

基于激光自混合干涉调频信号的位移测量实验

韩玉祥¹, 丛至诚², 高丙坤², 崔翔宇¹

(1. 东北石油大学计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 东北石油大学电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 激光自混合干涉在高精度测量领域发挥着越来越重要的作用, 微位移测量已应用于大型土木结构、航空航天、健康监测等。传统测量以调幅信号为主, 但随着噪声加强, 测量误差越来越大, 甚至难以测量。为此, 采用马赫-曾德尔干涉仪, 实现了调幅/调频信号转换。针对大噪声环境下的调频信号, 利用多次希尔伯特变换进行相位解卷, 实现了原始信号的重构。数值仿真结果证明了该方法的有效性, 在 10 dB 白噪声环境中, 系统的信噪比为 10.0614 dB, 估计误差为 0.0614 dB。实验结果表明, 微位移重构的误差在 100 nm 以内, 且调频信号的信噪比远高于调幅信号。该方法适用于超精密测量, 且在大噪声环境下仍具有较高的信噪比。

关键词: 激光自混合干涉; 调幅/调频; 微位移; 马赫-曾德尔干涉仪; 希尔伯特变换

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2022.05.011

Displacement measurement experiment based on laser self-mixing interference frequency modulation signal

HAN Yu-xiang¹, CONG Zhi-cheng², GAO Bing-kun², CUI Xiang-yu¹

(School of Computer & Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. School of Electrical Engineering & Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Laser self-mixing interferometry plays an increasingly important role in the field of high precision measurement. Micro-displacement measurement has been used in large civil structures, aerospace, health monitoring and so on. The traditional measurement is based on the amplitude modulation signal, but with the enhancement of noise, the measurement error is bigger and bigger, and even difficult to measure. For this reason, the amplitude modulation/frequency modulation (AM) signal conversion is realized by using the Mach-Zehnder interferometer. In this paper, the phase unwinding of frequency modulation signal in high noise environment is carried out by using multiple Hilbert transform, and the original signal is reconstructed. Numerical simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method. The SNR of the system is 10.0614 dB and the estimated error is 0.0614 dB in a 10 dB white noise environment. The experimental results show that the error of micro-displacement reconstruction is within 100 nm, and the SNR of FM signal is much higher than that of AM signal. This method is suitable for ultra-precision measurement and has a high signal-to-noise ratio in high noise environment.

Keywords: laser self-mixing interference; AM/FM; micro displacement; Mach-Zehnder interferometer; Hilbert transform

作者简介: 韩玉祥(1975-), 男, 硕士, 从事激光检测与计算机应用研究。E-mail: yuxiang_han@163.com

通讯作者: 高丙坤(1962-), 男, 博士, 从事精密测量与信号处理研究。

收稿日期: 2021-08-13

1 引言

激光自混合干涉系统结构简单、装置紧凑、鲁棒性好,能够实现物体位移、距离、振动、速度、表面轮廓、透明物体厚度等高精度测量^[1-12]。在干扰较小的环境中,大都采用激光器发射的调幅(AM)信号对目标进行测量,在满足高精度测量要求的同时,结构更加轻量化,产品也更加实用化。但在大噪声环境中,待测物体反射到激光自混合干涉系统中产生的相干调幅信号难以检测,为此通过调频(FM)信号测量目标物体状态的方法陆续提出^[13-16]。微位移测量已大量应用于大型土木结构、航空航天、健康监测等,故本文在激光自混合干涉平台上,采用马赫-曾德尔干涉仪,进行了调幅/调频信号转换与检测;针对大噪声干扰环境下的调频信号,通过多次希尔伯特变换进行相位解卷,重构了待测信号,实现了微位移的高精度测量。

2 激光自混合干涉调频测量原理

激光自混合干涉调幅/调频转换原理如图1所示。其中,DFB为激光器,PD为光电探测器,PZT为微纳米运动平台,马赫-曾德尔干涉仪用于实现AM/FM信号转换^[16]。

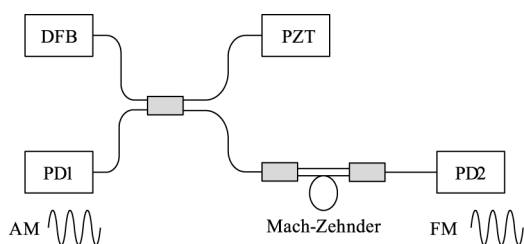


图1 调频信号产生原理图

Fig. 1 Frequency modulation signal generation schematic diagram

激光自混合干涉系统调幅信号的功率方程为^[10]:

$$P = P_0[1 + \beta \cos(\omega\tau)] \quad (1)$$

式中, P 是有光反馈时的光功率; P_0 是无光反馈时候的初始光功率; β 表示激光自混合干涉中的条纹可见度; ω 为角频率; τ 为光束在外腔往返一次所需要的时间。

自混合干涉系统的频率方程为:

$$\omega\tau = \omega_0\tau - C \sin(\omega\tau + \arctan\alpha) \quad (2)$$

式中, ω_0 为无光反馈时候的初始角频率; C 为光反馈强度系数; α 为线宽增强因子,系激光器的属性参数。用光频率表示的频率方程为:

$$2\pi(f - f_0)\tau = -C \sin(2\pi f\tau + \arctan\alpha) \quad (3)$$

令 $\Delta f = f - f_0$,有:

$$\Delta f = -\frac{C}{2\pi\tau} \sin(2\pi f\tau + \arctan\alpha) \quad (4)$$

当自混合干涉信号经过马赫-曾德尔干涉仪后,通过线性拟合,干涉仪输出功率 P_{FM} 为:

$$P_{FM} = P_0 S \Delta f = A \sin(2\pi f\tau + \arctan\alpha) \quad (5)$$

式中, A 为光束电矢量的振幅; S 为干涉仪的强度传输系数 T 对光频率 f 的导数,即:

$$S = \frac{dT}{df} = -\frac{\pi n \Delta L}{c} \sin\left(\frac{2\pi f n \Delta L}{c}\right) \quad (6)$$

式中, n 为光纤纤芯的折射率; c 为光在真空中的速度; ΔL 为振动位移。

由式(6)可知,调节马赫-曾德尔干涉仪的 S 可对光束滤波,其强度传输系数 T 与光频率 f 的对应变化曲线如图2所示。

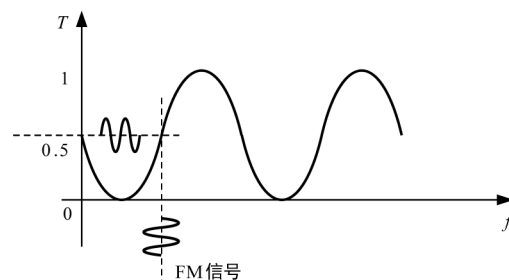


图2 滤波器强度传输系数与光频率的对应变化曲线以及FM信号转换原理图

Fig. 2 The corresponding change curve of filter intensity transmission coefficient and light frequency and the schematic diagram of FM signal conversion

由图2可知,当 $T=0.5$ 时, S 取得最大值,即:

$$S = \frac{\pi n \Delta L}{c} \quad (7)$$

可见马赫-曾德尔干涉仪滤波后得到的调频信号为正弦信号,因为相位信息难以解调,故通过多重希尔伯特变换^[17],得到与原信号 P_{FM} 正交的信号 P_N :

$$P_N = A \cos(2\pi f\tau + \arctan\alpha) \quad (8)$$

综合式(5)和(8),可计算出在进行位移重构时所需要的相位:

$$\phi = \arctan \frac{P_{FM}}{P_N} - \arctan\alpha \quad (9)$$

根据自混合干涉调幅信号与经过干涉仪滤波后的调频信号之间对应的相位关系,结合式(1)和(5),两信号之间的相位关系可以表示为:

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \arctan\alpha \quad (10)$$

分别对调幅和调频信号进行探测,然后对其进行相位提取,即可对线宽增强因子进行求解。

激光自混合干涉相干项的相位与外腔长度变化的关系为:

$$\phi(t) = \frac{4\pi\Delta L}{\lambda} \quad (11)$$

式(11)反映了相位与外腔长度变化的对应关系,实现了相位解卷。结合上面有关相位公式,即可进行位移重构,恢复出待测物体微位移轨迹。

3 微位移测量数值模拟

基于上述原理,首先通过数值模拟验证方法的有效性,分析微位移测量精度。选择外部物体运动频率为 100 Hz,振幅为 3.1 μm ,初始相位为 0 的简谐运动。激光器模拟波长为 1550 nm,线宽增强因子 α 为 4.6,光反馈因子 C 取为 0.1,采样点数取为 4000,可得到无噪声时调频信号仿真结果如图 3 所示。图 3(a)中,“a”线为调频信号,“b”线调频信号经过希尔伯特变换后的信号。在图 3(b)中,“a”线为模拟外部物体的简谐运动,“b”线为重构曲线,二者几乎重叠。图 3(c)给出了重构位移与模拟位移的误差,可见该方法能够实现微位移的高精度测量。

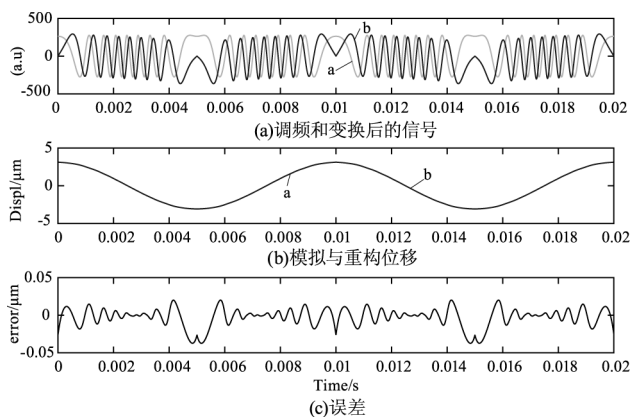


图 3 无噪声下调频信号仿真

Fig. 3 Simulation of frequency modulation signal without noise

对前述系统加入 10 dB 的高斯白噪声,数值仿真结果如图 4 所示。图 4(a)中,“a”线为加噪调频信号,“b”线为希尔伯特变换后的信号。在图 4(b)中,“a”线为模拟外部物体进行的简谐运动,“b”线为去噪后位移重构曲线。图 4(c)给出了重构位移与模拟位移之间的误差。可见,在大噪声环境下,基于调频信号的重构仍具有很高的精度。

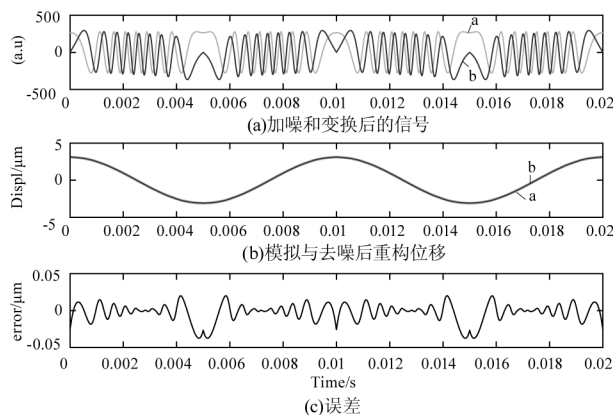


图 4 加入 10 dB 噪声的数值仿真

Fig. 4 Numerical simulation with 10 dB noise

4 微位移信号的测量与分析

数值模拟和分析证明了本文提出的高精度微位移测量方法的有效性,为此开展实验测试,装置如图 5 所示。为模拟大噪声干扰环境,该实验选用的光源为无光隔离器无温控的光纤耦合的 DFB 激光器 (THORLABS, S1FC1550PM),波长为 1550 nm,使用的三个耦合器均为 3 dB 标准耦合度 (分光比为 50 : 50),耦合器的四个传感臂的插入损耗分别为 3.32 dB、3.37 dB、3.46 dB、3.60 dB。第一个耦合器一条输出臂连接准直镜头 (THORLABS, F220FC - 1550) 照射在振动物体表面,振动物体选用镜面,放置在 PZT (P753.1CD, PI) 上,反射光再通过耦合器反射回激光腔形成自混合干涉现象,通过 PD1 (THORLABS, PDA20CS2) 进行探测。耦合器另一条输出臂连接马赫-曾德尔干涉仪,干涉仪由两个 3 dB 耦合器和一段 1 m 的光纤 (THORLABS, P1 - 1550A - FC - 1) 组成,再连接到 PD2 (THORLABS, PDA20CS2) 进行调频信号的探测。PD1 和 PD2 都通过数据采集模块 (USB-4431, NI) 获取电压信号,并在 PC 机上进行处理。在本次实验中,所有实验器材均放置在光学隔振平台 (T1225QK, THORLABS) 上,以避免外界振动的干扰。

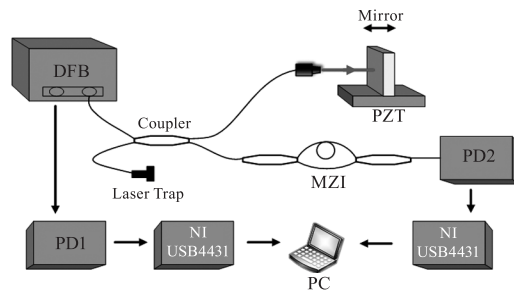


图 5 振动物体调幅/调频信号检测实验装置图

Fig. 5 An experimental device for detecting AM/FM signals of vibrating objects

设置目标物体振动频率为 5 Hz, 振动峰峰值为 3.1 μm , 采样频率设为 50 kHz, 两个光电探测器同一时刻探测到的调幅和调频信号如图 6 所示。可以看出, 调频信号的振幅远大于调幅信号且比较光滑, 有利于相位解卷。

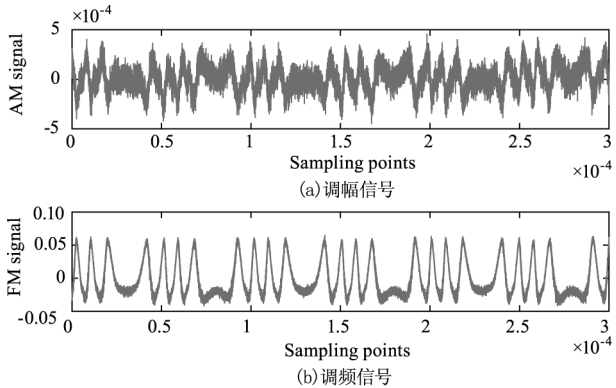


图 6 同时采集的调幅和调频信号
Fig. 6 Amplitude and frequency modulation signals are collected simultaneously

根据前述激光自混合干涉调频测量原理, 基于采集到的调频信号进行微位移重构, 结果如图 7 所示。图 7(a) 中, “a” 线为采集到的调频信号, “b” 线为调频信号经过希尔伯特变换后的信号。在图 7(b) 中, “a” 线为外部物体振动曲线, “b” 线为重构曲线。图 7(c) 给出了调频重构信号与原信号之间的误差, 可见, 基于调频信号可直接实现位移重构, 误差在 100 nm 以内。

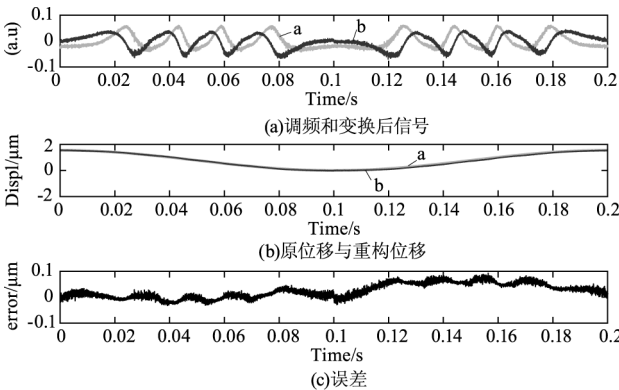


图 7 基于调频信号的微位移测量实验结果
Fig. 7 Experimental results of micro displacement measurement based on frequency modulation signal

因为使用调幅信号难以直接进行位移重构, 故首先对调幅信号做低通滤波, 再进行位移重构, 结果如图 8 所示。图 8(a) 中, “a” 线为滤波后的调幅信号, “b” 线为希尔伯特变换变换后的信号。在图 8

(b) 中, “a” 线为外部物体振动曲线, “b” 线为重构曲线。图 8(c) 给出了调幅重构信号与原信号之间的误差, 可见, 滤波后的调幅信号进行位移重构的误差达到了 520 nm。

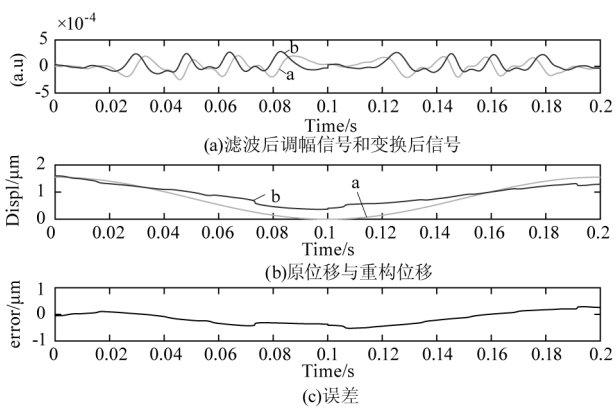


图 8 基于调幅信号的微位移测量实验结果
Fig. 8 Experimental results of micro-displacement measurement based on amplitude modulated signal

调整物体的位移, 同时获取两调频和调幅信号, 按照前述方法分析其信噪比, 得到三组数据示于表 1。可见, 调频信号的信噪比远高于调幅信号的信噪比。

表 1 调频和调幅信号的信噪比
Tab. 1 The signal-to-noise ratio of FM and AM signals

位移峰峰值/ μm	基于调频信号的信噪比/dB	基于调幅信号的信噪比/dB
1.55	16.9877	4.1574
3.1	13.2915	8.2860
6.2	9.4984	1.0015

5 结 论

- (1) 基于激光自混合干涉系统, 利用调频信号进行微位移测量, 误差在 100 nm 以内, 明显低于利用调幅信号测量的误差, 适用于超精密测量。
- (2) 基于激光自混合干涉系统测量微位移, 调频信号的信噪比远高于调幅信号的信噪比, 适用于大噪声环境下高精度测量。

参考文献:

[1] Xia W, Yang Z, LIU Q, et al. Development of a sinusoidal phase-shifting self-mixing interferometer for real-time displacement measurement with nanometer accuracy [J]. Meas. Sci. Technol., 2013, 24(5): 1-9.

[2] Dmitriev A K, Konovalov A N, UL'yanov V A. Self-mixing

- detection of backscattered radiation in a single-mode erbium fibre laser for doppler spectroscopy and velocity measurements[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(4): 309–313.
- [3] Zhao Y, Lu L, Du Z, et al. Research on micro-vibration measurement by a laser diode self-mixing interferometer[J]. *Optik*, 2013, 124(21): 4707–4711.
- [4] Alexandrova A S, Tzoganis V, Welsch C P. Laser diode self-mixing interferometry for velocity measurements[J]. *Opt Eng*, 2015, 54(3): 034104.
- [5] Zhao Y, Wu S, Xiang R, et al. Self-mixing fiber ring laser velocimeter with orthogonal-beam incident system[J]. *IEEE Photonics J*, 2014, 6(2): 1–11.
- [6] Chen P, Liu Y, Gao B, et al. Modeling and experimental verification of laser self-mixing interference phenomenon with the structure of two-external-cavity feedback[J]. *Opt Commun*, 2018, 410: 690–693.
- [7] Guo D, Wang M. New self-mixing micro-interferometer based on external phase modulation[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 20(3): 83–85.
- [8] Guo D. Quadrature demodulation technique for self-mixing interferometry displacement sensor[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(24): 5766–5769.
- [9] Yang J, Yang B, Zhang W, et al. Numerical simulation of phase modulation method used as high sensitive self-mixing vibrometry in vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Optik*, 2013, 124(23): 6017–6019.
- [10] Giuliani G, Bozzi-Pietra S, Donati S. Self-mixing laser diode vibrometer[J]. *Measurement Science & Technology*, 2003, 14(1): 24–32.
- [11] Aoshima T, Ohtsubo J. Two-dimensional vector LDV using laser diode frequency change and self-mixing effect[J]. *Opt. Commun.*, 1992, 92(4–6): 219–224.
- [12] Norgia M, Svelto C. Novel measurement method for signal recovery in optical vibrometer[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(8): 1703–1707.
- [13] Contreras V, Lonnqvist J, Toivonen J. Edge filter enhanced self-mixing interferometry[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2814–2817.
- [14] Contreras V, Toivonen J, Martinez H. Enhanced self-mixing interferometry based on volume Bragg gratings and laser diodes emitting at 405 nm wavelengths[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2221–2223.
- [15] 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):
- [16] Norgia M, Melchionni D, Donati S. Exploiting the FM-signal in a laser-diode SMI by means of a mach-zehnder filter[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2017, 29(18): 1552–1555.
- [17] Zhang Z, Li C, Huang Z. Vibration measurement based on multiple hilbert transform for self-mixing interferometry[J]. *Opt Commun*, 2019, 436: 192–196.