

激光与光电子学进展

基于激光自混调频特性的振动测量方法

殷璞芙, 吴腾飞*, 柴晓博

天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 基于激光自混合干涉的振动重构方法需估算光反馈水平因子以及线宽增强因子, 目标振动导致光反馈水平变化, 引入较大的测量误差。为提高测振精度和鲁棒性, 本文提出一种基于自混合干涉调频特性的振动重构算法, 利用全光纤马赫-曾德尔干涉仪获得自混合干涉调频信号, 解算出激光器的瞬时频率, 并联合调幅信号相位实现对目标振动信息重构。该方法无需估算光反馈水平因子以及线宽增强因子, 极大地简化了测量光路与解算模型, 在保证测量精度的同时降低了振动信息提取过程的复杂性。数值仿真表明, 在适度光反馈的条件下, 该算法在振幅为 2~100 μm 的测量范围内具有良好的线性度。实验结果显示, 在 1.6~8.3 μm 的测量范围内, 重复测量标准差低于 15 nm, 非线性误差为 0.78%。

关键词 测量; 自混合干涉; 振动测量; 调频特性; 马赫-曾德尔干涉

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0712001

Vibration Measurement Method Based on Laser Self-Mixing Frequency Modulation Characteristics

Yin Pufu, Wu Tengfei*, Chai Xiaobo

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The vibration reconstruction method based on laser self-mixing interference needs to estimate the optical feedback level factor and the line-width enhancement factor. In order to improve the precision and robustness of vibration measurement, a vibration reconstruction algorithm based on the frequency modulation characteristics of self-mixed interferometer is proposed. The all-fiber Mach-Zehnder interferometer is used to obtain the frequency-modulated signal of self-mixing interferometer, and the instantaneous frequency of the laser is calculated. This method does not need to estimate the optical feedback level factor and the line-width enhancement factor, greatly simplifies the measurement optical path and the solution model, and reduces the complexity of the vibration information extraction while ensuring the measurement accuracy. Numerical simulation shows that the proposed algorithm has good linearity in the measuring range from 2 μm to 100 μm amplitude with moderate optical feedback level. Experimental results show that the standard deviation of repeated measurements is less than 15 nm and the non-linear error is 0.78% in the range of 1.6 μm to 8.3 μm amplitude.

Key words measurement; self-mixing interference; vibration measurement; frequency modulation; Mach-Zehnder interferometer

OCIS codes 120.3180; 120.7280; 140.3518

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-08-31; 录用日期: 2020-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(61733012)

*E-mail: wtf@tju.edu.cn

1 引言

激光自混合干涉作为一种非接触式光学测量技术具有与传统双光束干涉相同的相位灵敏度与条纹分辨力,并以其结构简单紧凑、测量精度高、成本低等优势^[1-3]被广泛应用于位移^[4-5]、振动^[6-7]、速度^[8-9]与绝对距离^[9-10]等测量领域。激光自混合干涉技术在提取目标振动信息时,常见的测量方法有条纹计数法^[11]、相位测量法^[12-15]、相位锁定法^[16-17]。条纹计数法因分辨力小于半波长不适用于微振动测量场景。相位测量法可以实现较高的测量精度,使测量分辨力突破半波长的限制,且具有良好的信噪比,但大部分相位测量法在测量过程中需要对光反馈水平因子、线宽增强因子进行最优化估计,估计误差直接影响测量精度,同时也会增加算法的时间复杂度。相位锁定法利用环路反馈将相位锁定在半波长处,需预先设定偏置,系统复杂度较高,测量范围受环路增益影响,还需考虑相位失锁引入的误差。

面向机床在线测量等工业测量现场,测振装置在保证较高的测量精度的同时还应满足系统结构简单、实时性好、成本低等需求。针对光反馈水平系数估值不准、系统复杂度较高等问题,本文利用全光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)作为光滤波器获取自混合干涉调频信号^[18],提出一种基于自混合干涉调频特性的振动重构算法。该方法解算模型复杂度低,不需要预估光反馈水平因子以及线宽增强因子,减少了估算误差的引入,同时保留了系统成本低、光路结构简单等自混合干涉技术固有的应用优势。数值仿真和实验结果均证实了该算法的有效性。该方法为实现自混合干涉振动测量提供了新途径。

2 振动测量原理

2.1 光反馈强度对振动测量的影响

激光自混合干涉简图如图 1 所示。激光器发出的部分光经腔外目标反射或散射,重新回到激光器的谐振腔内,发生自混合干涉现象,光功率和光频受到调制,分析相应的干涉调幅(AM)信号以及干涉调频(FM)信号,可以获得激光器的内部参数和目标的位置信息^[1-2]。

图 1 中 $P(t)$ 为激光器的出射光功率,可表征激光自混合干涉的调幅特性,即



图 1 自混合干涉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-mixing interference

$$P(t) = P_0 [1 + m \cos(\varphi)], \quad (1)$$

式中: P_0 为无光反馈时激光器的出射光功率; m 为功率调制因子与光反馈量有关^[1]; φ 为存在光反馈时光在外腔往返一周的相位变化量。

$$\varphi = \varphi_0 - C \sin(\varphi + \arctan \alpha), \quad (2)$$

式中: φ_0 为无光反馈时的相位变化量, $\varphi_0 = 2kL_{\text{ext}}$ (k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光器中心波长, L_{ext} 为激光器端面到腔外反射体的绝对距离); α 为线宽增强因子。(2) 式为自混合干涉相位方程, 将其作进一步变换得到自混合干涉频率方程, 该式反映了自混合干涉的调频特性, 即

$$2\pi\nu = 2\pi\nu_0 - \frac{C}{\tau_{\text{ext}}} \sin(\varphi + \arctan \alpha), \quad (3)$$

式中: ν 为存在光反馈时激光出射频率; ν_0 为无光反馈时激光出射频率; τ_{ext} 为激光在外腔往返一周所用时间, 即 $\tau_{\text{ext}} = 2L_{\text{ext}}/c$ (c 为光在真空中的传播速度); C 为光反馈水平因子, 受 τ_{ext} 、激光器与外腔耦合系数 k_{ext} 等共同作用, 因此当物体存在振动时, C 值将随着 τ_{ext} 、 k_{ext} 变化而变化。

在存在光反馈的情况下, φ 、 ν 随着 L_{ext} 呈现周期性变化, L_{ext} 变化 $\lambda/2$, 调幅信号和调频信号相应地变化一个条纹。由(2)式、(3)式可知, 在已知 φ 、 ν 或 C 的情况下即可求解出 L_{ext} 。而当重构算法与 C 关联时, 对 C 的错误估计或者默认 C 值不变都会引入测量误差, 即

$$\Delta L_{\text{ext}} = \Delta C \sin(\varphi + \arctan \alpha) \lambda / 4\pi, \quad (4)$$

式中: ΔL_{ext} 为测量误差; ΔC 为 C 值的估计误差。有关光反馈水平因子的测量研究^[19-21]大多要求已知线宽增强因子 α 或者腔外目标的运动状态, 这些方法尽管可以实现对 C 值的测量, 但存在测量精度不高、测量范围有限以及测量过程繁琐等诸多问题。除测量手段本身的局限性外, 目标振动也会引入较大的测量误差, 因此要想精确测量 C 值存在较大难度。为避开对 C 值的估算, 本文算法将利用调频信号解算出 ν , 从而实现高精度的振动重构。

2.2 测振光路

基于全光纤马赫-曾德尔干涉仪的自混合干涉

测振系统如图 2 所示,出射激光通过分光比为 50:50 的分束镜 BS 分为测量光和辅助光。测量光透过衰减片 OA 经目标物体反射或散射后,部分光重新注入激光器谐振腔内,并对出射光功率以及光频产生调制。激光器内置的光电探测器 PD1 监测到激光二极管的光功率变化得到自混合干涉调幅信号 AMS。辅助光通过光纤耦合器 FOC 从自由空间耦合进光纤,进入 MZI,最后通过 PD2 得到自混合干涉调频信号 FMS。对调幅信号和调频信号进行同步采集,经过数据处理实现振动重构。

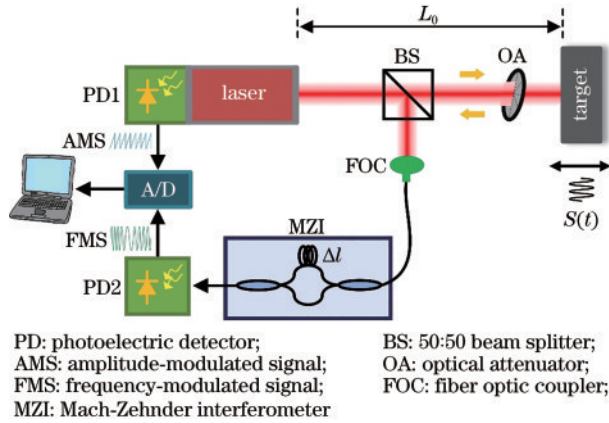


图 2 自混合测振系统

Fig. 2 Self-mixing vibration measuring system

目标物体到激光器出射端面的绝对距离为 L_0 ,且在光线传播方向存在振动 $s(t)$,激光的外腔往返一周时间表示为 $\tau_{\text{ext}}(t) = 2[L_0 + s(t)]/c$,则自混合调幅信号相位表示为

$$\varphi = 4\pi v_0 [L_0 + s(t)]/c - C \sin(\varphi + \arctan \alpha). \quad (5)$$

自混合效应引发的激光频率变化量 $\Delta v(t)$ 表示为

$$\Delta v(t) = -\frac{C}{4\pi [L_0 + s(t)]/c} \sin(\varphi + \arctan \alpha). \quad (6)$$

自混合干涉调幅信号表示为

$$P_{\text{AM}}(t) = P_0 (1 + m \cos \varphi). \quad (7)$$

随着光反馈量的增大, m 值发生变化, $P_{\text{AM}}(t)$ 由类余弦波形逐渐转变为锯齿状波形,条纹幅值随之变小,当系统处于强反馈状态时 ($C > 4.6$),条纹数目开始减少,在 C 增大到一定程度时完全消失,此时激光器处于混沌状态,不利于信息的提取。

MZI 臂长差为 Δl , 对应时延为 τ_{mzi} , 当耦合器相位因子均为 $\pi/4$ 时, MZI 的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} P_{\text{out1}} \\ P_{\text{out2}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \cos(\Delta\varphi) \\ 1 - \cos(\Delta\varphi) \end{bmatrix} P_0, \quad (8)$$

式中: P_{out1} 、 P_{out2} 分别为 MZI 两端口输出; $\Delta\varphi$ 为两传输臂之间的相位差。由于 τ_{mzi} 一般为纳秒级, 可认为在 τ_{mzi} 时间内 $\Delta\varphi$ 基本不变^[22-23], 则有 $\Delta\varphi = 2\pi v_{\text{LD}}(t)\tau_{\text{mzi}}$ 。当 MZI 两输出端口接入平衡型光电探测器时, 得到自混合干涉调频信号为

$$P_{\text{FM}}(t) = P_{\text{out1}} - P_{\text{out2}} =$$

$$P_0 \{1 + \cos[2\pi\Delta v(t)\tau_{\text{mzi}} + 2\pi v_0\tau_{\text{mzi}}]\}, \quad (9)$$

式中: $2\pi v_0\tau_{\text{mzi}}$ 为相位常量, 可见该信号频率受到 $\Delta v(t)$ 调制。

随着反馈强度的增加, 调频信号中的跳变随之减少, 波形由疏变密, 在弱反馈时 ($C \leq 1$), 调频信号的不规则波形会增加相位检测难度。综上所述, 本文工作选择在适度反馈 ($1 < C \leq 4.6$) 的自混合干涉条件下开展。

2.3 振动重构算法

首先对自混合干涉调幅信号 $P_{\text{AM}}(t)$ 、调频信号 $P_{\text{FM}}(t)$ 进行滤波、归一化处理, 通过希尔伯特变换得到对应的包裹相位。通过对包裹相位进行微分并设置合适阈值获得相位跳变点, 根据条纹倾斜方向决定对包裹相位加减 2π , 实现相位展开得到调幅信号相位 $\varphi_{\text{AM}}(t)$ 与调频信号相位 $\varphi_{\text{FM}}(t)$ 。理论上调幅信号相位与调频信号相位为

$$\varphi_{\text{AM}}(t) = 2\pi [v_0 + \Delta v(t)] \frac{2[L_0 + s(t)]}{c}, \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{FM}}(t) = 2\pi [v_0 + \Delta v(t)] \tau_{\text{mzi}}. \quad (11)$$

由于初相位 ($4\pi v_0 L/c$ 、 $2\pi v_0 \tau_{\text{mzi}}$) 远大于 2π , 因此对包裹相位进行展开时无法得到真实的初相位。在实际的解卷中得到的相位为

$$\hat{\varphi}_{\text{AM}}(t) = 4\pi [v_0 + \Delta v(t)]$$

$$\frac{s(t)}{c} + 4\pi\Delta v(t) \frac{L}{c} + \hat{\varphi}_{\text{AM}0}, \quad (12)$$

$$\hat{\varphi}_{\text{FM}}(t) = 2\pi\Delta v(t)\tau_{\text{mzi}} + \hat{\varphi}_{\text{FM}0}, \quad (13)$$

式中: $\hat{\varphi}_{\text{AM}0}$ 为 $(4\pi v_0 L/c)$ 对 2π 取余; $\hat{\varphi}_{\text{FM}0}$ 为 $2\pi v_0 \tau_{\text{mzi}}$ 对 2π 取余。利用调频信号相位 $\hat{\varphi}_{\text{FM}}(t)$ 除以 MZI 时延 τ_{mzi} 即获得激光器的瞬时频率变化量 $\Delta v(t)$ 为

$$\Delta v(t) = [\hat{\varphi}_{\text{FM}}(t) - \hat{\varphi}_{\text{FM}0}] / (2\pi\tau_{\text{mzi}}). \quad (14)$$

联合 (11) 式, 振动 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = c \frac{\hat{\varphi}_{\text{AM}}(t) - \hat{\varphi}_{\text{AM}0} - 4\pi\Delta v(t)L/c}{4\pi [v_0 + \Delta v(t)]} =$$

$$c \frac{\hat{\varphi}_{\text{AM}}(t) - \hat{\varphi}_{\text{AM}0} - \frac{2L}{c\tau_{\text{mzi}}} [\hat{\varphi}_{\text{FM}}(t) - \hat{\varphi}_{\text{FM}0}]}{4\pi \{v_0 + [\hat{\varphi}_{\text{FM}}(t) - \hat{\varphi}_{\text{FM}0}] / (2\pi\tau_{\text{mzi}})\}}. \quad (15)$$

根据上述分析可以看出, 重构过程与光反馈水平因子 C 没有关联, 不需要对 C 进行最优化估计, 因

此不会引入估算误差,即振动引起的光反馈量变化不会影响该算法的重构结果,同时也降低了算法的时间复杂度。从(15)式可以看出,待测量只有 $\hat{\varphi}_{AM}(t)$ 、 $\hat{\varphi}_{FM}(t)$,因 $\Delta v(t) \ll v_0$, $s(t)$ 对应的合成标准不确定度可以表示为

$$u_c^2[s(t)] \approx \frac{\lambda_0}{4\pi} \left\{ u_c^2[\hat{\varphi}_{AM}(t)] + \frac{\tau_{ext}}{\tau_{mzi}} u_c^2[\hat{\varphi}_{FM}(t)] \right\}. \quad (16)$$

传统相位测量法的数学模型如(2)式所示,对应的合成标准差可表示为

$$u_c^2[s(t)] \approx \frac{\lambda_0}{4\pi} [C + 1] u_c^2[\hat{\varphi}_{AM}(t)] + \frac{\lambda_0}{4\pi} [\hat{\varphi}_{AM}(t) + \arctan \alpha] u_c^2[C]. \quad (17)$$

由于 $\hat{\varphi}_{AM}(t)$ 、 $\hat{\varphi}_{FM}(t)$ 均通过相同的相位展开方法得到,可认为 $u_c^2[\hat{\varphi}_{AM}(t)] \approx u_c^2[\hat{\varphi}_{FM}(t)]$,且 $\tau_{ext} <$

τ_{mzi} ,当系统处于适度光反馈的情况下,即 $1 < C < 4.6$,可以得出(16)式的不确定度要小于(17)式,这意味着上述算法的确可以提升测量精度。

3 仿真结果与分析

为了验证上述重构算法的可行性,对自混合干涉测振系统进行数值模拟。仿真条件如下:激光器中心波长为 1550 nm,线宽增强因子为 4.6,激光器端面到目标物体的绝对距离为 1 m,光反馈水平因子 $C=4$,目标做简谐振动,频率为 100 Hz,振幅为 3 μm ,马赫-曾德尔干涉仪时延为 70 ns,对应的仿真结果如图 3 所示。图 3(a)为自混合干涉调幅信号的展开相位,图 3(b)为自混合干涉调频信号的展开相位。通过重构算法对两路信号相位进行处理,得到振动重构结果如图 3(c)所示,图 3(d)为重构误差。

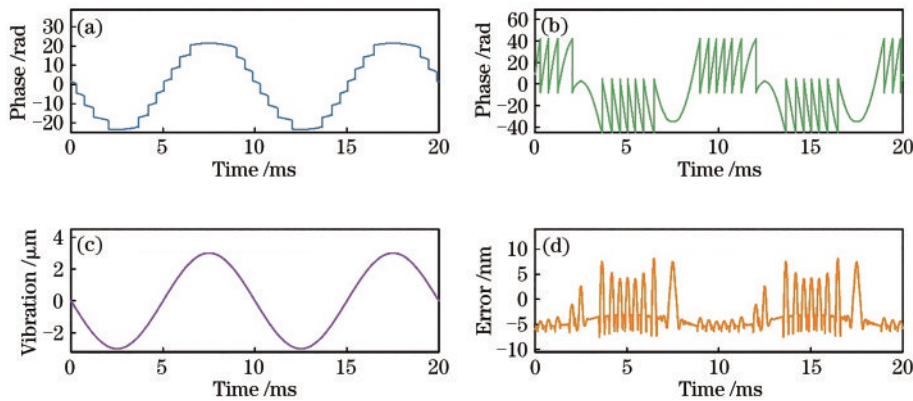


图 3 重构仿真结果。(a)调幅信号展开相位;(b)调频信号展开相位;(c)重构振动曲线;(d)重构误差

Fig. 3 Simulation results of reconstruction. (a) Unwrapped phase of AM signal; (b) unwrapped phase of FM signal; (c) reconstructed vibration curve; (d) error of reconstruction

从图 3(c)、图 3(d)可以看出,重构结果与实际的目标振动信号吻合度较高,最大测量误差不超过 10 nm,证实该重构算法具有可行性,重构精度较高。为测试算法的有效测量范围,在 2~100 μm 之间选取若干点进行振动重构,仿真结果如图 4 所示,非线性误差为 0.09%。

为进一步验证算法的稳定性,在不同反馈水平、不同振幅下进行振动重构。由图 5 可以看出,不同光反馈水平下的振幅误差曲线发展趋势基本一致,在适度光反馈的条件下,尽管误差曲线因振幅的增加呈现上升趋势,但 10 μm 振幅对应的重构误差仍小于 15 nm。当 $C=5$ 时,理论上系统处于强反馈的状态,但此时的重构误差仍与适度反馈时的误差相近,在仿真过程中发现,当 $C=6$ 时,调幅信号出

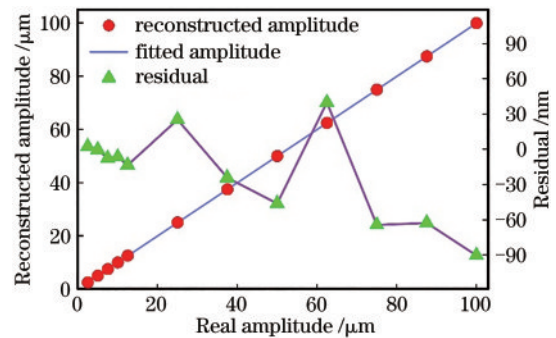


图 4 仿真测量范围

Fig. 4 Simulated measurement range

现条纹丢失现象,误差显著增大,而系统处于弱反馈时,调频信号跳变过多不利于相位展开,重构误差显著增大。

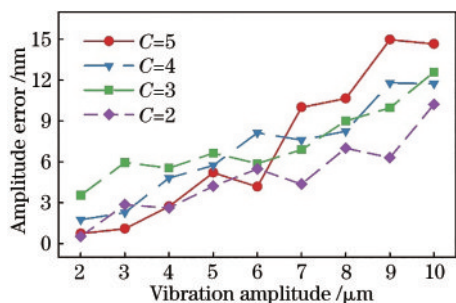


图5 不同光反馈水平下的重构误差
Fig. 5 Reconstruction errors at different optical feedback levels

4 实验结果分析

为了验证重构算法的实际效果,搭建如图6所示的实验测量装置。

实验采用 Wave Spectrum 的分布式反馈(DFB)半导体单模激光管作为光源,其中心波长为 1310 nm,额定输出功率为 20 mW,激光器内置光电二极管用于检测调幅信号。激光器出射光经吸收型衰减片

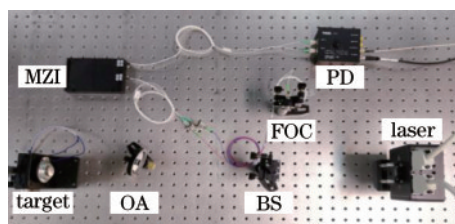


图6 实验装置

Fig. 6 Experimental equipment

后,照射在反射率为0.9的平面反射镜上,反射镜被固定在扬声器上,扬声器由信号发生器驱动。外腔长度为 60.8 cm, MZI 光纤臂长差为 8 m,其输出的自混合干涉调频信号由平衡型光电探测器接收。两路调制信号经信号采集卡采集后送入计算机进行后续的处理。在适度光反馈的实验条件下,扬声器受到振幅为 500 mV、频率为 60 Hz 的正弦信号驱动,实验结果如图7所示。图7(a)、(b)分别为经过滤波、归一化后的调幅信号与调频信号(因信号稠密仅展示一个周期),图7(c)、(d)分别对应两调制信号的展开相位,图7(e)为振动重构结果。

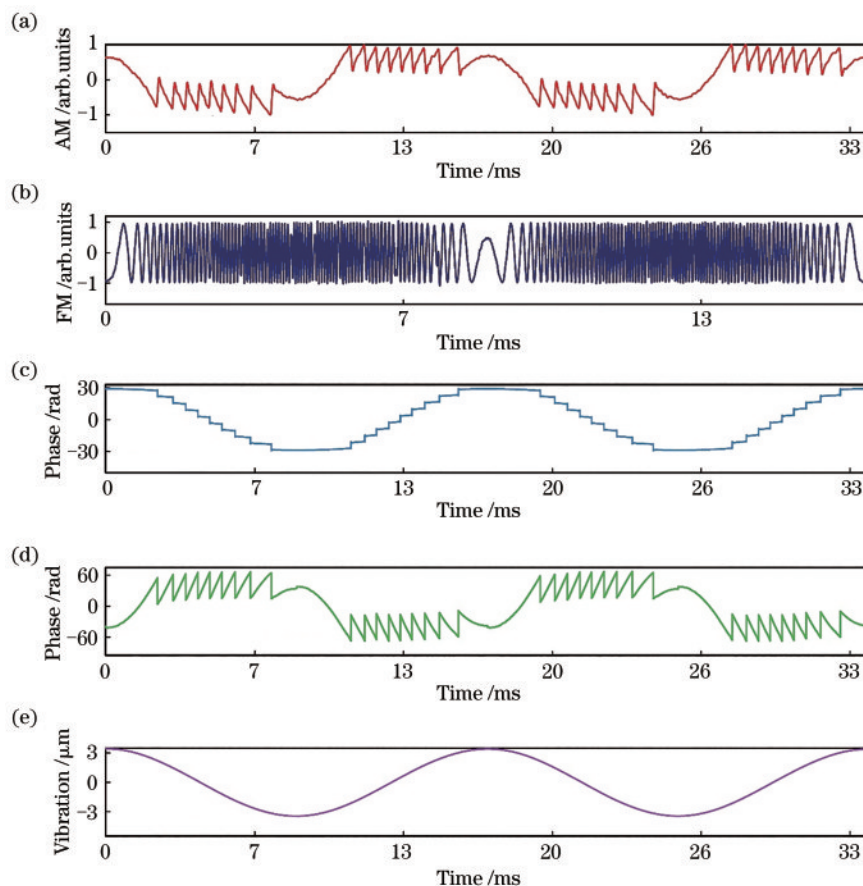


图7 重构实验结果。(a)调幅信号;(b)调频信号;(c)调幅信号展开相位;(d)调频信号展开相位;(e)重构振动曲线
Fig. 7 Experimental results of reconstruction. (a) AM signal; (b) FM signal; (c) unwrapped phase of AM signal; (d) unwrapped phase of FM signal; (e) reconstructed vibration curve

从图 7 可以看出调制信号的相位展开结果与仿真结果相吻合,重构曲线与正弦驱动信号相符。为验证该测量方法的重复性,保持驱动信号的频率不变,振幅由 200 mV 等间隔变化到 1000 mV,对扬声

器振幅进行连续多次测量,测量结果如表 1 所示,对应的散布图如图 8 所示,可以看出,重复测量标准差最大为 14.8 nm,对测量结果进行线性拟合,非线性误差为 0.78%。

表 1 测量结果

Table 1 Measurement results

Driving voltage amplitude / mV	Reconstructed amplitude / nm								Meanvalue / nm	Standard deviation / nm
	1	2	3	4	5	6	7	8		
200	1616.5	1611.9	1622.7	1621.6	1627.0	1634.9	1622.6	1614.9	1621.5	7.3
300	2496.7	2505.0	2495.0	2492.9	2493.7	2500.5	2491.3	2494.1	2496.2	4.5
400	3297.6	3297.9	3298.4	3298.5	3295.5	3299.2	3296.5	3294.4	3297.3	1.7
500	4092.2	4103.5	4094.5	4090.2	4100.5	4088.3	4091.1	4090.4	4093.8	5.4
600	5021.3	5023.4	5023.2	5020.3	5018.6	5020.4	5017.6	5010.5	5019.4	4.1
700	5827.1	5841.4	5828.5	5833.8	5822.2	5841.2	5839.8	5829.4	5832.9	7.3
800	6644.7	6677.7	6661.9	6641.2	6657.5	6665.2	6637.6	6672.1	6657.2	14.8
900	7516.1	7518.1	7494.0	7504.1	7517.1	7498.2	7512.0	7501.2	7507.6	9.4
1000	8335.6	8351.1	8356.2	8342.3	8365.4	8335.2	8335.3	8356.1	8347.2	11.7

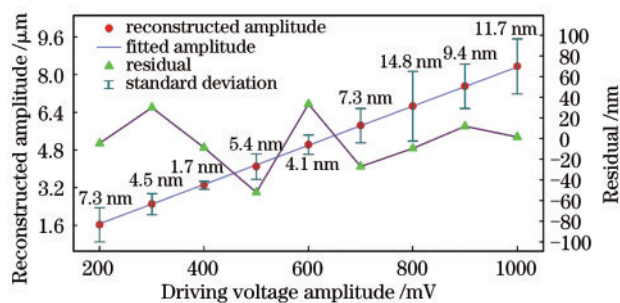


图 8 振动重复测量结果

Fig. 8 Vibration repeated measurement results

从上述分析可以看出,本文算法在实际的振动测量中是有效的,对调幅信号、调频信号的相位提取以及振动重构都与仿真结果基本吻合。相比仿真结果,实验中得到的 0.78% 非线性误差略大,一方面原因在于原始的自混合调制信号存在噪声,包括白噪声、条纹最高点处的尖脉冲噪声以及信号包络中缓慢变化的波动噪声^[6],噪声干扰会造成相位跳变点误检,其中尖脉冲噪声带来的影响尤为严重,因此必须对调制信号进行滤波,但滤波会导致波形钝化,在一定程度上影响相位展开精度。另一方面由于实验中采用扬声器作为振动源,受限于扬声器的品质,无法保证振幅与驱动电压之间满足严格的线性关系。

5 结 论

本文在全光纤 MZI 自混合干涉测振系统的基

础上,分析了光反馈量变化引入的测量误差,并针对自混合干涉信号的调频特性提出了一种新的振动重构算法,依靠较为简单的解算模型即可实现对目标物体振动信息的准确提取。实验结果表明,该算法能够有效地实现振动重构,在 1.6~8.3 μm 测量范围内,该算法的最大重复测量标准差为 14.8 nm,非线性误差为 0.78%。本文重构方法拓展了自混合干涉振动测量的应用范围,为实现低成本化的振动测量提供了可行的方案,同时也为光反馈水平因子的测量提供了一种新思路。

参 考 文 献

- [1] Donati S, Norgia M. Overview of self-mixing interferometer applications to mechanical engineering [J]. Optical Engineering, 2018, 57(5): 051506.
- [2] Xu Z L, Xie Y, Wang Y X, et al. Self-mixing interferometry with terahertz quantum cascade lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1114003. 徐赵龙, 解研, 王迎新, 等. 太赫兹量子级联激光器自混合干涉测量技术研究[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1114003.
- [3] Fu Y Y, Xiao G Z, Zhang B. Study of optical feedback and its application progress [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 060001. 傅杨颖, 肖光宗, 张斌. 激光回馈传感应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 060001.
- [4] Zhang Z Y, Gao Y, Zhao X H, et al. FFT phase detection method for self-mixing laser diode micro-

- displacement measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(7): 071201.
- 张照云, 高杨, 赵兴海, 等. 激光自混合微位移测量的 FFT 相位提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(7): 071201.
- [5] Guo D D, Ye H Y. Optical feedback self-mixing interference displacement real-time tracking and measurement algorithm [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(1): 55-59.
- 郭冬冬, 叶会英. 光反馈自混合干涉位移实时跟踪测量算法[J]. *激光杂志*, 2017, 38(1): 55-59.
- [6] Huang Z. Research and application on vibration measurement based on laser diode self-mixing interference [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- 黄贞. 基于半导体激光自混合干涉的振动测量研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] Donati S, Martini G, Hwang S K. Measurement of ambient vibration by self-mixing interferometry and its application to intrusion detection [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(5): 051508.
- [8] Chen J B, Zhu H B, Xia W, et al. Self-mixing birefringent dual-frequency laser Doppler velocimeter [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 560-572.
- [9] Norgia M, Melchionni D, Pesatori A. Self-mixing instrument for simultaneous distance and speed measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 99: 31-38.
- [10] Han D F, Yu J, Ma L, et al. Self-mixing speckle and dynamic target distance measurement using erbium-doped fiber ring laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(2): 020601.
- 韩道福, 俞进, 马力, 等. 环形掺铒光纤激光器自混合散斑及动态目标距离测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 020601.
- [11] Donati S, Giuliani G, Merlo S. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(1): 113-119.
- [12] Bes C, Plantier G, Bosch T. Displacement measurements using a self-mixing laser diode under moderate feedback[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(4): 1101-1105.
- [13] Tao Y F, Wang M, Guo D M, et al. Self-mixing vibration measurement using emission frequency sinusoidal modulation [J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 141-150.
- [14] Liu Q, Wang M, Xia W, et al. Implementation of real-time displacement precision measurement technology for sinusoidal phase-shifting laser self-mixing interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612011.
- 刘强, 王鸣, 夏巍, 等. 正弦相位调制型激光自混合干涉仪的实时位移测量技术[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0612011.
- [15] Jha A, Azcona F J, Royo S. Frequency-modulated optical feedback interferometry for nanometric scale vibrometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(11): 1217-1220.
- [16] Magnani A, Melchionni D, Pesatori A, et al. Self-mixing digital closed-loop vibrometer for high accuracy vibration measurements [J]. *Optics Communications*, 2016, 365: 133-139.
- [17] Giuliani G, Bozzi-Pietra S, Donati S. Self-mixing laser diode vibrometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(1): 24-32.
- [18] Donati S, Norgia M. Self-mixing interferometer with a laser diode: unveiling the FM channel and its advantages respect to the AM channel [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(5): 1-10.
- [19] Sun X Q, Ye H Y. Measurement of parameters C and α in optical feedback self-mixing interference system [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(10): 1211-1215.
- 孙学群, 叶会英. 光反馈自混合干涉系统中参数 C 和 α 的测量[J]. *激光与红外*, 2016, 46(10): 1211-1215.
- [20] Yu Y, Xi J, Chicharo J F. Measuring the feedback parameter of a semiconductor laser with external optical feedback [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9582-9593.
- [21] Zhou J F. Research on self-mixing sensor system of multi-longitudinal laser and a new method for measuring feedback factor[D]. Hefei: Anhui University, 2018.
- 周俊峰. 多纵模激光器自混合传感系统及反馈因子测量新方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [22] Geng J, Zhu X J, Zhang G A, et al. Bandwidth tunable microfiber-assisted Mach-Zehnder interferometer based on tapered-drawing fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0306004.
- 耿健, 朱晓军, 章国安, 等. 基于光纤布拉格光栅拉锥的带宽可调微光纤马赫-曾德尔干涉仪[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0306004.
- [23] Wang Y Z, Xie F, Chen L H, et al. On-line displacement measurement system based on multiplexed optical fiber Mach-Zehnder heterodyne interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0904007.
- 王韵致, 谢芳, 陈龙辉, 等. 复合光纤马赫-曾德尔外差干涉位移在线测量系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0904007.