

复合光纤马赫-曾德尔外差干涉位移在线测量系统

王韵致, 谢芳*, 陈龙辉, 徐海波, 李明佳

北京交通大学理学院物理系光电信息科学与工程专业实验室, 北京 100044

摘要 研究了一种复合光纤马赫-曾德尔外差干涉测量系统, 并采用该系统对位移进行在线测量。基于光纤光栅只反射布拉格波长的特性, 构建了两个独立但光程几乎重合的光纤马赫-曾德尔干涉仪。其中的一个马赫-曾德尔干涉仪用于完成测量工作, 另一个马赫-曾德尔干涉仪用于监测环境干扰, 补偿环境干扰对测量结果的影响, 使测量系统适用于在线测量。位于马赫-曾德尔干涉仪参考臂的声光调制器组可对参考光进行移频, 当参考光与测量光会合时形成外差干涉信号, 实现外差干涉测量。实验中, 该系统对 $100\ \mu\text{m}$ 位移进行 10 次重复测量的标准差为 6 nm。

关键词 测量; 光纤传感; 在线测量; 外差干涉测量; 位移测量

中图分类号 TN2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0904007

On-Line Displacement Measurement System Based on Multiplexed Optical Fiber Mach-Zehnder Heterodyne Interferometry

Wang Yunzhi, Xie Fang*, Chen Longhui, Xu Haibo, Li Mingjia

Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Engineering, Department of Physics, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A multiplexed optical fiber Mach-Zehnder heterodyne interferometric system which is suitable for on-line displacement measurement is researched. Based on the characteristic that fiber Bragg grating only reflects Bragg wavelength, two independent optical fiber Mach-Zehnder interferometers which possess almost the same optical path are established. One of the optical fiber Mach-Zehnder interferometers is used to perform the measurement task while the other one is used to monitor the environmental disturbances. The system is suitable for on-line measurement after the environmental disturbances are compensated. The acoustic optical modulators embedded in the reference arm of the interferometers shift the frequency of the reference beam, and heterodyne interferometric signals are formed when the reference beam meets the measurement beam, realizing heterodyne interferometric measurement. During the experiments, the standard deviation of 10 repeated measurements for $100\ \mu\text{m}$ displacement is 6 nm.

Key words measurement; optical fiber sensing; on-line measurement; heterodyne interferometric measurement; displacement measurement

OCIS codes 120.3180; 060.2370; 060.2840

1 引言

光纤干涉测量系统由于具有非接触测量方式、结构紧凑、对电磁干扰不敏感、高分辨率、低成本等优点而被广泛应用于位移^[1-3]、振动^[4]、速度^[5]、应力^[6]、压力^[7]及温度^[8]等参量的精密测量。基于光学干涉原理的测量系统对环境干扰很敏感, 环境干

扰会降低测量精度, 甚至使测量系统不能正常工作, 因此, 传统光学干涉测量系统难以实现在线测量。Manojlovic^[4]利用测量光路和参考光路共路的方法消除了环境干扰对干涉测量系统的影响, Xavier等^[9]和 Fritsch等^[10]利用反馈控制系统补偿环境干扰对干涉测量系统的影响, 提高了干涉测量系统的抗干扰能力, 这两种方法均能使干涉测量系统适用

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-05-11; 录用日期: 2019-05-27

基金项目: 北京市自然科学基金(3172024)

* E-mail: fxie@bjtu.edu.cn

于在线测量。

本文提出了一种复合光纤马赫-曾德尔外差干涉位移在线测量系统,该系统可实时消除环境干扰对测量结果的影响,因此具有很强的抗干扰能力,能够对位移进行在线测量。基于光纤光栅只反射布拉格波长的特性,该系统采用一对布拉格波长相同的光纤光栅构成两个独立但光程几乎重合的光纤马赫-曾德尔干涉仪。一个马赫-曾德尔干涉仪用于测量,另一个则用于监测环境干扰,对测量结果进行补偿,消除环境干扰对测量结果的影响,使干涉测量系统适合在线测量。位于光纤马赫-曾德尔干涉仪参考臂的声光调制器组可以对参考光移频,当参考光与测量光会合时形成外差干涉信号,实现外差干涉测量。

2 复合光纤马赫-曾德尔外差干涉位移在线测量系统的原理

测量系统的原理如图 1 所示。利用布拉格波长相同的一对光纤布拉格光栅 FBG1 和 FBG2 构成两个独立但光程几乎重合的光纤马赫-曾德尔干涉仪。分布反馈式激光器 DFB1 和 DFB2 分别作为两个干涉仪的光源。FBG1 和 FBG2 的布拉格波长与 DFB1 的出射波长相同。其中的一个光纤马赫-曾德尔干涉仪利用 FBG1 作为反射镜,此干涉仪作为参考干涉仪,用于监测环境干扰;另一个光纤马赫-曾德尔干涉仪利用被测物体作为反射镜,此干涉仪作为测量干涉仪,完成测量工作。

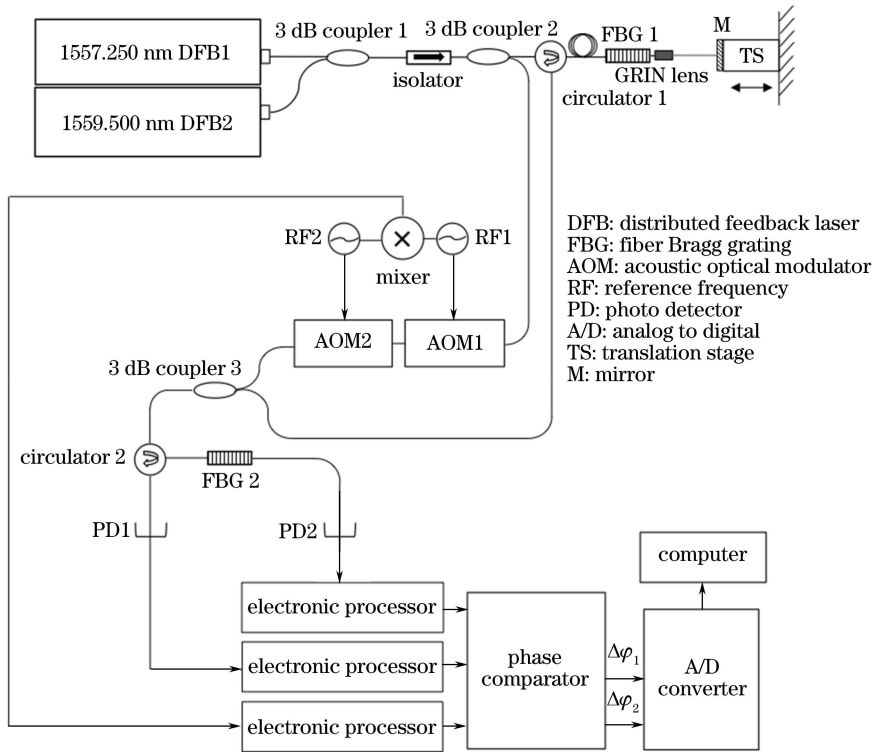


图 1 测量系统的原理图

Fig. 1 Diagram of principle of measurement system

DFB1 发出频率为 f_1 ($\lambda_1 = 1557.250$ nm) 的光工作于参考干涉仪中,此光经过 3 dB 耦合器 1、隔离器及 3 dB 耦合器 2 后被分成两束。其中一束光进入光纤马赫-曾德尔干涉仪参考臂,经过两个串联的声光调制器组 AOM1 和 AOM2(光频从 f_1 被移频至 $f_1 + \Delta f$)后,到达 3 dB 耦合器 3。AOM1 的 -1 级作为输出级,光移频量为 $-\Delta f_1$; AOM2 的 1 级作为输出级,光移频量为 Δf_2 。AOM1 和 AOM2 的光移频总量 $\Delta f = \Delta f_2 - \Delta f_1$ 。另一束光进入光纤马赫-曾德尔干涉仪的测量臂,经过光纤环形器 1

后到达紧邻准直镜(GRIN lens)的 FBG1。由于光纤光栅的反射特性,光被 FBG1 反射。反射光再次经过光纤环形器 1,到达 3 dB 耦合器 3。此光与来自参考臂的光会合,产生频率为 Δf 的外差干涉信号。此外差干涉信号经过光纤环形器 2 后到达 FBG2,被 FBG2 反射;反射光再次经过光纤环形器 2,到达光电探测器 PD1,被 PD1 探测。

DFB2 发出频率为 f_2 ($\lambda_2 = 1559.500$ nm) 的光工作于测量干涉仪中。此光经过 3 dB 耦合器 1、隔离器及 3 dB 耦合器 2 后被分成两束。一束光进入

光纤马赫-曾德尔干涉仪的参考臂,经过 AOM1 和 AOM2(光频从 f_2 被移频至 $f_2 + \Delta f$)后到达 3 dB 耦合器 3。另一束光进入光纤马赫-曾德尔干涉仪的测量臂,经过光纤环行器 1 后透过 FBG1,被准直镜准直成平行光束,投射到被测物体上,然后被待测物体反射回测量系统。反射光再次经过准直镜、FBG1、以及光纤环行器 1 后到达 3 dB 耦合器 3。此光与来自参考臂的光会合,产生频率为 Δf 的外差干涉信号。此外差干涉信号经过光纤环行器 2 及 FBG2 后到达光电探测器 PD2,并被 PD2 探测。

驱动 AOM1 和 AOM2 的射频信号经过混频器后输出频率为 $\Delta f = \Delta f_2 - \Delta f_1$ 的信号,作为测量的基准信号。此基准信号可表示为

$$V_b = C_b + \cos(2\pi\Delta f t + \varphi_{b0}), \quad (1)$$

式中: C_b 为直流量; φ_{b0} 为初始相位; t 为时间。

PD1 探测到的外差干涉信号可表示为

$$V_r = C_r + \cos\left(2\pi\Delta f t + \varphi_{r0} + 2\pi\frac{\Delta r}{\lambda_1}\right), \quad (2)$$

式中: C_r 为直流量; φ_{r0} 为初始相位; Δr 为参考干涉仪光程差的变化量; λ_1 为 DFB1 出射光波的波长。

PD2 探测到的外差干涉信号可表示为

$$V_m = C_m + \cos\left(2\pi\Delta f t + \varphi_{m0} + 2\pi\frac{\Delta m}{\lambda_2}\right), \quad (3)$$

式中: C_m 为直流量; φ_{m0} 为初始相位; Δm 为测量干涉仪光程差的变化量; λ_2 为 DFB2 出射光波的波长。

将(1)~(3)式所示的三路信号同时输入相位比较器,测量两路外差干涉信号与基准信号的相位差。由(2)式和(1)式可得参考干涉仪相位与基准信号相位之差为

$$\Delta\varphi_{rb} = 2\pi\frac{\Delta r}{\lambda_1} + \varphi_{r0} - \varphi_{b0}. \quad (4)$$

由(4)式可得参考干涉仪的光程差变化量 Δr 为

$$\Delta r = \frac{\lambda_1}{2\pi}[\Delta\varphi_{rb} - (\varphi_{r0} - \varphi_{b0})]. \quad (5)$$

同样地,由(3)式和(1)式可得测量干涉仪相位与基准信号相位之差为

$$\Delta\varphi_{mb} = 2\pi\frac{\Delta m}{\lambda_2} + \varphi_{m0} - \varphi_{b0}. \quad (6)$$

由(6)式可得测量干涉仪的光程差变化量 Δm 为

$$\Delta m = \frac{\lambda_2}{2\pi}[\Delta\varphi_{mb} - (\varphi_{m0} - \varphi_{b0})]. \quad (7)$$

测量干涉仪和参考干涉仪的光程除了 FBG1 到被测物体这一部分以外,其他部分均重合,测量干涉仪的光程差的变化量为参考干涉仪的光程差的变化

量与被测物体位移引起的光程之和,所以,被测物体的位移 D 可以表示为

$$D = \frac{1}{2}(\Delta m - \Delta r) = \frac{\lambda_2}{4\pi}[\Delta\varphi_{mb} - (\varphi_{m0} - \varphi_{b0})] - \frac{\lambda_1}{4\pi}[\Delta\varphi_{rb} - (\varphi_{r0} - \varphi_{b0})]. \quad (8)$$

(8)式即为补偿了环境干扰影响的位移测量结果。

3 位移测量实验及讨论

在实验中,被测物体(反射镜)随一维工作台 TS (P-625.1CD, Physik Instrumenta, 德国)线性移动,图 2 为实际的实验装置。

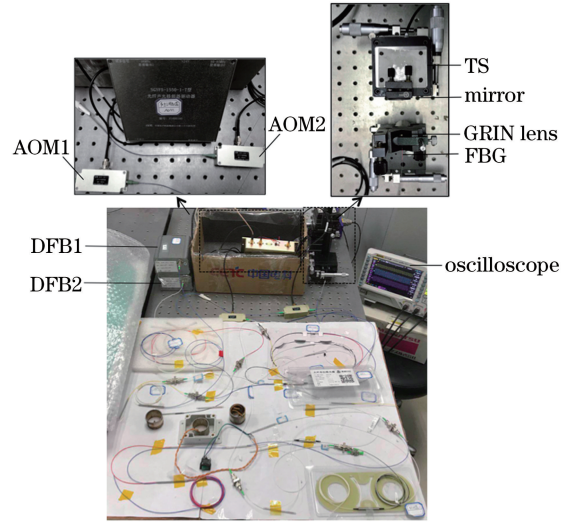


图 2 实验装置照片

Fig. 2 Photo of experimental system

驱动 AOM1 的射频信号的频率 $\Delta f_1 = 80$ MHz,驱动 AOM2 的射频信号的频率 $\Delta f_2 = 81.2$ MHz。光经过 AOM1 和 AOM2 以后的移频量 $\Delta f = -\Delta f_1 + \Delta f_2 = 1.2$ MHz。在图 3 中,曲线 1 为混频器输出的基准信号,曲线 2 和曲线 3 分别为 TS 线性移动被测

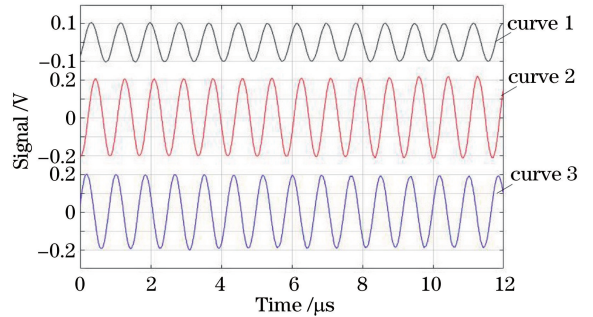


图 3 被测物体线性移动时混频器输出的基准信号以及 PD1 和 PD2 输出的信号

Fig. 3 Reference signal from mixer and signals from PD1 and PD2 when object is moved linearly

物体时 PD1 和 PD2 探测到的干涉信号。

在进行位移测量实验时, TS 线性移动被测物体, 移动范围为 $100\ \mu\text{m}$, 每移动 $5\ \mu\text{m}$, 系统输出当前的干涉系统的光程差。

测量开始时, 相位比较器先测出参考干涉仪干涉信号的初始相位与基准信号相位之差 $\varphi_{r0} - \varphi_{b0}$, 再测出物体在移动过程中参考干涉仪干涉信号的相位与基准信号相位之差 $\Delta\varphi_{rb}$, 从而可由(5)式得到参考干涉仪的光程差变化量 Δr 。测量结果如图 4(a)所示, Δr 变化无规律, 这是因为参考干涉仪光程

差的变化是由温度漂移和振动等环境干扰引起的。

相位比较器在测量开始时同样测出测量干涉仪初始相位与基准信号的相位差 $\varphi_{m0} - \varphi_{b0}$, 在物体移动过程中, 测出测量干涉仪与基准信号的相位差 $\Delta\varphi_{mb}$, 由(7)式可得测量干涉仪的光程差的变化量 Δm 。测量结果如图 4(b)所示, 可见, 测量干涉仪的光程差的变化也呈现出非线性, 这是因为测量干涉仪的光程包含了参考干涉仪的光程, 而参考干涉仪的光程差因受到环境干扰而呈现无规律的变化。

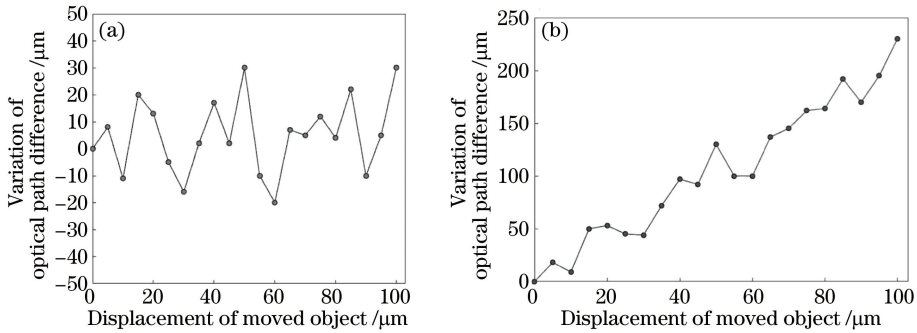


图 4 位移测量过程中参考干涉仪和测量干涉仪光程差的变化量。
(a)参考干涉仪光程差的变化量;(b)测量干涉仪光程差的变化量

Fig. 4 Variations of OPD of reference interferometer and measurement interferometer during displacement measurement process. (a) Variation of OPD of reference interferometer; (b) variation of OPD of measurement interferometer

根据图 4(a)~(b)的测量结果, 得到补偿了环境干扰的干涉系统的光程差测量结果, 如图 5 所示, 根据(8)式可以得到位移测量结果。

值。由测量结果可得系统进行 10 次重复测量的标准差为 6 nm。

4 结 论

本文提出并搭建了一种新型的复合光纤马赫-曾德尔外差干涉位移在线测量系统, 该系统包含两个独立但光程几乎重合的光纤马赫-曾德尔干涉仪。其中的一个马赫-曾德尔干涉仪用于完成测量工作, 另一个马赫-曾德尔干涉仪用于监测环境的干扰, 补偿环境干扰对测量结果的影响。实验结果表明, 通过对环境干扰进行补偿, 有效消除了环境干扰对测量结果的影响, 使测量系统有极强的抗干扰性, 适合用于在线测量。系统的位移测量分辨率为 $0.87\ \text{nm}$, 对 $100\ \mu\text{m}$ 位移进行 10 次重复测量结果的标准差为 $6\ \text{nm}$ 。

参 考 文 献

[1] Chang C P, Tung P C, Shyu L H, *et al.* Fabry-Perot displacement interferometer for the measuring range up to 100 mm[J]. Measurement, 2013, 46 (10): 4094-4099.
[2] Wang C, Xu L L, Zhu J, *et al.* A novel integrated

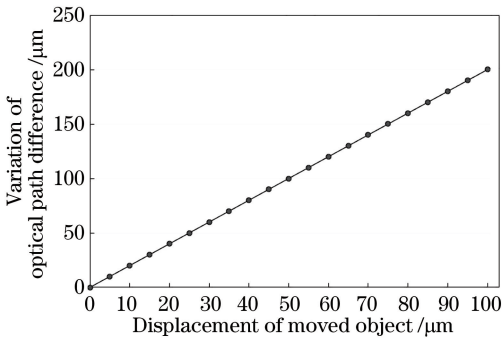


图 5 补偿了环境干扰的光程差测量结果

Fig. 5 Optical path difference measurement results after environmental disturbances are compensated

对图 5 的数据进行最小二乘线性拟合, 得线性相关系数为 0.999。因为相位比较器的相位测量分辨率为 0.4° , 故可得系统的位移测量分辨率为 $\frac{0.4^\circ}{360^\circ} \times \frac{\lambda_2}{2} = 0.87\ \text{nm}$ 。实验中, 系统对位移进行了 10 次重复测量, 每次测量时, TS 线性移动被测物体的距离均为 $100\ \mu\text{m}$, 系统输出被测物体的位移测量

- fiber-optic interferometer model and its application in micro-displacement measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 86: 125-131.
- [3] Guan K S, Li Y H, Chen Y X, *et al.* A novel optical fiber displacement measurement system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 599/600/601: 684-688.
- [4] Manojlovic L M. A novel common path interferometric technique for vibration measurement based on two fiber-optic couplers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(7): 1541-1547.
- [5] Seat C, Ouisse E, Morteau E, *et al.* Vibration displacement measurements based on a polarimetric extrinsic fibre Fabry Perot interferometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(6): 710-716.
- [6] Meggitt B T, Hall C J, Weir K. An all fibre white light interferometric strain measurement system[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 79(1): 1-7.
- [7] Wang W H, Wu N, Tian Y, *et al.* Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9006-9014.
- [8] Ohta T, Koshimizu C, Kawasaki K, *et al.* Simultaneous measurement of substrate temperature and thin-film thickness on SiO₂/Si wafer using optical-fiber-type low-coherence interferometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(1): 013110.
- [9] Xavier G B, von der Weid J P. Stable single-photon interference in a 1 km fiber-optic Mach-Zehnder interferometer with continuous phase adjustment[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1764-1766.
- [10] Fritsch K, Adamovsky G. Simple circuit for feedback stabilization of a single-mode optical fiber interferometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1981, 52(7): 996-1000.