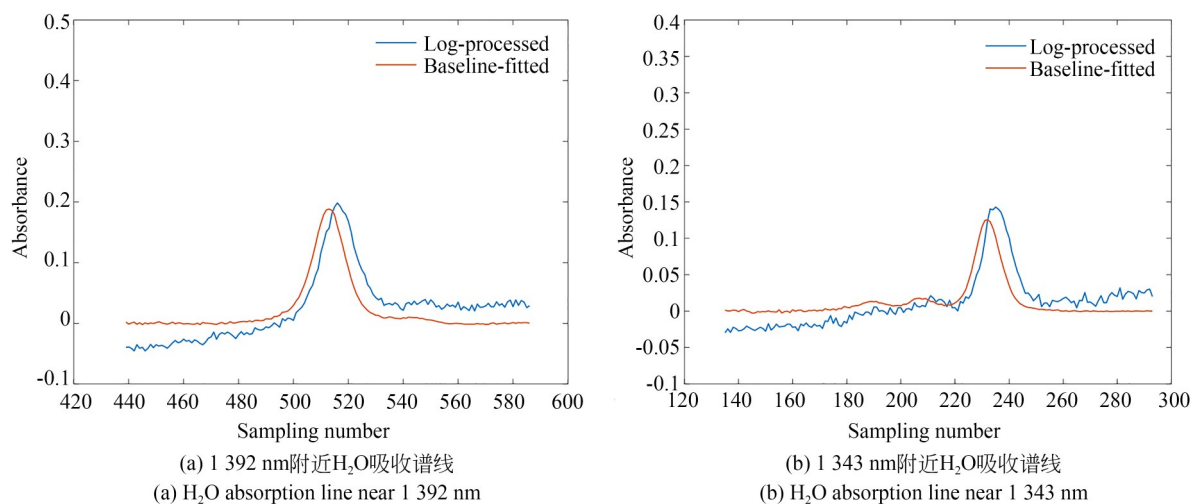


图 11 对数放大输出处理及基线拟合得到的两种吸光度

Fig. 11 Two absorbance obtained from logarithmic amplification and baseline fitting

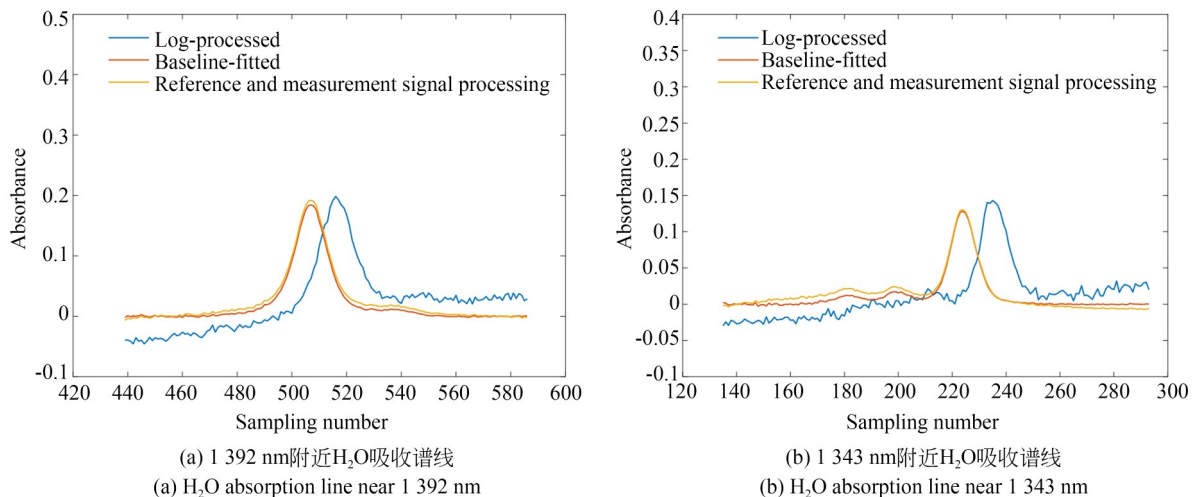


图 12 时序对齐,背景重新扣除后的吸光度

Fig. 12 Absorbance after temporal alignment and background re-subtraction

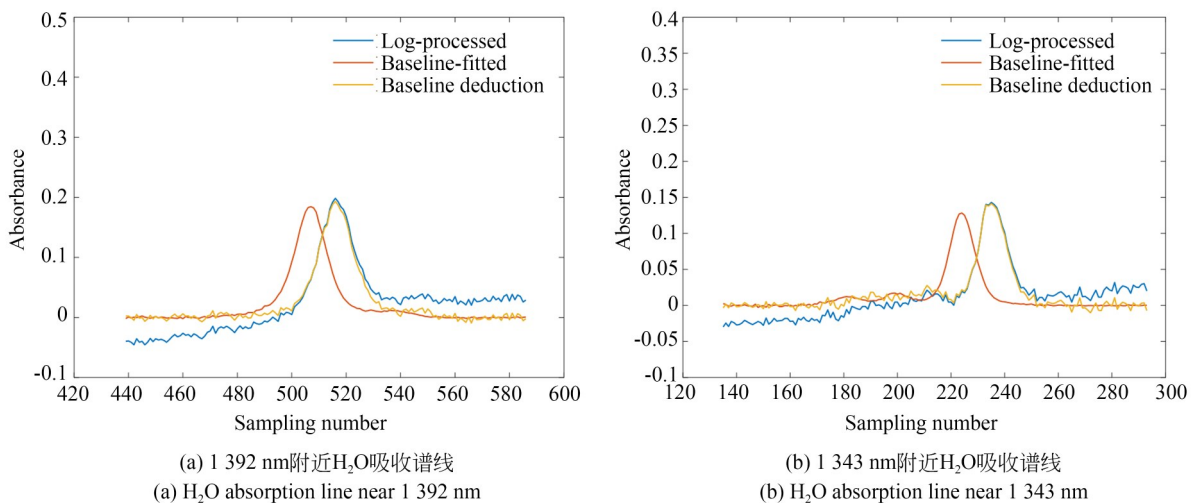


图 13 基线拟合并扣除的对数放大吸光度

Fig. 13 Baseline alignment and logarithmic amplification of absorbance after subtraction

表 2 积分吸光度		
Tab. 2 Integrated absorbance		
吸光度类型	1 392 nm	1 343 nm
Baseline-fitted	0.020 1	0.016 3
Correction	0.021 1	0.018 7

4. 1. 4 背景辐射扣除前后对数放大比较

基于上文同样的方法模拟不同的背景辐射,将上述实验装置的样品激光束穿过高温炉的气

体室,高温炉设定在 1 000 K 的工况,分析不同背景辐射对温度计算的影响及背景辐射自动扣除以后的温度计算,此处的信号均由采集卡采集。图 14(a)、(b)为不同大小的背景辐射对对数放大信号基线偏移的影响及使用背景辐射自动扣除校正以后的对数放大信号。可以看到,未校正之前,随着 N 的增大,对数放大信号的失真也越来越大,校正以后,对数放大信号的基线倾斜范围被控制在了 0.08 以内。

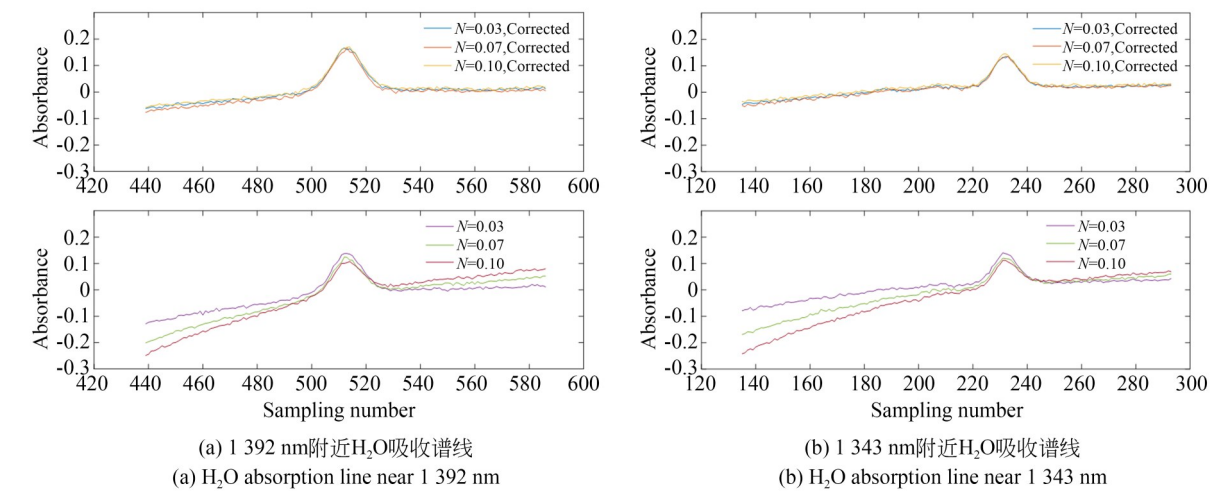


图 14 基线偏移及校正后对数放大信号

Fig. 14 Baseline offset and log-amplified signal after correction

4. 2 温度反演实验

4. 2. 1 实验装置

温度反演验证实验也在实验室的高温炉中

进行,实验装置及基于对数放大的 TDLAS 即时在线温度测量系统如图 15 所示。激光器,扫描波形,扫描频率等均与上述实验装置的配置相同,

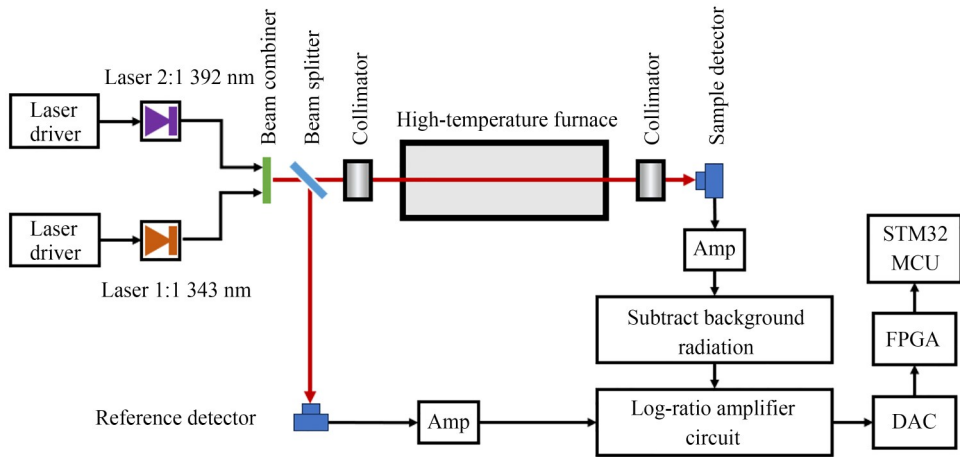


图 15 基于对数放大的可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)高频响应即时在线温度测量系统

Fig. 15 TDLAS high-frequency response real-time online temperature measurement system based on logarithmic amplification

分束器将耦合以后的光束分成两束:参考激光光束和样品激光光束。参考激光光束直接用光纤接到对数放大电路的参考探测器上,而样品激光光束穿过高温炉的气体室以后接到对数放大电路的样品探测器上。

4.2.2 基于对数放大的高频响即时在线温度测量

进一步对基于对数放大的即时在线温度测量系统进行实测,在高温炉中分别设置了 800, 1 000 和 1 100 K 三种工况进行温度反演实验,其实验结果如图 16 所示。

系统在连续运行中可实现 2.5 ms 左右的单次温度反演速度,计算温度在设定温度附近波动。对三个设定温度点的测量数据进行统计分析,结果如表 3 所示。尽管本系统单次温度测量的相对误差约为 8%~12%,但该精度水平可以反映温度变化趋势,满足快速、实时反馈控制的数据时效要求。

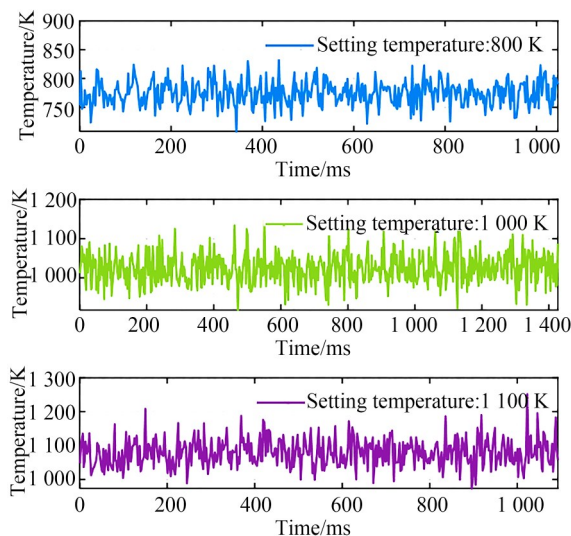


图 16 即时在线温度测量

Fig. 16 Real-time online temperature measurement

表 3 测量精度统计

Tab. 3 Statistics of measurement accuracy

(K)

设定温度	测量平均值	标准差 σ	3σ 波动	相对误差 ($3\sigma/\text{均值}$)
800	775	21	63	8.1%
1 000	1 024	38	115	11.2%
1 100	1 079	42	125	11.6%

5 结 论

为应对发动机燃烧过程中毫秒级瞬态现象的监测需求,本文设计并研制了一种基于对数比放大的硬件快速光谱处理系统。在系统设计方面,采用模拟前端处理与数字后端协同的架构。通过自主设计的背景辐射自动扣除电路,在模拟前端直接消除高温环境引起的直流偏置,避免了对数放大环节的基线偏移;利用对数比放大器将透射光与参考光信号直接转换为与吸光度成正比的电压输出,显著简化了后续数字处理流程。在数字处理部分,由 FPGA 与 MCU 结合,基于双线比值法的修正算法,实现了温度的高速反演。实验结果表明,本系统在 100 kHz 扫描频率下,能够实现单次温度测量时间 2~3 ms 的实时处理能力,满足燃烧过程趋势监测与快速反馈的控制需求。通过硬件层面的信号处理优化,系统有效避

免了复杂软件解调带来的时间延迟,在保持较好稳定性的同时,显著提升了响应速度。综上所述,本文提出的基于对数比放大的硬件快速光谱处理系统,在模拟前端完成关键信号预处理,结合实时数据处理架构与简化反演算法,实现了毫秒级温度测量,为航空发动机等燃烧瞬态过程的在线监测与闭环控制提供了一种新的思路。

作者贡献声明:

李玉涵:研究设计,实验执行,数据分析,论文构思与撰写;

胡佳屹:电子学指导;

姚路:电子学指导,技术支持;

许振宇:理论指导,论文审核;

黄安:理论指导;

阙瑞峰:实验资源提供和项目支持。

参考文献:

- [1] BOLSHOV M A, KURITSYN Y A, ROMANOVSKII Y V. Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2015, 106: 45-66.
- [2] 李桃花, 牛明生, 史永鹏, 等. 可调光程柱面多通池 TDLAS 系统 [J]. *光学精密工程*, 2025, 33 (2): 194-208.
- LI T H, NIU M SH, SHI Y P, *et al.* Adjustable optical path cylindrical multi-pass cell TDLAS system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(2): 194-208. (in Chinese)
- [3] 邢文锦, 李润浩, 毕云峰. 中红外 TDLAS 一氧化氮气体检测系统灵敏度提高 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(23): 3424-3435.
- XING W J, LI R H, BI Y F. Sensitivity improvement of NO gas detection based on mid-infrared TDLAS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(23): 3424-3435. (in Chinese)
- [4] HASTI V R, KUNDU P, SOM S, *et al.* Computation of conventional and alternative jet fuel sensitivity to lean blowout [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2022, 101: 19-31.
- [5] MA J L, HUI X, HAN X, *et al.* Influence of fuel reduction rate on flame dynamics and lean blowout characteristics in a centrally-staged combustor [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 280: 127939.
- [6] DOMEN S, GOTODA H, KURIYAMA T, *et al.* Detection and prevention of blowout in a lean premixed gas-turbine model combustor using the concept of dynamical system theory [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35 (3): 3245-3253.
- [7] RIEKER G B. *Wavelength-Modulation Spectroscopy for Measurements of Gas Temperature and Concentration in Harsh Environments* [D]. Palo Alto: Stanford University, 2009.
- [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]. *Applied Optics*, 2009, 48(29): 5546.
- [9] ZHANG R, XIA J N, AHMED I, *et al.* A fast sensor for non-intrusive measurement of concentration and temperature in turbine exhaust [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 396: 134500.
- [10] SCHWARM K K, SPEARRIN R M. Real-time FPGA-based laser absorption spectroscopy using on-chip machine learning for 10 kHz intra-cycle emissions sensing towards adaptive reciprocating engines [J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2023, 16: 100231.
- [11] 辛文辉, 任卓勇, 樊建鑫, 等. 基于 FPGA 的 TDLAS-WMS 信号控制系统设计及实现 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(5): 0530001.
- XIN W H, REN ZH Y, FAN J X, *et al.* Design and implementation of a field programmable gate array-based signal control system for tunable diode laser absorption spectroscopy-wavelength modulation spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 0530001. (in Chinese)
- [12] 张鑫, 邱海峰, 兰嘉琪, 等. 可编程门阵列 WM-TDLAS 气体检测系统设计及应用 [J]. *光电工程*, 2024, 51(4): 240022.
- ZHANG X, QIU H F, LAN J Q, *et al.* Programmable gate array WM-TDLAS gas detection system design and application [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(4): 240022. (in Chinese)
- [13] KELLY R M, O'BYRNE S. Suitability of tunable diode laser absorption spectroscopy experiments for low density flows [J]. *32ND International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, 2024, 2996: 140002.
- [14] KURTZ J, AIZENGENDLER M, KRISHNA Y, *et al.* Flight test of a rugged scramjet-inlet temperature and velocity sensor [C]. *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, Florida*. AIAA, 2015: AIAA2015-0110.
- [15] AL-MANEA A, BUTTSWORTH D, LEIS J, *et al.* Measurement of water vapour in axisymmetric jet development using TDLAS [C]. *21st Australasian Fluid Mechanics Conference. December 10-13, 2018, Adelaide, Australia*.
- [16] 姚路, 刘文清, 阙瑞峰, 等. 小型化 TDLAS 发动机测温系统的研究及进展 [J]. *实验流体力学*, 2015, 29(1): 71-76.
- YAO L, LIU W Q, KAN R F, *et al.* Research and development of a compact TDLAS system to measure scramjet combustion temperature [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(1): 71-76. (in Chinese)
- [17] Texas Instruments. LOG114 Logarithmic Amplifier

er Data Sheet(Rev. A)[Z]. Texas Instruments Incorporated, 2007.

[18] KRISHNA Y, O'BYRNE S, KURTZ J J. Base-

line correction for stray light in log-ratio diode laser absorption measurements [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(19): 4128.

作者简介:



李玉涵(2000—),女,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要从事激光光谱技术与电子学设计方面的研究。E-mail: lyh1@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:



姚路(1987—),男,河南南阳人,副研究员,硕士生导师,主要从事激光光谱检测方法研究及其电子学设计。E-mail: lyao@aiofm.ac.cn