

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417182

## 基于 DSP 双核解调的光纤光栅解调系统设计\*

李忆祥<sup>1</sup> 邵文军<sup>2</sup> 卫东升<sup>1</sup> 李敏<sup>1</sup> 刘秀峰<sup>3</sup>(1. 江汉大学智能制造学院 武汉 430056; 2. 武汉理工大学交通与物流工程学院 武汉 430070; 3. 湖北第二师范学院  
物理与机电工程学院 武汉 430205)

**摘要:** 基于法布里-珀罗解调方法采样频率低,在测量变化频率较高的物理量时会产生误差。针对这一问题,本文提出了一种使用可调谐激光器构建的多通道高性能光纤光栅波长解调系统,以满足光纤光栅传感器在高精度和高频率测量中的应用需求。设计了快速同步刷新程序提升解调频率和实时性能,双核数据处理程序优化数据处理效率。最后使用电机和等强度梁进行功能和性能测试,结果表明该方案扫描频率达到 100 Hz,系统平均拟合误差为 6.23 pm,显著优于对比系统的平均拟合误差 24.10 pm。线性度达到  $R^2=0.9999$ ,高于对比系统的  $R^2=0.9995$ ,验证了其在高性能光纤光栅解调中的可行性。

**关键词:** 光纤布拉格光栅;可调谐激光器;光纤传感

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Design of a fiber bragg grating demodulation system based on dual-core DSP

Li Yixiang<sup>1</sup> Shao Wenjun<sup>2</sup> Wei Dongsheng<sup>1</sup> Li Min<sup>1</sup> Liu Xiufeng<sup>3</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Jianghan University, Wuhan 430056, China; 2. School of Traffic and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Physics and Mechanical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** The Fabry-Perot demodulation method suffers from low sampling frequency, leading to errors when measuring physical quantities with high frequency variations. To address this issue, this paper proposes a high-performance multi-channel fiber Bragg grating wavelength demodulation system using a tunable laser, designed to meet the application requirements of fiber Bragg grating sensors in high-precision and high-frequency measurements. A fast synchronous refresh program was developed to enhance the demodulation frequency and real-time performance, while a dual-core data processing program was implemented to optimize data processing efficiency. Functional and performance tests were conducted using a motor and an isometric beam. Results showed that the proposed system achieved a scanning frequency of 100 Hz and an average fitting error of 6.23 pm, significantly outperforming the comparison system with an average fitting error of 24.10 pm. The linearity reached  $R^2=0.9999$ , higher than the comparison system's  $R^2=0.9995$ , validating its feasibility in high-performance fiber Bragg grating demodulation applications.

**Keywords:** fiber Bragg grating; tunable laser; optical fiber sensing

## 0 引言

光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器是一种高灵敏度的光学传感器,具备电绝缘性好、抗电磁干扰、耐高低温、体积小、质量轻等优点<sup>[1-3]</sup>,广泛应用于状态监测<sup>[4]</sup>、液位监测<sup>[5]</sup>、振动检测<sup>[6]</sup>、航空航天<sup>[7]</sup>、智能穿戴设备<sup>[8]</sup>、桥梁<sup>[9]</sup>等领域。FBG在传感测量中,通过外界参数变化引起的光栅结构参数变化,测量其反射或透射光谱特

征,可实现对目标物理参量的精确获取。在FBG传感器技术的发展过程中,杨焯等<sup>[10]</sup>设计了基于FPGA控制的光纤光栅解调仪,解调精度和重复性较高;文丰等<sup>[11]</sup>提出了一种基于光纤标准具的F-P可调谐滤波器光纤光栅解调系统,用于结构应力监测。利用直接数字频率合成技术原理设计驱动源,以确保解调系统的最终分辨率达到1 pm。Darwich等<sup>[12]</sup>研制了一种新型的低成本光纤布拉格光栅解调系统,能够实现1.7 nm范围内的波长解调。在温度测量

收稿日期:2024-10-22

\* 基金项目:东莞市重点领域研发项目(20231200300072)、高空作业车安全性增强关键技术(2024DJC094)、湖北省教育厅科学研究计划项目(Q20233006)、科技人才服务企业项目(RCFWQY202400379)资助

实验中,该系统以 1 kHz 的调制频率运行,成功达到 8 pm 的解调精度。王鹏飞等<sup>[13]</sup>提出了一种基于直接存储器访问(direct memory access, DMA)的光谱数据高速传输方法,通过 Zynq 芯片构建 FBG 解调系统,实现在 320 Mbit/s 带宽下 34 kHz 解调速率同步传输光谱数据,且具有高稳定性。甄茜<sup>[14]</sup>在研究基于法布里-珀罗 Fabry-Perot, F-P) 滤波器解调技术的(系统时指出,当解调频率低于 10 Hz 时,该系统的解调精度可达 1 pm。F-P 滤波器通过压电陶瓷来调节腔长,但由于压电陶瓷存在迟滞和蠕变等特性,这些非线性效应会对高频变化的物理量检测产生影响,从而降低解调系统的精度。

针对目前市面上大多解调仪体型大、成本高,且解调精度和解调频率难以同时兼顾等问题<sup>[15]</sup>。本文提出了研制一款具备多通道高速扫描能力的小型可调谐激光器解调系统。该系统通过引入可调谐激光器,替代了传统的可调谐 F-P 滤波器,通过调节激光器的三路电流,实现了不同波段窄带光的精确发射。在系统设计中为实现高速数据刷新,采用了定时器、DMA、优化的通用输入输出(general purpose input output, GPIO)操作相结合的方法。构建了一个高效的数据处理流程,满足了对电流快速控制的严格要求。同时为进一步提升系统性能,解调系统采用了双核心信号处理器架构。该架构有效克服了单核处理器在高速信号处理任务中的局限性,提升了整体的运算效率和数据处理能力。

最后,通过双核功能测试和系统性能评估,验证了该系统在双核架构下的解调频率和解调精度。

### 1 系统设计方案

基于可调谐激光器的布拉格光纤光栅解调系统原理图如图 1 所示,分为 3 个模块,光路系统、控制板解调系统和通信系统组成。

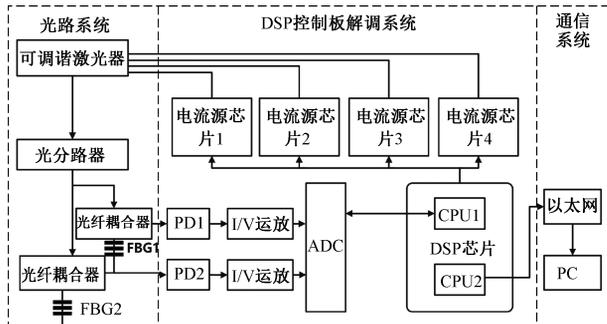


图 1 解调仪工作原理

Fig. 1 Working principle of the demodulator

本文描述的解调系统的核心工作流程包括以下关键组件:数字信号处理器(digital signal processor, DSP)芯片、可调谐激光器、光分路器、光纤耦合器、光电探测器以及传输模块。具体流程为:

DSP 核心 1 通过数模转换器驱动电流源,根据激光器的预标定数据精确调控波长输出。窄带光经光分路器分配至 12 个通道后,通过光纤耦合器传输至光电探测器,将光信号转换为电信号。经过放大后,电信号通过模数转换器转化为数字信号。核心 1 利用 DMA 将采集的数字信号高速传输至公共内存,核心 2 从中提取数据进行波长相解调,计算中心波长值,并通过以太网发送至上位机,实现数据的实时传输和显示。

### 2 波长输出原理

可调谐激光器凭借高功率、窄线宽、强稳定性和 1 pm 分辨率,是光纤光栅解调的理想选择。本设计采用调制光栅 Y 分支结构(modulation grating Y branch, MG-Y)型激光器, MG-Y 型激光器的结构如图 2 所示。

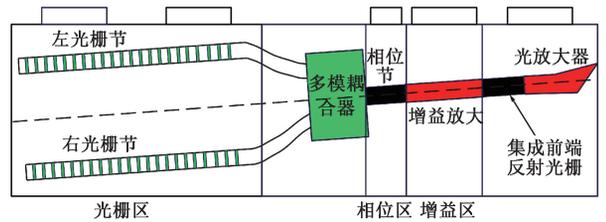


图 2 可调谐激光器结构

Fig. 2 Structure of the tunable laser

通过光栅 Y 分支结构与 Vernier 效应,利用温度或电场调节光栅间距,实现了宽频率范围内的高精度调谐,显著扩展了波长调谐范围。激光器输出特性由五组电流控制:增益和光放大器电流用于调节光强,左、右光栅及相位电流实现波长调谐;相位电流填补光栅电流覆盖的频率空缺,确保波长输出连续性和一致性。

同时为实现 1 525~1 565 nm 范围的连续波长输出,本设计采用 AD9764DAC 芯片,通过 14 位分辨率实现电流的快速精确控制。其原理图如图 3 所示。

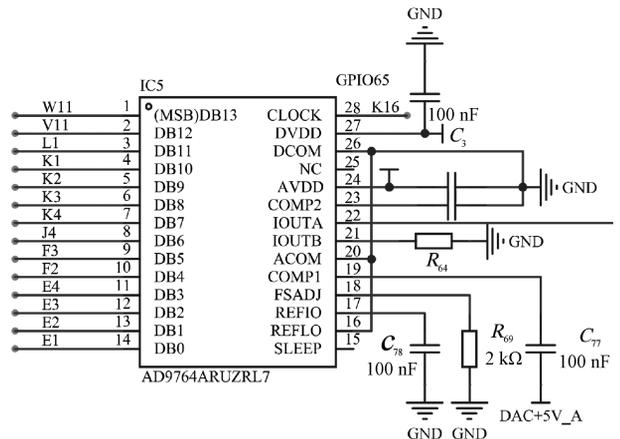


图 3 AD9764DAC 芯片原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the AD9764DAC

随后进行实际测试验证芯片性能。将 DA 和 PWM 信号设置为 1 Hz,并采集了实验数据,具体结果如图 4 和图 5 所示。实验结果表明,光谱仪测得的电流输出波形与系统设定的波形在形态及时间轴变化上表现出高度一致性,证明了 AD9764DAC 芯片输出电流波形的准确性。

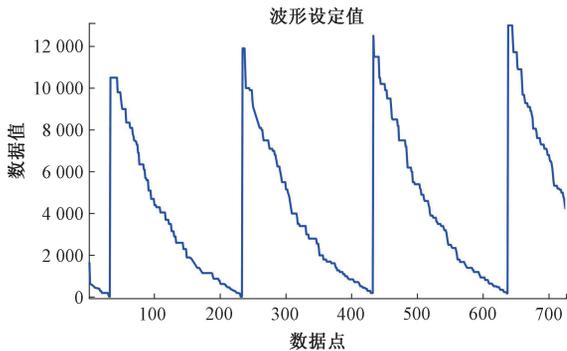


图 4 波形设定  
Fig. 4 Waveform setting



图 5 示波器波形  
Fig. 5 Oscilloscope waveform

### 3 控制程序原理

#### 3.1 双核程序设计

为解决单核架构下 CPU 负载过高、实时性不足的问题,本设计采用了双核架构,实现了多任务的高效分配与协同处理。单核架构中,需控制 3 个电流源和 40 个 GPIO 端口,同时执行模数转换和数据处理,CPU 使用率高达 85%,扫描周期为 15 ms (66.7 Hz),显然无法满足高实时性需求。

在双核架构下,程序将任务精细划分,双核控制框图如图 6 所示。

由 DSP 核心 1 专注于信号采集与初步处理,耗时仅为 5 ms,CPU 使用率从原来的 85%降至 40%;核心 2 则负责波长解调与复杂的数据处理,耗时同样为 5 ms,CPU 使用率为 45%。双核间通过高速共享内存和优化的调度机制实现无缝协作,使得扫描周期缩短至 10 ms,频率提升至 100 Hz,系统整体 CPU 使用率降低至 70%。程序流程图如图 7 所示。

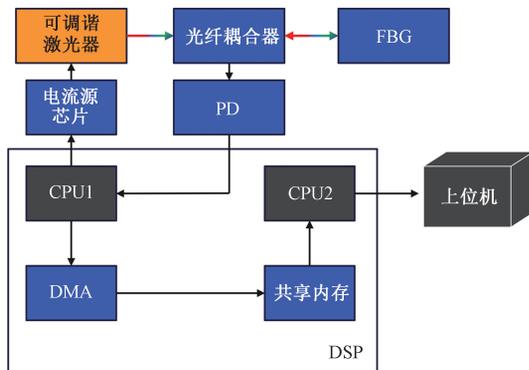


图 6 双核工作原理  
Fig. 6 Dual-Core working principle

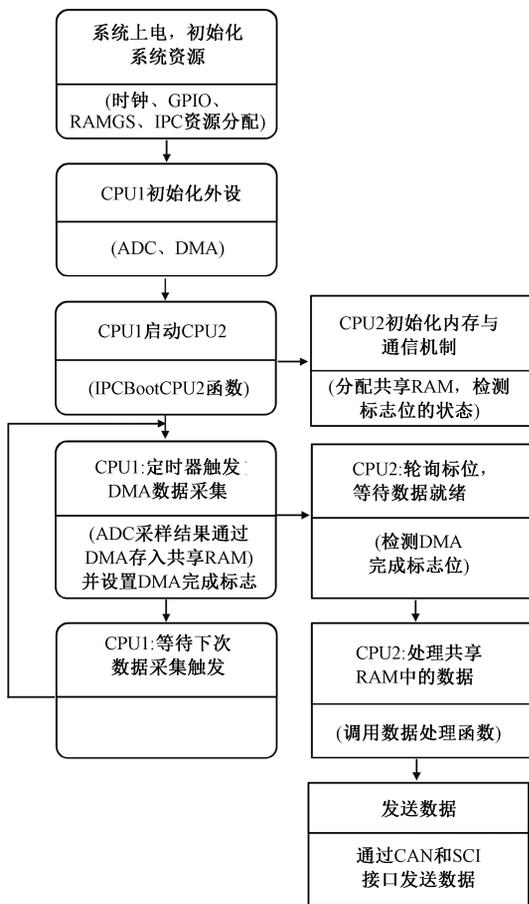


图 7 双核程序设计流程  
Fig. 7 Dual-core program design flowchart

系统启动时,核心 1 负责初始化外设,核心 2 完成内存和通信机制的初始化,确保双核间的高速数据共享。核心 1 通过模数转换器采集光电探测器输出的模拟信号,将其实时转换为数字信号,并借助 DMA 模块将采集到的数据高速传输至公共内存。核心 2 从公共内存中提取核心 1 传输的数字信号,执行降噪、波长解调等复杂数据处理任务,精确计算光纤光栅的中心波长。在完成数据处理后,核

心 2 通过以太网将计算结果传输至上位机,实现波长数据的实时显示和记录。与此同时,核心 2 还监控公共内存中的标志位,确保双核间的任务切换无缝衔接。

### 3.2 快速同步 GPIO 刷新程序设计

为实现激光器输出波段的精确控制,本设计开发了一种快速同步 GPIO 刷新程序,用于高速更新四组标定数据。这一程序通过直接控制电流源芯片引脚调节输出电流,突破了在主程序中执行此任务时无法满足实时性需求且占用大量资源的限制。程序的核心在于通过系统定时器和周期性中断,严格控制数据刷新时机,确保每次更新的高精度。同时,利用 DMA 技术实现数据从内存到硬件的高效传输,全程无需 CPU 参与,有效降低了系统的负载并提高了传输效率。在设计中为每组标定数据分配了独立的 DMA 通道,使得数据能够直接传输至对应的 GPIO 端口,保障了更新操作的实时性和稳定性。程序流程框图如图 8 所示。

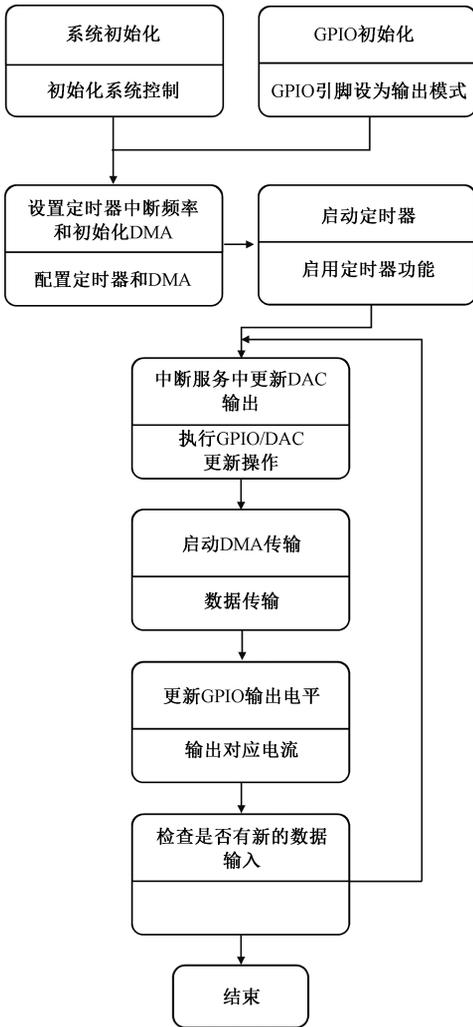


图 8 快速同步 GPIO 刷新程序流程

Fig. 8 Fast synchronous GPIO refresh program flowchart

当 DMA 完成数据传输后,程序调用专用的 GPIO 操

作函数调整输出状态,驱动电流源芯片产生精确的电流,从而实现对激光器波段的快速调整。这种方法结合了 DMA 的高速传输能力与 GPIO 的精确控制,不仅提升了系统响应速度,还大幅提高了波段控制的精度,满足了高精度激光器控制的技术需求。在程序设计完成后,通过逻辑分析仪捕获了 15 个 GPIO 引脚的电压波形,其中第 15 引脚被配置为时钟信号。波形如图 9 所示。

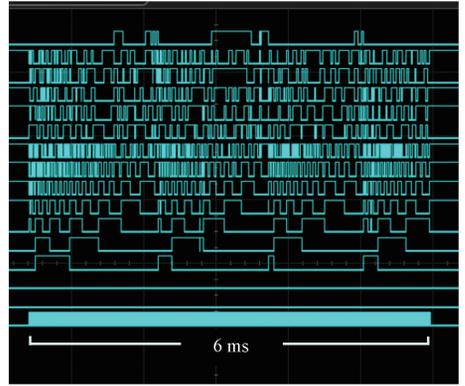


图 9 GPIO 引脚电压波形

Fig. 9 GPIO pin voltage waveform

从波形图中可以清晰观察到,各数据引脚(D0~D14)在 6 ms 内表现出不同的电压切换,充分反映了快速同步 GPIO 刷新程序在实际硬件环境下的执行效果。尤其是 D15 引脚呈现出周期性的高低电平转换,作为时钟信号为系统中的数据传输和处理提供了稳定的时序基准。通过分析波形,可以确认 GPIO 刷新程序在硬件上运行正常,且时钟信号(D15)的稳定性确保了数据的同步性和一致性,证明了程序的可行性。

## 4 实验验证

### 4.1 双核功能测试

通过 CCS 编程软件进入调试模式,监控共享内存,以观察 CPU1 是否成功将数据传入共享内存。在通道 11 插入应变传感器,进入调试模式读取共享内存内容,得到的光谱数据波形如图 10 所示。

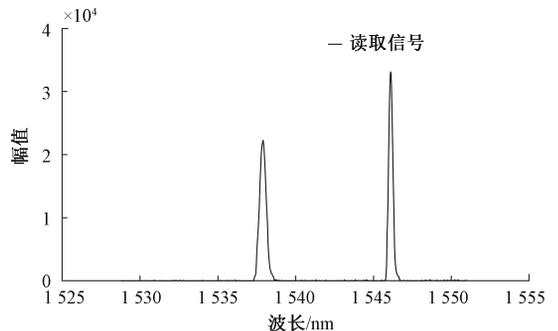


图 10 光谱数据波形

Fig. 10 Spectrum data waveform

从图 10 中可以看出, DSP 核心 1 成功地将数据传输到了共享内存中。接下来, 测试 DSP 核心 2 是否能够成功解调光谱数据。通过监视 DSP 核心 2 程序中的 `g_force_Wave` 数组, 并利用动态测试实验装置来观察解调后的波长数据。

首先, 将光纤传感器附着在柔性板上, 并将柔性板的一端固定。另一端通过连杆与电机相连。当电机旋转时, 驱动柔性板进行周期性的弯折运动。由于电机的旋转运动特性, 传感器采集的应力波长近似为正弦波形。经过调试, 最终得到的波形如图 11 所示。

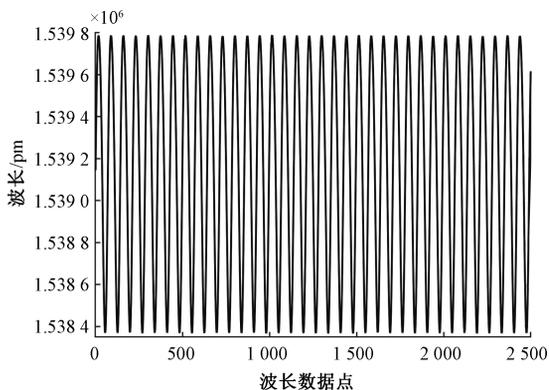


图 11 读取波形数据

Fig. 11 Waveform data reading diagram

从图 11 中可以看出, DSP 核心 2 能够对光谱数据进行峰值检测, 并将数据存入对应的数组, 从而实现波长解调。

#### 4.2 解调系统性能测试实验

为了测试解调仪的性能, 首先进行解调频率测试, 系统的搭建如图 12 所示。在电机匀速旋转过程中, 安装在柔性板上的传感器感应到的应变呈类似正弦曲线的变化模式。传感器所记录的应变波长数据与标准的正弦波形高度吻合, 因此可以近似认为检测到的应变信号为正弦波信号。

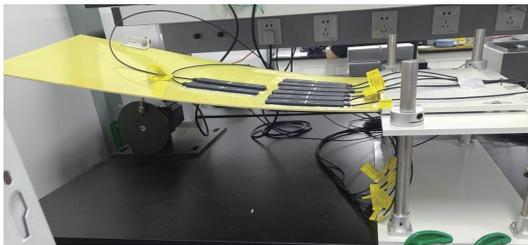


图 12 解调频率测试实验装置

Fig. 12 Demodulation frequency test experimental setup

所采集的数据如图 13 所示。电机每旋转一周的时间大约为 2.5 s, 共进行了 10 周的旋转, 因此总旋转时间为 25 s。实际采集的样本数量为 2 500 个, 据此可以计算出解调系统的解调频率为 100 Hz, 符合系统的性能要求。

之后进行精度测试, 使用量程为 3 000 微应变的大应

变等强度梁实验台进行实验。首先, 将光纤光栅传感器贴在等强度梁上。然后, 通过依次加载 5 个重量为 5 N 的砝码, 施加不同程度的应变, 使悬臂梁产生相应的变形。粘附在梁表面的 FBG 传感器会经历相同的应变。用上位机记录解调系统解析出的传感器反射光偏移量, 并对 3 次实验的结果进行分析。同时, 将基于 MEMS 振镜的解调系统与本文提出的解调系统进行对比测试。实验系统如图 14 所示。

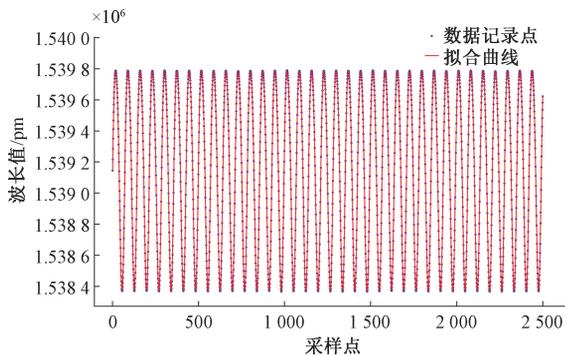


图 13 波长解调频率测试数据

Fig. 13 Wavelength demodulation frequency test data

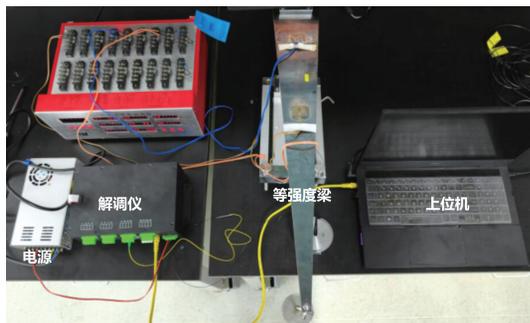


图 14 性能测试实验系统

Fig. 14 Performance testing experimental system

通过使用砝码依次进行加载并重复 3 次, 分别计算每次加载的波长平均值。然后根据公式求得总行程的波长平均值。最后采用最小二乘拟合法得到拟合曲线。本系统与对比系统的测试结果如图 15 和 16 所示。

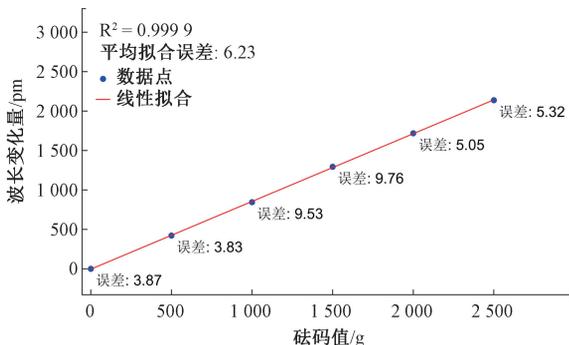


图 15 本系统测试结果

Fig. 15 Test results of this system

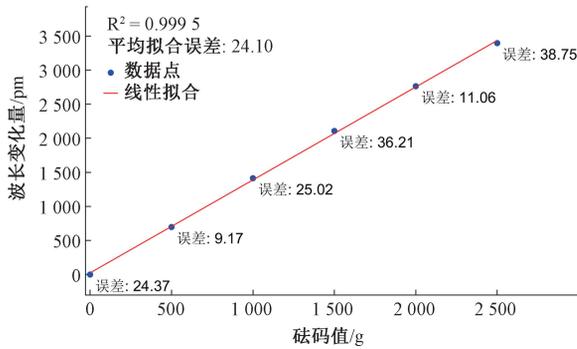


图 16 对比系统测试结果

Fig. 16 Test results of the comparison system

通过对本系统测得的波长变化量与对比系统的波长变化量分别进行拟合,并将拟合误差缩放至同一尺度进行比较。结果表明,相较于对比系统,本文提出的光纤光栅解调系统具有较小的拟合误差,其平均拟合误差为 6.23 pm,而对比系统的平均拟合误差为 24.10 pm。此外,本系统的线性度也优于对比系统。这些结果表明,该光纤光栅传感器解调系统在精度和线性度方面具有明显优势,从而证明其在光纤传感器解调过程中表现出更高的测量精度和线性度。

## 5 结 论

本文提出了一种基于 DSP 双核解调的光纤光栅波长解调系统,通过快速同步 GPIO 刷新程序实现了控制激光器输出不同波段的光。通过引入双核 DSP 结构,有效提升了解调系统的处理性能,突破了传统单核 DSP 处理器的性能限制。双核实验结果表明,DSP 核心 1 成功将数据传输至共享内存,核心 2 能够对光谱数据进行峰值检测,实现波长解调。系统性能测试表明,系统解调频率达到 100 HZ 同时系统的平均拟合误差为 6.23 pm,对比系统的平均拟合误差为 24.10 pm。本系统线性度达到  $R^2=0.9999$ ,而对比系统的线性度为  $R^2=0.9995$ 。这些结果证明了本文提出的光纤光栅解调系统在精度和速度方面的显著优势,展示了其在光纤传感器解调过程中的优越性能,适用于工程应用。

## 参考文献

- [1] 刘显明,任怡霖,周峰,等. 面向高速动态测量的光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国激光,2023, 50(10):9-34.  
LIU X M, REN Y L, ZHOU F, et al. Research progress on fiber Bragg grating sensing signal demodulation technology for high-speed dynamic measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(10): 9-34.
- [2] 潘睿智,冯艳,张洪涛,等. 基于 DDS 信号和插值法的 FBG 解调系统研究[J]. 电子测量技术,2023, 46

(24):6-13.

PAN R ZH, FENG Y, ZHANG H P, et al. Research on FBG demodulation system based on DDS signal and interpolation method [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24): 6-13.

- [3] BONOPERA M. Fiber-Bragg-grating-based displacement sensors: Review of recent advances[J]. Materials, 2022, 15(16): 5561.
- [4] SUN X Y, ZENG L, HU Y W, et al. Fabrication and sensing application of phase shifted Bragg grating sensors[J]. Materials, 2022, 15(10): 3720.
- [5] 杨才千,唐人杰,文峰,等. 光纤光栅液位传感器设计及其灵敏度分析[J]. 仪表技术与传感器,2021(10): 37-41.  
YANG C Q, TANG R J, WEN F, et al. Design and sensitivity analysis of fiber Bragg grating liquid level sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(10): 37-41.
- [6] 魏鹤鸣,车嘉炜,侯林嵩,等. 高精度光纤光栅振动解调系统研究与应用[J]. 国外电子测量技术,2023, 42(1): 82-88.  
WEI H M, CHE J W, HOU L S, et al. Research and application of high-precision fiber Bragg grating vibration demodulation system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 82-88.
- [7] 王威,陶传义,朱悦青,等. 光纤光栅传感器阵列在撞击定位监测中的应用[J]. 仪器仪表学报,2022, 43(6): 76-82.  
WANG W, TAO CH Y, ZHU Y Q, et al. Application of fiber Bragg grating sensor array in impact localization monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 76-82.
- [8] 饶洪承. 基于光纤 Bragg 光栅阵列的多通道手部姿态传感及手势识别研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2023.  
RAO H CH. Research on multi-channel hand posture sensing and gesture recognition based on fiber Bragg grating array[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [9] ZHU W, SHEN Q, QIN H. Monitoring of prestress and bond stress of self-sensing FBG steel strand[J]. Measurement, 2021, 177: 109246.
- [10] 杨焯,冯绍彬,翟春玲,等. 基于 FPGA 的光纤光栅解调仪研制[J]. 工业仪表与自动化装置,2020(6): 101-104.  
YANG Y, FENG SH B, ZHAI CH L, et al. Development of a fiber Bragg grating demodulator based on FPGA [J]. Industrial Instruments & Automation Devices, 2020(6):101-104.

- [11] 文丰, 张岩, 贾兴中. 基于F-P可调谐滤波器的光纤光栅解调系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 38-43.  
WEN F, ZHANG Y, JIA X ZH. Design of an F-P tunable filter based fiber Bragg grating demodulation system [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(9): 38-43.
- [12] DARWICH D, YOUSSEF A, PISCO M, et al. Investigation of low-cost interrogation technique based on modulated distributed feedback laser [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(5): 2460-2466.
- [13] 王鹏飞, 宋言明, 王永千, 等. 光纤布拉格光栅解调系统的光谱数据高速传送方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 65-71.  
WANG P F, SONG Y M, WANG Y Q, et al. High-speed transmission method for spectral data of fiber Bragg grating demodulation system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 65-71.
- [14] 甄茜. 基于F-P滤波器的高精度光纤光栅解调系统研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2019.  
ZHEN Q. Research on high-precision fiber Bragg grating demodulation system based on F-P filter [D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2019.
- [15] 孙智鹏, 管迎春, 何君, 等. 基于风机叶片应力监测的光纤光栅解调电路的研究与设计[J]. 现代信息技术, 2023, 7(8): 171-174.  
SUN ZH P, GUAN Y CH, HE J, et al. Research and design of fiber Bragg grating demodulation circuit for wind turbine blade stress monitoring [J]. Modern Information Technology, 2023, 7(8): 171-174.

### 作者简介

李忆祥, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式软件开发。

E-mail: 1434423843@qq.com

刘秀峰(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为智能装备制造和光学加工及检测。

E-mail: liuxiufeng15@hue.edu.cn