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 冯 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 1 mm , while the measurement resolution determined by one of the single-wavelength interferometric signals was maintained less than 1 nm. 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^[1-8]。

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

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 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^[1]及具有反馈补偿的测量系统^[2-3]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^[9]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 FMI) 通过反馈环节补偿由于环境干扰引起的相位漂 移,从而稳定测量系统,使得测量系统适合在线测量; 另一个干涉仪(测量 FMI) 用于完成测量工作。3 个波 长不同的分布反馈式激光器(distributed feedback laser, DFB) 激光器发出的光经过 3 × 3 耦合器耦合进测 量系统,其中一个波长工作于参考 FMI 中通过反馈补 偿环节消除环境干扰的影响,达到稳定测量系统的目 的^[10];另外两个波长的光同时工作于测量 FMI 中,完 成测量工作,系统中的一个探测器探测到这两个波长 的合成波干涉信号,另一个探测器探测到其中一个波 长的干涉信号^[11-2]。对这两路信号进行处理,系统的 测量量程由合成波干涉信号确定,使测量量程大于 2mm;系统的测量分辨率由单波长干涉信号确定,使测 量分辨率小于 1nm。

1 系统原理

1.1 复合光纤干涉测量系统

复合光纤干涉测量系统的原理如图 1 所示。该测 量系统包含两个光纤迈克尔逊干涉仪,利用光纤光栅 作为反射镜,两个光纤迈克尔逊干涉仪复合在一起且 干涉光路共路。系统中 3 个 DFB 激光器发出的光波 长分别为 $\lambda_1 = 1557.32$ nm, $\lambda_2 = 1558.52$ nm, $\lambda_3 = 1559.08$ nm 输出功率均为 2.5mW, 20dB 光谱带宽约 为 0.2nm。该系统中的 3 个光纤光栅(FBG₁,FBG₂和 FBG₃) 具有相同的布喇格波长,且均为 1557 *3*2nm,反 射谱的 3dB 带宽均为 0.2nm,第 4 个光纤光栅(FBG₄) 布喇格波长为 1558.52nm,反射谱的 3dB 带宽为 0.3nm。其中一个光纤迈克尔逊干涉仪(参考 FMI)利 用 FBG₁和 FBG₂作为反射镜,FBG₁和 FBG₂分别紧接 两个自准直透镜。此干涉仪通过反馈补偿环节补偿两 个干涉臂由于环境干扰而引起的相位漂移,实现测量 系统的稳定。波长为 $\lambda_1 = 1557.32$ nm 的 DFB 激光器



Fig.1 Principle of the measurement system

发出的光经过 3 × 3 耦合器 1(3 × 3 coupler 1)、光纤隔 离器(isolator)和3×3耦合器2(3×3 coupler 2)后被 分成3束,其中两束光分别被FBG,和FBG,反射,这 两束反射光又在 3 × 3 耦合器 2(3 × 3 coupler 2) 相遇 并发生干涉。来自3×3耦合器2(3×3 coupler 2) 第1 个端口的光由于光纤隔离器的作用不会到达光源 因 此 不会对光源产生影响。来自 3 × 3 耦合器 2(3 × 3 coupler 2) 第 2 个端口的光经过环形器 2(circulator 2) 和 FBG₄ 后被导出测量系统。来自 3×3 耦合器 $2(3 \times 3)$ 3 coupler 2) 第 3 个端口的光经过环形器 1(circulator 1) 后被 FBG₃ 反射 再次经过环形器 1(circulator 1) 后 由探测器(photo detector, PD) PD, 探测。PD, 探测到 的信号经过反馈电路处理后 输出一个电压加在参考 臂中的压电陶瓷管(piezoelectric ceramics, PZT)上, PZT 管长为 35mm ,外径 35mm ,壁厚 2mm ,上面缠绕约 11m 的构成参考臂的光纤。此反馈电压驱动压电陶瓷 调节参考臂的光纤长度,使此干涉仪始终处于正交状 态(相位差为 π/2) 从而消除参考 FMI 的随机相位漂 移 实现对参考 FMI 的稳定。另一个干涉仪(测量 FMI) 与参考 FMI 复合在一起且干涉光路共路,因此, 当参考 FMI 稳定时 测量 FMI 也稳定了 测量系统也 就稳定了。

从波长为 $\lambda_2 = 1558.52$ nm 和 $\lambda_3 = 1559.08$ nm 的 DFB 激光器发出的两个波长的光经过 3 × 3 耦合器 1 $(3 \times 3 \text{ coupler } 1)$ 、隔离器(isolator)和 3 × 3 耦合器 2(3×3 coupler 2) 后被分成 3 束。其中两束光透过 FBG₁和 FBG₂分别经测量镜和参考镜反射后再次进入 系统。在3×3耦合器2(3×3 coupler 2) 再次相遇并发 生干涉 从而产生合成波干涉信号。来自3×3 耦合器2 (3×3 coupler 2) 第1个端口的光由于光纤隔离器的作 用不会到达光源 因此 不会对光源产生影响。来自3× 3 耦合器 2(3 × 3 coupler 2) 第 2 个端口的光经过环形器 2(circulator 2),其中 1558.52nm 波长的光被 FBG4 反 射 而 1559.08nm 波长的光透过 FBG₄ 被导出系统。由 FBG₄ 反射的光是单波长干涉信号,再次经过环形器2 (circulator 2) 后由 PD₃ 探测。来自 3 × 3 耦合器 2(3 × 3 coupler 2) 第3个端口的光是合成波长干涉信号 经过 环形器 1(circulator 1) 后透过 FBG_3 后被 PD_2 的探测。 当被测位移发生变化时 PD, 和 PD, 探测到的信号会相 应地变化。PD₃ 探测到的是波长为 λ_2 的单波长干涉信 号 PD_2 探测到的是 λ_2 和 λ_3 的合成波长干涉信号 ,合 成波长为 $\lambda_2 \lambda_3 / (\lambda_3 - \lambda_2)$ 远远大于 λ_2 和 λ_3 。在数据 处理时 利用 PD。探测到的合成波长干涉信号确定系统 的测量量程 使测量量程大于 2mm 利用 PD, 探测到的单 波长干涉信号确定系统的分辨率 使分辨率小于 1nm。

1.2 反馈补偿原理

PD₁ 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。



以下形式:

Fig. 2 Circuit scheme of the electronic feedback loop

 $u_1 = u_0 [1 + k \cos(\phi_d + \phi_s)]$ (1) 式中 μ_0 与输入光功率和 U₁ 的增益有关 *k* 是干涉条 纹的可见度 ϕ_d 是两臂之间的固有相位差 ϕ_s 是由环 境干扰引起的相位差。PD₁ 探测到的信号经过微分电 路 U₂ 和两个串联积分电路 U₃, U₄。 U₄ 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,PD₂和 PD₃探测到的干涉信号如图 3 所示。曲线 1 是 PD₂探测到的信号,曲线 2 是 PD₃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,PD₂和 PD₃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 PD₂探测到的信 号,曲线 2 是 PD₃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,PD₂和 PD₃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_2 and PD_3 when the electronic feedback loop is out of operation



反馈电路的原理图如图 2 所示。 PD_1 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

g.4 Signals detected by PD_2 and PD_3 before and after the electronic feedback loop is turned on

反馈电路处于工作状态,PD₂和PD₃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,PD₂ 和 PD₃ 探测到的干涉信号将相应 地变化,如图 5 所示。曲线 1 是由 PD₂ 的探测到的信 号,曲线 2 是由 PD₃ 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 PD₂ and PD₃ 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/2¹⁶ = 0.15mV。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 $\frac{0.15mV}{16000mV}$ ×

4 -0.004mm。考虑到电路噪声、1 维干移 台的移动误差的影响,系统的实际测量分辨率小 干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1个1维平移台等间距地移 动测量镜,每移动10μm 测1次,移动范围为200μm, 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 ther interferometer using a piezoeletric 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] JIANC 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 opticlow-coherent interferometry [J]. Measurement Science Technology ,1996 ,7 (7):981-999.
- [12] XIE F, CHEN Zh M, REN J Y. A stabilized fiber 3 × 3 coupler interferometric measurement system based on a first order feedback loop [J]. Laser Technology 2010 34(3):297-299(in Chinese).