

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于内调制的光纤干涉振动测量系统研究

贾鹏, 谢建东, 楼盈天, 杨晔, 杨涛

引用本文:

贾鹏, 谢建东, 楼盈天, 等. 基于内调制的光纤干涉振动测量系统研究[J]. *光电工程*, 2025, **52**(1): 240233.

Jia P, Xie J D, Lou Y T, et al. Research on fiber optic interferometric vibration measurement system based on internal modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(1): 240233.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.240233>

收稿日期: 2024-10-07; 修改日期: 2024-12-09; 录用日期: 2024-12-10

相关论文

Specialty optical fibers for advanced sensing applications

Huanhuan Liu, Dora Juan Juan Hu, Qizhen Sun, Lei Wei, Kaiwei Li, Changrui Liao, Bozhe Li, Cong Zhao, Xinyong Dong, Yuhan Tang, Yihong Xiao, Gerd Keiser, Perry Ping Shum

Opto-Electronic Science 2023, **2**(2): 220025 doi: [10.29026/oes.2023.220025](https://doi.org/10.29026/oes.2023.220025)

Seeing at a distance with multicore fibers

Haogong Feng, Xi Chen, Runze Zhu, Yifeng Xiong, Ye Chen, Yanqing Lu, Fei Xu

Opto-Electronic Advances 2024, **7**(7): 230202 doi: [10.29026/oea.2024.230202](https://doi.org/10.29026/oea.2024.230202)

基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究

张博智, 刘柯, 刘琨, 江俊峰, 张曼, 刘铁根

光电工程 2023, **50**(2): 220205 doi: [10.12086/oe.2023.220205](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220205)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

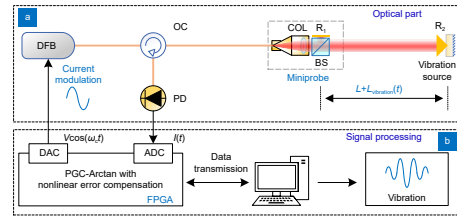
DOI: 10.12086/oe.2025.240233

CSTR: 32245.14.oe.2025.240233

基于内调制的光纤干涉 振动测量系统研究

贾鹏, 谢建东*, 楼盈天, 杨晔, 杨涛

浙江理工大学精密测量技术实验室, 浙江 杭州 310018



摘要: 研制了一种基于内调制的光纤干涉振动测量系统。对分布式反馈激光器 (DFB) 进行电流内调制, 产生正弦频率调制单频激光。经光纤环形器与光纤微探头输出测量光对振动源进行干涉测量, 返回的测量光与光纤微探头自反射的参考光进行干涉获得相位生成载波 (PGC) 干涉信号。基于可编程逻辑门阵列 (FPGA) 数字信号处理平台设计了 PGC 干涉信号解调算法, 通过 5 参数椭圆拟合提取附加光强调制等因素引入的误差系数, 对相位非线性误差进行补偿, 实现振动位移的高精度测量, 并采用快速傅里叶变换 (FFT) 算法对振动位移频谱进行分析。进行了理论分析并搭建了振动测量系统, 开展了干涉信号解调实验、位移测量实验和振动测量实验。实验结果表明, 该系统的振动频率范围覆盖 1142 Hz; 在 10 μm 的位移步进实验中, 测量结果的平均偏差为 0.173 μm ; 振动频率的分辨率为 1.221 Hz, 谐波失真率小于 1.36%; 有望应用于精密振动测量领域。

关键词: 振动测量; 内调制; 微探头; 相位生成载波; 椭圆拟合

中图分类号: TN249

文献标志码: A

贾鹏, 谢建东, 楼盈天, 等. 基于内调制的光纤干涉振动测量系统研究 [J]. 光电工程, 2025, 52(1): 240233

Jia P, Xie J D, Lou Y T, et al. Research on fiber optic interferometric vibration measurement system based on internal modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(1): 240233

Research on fiber optic interferometric vibration measurement system based on internal modulation

Jia Peng, Xie Jiandong*, Lou Yingtian, Yang Ye, Yang Tao

Precision Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Zhejiang, Hangzhou 310018, China

Abstract: A fiber microprobe vibration measurement system based on internal modulation has been developed. A sinusoidal phase modulated laser source is generated by modulating the current of the distributed feedback laser (DFB) with a sinusoidal signal. After passing through a fiber circulator and a fiber microprobe, the output laser beam is used to measure the displacement of a vibration source. The returned laser beam interferes with the reference laser reflected by the fiber microprobe to generate a phase generated carrier (PGC) interference signal. A real-time PGC signal processing algorithm is designed through a programmable logic gate array (FPGA) digital computing platform. A five-parameter ellipse fitting method is utilized to extract the error items introduced by additional intensity modulation and other factors and compensate for the phase nonlinear error. The fast Fourier transform

收稿日期: 2024-10-07; 修回日期: 2024-12-09; 录用日期: 2024-12-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF0705803); 浙江理工大学科研基金 (1112293261222, 23222133-Y)

*通信作者: 谢建东, xiejiaandong@yeah.net

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

(FFT) algorithm is unitized to analyze the vibration displacement. Theoretical analysis was conducted and a vibration measurement system was built. A series of experiments were conducted, including PGC signal demodulation, displacement measurement, and vibration measurement. The experimental results show that the vibration frequency range of the system covers 1142 Hz. In the 10 μm step displacement experiment, the average deviation measured is 0.173 μm . The resolution of vibration measurement is 1.221 Hz, and the harmonic distortion is less than 1.36%. The measurement system is expected to be applied in the field of precise vibration measurement.

Keywords: vibration measurement; internal modulation; microprobes; phase generated carrier; ellipse fitting

1 引言

振动测量在桥梁探伤、水声探测、医疗诊断和声学传感等领域中得到了广泛应用^[1-4]。振动测量方法可分为接触式测量^[5-6]与非接触式测量^[7-10]两类,其中接触式测量方法又分为机械法和电测法。机械法主要利用杠杆原理将振动量放大后通过杠杆末端的笔直接在纸上绘制振动波形,具有很强的抗干扰能力;电测法通常利用传感器将物体的振动转换为电信号,再从电信号中解析出振动信息,具有灵敏度高、动态范围大的特点。但这两种方法的使用场合存在一定限制。非接触式测量主要是光测法,包括外差干涉、零差干涉、正弦相位调制等方法,通过测量光路探测振动信息并转移至光信号相位,最后从光信号中还原振动信息^[10-12]。其中基于正弦相位调制干涉测量方法以其抗电磁干扰能力强、灵敏度高、动态范围大等优点成为了近些年的研究热点^[12-15]。下面从干涉光路结构、PGC干涉信号处理二个关键技术展开分析。

正弦相位调制干涉仪可分为外调制和内调制两种干涉光路结构。外调制是通过在光路参考臂中加入压电陶瓷(PZT)^[16-18]或电光调制器(EOM)^[19-21]对参考光进行正弦相位调制的,其优点是调制过程中不会引入附加光强调制,同时调制深度直接由调制信号强度来决定,不受待测距离影响。但引入额外的器件会增加测量系统硬件成本,并且参考臂较长,可能会引入漂移误差。内调制则直接通过激光电流进行正弦调制,使测量光与参考光的激光频率都进行正弦扫频,在非等臂长的干涉光路中等效产生正弦相位调制效果^[22-23]。其优点是无需引入额外的调制器件,结构简单、成本低^[24],并且参考臂可以缩短,降低漂移影响。此外,内调制干涉测量光路中的准直器、分光镜、参考镜可集成至单个超小型的光纤微探头内,提高了实用性^[25]。在光纤微探头中,参考臂与测量臂共用同一段光纤,

所得相位差中直接抵消了光纤漂移的影响,具有良好的应用前景^[26]。

在正弦相位干涉中,调制深度、载波相位延迟、伴随光强调制都会引入非线性误差^[27-28]。现有的非线性补偿方法通常只针对其中部分非线性误差因素进行补偿。侯长波等人提出了一种基于正交锁相技术的载波相位延迟自动提取算法,然后通过调整混频信号的初始相位来降低载波相位对信号解调的影响^[29]。张帅通过引入一个参考信号对光强扰动进行估计,并利用这个估计值对干涉信号的解调结果进行修正,消除了伴随光强调制的影响^[30]。Zhang等人提出一种微分交叉除乘法对一阶和二阶信号进行处理,有效消除了调制深度和载波相位延迟的影响^[31]。Dong等人面对大量程与高分辨力的位移测量中非线性误差因素同时补偿的问题,分别设计了调制深度、载波相位、伴随光强调制相位延迟提取与补偿算法,有效补偿了非线性误差^[32-33]。

本课题组前期对正弦相位调制激光干涉测量中的PGC相位解调非线性误差补偿、光路漂移补偿等方面进行了大量研究^[34-39]。本课题组在前期基础上展开了进一步研究,为补偿光纤漂移影响并减小系统体积,采用内调制激光与光纤微探头式光路结构设计振动测量系统;为补偿非线性误差,设计了基于5参数椭圆拟合的非线性误差补偿方法;为实现实时振动测量,基于FPGA设计了相位解调算法并采用FFT算法进行振动分析,最终研制了一套内调制的光纤干涉振动测量验证系统,并开展了实验验证与分析。

2 原理

2.1 基于内调制的光纤微探头式振动测量基本原理

如图1所示,基于内调制的光纤微探头式振动测量系统由光路和信号处理两部分组成。

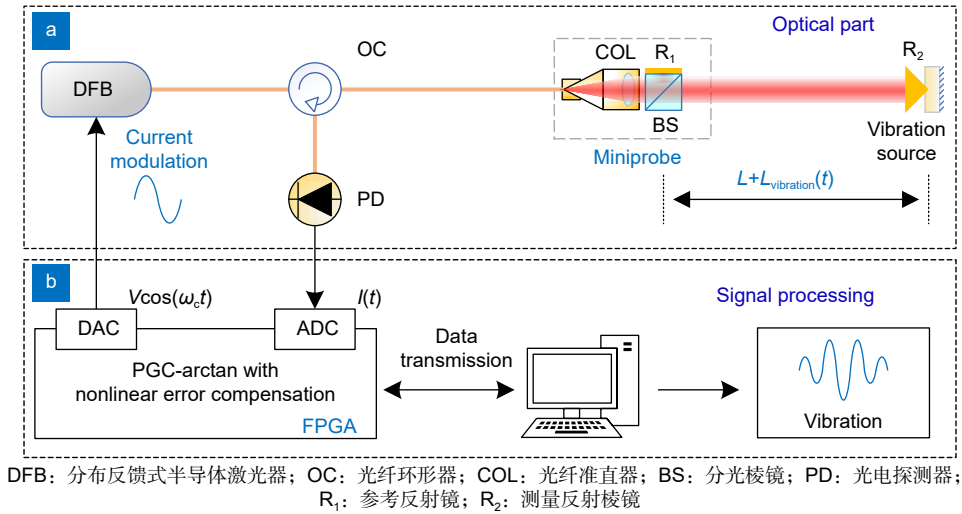


图 1 基于内调制的光纤微探头式振动测量方法原理框图。(a) 光路; (b) 信号处理

Fig. 1 Schematics of vibration measurement by a fiber microprobe with internal modulation. (a) Optical part; (b) Signal processing

DFB 激光器经电流内调制输出调制光, 内调制的深度与频率由可编程逻辑门阵列 (FPGA) 生成的调制信号 $V\cos(\omega_c t)$ 进行控制, 调制后光频可表示为

$$f = f_0 + k_f k_i V \cos(\omega_c t), \quad (1)$$

式中: f_0 为激光中心频率; k_f 为光频调制系数; k_i 为电流调制系数; V 为电流调制振幅; ω_c 表示电流调制角频率; t 表示时间。

调制光通过光纤环形器 OC 传输至光纤微探头, 经微探头中的光纤准直器 COL 输出为空间光束, 经分光棱镜 BS 分为透射的测量光与反射的参考光, 两束光分别经测量反射棱镜 R_2 与参考反射镜 R_1 反射后, 原路返回至微探头, 经光纤环形器 OC 传输至光电探测器 PD。其中, 参考反射镜 R_1 由光学胶水直接固定至分光棱镜 BS 侧面, 因此参考镜与分光棱镜 BS 间的参考臂光程在测量中可忽略不计。测量时, 将测量反射棱镜 R_2 固定至振动源上, 调整微探头使测量光照射至测量镜中心, 并调整工作距离为 L 。

返回的测量光光程包括空气路径中振动源引入的光程变化与光纤路径光程, 返回的参考光光程仅包含光纤路径光程, 对应相位可分别表达为

$$\varphi_m(t) = \frac{2\pi n_{\text{fiber}}}{\lambda_0} L_{\text{fiber}} + \frac{4\pi n_{\text{air}}}{\lambda_0} [L_{\text{air}} + L(t)], \quad (2)$$

$$\varphi_r(t) = \frac{2\pi n_{\text{fiber}}}{\lambda_0} L_{\text{fiber}}, \quad (3)$$

式中: $\lambda_0 = c/f_0$ 为激光中心波长 (c 为光速); n_{fiber} 与 n_{air} 分别为光纤与空气折射率; L_{fiber} 为从激光器至光电探测器间光纤路径的总长度; L_{air} 为测量臂空气路径

的距离; $L(t)$ 为振动源引入的位移变化量。

在干涉过程中, 可获得测量光与参考光的相位差 $\Delta\varphi(t) = \varphi_m(t) - \varphi_r(t) = \frac{4\pi n_{\text{air}}}{\lambda_0} [L_{\text{air}} + L(t)]$, 由此可见, 在微探头中参考光和测量光共光路结构的设计, 可消除光纤路径漂移和共模噪声的影响。信号处理系统采集干涉信号并解调获得相位差, 再经相位解包裹求得待测振动位移, 公式为

$$L_{\text{vibration}}(t) = \frac{\lambda_0}{4\pi n_{\text{air}}} \text{Unwrap}[\Delta\varphi(t)], \quad (4)$$

式中: $\text{Unwrap}[\cdot]$ 为解包裹计算; $L_{\text{vibration}}(t)$ 为待测振动位移。

进一步对振动位移测量结果进行高速缓冲并传输至计算机, 通过上位机程序进行 FFT 频谱分析即可求得振动频谱信息。

2.2 非线性误差分析

在内调制中, 由于电流调制的过程中不仅仅会产生频率调制, 还会引入伴随光强调制, 其相位解调主要受到调制深度与载波相位延迟、光强调制系数、光强调制相位延迟的影响。内调制的干涉信号 $I(t)$ ^[33] 可表示为

$$I(t) = I_0 [1 + m \cos(\omega_c t - \varphi_c + \varphi_m)] \cdot \{1 + \cos[C \cos(\omega_c t - \varphi_c) + \Delta\varphi(t)]\}, \quad (5)$$

式中: I_0 为干涉信号幅值; m 为光强调制系数; φ_c 为载波相位延迟; φ_m 为光强调制相位延迟; $C = \frac{4\pi n_{\text{air}} L_{\text{air}}}{c} k_f k_i V$ 为调制深度; $\Delta\varphi(t)$ 表示待求解的相位差。

将干涉信号与频率等于调制频率一倍频和二倍频的本振信号分别相乘, 并进行低通滤波, 得到的待求解的相位差的正弦信号, 可表示为

$$P(t) = \text{LPF}[I(t) \cdot \cos(\omega_c t)]$$

$$= -I_0 \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \cdot \sin[\Delta\varphi(t) - \theta_1] + \frac{m}{2} I_0 \cos(\varphi_m - \varphi_c), \quad (6)$$

$$Q(t) = \text{LPF}[I(t) \cdot \cos(2\omega_c t)]$$

$$= -I_0 \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \cdot \{\cos[\Delta\varphi(t) - \theta_2]\}, \quad (7)$$

式中: $\text{LPF}[\cdot]$ 表示低通滤波运算; $a_1 = \frac{m}{2} [J_0(C) \cos(\varphi_c - \varphi_m) - J_2(C) \cos(\varphi_c + \varphi_m)]$, $b_1 = J_1(C) \cos \varphi_c$, $a_2 = \frac{m}{2} [J_3(C) \cos(2\varphi_c + \varphi_m) - J_1(C) \cos(2\varphi_c - \varphi_m)]$, $b_2 = J_2(C) \cos(2\varphi_c)$, 其中, $J_1(C)$ 、 $J_2(C)$ 、 $J_3(C)$ 分别表示 1 阶、2 阶、3 阶贝塞尔函数; $\theta_1 = \arctan(2a_1/b_1)$; $\theta_2 = \arctan(2a_2/b_2)$ 。

在理想情况下 ($m=0$ 、 $\varphi_c=0$ 、 $\varphi_m=0$ 、 $C=2.63$), 计算式 (6) 与式 (7) 可得: $P(t) = -I_0 J_1(C) \cdot \sin \Delta\varphi(t)$ 、 $Q(t) = -I_0 J_2(C) \cdot \cos \Delta\varphi(t)$, 其中 $J_1(C) = J_2(C)$ 。即正交信号 $P(t)$ 、 $Q(t)$ 分别正比于待测相位的正弦与余弦值, 对应李萨如图形为圆心在原点的圆形, 经反正切计算可直接求得待测相位 $\Delta\varphi(t)$ 。在实际应用中, 由于调制深度 C 、载波相位延迟 φ_c 、光强调制系数 m 和光强调制相位延迟 φ_m 不等于理想值, 正交信号 $P(t)$ 、 $Q(t)$ 会发生椭圆畸变, 李萨如图变成中心纵向偏移、幅度不相等并且存在一定旋转角度的椭圆。在这种情况下, 直接进行反正切所得相位解调结果将存在严重的非线性误差。

为进一步分析在不同影响因素 ($C, m, \varphi_c, \varphi_m$) 所

引入非线性误差的大小, 对上述信号处理过程进行数值仿真。在仿真过程中, 调制深度 C 设置为 2.63 rad, 分别将载波相位延迟 φ_c 设置为 $\pi/6$ rad、 $\pi/3$ rad, 光强调制系数 m 设置为 0.1、0.2, 光强调制相位延迟 $\varphi_m = \pi/6$ rad、 $\pi/12$ rad。设置待测相位从 $0 \sim 2\pi$ rad 变化, 正交信号李萨如图以及对应非线性误差大小如图 2 所示。

由图 2(a) 可知, 四个椭圆的中心都明显脱离原点, 即存在中心偏移; 四个椭圆其各自的长轴与短轴不等, 即存在不等幅误差; 四个椭圆都有一定的倾斜角度, 即存在非正交误差。当载波相位延迟、光强调制相位延迟和光强调制系数都为零时, 对应的李萨如图为圆形, 此时可准确进行相位解调; 反之, 当这些系数偏离理想值时, 对应的李萨如图会发生椭圆畸变, 不能准确进行相位解调。对上述正交信号进行反正切计算, 并将相位计算结果与待测相位设置值相减, 获得相位解调误差。如图 2(b) 所示, 相位解调误差呈现非线性的周期性波动, 幅度可达数 10° , 严重影响测量精度。

2.3 基于椭圆拟合的干涉信号处理

提高相位解调精度是提高振动测量精度的前提, 为了补偿非线性误差, 本文采用 5 参数椭圆拟合对干涉信号进行处理, 具体的信号处理原理示意图如图 3 所示。

测量光路所得干涉信号 $I(t)$ 经 ADC 模数转换后进入 FPGA 进行相位解调, 与频率为调制频率一倍频和二倍频的本振信号分别相乘, 并进行低通滤波得到正交信号, 为方便起见, 将式 (6)、(7) 的正交信号简化为 5 参数模型: $P(t) = A + B \sin \Delta\varphi(t)$ 、 $Q(t) = M + N \cos[\Delta\varphi(t) + \theta]$, 其中 $A = 0.5 \cdot m I_0 \cos \varphi_m$ 、 $B = -I_0 \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ 、 $N = -I_0 \sqrt{a_2^2 + b_2^2}$ 、 $\theta = \theta_1 - \theta_2$, M 为直流

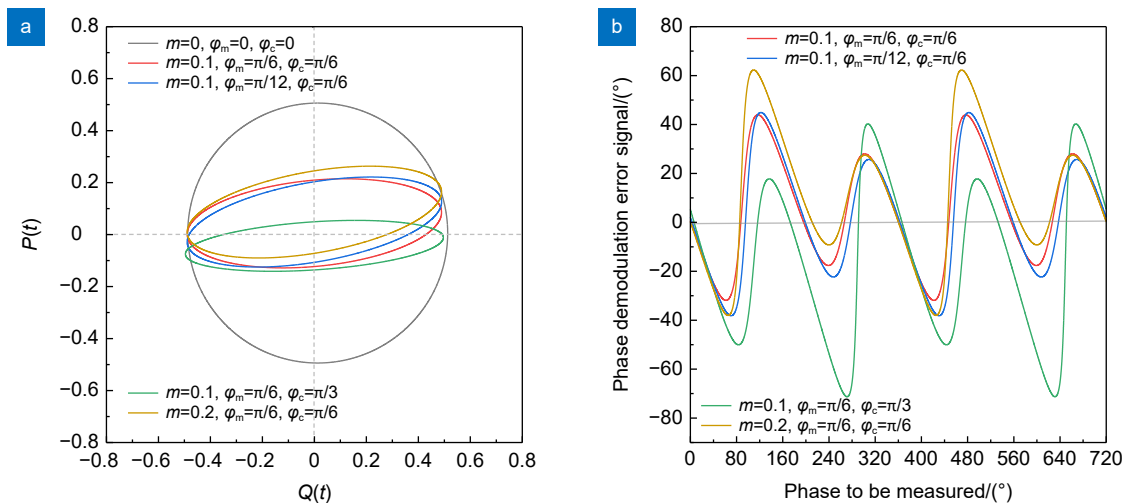


图 2 非线性误差仿真结果。(a) 李萨如图; (b) 相位解调误差
Fig. 2 Results of nonlinear errors from simulation. (a) Lissajous figures; (b) Phase demodulation error

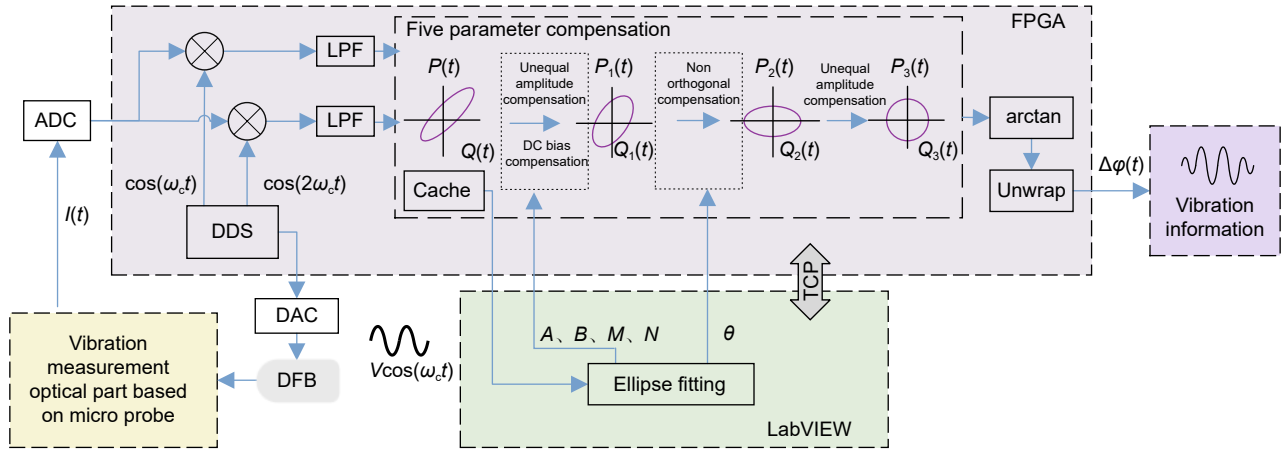


图 3 基于椭圆拟合的信号处理原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of signal processing based on ellipse fitting

偏置。在 FPGA 中对正交信号进行缓冲处理，并将缓存数据传输至 LabVIEW，采用最小二乘椭圆拟合算法求得 5 个椭圆参数 A 、 B 、 M 、 N 、 θ 。

将 5 个椭圆参数回传到 FPGA，分 3 步进行椭圆畸变补偿。

第 1 步：使用参数 A 、 B 、 M 、 N 补偿直流偏置和不等幅误差，计算过程为

$$P_1(t) = [P(t) - A] \cdot N = BN \sin \Delta\varphi(t), \quad (8)$$

$$Q_1(t) = [Q(t) - M] \cdot B = BN \cos [\Delta\varphi(t) + \theta]. \quad (9)$$

比较式 (8) 和式 (9) 可知，此时幅值虽然相等，但还存在非正交误差。

第 2 步：通过和差化积的方式来补偿非正交误差^[11]，计算过程为

$$P_2(t) = P_1(t) + Q_1(t) = 2BN \cos\left(-\frac{\pi + 2\theta}{4}\right) \cdot \sin\left[\Delta\varphi(t) + \frac{\pi + 2\theta}{4}\right], \quad (10)$$

$$Q_2(t) = P_1(t) - Q_1(t) = 2BN \sin\left(-\frac{\pi + 2\theta}{4}\right) \cdot \cos\left[\Delta\varphi(t) + \frac{\pi + 2\theta}{4}\right]. \quad (11)$$

比较式 (10) 和式 (11) 可知，两信号相互正交，但补偿过程导致幅值不相等。

第 3 步：运用 θ 补偿第 2 步补偿引入的不等幅，计算过程为

$$P_3(t) = P_2(t) \cdot \sin\left(-\frac{\pi + 2\theta}{4}\right) = R \cdot \sin\left[\Delta\varphi(t) + \frac{\pi + 2\theta}{4}\right], \quad (12)$$

$$Q_3(t) = Q_2(t) \cdot \cos\left(-\frac{\pi + 2\theta}{4}\right) = R \cdot \cos\left[\Delta\varphi(t) + \frac{\pi + 2\theta}{4}\right], \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } R &= 2BN \sin\left(-\frac{\pi + 2\theta}{4}\right) \cos\left(-\frac{\pi + 2\theta}{4}\right) \\ &= BN \sin\left(-\theta - \frac{\pi}{2}\right) = -BN \cos(\theta). \end{aligned}$$

由式 (12) 和式 (13) 可知，经过 3 步补偿后的两信号幅值相等、直流偏置为零、相互正交，以及畸变的椭圆已被补偿并还原为圆形。通过坐标旋转数字计算模块 (CORDIC) 进行四象限反正切计算即可求得相位 $\Delta\varphi + \pi/4 + \theta/2$ ，其中 $\pi/4 + \theta/2$ 为常数项，不影响振动测量结果，将解调所得相位进行解包裹处理并根据式 (4) 计算，即可求得待测振动位移。

3 实验与结论

3.1 微探头式振动测量系统搭建

为了验证本文设计的基于内调制的光纤微探头式振动测量系统的可行性和有效性，搭建了如图 4 所示的测量系统，包括 DFB 激光器、光纤环形器、微探头和光电探测器等模块。DFB 激光器为 Thorlabs 公司的 SFL1550P 型带尾纤的外腔 ECL 单频激光器，激光输出功率为 40 mW，中心波长为 1550 nm。激光驱动器为 Thorlabs 公司的 CLD1015 紧凑型驱动器，集成温度与电流控制功能，光频调制系数 $k_f = 0.062 \text{ GHz/mA}$ ，电流调制系数为 $k_i = 150 \text{ mA/V}$ ，调制带宽为 250 kHz。光纤环形器为 Thorlabs 公司的 CIR1550PM-APC 型保偏光纤环形器，它可以实现单根光纤上双向光信号传输。定制的微探头为圆柱形，尺寸为 $\Phi 4.7 \text{ mm} \times 17.0 \text{ mm}$ ，由准直器和分光棱镜组成，参考镜由光学胶水直接固定至分光镜棱镜侧面。光电探测器为 Thorlabs 公司的 FPD0510-FC-NIR 型铟镓砷高灵敏度光电探测器。信号处理板为 Redpitaya 公司的

STEMlab125-14 开发板, 采用 FPGA+ARM 结构的 SOC (Zynq7010, Xilinx) 进行数字信号处理, 具有两路 14 位 ADC 和两路 14 位 DAC, 采样频率为 125 MHz。测量时, 调制频率设置为 20 kHz, 调制信号幅值设置为 112 mV, 相位调制深度设置为 2.63 rad, 并调整微探头位置, 使工作距离为 6 cm。

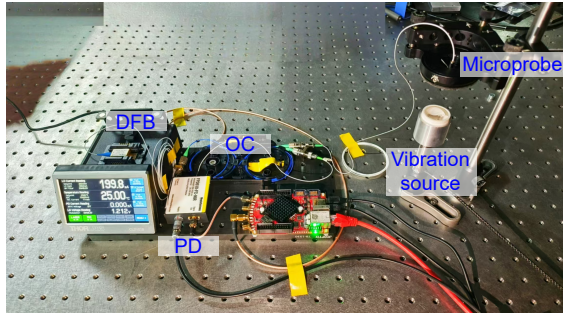


图 4 基于内调制的微探头式振动测量系统
Fig. 4 Microprobe vibration measurement system based on internal modulation

以正弦振动为例, 振动引入的多普勒频率与振动频率和振幅有关, 可表示为

$$f_d = \frac{4\pi f_v l}{\lambda_0}, \quad (14)$$

式中: f_d 为多普勒频率; f_v 为振动频率; l 为振幅。根据文献 [34], 最大多普勒频率 f_d 受到相位调制频率 f_c 的影响, 约为 $f_d = f_c/2$, 本文相位调制频率为 20 kHz, 因此理论上允许的最大多普勒频率为 10 kHz, 再通过式 (14) 计算得出振动频率的最大值为 1.142 kHz。

下面先对基于内调制的光纤微探头式振动测量系统的测量范围进行测试, 然后进一步展开位移稳定性测试、线性位移验证实验和振动频率验证实验。

3.2 信号处理系统测试

为了验证信号处理系统的非线性误差补偿效果以及振动频率测量范围, 采用半仿真的方式来展开测试实验。按照式 (5) 在 FPGA 内生成参数可调的数字仿真干涉信号, 其中, 待测振动位移是根据表达式

$L(t) = l \sin(2\pi f_v t)$ 进行设置的, 并通过 DAC 输出为模拟信号, 经 FPGA 开发板的 ADC 模块采样后进入 FPGA 进行相位解调与振动位移计算。在实验中, 主要参数如表 1 所示。

将振动频率分别设置为 0.5、0.8、1.0 kHz, 进行振动位移测量实验, 以 20 kHz 的刷新率对测量结果进行存储, 通过网线端口高速传输数据, 每次传输 4096 个数据, 对测量数据进行 FFT 分析, 用 Hanning 窗降低频谱泄露, 并计算测量信号的总谐波失真百分比, 振动位移测量结果波形与频谱分析结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 0.5、0.8、1.0 kHz 对应的测量结果符合正弦规律, 没有失真, 并且对应 FFT 分析结果所得振动频率以及幅值与设置值一致。FFT 分析结果中包含微弱的谐波成分, 最大幅值仅为 6 nm, 总谐波失真 (THD) 最大为 1.2%, 说明信号处理系统谐波失真较小。

3.3 测量实验

3.3.1 非线性误差补偿实验

在开展非线性误差补偿实验时, 采用线性度为 0.1% 的压电陶瓷 (CoreMorrow, PSt 150/10/20 VS15) 驱动测量镜进行线性运动, 并使用微探头式振动测量系统进行位移测量, 相位解调李萨如图与解调结果如图 6 与图 7 所示。

由图 6(a) 可知, 散点状椭圆图形为未补偿的李萨如图, 线形椭圆为最小二乘椭圆拟合所得椭圆, 两者高度重合并且拟合残差平方和小于 1.27, 这证明了椭圆拟合的准确性。按照式 (8)~(13) 运用椭圆拟合所得参数进行 3 步补偿, 每步补偿后的李萨如图见图 6(b)。对比图 6(a) 与图 6(b) 可知, 经第 1 步补偿后, 椭圆的中心与原点重合, 消除了直流偏置; 经第 2 步补偿后, 椭圆长轴、短轴分别与横坐标、纵坐标重合, 非正交问题得到解决; 经第 3 步补偿后, 李萨如图还原为中心在原点的圆形, 椭圆畸变问题已经解决。

表 1 信号处理系统测试中的主要参数

Table 1 Main parameters in signal processing system testing

参数	数值	参数	数值
测量光强度 I_0	1	相位调制深度 C	2.63 rad
光强调制系数 m	0.1	空气折射率 n	1.00032
调制频率 f_c	20 kHz	激光波长 λ_0	1550 nm
载波相位延迟 ϕ_c	30 rad	振动幅度 l	1 μm
光强调制相位延迟 ϕ_m	18 rad	振动频率 f_v	0.5, 0.8, 1.0 kHz

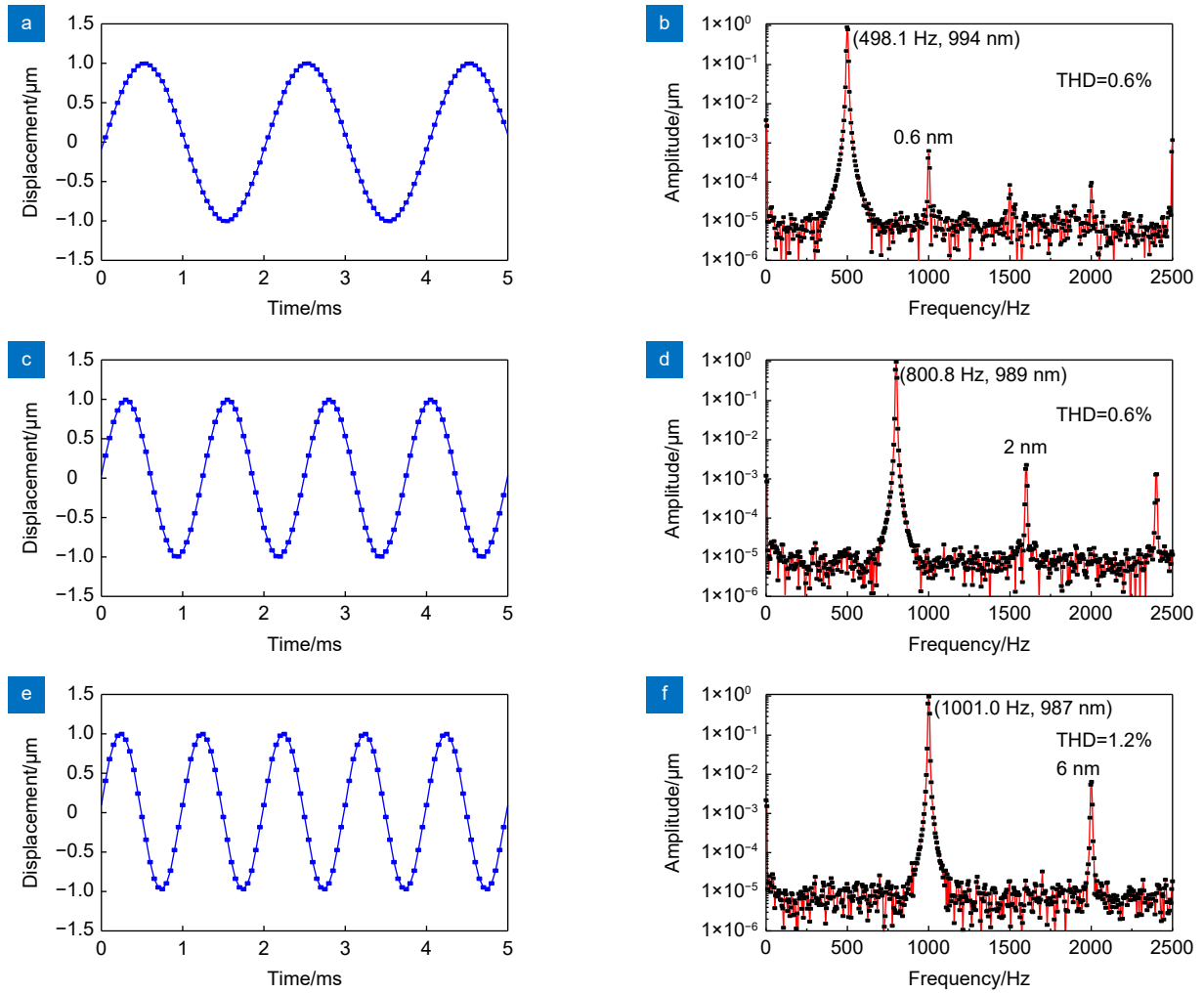


图 5 半仿真测量结果。(a) 0.5 kHz 振动测量结果; (b) 0.5 kHz 振动频谱; (c) 0.8 kHz 振动测量结果; (d) 0.8 kHz 振动频谱; (e) 1.0 kHz 振动测量结果; (f) 1.0 kHz 振动频谱

Fig. 5 Measurement results of semi-simulation. (a) Vibration measurement results of 0.5 kHz; (b) Vibration spectrum of 0.5 kHz; (c) Vibration measurement results of 0.8 kHz; (d) Vibration spectrum of 0.8 kHz; (e) Vibration measurement results of 1.0 kHz; (f) Vibration spectrum of 1.0 kHz

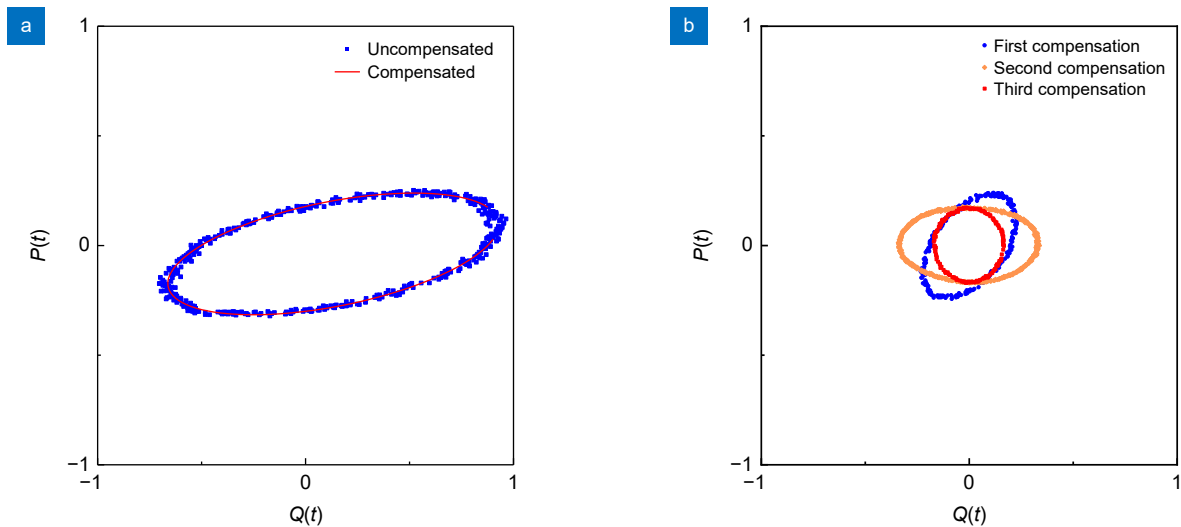


图 6 相位解调中的李萨如图。(a) 原始李萨如图; (b) 三步补偿的李萨如图

Fig. 6 Lissajous figures in phase demodulation. (a) Initial Lissajous figure; (b) Lissajous figures after compensation of each step

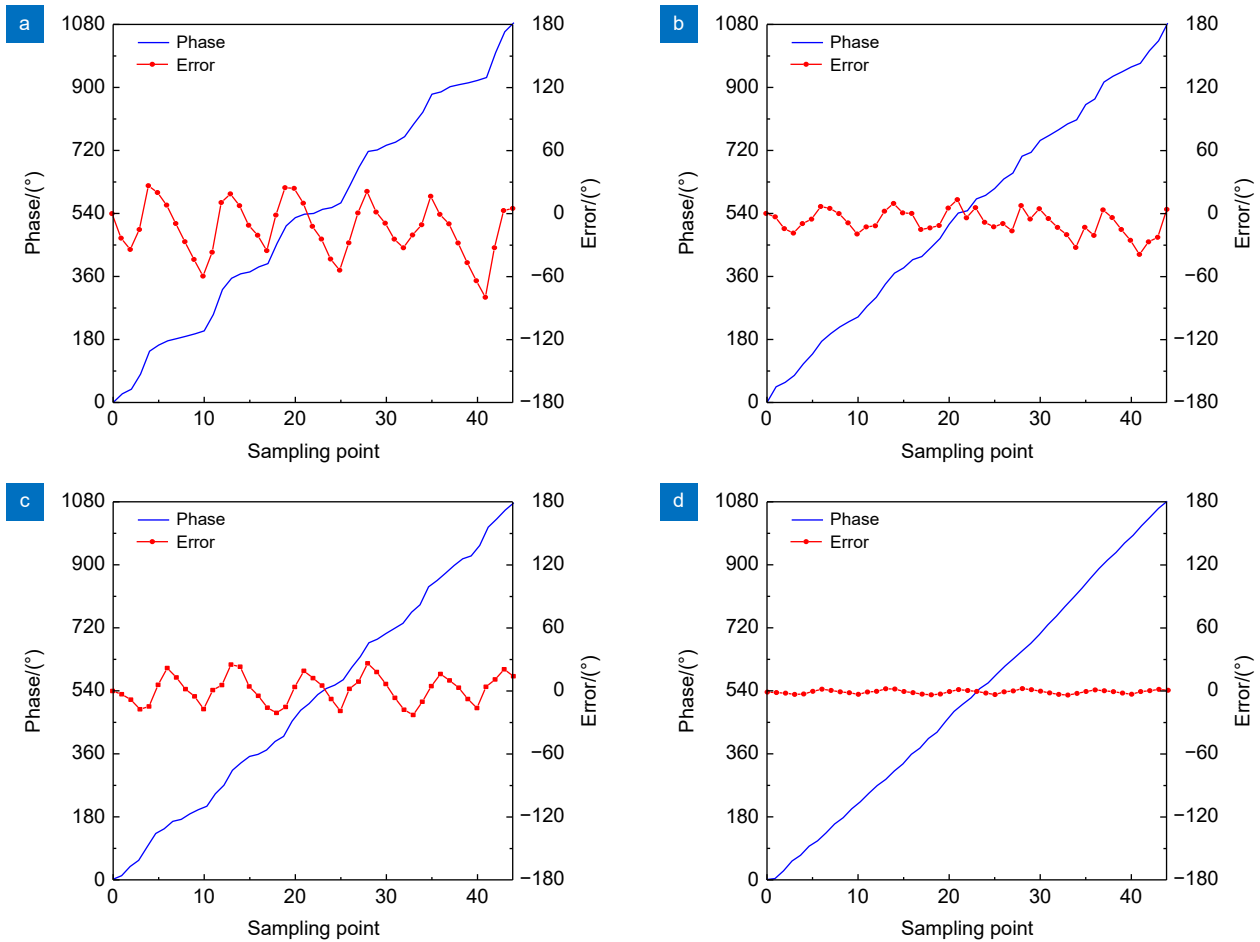


图 7 各阶段相位解调结果。(a) 初始相位解调结果; (b) 第一步补偿; (c) 第二步补偿; (d) 第三步补偿
Fig. 7 Phase demodulation results after each step. (a) Initial phase demodulation results; (b) First compensation; (c) Second compensation; (d) Third compensation

采用图 6 中未补偿以及各阶段补偿系数进行相位解调来验证椭圆拟合的效果, 所得相位测量结果如图 7 所示。图 7 中横坐标表示时间序列号, 蓝线表示相位解调结果。待测对象线性移动, 理想情况下所得相位也随时间变化呈线性规律递增。由图 7(a) 可知, 补偿前, 相位测量结果中存在一个周期性的波动, 即非线性误差。为分析该非线性误差大小, 对各相位测量结果进行线性拟合处理, 并将相位结果减去线性拟合结果, 获得相位非线性误差。图 7 中的红色曲线即为对应非线性误差曲线。补偿前, 非线性误差峰值达到 106.3°。图 7(b)~7(d) 分别为三步补偿后对应解调相位结果, 最终将非线性误差降低至 3.3° 以内。

3.3.2 稳定性测试

预热后, 开展稳定性测试实验, 采用所研制的测量系统对工作距离为 6 cm 的静态目标进行位移测量, 连续记录 60 min, 测量结果如图 8 所示。

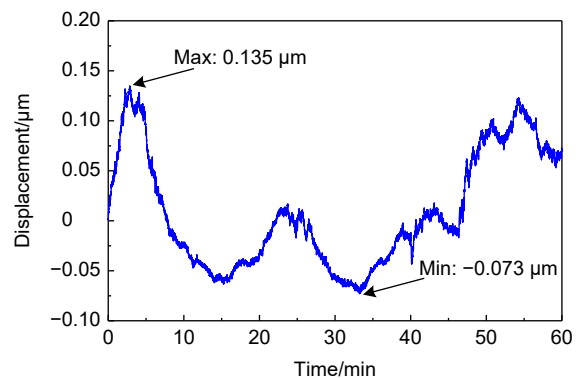


图 8 静态目标位移测量结果
Fig. 8 Results of static displacement measurement

由图 8 可知, 在 60 min 内, 位移测量结果的最大漂移为 0.135 μm , 对于动态的振动而言, 这一静态的缓慢漂移可以通过频谱进行区分, 对振动测量的影响可以忽略不计。

3.3.3 线性位移验证实验

为了验证系统位移测量的准确性, 以精密位移导

轨 (PI, M531) 的线性位移来进行实验验证。通过上位机 LabVIEW 获取 M531 导轨上滑块的位置以及系统解调得到的位移值。控制 M531 导轨使其进行线性运动, 位移位置从 0 μm 逐步移动到 300 μm , 每次步进 10 μm , 一共 30 次。每一次步进, 都等待 M531 导轨完全停止后, 读取并记录导轨滑块位置和位移测量的结果, 其结果及误差如图 9 所示。

将导轨滑块位移位置作为横轴, 位移测量值作为纵轴。从图 9 可以看出, 位移测量值与导轨滑块呈线性趋势, 斜率为 0.99944, 在误差曲线中可知, 两者的最大误差为 580 nm, 位移的平均偏差为 173 nm。

3.3.4 振动测量实验

开展振动测量实验, 控制促动器以 25~600 Hz 的频率分别进行正弦振动 (驱动电压相等), 其中 25、50、600 Hz 振动测量结果如图 10 所示。

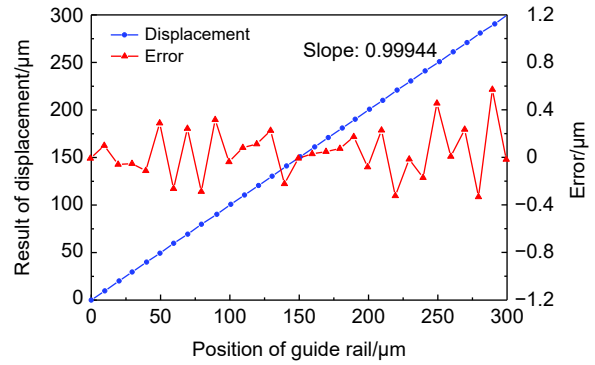


图 9 线性位移对比结果

Fig. 9 Comparison results of linear displacement

如图 10 所示, 根据振动测量结果可知, 振动波形为正弦波, 没有明显失真。如图 10(b) 所示, 根据 25 Hz 振动测量结果的频谱可知, 测量结果中 24.4 Hz 的频率分量幅值最大, 即实测振动频率为 24.4 Hz。

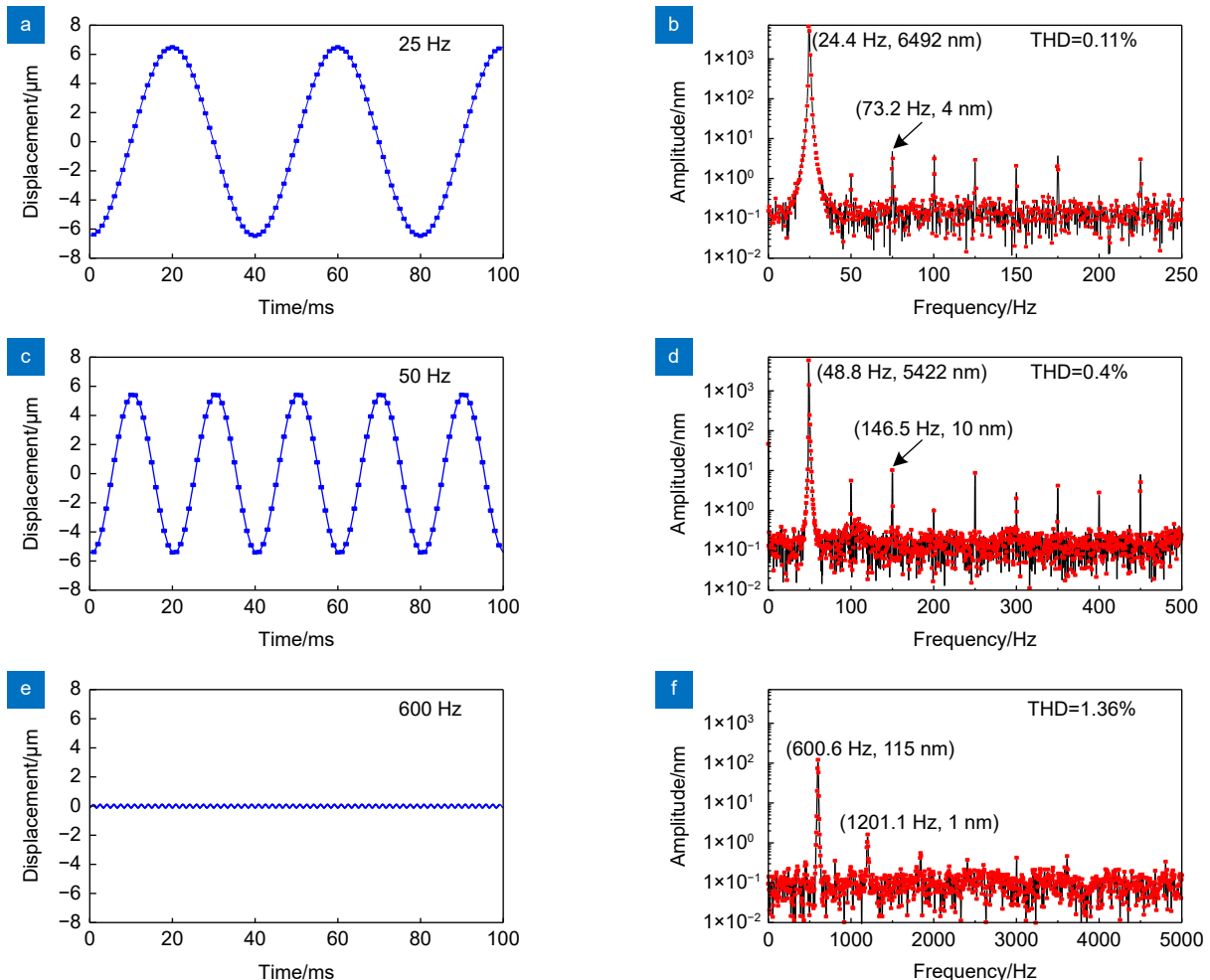


图 10 振动测量结果。(a) 25 Hz 振动测量结果; (b) 25 Hz 振动频谱; (c) 50 Hz 振动测量结果; (d) 50 Hz 振动频谱; (e) 600 Hz 振动测量结果; (f) 600 Hz 振动频谱

Fig. 10 Results of vibration test. (a) Vibration measurement results of 25 Hz; (b) Vibration spectrum of 25 Hz; (c) Vibration measurement results of 50 Hz; (d) Vibration spectrum of 50 Hz; (e) Vibration measurement results of 600 Hz; (f) Vibration spectrum of 600 Hz

根据图 10(d) 所示的 50 Hz 振动测量频谱数据可知, 频率分量最高为 48.8 Hz。根据图 10(f) 所示的 600 Hz 振动测量频谱数据可知, 频率分量最高为 600.6 Hz。考虑到 FFT 分析的频率分辨力为 1.221 Hz (测量系统的存储数据的刷新率为 5000 Hz, 采样数据点数为 4096), 实测结果与设置值的偏差小于测量分辨力, 可以认为已准确测得振动频率。

对 25~600 Hz 频率的振动测量结果进行 FFT 分析并计算振幅与总谐波失真, 结果如图 11 所示。

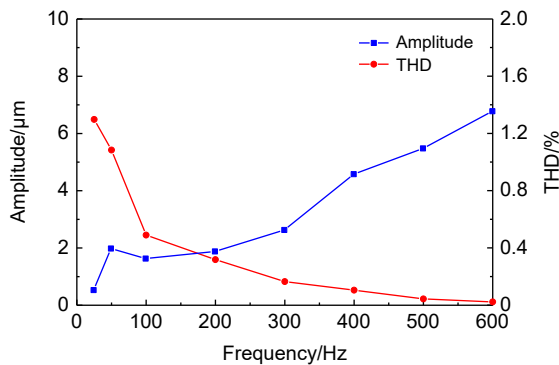


图 11 不同振动频率下振幅和总谐波失真测量结果
Fig. 11 Results of amplitude and THD at different vibration frequencies

由图 11 可知, 振幅随着振动频率的提高而越来越小, 符合驱动器的频率响应特性。同时, 随着频率的提高, 总谐波失真整体处于缓慢上升趋势, 这主要是因为驱动器本身具有一定的非线性, 随着振动频率的提高, 振幅在幅频特性作用下衰减, 导致测量结果中基波逐渐减小。在这种情况下, 谐波与基波的比例会越来越高, 因此总谐波失真整体呈上升趋势。总体来说, 谐波仅为纳米量级大小, 总谐波失真也基本保持在一个较低水平, 验证了所研制的测量系统振动频谱分析能力。

4 结论

本文研制了一种基于内调制的光纤微探头式振动测量系统。重点研究了内调制激光干涉测量中非线性误差来源与数学模型, 采用了 5 参数椭圆拟合的方法对相位解调李萨如图进行分析, 求得非线性误差补偿参数, 实现对非线性误差补偿。基于 FPGA 设计了 PGC-arctan 相位解调算法, 实现了相位的快速解调和振动测量结果的高速传输, 最终实现了振动的在线实时测量与频谱分析。实验结果表明, 在 25~600 Hz 的频率范围内, 研制的测量系统可以有效实现精密振动测量。

参考文献

- Li Y J, Wang Z F, Wang J, et al. Damage identification of I-Beam based on fiber Bragg grating vibration sensor and extreme learning machine[J]. *Chin J Lasers*, 2021, **48** (16): 1610004.
李亦佳, 王正方, 王静, 等. 基于光纤布拉格光栅振动传感器和极限学习机的工字钢梁损伤识别[J]. *中国激光*, 2021, **48** (16): 1610004.
- Zhou Z R, Qiu Z J, Li K, et al. Review on demodulation methods for optic fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49** (6): 210411.
周朕蕊, 邱宗甲, 李康, 等. 光纤法布里-珀罗传感器的解调方法研究综述[J]. *光电工程*, 2022, **49** (6): 210411.
- Ding J W, Zhou W J, Yu Y J. Vibration modes study of defective eardrum realized using digital holographic endoscopy[J]. *Chin J Lasers*, 2023, **50** (15): 1507204.
丁剑雯, 周文静, 于瀛洁. 数字全息内窥技术实现耳膜病态下的振动模式研究[J]. *中国激光*, 2023, **50** (15): 1507204.
- Yu K, Chen Y G, Wang G P. Laser excitation of coherent acoustic vibrations of metallic nanoresonators and their applications[J]. *Acta Opt Sin*, 2023, **43** (16): 1623015.
余快, 陈云高, 汪国平. 光诱导金属纳腔的相干声学振动及应用[J]. *光学学报*, 2023, **43** (16): 1623015.
- Zhu J L, Li L. Monitoring mechanical vibration amplitude system design based on the PVDF piezoelectric film sensor[J]. *Appl Mech Mater*, 2014, 556-562.
- Song X W. Error analysis and improvement of rail longitudinal force measurement by strain electrical measuring method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
宋晓伟. 应变电测法测量钢轨纵向力的误差分析及改进[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- Zhang B Z, Liu K, Liu K, et al. Research on dynamic variance threshold algorithm based on distributed fiber vibration sensor system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50** (2): 220205.
张博智, 刘柯, 刘琨, 等. 基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究[J]. *光电工程*, 2023, **50** (2): 220205.
- Sun C M, Sun K H, Ge J Q. Measurement of surface vibrations of ultrasonic transducers by laser interference method[J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, **47** (9): 0904006.
孙朝明, 孙凯华, 葛继强. 超声换能器表面振动的激光干涉测量[J]. *中国激光*, 2020, **47** (9): 0904006.
- Zhang L S, Li R S, Lan Y C, et al. Detection of solid surface microvibration excited via acoustic radiation using sinusoidal phase modulation interferometer[J]. *Chin J Lasers*, 2022, **49** (3): 0304001.
张烈山, 李荣森, 兰益成, 等. 利用正弦相位调制干涉仪探测声辐射激励的固体表面微振动[J]. *中国激光*, 2022, **49** (3): 0304001.
- Wang C, Liang C, Huangfu S N, et al. Research on non-contact photoacoustic signal detection based on laser heterodyne interferometry[J]. *Chin J Lasers*, 2024, **51** (3): 0307402.
王成, 梁宸, 皇甫胜男, 等. 基于激光外差干涉技术的非接触式光声信号检测研究[J]. *中国激光*, 2024, **51** (3): 0307402.
- Zhu J H. Research on key technologies of laser vibrometry for micro-bead retro-reflection target[D]. Harbin: Harbin Institute of

- Technology, 2018.
朱静浩. 面向微珠逆反射目标的零差激光干涉测振关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [12] Yang P G, Jia H Z, Fu K Y, et al. Study on all-fiber sinusoidal phase modulation interferometer for displacement measurement[J]. *Opt Instrum*, 2023, **45** (4): 1–8.
杨沛钢, 贾宏志, 傅坤跃, 等. 基于正弦相位调制的光纤干涉位移测量系统研究[J]. *光学仪器*, 2023, **45** (4): 1–8.
- [13] Karim F, Zhu Y P, Han M. Modified phase-generated carrier demodulation of fiber-optic interferometric ultrasound sensors[J]. *Opt Express*, 2021, **29** (16): 25011–25021.
- [14] Sun Z S, Liu K, Jiang J F, et al. Dynamic phase extraction in an ameliorated distributed vibration sensor using a highly stable homodyne detection[J]. *IEEE Sensors J*, 2021, **21** (23): 27005–27014.
- [15] Xiao W Z, Cheng J, Zhang D W, et al. High stability PGC demodulation technique for fiber-optic interferometric sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49** (3): 210368.
肖文哲, 程静, 张大伟, 等. 用于光纤干涉传感器的高稳定 PGC 解调技术[J]. *光电工程*, 2022, **49** (3): 210368.
- [16] Guo J H, Liu X J, Hu M L, et al. Elimination of parasitic interference effect in fiber-optic external sinusoidal phase-modulating interferometer based on Kalman filter[J]. *Measurement*, 2022, **187**: 110334.
- [17] Wu Y J, Li C R, Wang C, et al. Self-calibration phase demodulation scheme for stabilization based on an auxiliary reference fiber-optic interferometer and ellipse fitting algorithm[J]. *Opt Express*, 2023, **31** (3): 4639–4651.
- [18] Gong Y F, Yu B L, Shi J H, et al. Ameliorated algorithm for PGC to eliminate the influence of carrier phase delay with FFT[J]. *Opt Fiber Technol*, 2024, **82**: 103554.
- [19] Volkov A V, Plotnikov M Y, Mekhregin M V, et al. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors[J]. *IEEE Sensors J*, 2017, **17** (13): 4143–4150.
- [20] Ni C, Zhang M, Zhu Y, et al. Sinusoidal phase-modulating interferometer with ellipse fitting and a correction method[J]. *Appl Opt*, 2017, **56** (13): 3895–3899.
- [21] Qu Z Y, Guo S, Hou C B, et al. Real-time self-calibration PGC-Arctan demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors[J]. *Opt Express*, 2019, **27** (16): 23593–23609.
- [22] Guo J H, Li D G, Liu X J, et al. Dimensionality-reduced iterative ellipse fitting algorithm for fiber-optic sinusoidal frequency modulation interferometer quadrature signal correction[J]. *Opt Lasers Eng*, 2024, **174**: 107973.
- [23] Dong Y S, Zhang J R, Fu H J, et al. High-speed and high-precision measurement of biaxial in-plane displacements: tens of nanometers principle error suppression in microprobe sensors[J]. *Opt Express*, 2024, **32**: 15199–15214.
- [24] Krauhausen M, Priem R, Claßen R, et al. Sub-micron inline thickness measurement of cold-rolled metal strips by multi-wavelength interferometry and laser triangulation[J]. *Opt Express*, 2023, **31** (26): 43804–43820.
- [25] Dong Y S, Luo W R, Li W W, et al. Focus on sub-nanometer measurement accuracy: distortion and reconstruction of dynamic displacement in a fiber-optic microprobe sensor[J]. *Light Adv Manuf*, 2024, **5**: 51.
- [26] Dong Y S, Li W W, Zhang J R, et al. High-speed PGC demodulation model and method with subnanometer displacement resolution in a fiber-optic micro-probe laser interferometer[J]. *Photon Res*, 2024, **12** (5): 921–931.
- [27] Shi Q P, Tian Q, Wang L W, et al. Performance improvement of phase-generated carrier method by eliminating laser-intensity modulation for optical seismometer[J]. *Opt Eng*, 2010, **49** (2): 024402.
- [28] Tian C D, Wang L W, Zhang M, et al. Performance improvement of PGC method by using lookup table for optical seismometer[J]. *Proc SPIE*, 2009, **7503**: 750348.
- [29] Hou C B, Guo S. Automatic carrier phase delay synchronization of PGC demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors[J]. *KSII Trans Internet Inf Syst*, 2020, **14** (7): 2891–2903.
- [30] Zhang S. Research on eliminating light intensity disturbance in the fiber-optic sensor based on PGC demodulation algorithms[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2016.
张帅. 基于 PGC 解调算法消除光强扰动的光纤传感器研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2016.
- [31] Zhang S H, Chen Y P, Chen B Y, et al. A PGC-DCDM demodulation scheme insensitive to phase modulation depth and carrier phase delay in an EOM-based SPM interferometer[J]. *Opt Commun*, 2020, **474**: 126183.
- [32] Dong Y S, Hu P C, Ran M, et al. Phase modulation depth setting technique of a phase-generated-carrier under AOIM in fiber-optic interferometer with laser frequency modulation[J]. *Opt Express*, 2020, **28** (21): 31700–31713.
- [33] Dong Y S, Hu P C, Fu H J, et al. Long range dynamic displacement: precision PGC with sub-nanometer resolution in an LWSM interferometer[J]. *Photon Res*, 2022, **10** (1): 59–67.
- [34] Yan L P, Chen Z Q, Chen B Y, et al. Precision PGC demodulation for homodyne interferometer modulated with a combined sinusoidal and triangular signal[J]. *Opt Express*, 2018, **26** (4): 4818–4831.
- [35] Liao H, Xie J D, Yan L P, et al. Precision vibration measurement using differential phase-modulated homodyne interferometry[J]. *Opt Lasers Eng*, 2023, **169**: 107695.
- [36] Yan L P, Zhou C Y, Xie J D, et al. Nonlinear error compensation method for PGC demodulation based on Kalman filtering[J]. *Chin J Lasers*, 2020, **47** (9): 0904002.
严利平, 周春宇, 谢建东, 等. 基于卡尔曼滤波的 PGC 解调非线性误差补偿方法[J]. *中国激光*, 2020, **47** (9): 0904002.
- [37] Zhang S H, Chen B Y, Yan L P, et al. Real-time normalization and nonlinearity evaluation methods of the PGC-arctan demodulation in an EOM-based sinusoidal phase modulating interferometer[J]. *Opt Express*, 2018, **26** (2): 605–616.
- [38] Xie J D, Yan L P, Chen B Y, et al. Extraction of carrier phase delay for nonlinear errors compensation of PGC demodulation in an SPM interferometer[J]. *J Lightwave Technol*, 2019, **37** (13): 3422–3430.
- [39] Yan L P, Zhang Y D, Xie J D, et al. Nonlinear error compensation of PGC demodulation with the calculation of carrier phase delay and phase modulation depth[J]. *J Lightwave Technol*, 2021, **39** (8): 2327–2335.

作者简介



贾鹏 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光干涉振动测量技术、信号处理技术等方面的研究。

E-mail: jjapeng0108@foxmail.com



【通信作者】谢建东 (1993-), 男, 博士, 讲师, 助理导师, 主要从事激光干涉纳米位移测量、大尺寸绝对距离测量、激光频率锁定、干涉信号处理等技术研究工作。

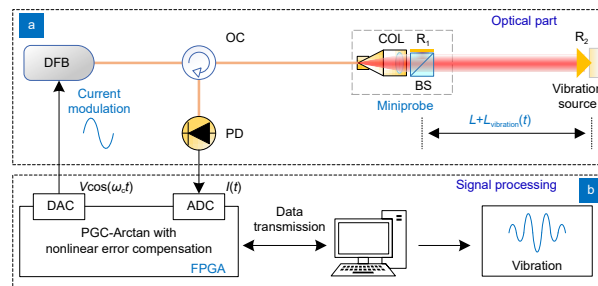
E-mail: xiejiandong@yeah.net



扫描二维码, 获取PDF全文

Research on fiber optic interferometric vibration measurement system based on internal modulation

Jia Peng, Xie Jiandong*, Lou Yingtian, Yang Ye, Yang Tao



Schematics of vibration measurement by a fiber microprobe with internal modulation

Overview: Vibration measurement is significant and widely used in the fields of spacecraft performance evaluation, material damage detection, machinery diagnostics, and acoustic sensing. Specifically, the vibration measurement based on a sinusoidal phase modulation laser interferometer has become a lasting research focus because of the advantages of strong anti-electromagnetic interference, high sensitivity, and large dynamic range. Sinusoidal phase modulation interferometers based on external modulation use adding piezoelectric ceramics or electro-optic modulators to the reference arm of the optical path. Introducing additional components will increase the hardware cost of the measurement system and result in a longer reference arm, which may introduce drift errors. Differently, sinusoidal phase modulation interferometers based on internal modulation directly modulate the laser current sinusoidally. The advantage is that no additional modulation devices need to be introduced. Besides, the collimator, spectroscope, and reference mirror in the measurement optical path can be integrated into a single fiber microprobe, improving practicality. However, it inevitably has periodic nonlinear errors caused by the phase modulation depth, carrier phase delay, and additional intensity modulation, which limits the accuracy of vibration measurement.

In this paper, a fiber microprobe vibration measurement system based on internal modulation has been developed to solve the problems mentioned above. A sinusoidal phase modulation laser source is generated by modulating the current of a distributed feedback laser (DFB) with a sinusoidal signal. After passing through a fiber circulator and a microprobe, the output laser beam is used to measure the displacement of the vibration source. The returned laser beam interferes with the reference laser reflected by the microprobe to generate a phase generated carrier (PGC) interference signal. A real-time interference signal processing algorithm is designed based on a programmable logic gate array (FPGA) digital computing platform. The error items introduced by additional intensity modulation and other factors are extracted through five-parameter ellipse fitting to compensate for the phase nonlinear error, and achieve high-precision measurement of vibration displacement. The fast Fourier transform (FFT) algorithm is used to analyze the vibration displacement. Theoretical analysis was conducted and a vibration measurement verification system was built. Interference signal demodulation experiments, step displacement measurement experiments, and vibration measurement experiments were carried out. The experimental results show that the vibration frequency range of the system covers 1142 Hz. In the 10- μm step displacement experiment, the average deviation measured is 0.173 μm . The resolution of vibration measurement is 1.221 Hz, and the harmonic distortion is less than 1.36%. The measurement system is expected to be applied in the field of precision vibration measurement.

Jia P, Xie J D, Lou Y T, et al. Research on fiber optic interferometric vibration measurement system based on internal modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(1): 240233; DOI: 10.12086/oe.2025.240233

Foundation item: National Key Research and Development Program (2022YFF0705803), Science Foundation of Zhejiang Sci-Tech University (11122932612222, 23222133-Y)

Precision Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Zhejiang, Hangzhou 310018, China

* E-mail: xiejiaandong@yeah.net