

文章编号: 1001-3806(2012)06-0738-04

## 高稳定大量程复合光纤干涉位移测量系统研究

李恒鹤, 马森, 谢芳\*

(北京交通大学理学院物理系, 北京 100044)

**摘要:** 为了使位移测量系统达到大量程、高分辨率, 采用复合光纤干涉的方法, 进行了理论分析和实验验证。利用光纤光栅作为反射镜, 构成两个干涉光路几乎共路的光纤迈克尔逊干涉仪。其中一个光纤迈克尔逊干涉仪通过反馈控制补偿环境干扰对测量系统的影响, 使测量系统适合在线测量; 另一个干涉仪用于完成测量工作。两个不同波长的光同时作用于完成测量的干涉仪中, 测量量程由两个波长的合成波干涉信号确定, 使测量量程大于 1mm; 测量分辨率由其中一个单波长干涉信号确定, 测量分辨率小于 1nm。结果表明, 这种基于复合光纤干涉仪的位移测量系统可以实现大量程、高稳定的位移在线测量。

**关键词:** 测量与计量; 光纤; 干涉; 反馈控制

**中图分类号:** TP274

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.007

## High-stability and large-displacement measurement system based on multiplexed fiber interferometry

LI Heng-he, MA Sen, XIE Fang

(Department of Physics, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to make the displacement measuring system achieve the large-range and high-resolution, theoretical analysis and experimental verification were conducted with the multiplexed fiber interferometer. Two fiber Michelson interferometers sharing common-interferometric-optical path were configured by employing fiber Bragg gratings as in-fiber reflective mirrors. One of the interferometer was used to stabilize the measurement system with a feedback loop compensating the influence induced by the environmental disturbance so that the measurement system was kept stable enough for on-line measurement, while the other one was for performing the measurement task. Two different wavelengths are working simultaneously in the measurement interferometer. The measurement range determined by the synthetic-wavelength interferometric signal of the two wavelengths was expanded to be larger than 1mm, while the measurement resolution determined by one of the single-wavelength interferometric signals was maintained less than 1nm. The displacement measurement system achieved the large-range and high-resolution purpose based on multiplexed fiber interferometry.

**Key words:** measurement and metrology; fiber optics; interferometry; feedback control

### 引言

光纤干涉仪由于具有可进行非接触测量、体积小、重量轻、抗电磁干扰、分辨率高、价格低廉等优点被广泛应用于精密测量领域, 对位移、振动、速度、应变、压力以及温度等参量进行测量<sup>[1-8]</sup>。

对于光纤干涉位移测量系统, 光纤应该仅完成传光的作用, 干涉信号的相位的变化应该仅由被测位移的变化引起。但是由于温度漂移以及其它类型的环境

干扰, 构成干涉臂的光纤的长度会随机地变化, 从而引起干涉信号的相位随机变化, 这将会降低位移测量精度, 有时甚至使测量系统无法正常工作。虽然干涉臂共路的测量系统<sup>[1]</sup>及具有反馈补偿的测量系统<sup>[2-3]</sup>能够补偿干涉信号的相位的随机变化, 但是由于受干涉信号相位模糊的限制, 使得该技术不能对大跨度位移进行测量, 如参考文献[1]和参考文献[3]中所述技术的测量量程仅为半波长, 只有几百纳米。

作者研究了一种高稳定、大量程的基于复合光纤迈克尔逊干涉仪的位移测量系统。该测量系统包含两个光纤迈克尔逊干涉仪(fiber Michelson interferometer, FMI), 利用光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)作为反射镜<sup>[9]</sup>构成两个干涉光路共路的光纤迈克尔逊干涉仪。其中一个光纤迈克尔逊干涉仪(参考

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975022)

作者简介: 李恒鹤(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感和光电检测方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: fxie@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2012-04-23; 收到修改稿日期: 2012-05-21



### 1.2 反馈补偿原理

PD<sub>1</sub> 探测到的参考 FMI 的干涉信号通过一个反馈电路处理后补偿由于环境干扰引起的随机相位漂移。

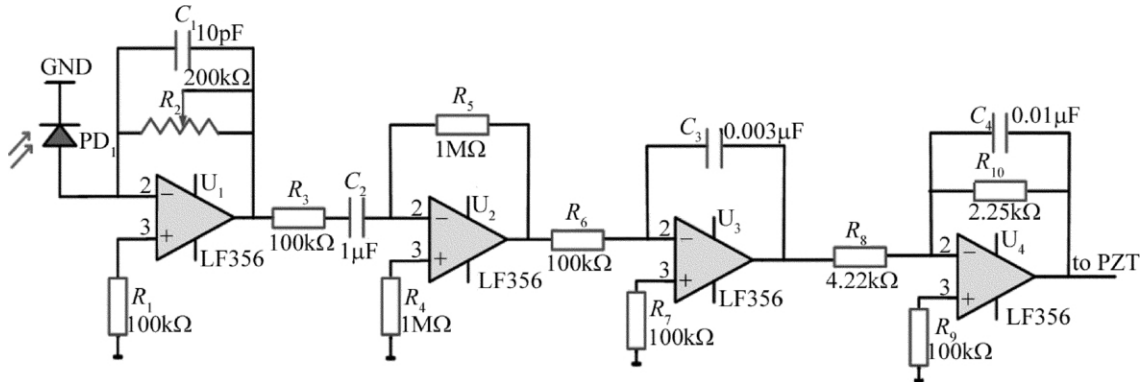


Fig. 2 Circuit scheme of the electronic feedback loop

$$u_1 = u_0 [1 + k \cos(\phi_d + \phi_s)] \quad (1)$$

式中  $u_0$  与输入光功率和  $U_1$  的增益有关  $k$  是干涉条纹的可见度  $\phi_d$  是两臂之间的固有相位差  $\phi_s$  是由环境干扰引起的相位差。PD<sub>1</sub> 探测到的信号经过微分电路  $U_2$  和两个串联积分电路  $U_3, U_4$ 。  $U_4$  输出的电压加在驱动压电陶瓷管上,以此来调节参考臂的光程,使参考 FMI 保持在正交状态(相位差为  $\pi/2$ )。该反馈回路为一个 2 阶系统,频率带宽为 0kHz ~ 5kHz,足以补偿各种频率的环境干扰。

## 2 实验及实验结果

### 2.1 反馈补偿实验

当反馈电路处于非工作状态(断开),且测量镜和参考镜静止时,PD<sub>2</sub> 和 PD<sub>3</sub> 探测到的干涉信号如图 3 所示。曲线 1 是 PD<sub>2</sub> 探测到的信号,曲线 2 是 PD<sub>3</sub> 探测到的信号。由图 3 可知,即使测量镜和参考镜保持静止,干涉信号也一直在随机波动,此波动是由温度漂移以及其它类型的环境干扰引起。当反馈电路工作(闭合)时,PD<sub>2</sub> 和 PD<sub>3</sub> 探测到的干涉信号即刻保持在恒定值,如图 4 所示,其中曲线 1 是 PD<sub>2</sub> 探测到的信号,曲线 2 是 PD<sub>3</sub> 探测到的信号。在图 4 所示的采样时间内,前半段时间反馈电路处于非工作状态,PD<sub>2</sub> 和 PD<sub>3</sub> 探测到的干涉信号一直在随机波动;后半段时间

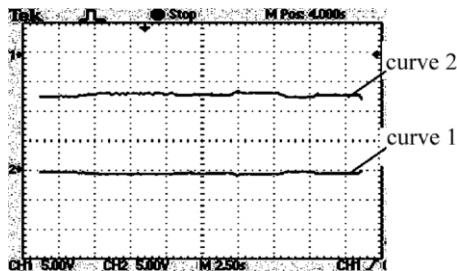


Fig. 3 Signals detected by PD<sub>2</sub> and PD<sub>3</sub> when the electronic feedback loop is out of operation

反馈电路的原理图如图 2 所示。PD<sub>1</sub> 连接到具有低输入阻抗的电流电压转换电路  $U_1$ 。  $U_1$  的输出电压具有以下形式:

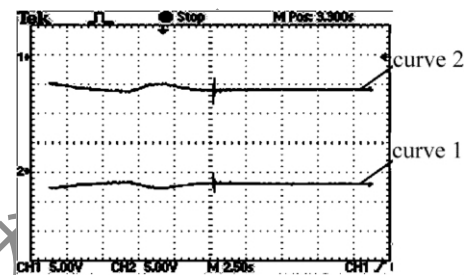


Fig. 4 Signals detected by PD<sub>2</sub> and PD<sub>3</sub> before and after the electronic feedback loop is turned on

反馈电路处于工作状态,PD<sub>2</sub> 和 PD<sub>3</sub> 探测到的干涉信号稳定在恒定值。在实验中,反馈电路连续工作 4h 以上,在此期间干涉信号一直保持稳定,证明此反馈电路能有效地消除环境干扰。

### 2.2 位移测量实验

为了实现位移测量,测量 FMI 的光程差需被线性调制。锯齿波电压驱动 1 个 1 维平移台线性调制测量 FMI 的光程差,PD<sub>2</sub> 和 PD<sub>3</sub> 探测到的干涉信号将相应地变化,如图 5 所示。曲线 1 是由 PD<sub>2</sub> 的探测到的信号,曲线 2 是由 PD<sub>3</sub> 探测到的信号。当测量镜的位移发生变化,曲线 1 的峰值点将线性移动,曲线 1 峰值点的移动范围内曲线 2 的相位随测量镜的位移而线性变化。为了测出曲线 2 的相位变化从而计算出测量镜的位移,曲线 1 和曲线 2 同时经过 A/D 转换卡转换成数字信号输入计算机,再由计算机程序作数据处理,得出

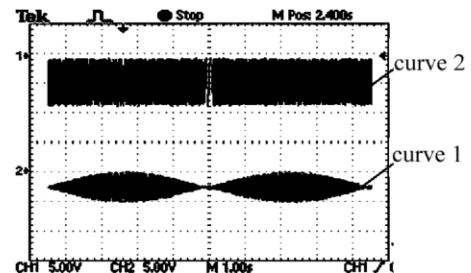


Fig. 5 Signals detected by PD<sub>2</sub> and PD<sub>3</sub> during the optical path difference of the interferometer is scanned linearly

测量结果。当测量镜的位移变化时,利用计算机程序可以很容易地确定曲线1的峰值点位置的移动范围,在此范围内对应的曲线2的相位变化也可由计算机程序测出,即可计算出测量镜的位移。在图5中曲线1的峰值点处沿时间轴展开曲线,展开图如图6所示。系统的测量量程由合成波干涉信号决定,为半合成波长。对应于工作于测量干涉仪中的两个波长,该系统的测量量程为2.17mm。如果选择适当的两个波长,测量量程可以更大。本系统所用的A/D转换卡为16位,A/D卡的输入电压幅值为10V,所以其电压分辨率为 $10V/2^{16} = 0.15\text{mV}$ 。由图6中的曲线2可知,单波长干涉信号的峰-峰值为16V,可以计算出本系统的分辨率为 $\frac{0.15\text{mV}}{16000\text{mV}} \times 1558.52\text{nm} = 0.004\text{nm}$ 。考虑到电路噪声、1维平移台的移动误差的影响,系统的实际测量分辨率小于1nm。



Fig. 6 Zoom of Fig. 5 in the area of the top of synthetic-wavelength interferometric signal

实验过程中,利用另一个1维平移台等间距地移动测量镜,每移动 $10\mu\text{m}$ 测1次,移动范围为 $200\mu\text{m}$ ,实验结果如图7所示。对实验所得数据做最小二乘拟合,可得实验数据的线性相关系数 $R = 0.999$ ,说明此测量系统有很好的线性。

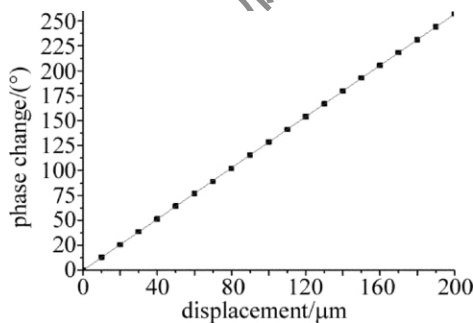


Fig. 7 Displacement measurement results

### 3 结论

研究了一种高稳定大量程的适合在线测量的复合光纤迈克尔逊干涉位移测量系统。利用反馈控制环节补偿了环境干扰的影响,达到了稳定测量系统的目的,使测量系统适合在线测量;利用合成波干涉信号决定测量量程,使测量量程大于1mm;利用单波干涉信号决定测量分辨率,使测量分辨率小于1nm。位移测量结果的线性相关系数为0.999。

#### 参考文献

- [1] HAND D P, CAROLAN T A, BARTON J S, *et al.* Profile measurement of optically rough surfaces by fiber-optic interferometry [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(16): 1361-1363.
- [2] JACKSON D A, DANDRIDGE A, TVENTEN A B. Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectric stretched coiled fiber [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(17): 2926-2929.
- [3] LIN D J, JIANG X Q, XIE F, *et al.* High stability multiplexed fibre interferometer and its application on absolute displacement measurement and on-line surface metrology [J]. *Optics Express*, 2004, 12(23): 5729-5734.
- [4] JIANG M Zh, GERHARD E. A simple strain sensor using a thin film as a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer [J]. *Sensors and Actuators* 2001, A88(1): 41-46.
- [5] SEAT H C, OUISSE E, MORTEAU E, *et al.* Vibration-displacement measurements based on a polarimetric extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer [J]. *Measurement Science 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*, 2000, A79(1): 1-7.
- [7] NGUYEN L V, HWANG D, MOON S, *et al.* High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch [J]. *Optics Express* 2008, 16(15): 11369-11375.
- [8] 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.
- [9] XIE F, ZHANG Sh L, LI Y, *et al.* Study on the reflected wavelength shift based on sensing elements of in-fiber Bragg gratings [J]. *Laser Technology* 2002, 26(2): 84-85 (in Chinese).
- [10] LI D, ZHANG X H, HUANG J B. Theoretical analysis of feedback control on input light polarization of fiber optic interferometer [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 126-129 (in Chinese).
- [11] RAO Y J, JACKSON D A. Recent progress in fibre optic low-coherent interferometry [J]. *Measurement Science Technology*, 1996, 7(7): 981-999.
- [12] XIE F, CHEN Zh M, REN J Y. A stabilized fiber 3x3 coupler interferometric measurement system based on a first order feedback loop [J]. *Laser Technology* 2010, 34(3): 297-299 (in Chinese).