

文章编号: 1001-3806(2010)03-0297-03

1阶反馈稳定光纤3×3耦合器干涉测量系统

谢芳, 陈志敏, 任均宇

(北京交通大学理学院物理系, 北京 100044)

摘要: 为了消除环境干扰对光纤干涉测量系统的影响, 采用光纤3×3耦合器和光纤光栅构成光路复合在一起的两个光纤迈克尔逊干涉仪构成了光纤干涉测量系统。利用光纤光栅作为反射镜, 两个光纤迈克尔逊干涉仪共有几乎相同的光路。其中一个光纤迈克尔逊干涉仪通过一个1阶反馈来补偿环境干扰的影响, 实现对该测量系统的稳定; 另一个光纤迈克尔逊干涉仪用于完成测量工作。结果表明, 1阶反馈可以对0Hz~21Hz的干扰进行补偿, 使得该测量系统适合于在线精密测量。

关键词: 光纤光学; 稳定; 反馈控制; 干涉计量

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.003

A stabilized fiber 3×3 coupler interferometric measurement system based on a first order feedback loop

XIE Fang, CHEN Zhi-min, REN Jun-yu

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

Abstract: In order to eliminate the influences resulting from environmental disturbances, a stabilized optical fiber interferometric measurement system configured with a fiber 3×3 coupler and fiber Bragg gratings (FBGs) was designed. By employing the FBGs as in-fiber reflective mirrors, both fiber Michelson interferometers in the system shared a common-interferometric-optical path. One of the fiber interferometers was used to stabilize the system based on a first order electronic feedback loop for compensating for the environment jitter, while the other was used to perform the measurement task. The bandwidth of the feedback loop is 21Hz which endows the system stabilization for on-line precision measurement.

Key words: fiber optics; stabilisation; feedback control; interferometry

引言

光纤干涉仪由于体积小、重量轻、抗电磁干扰、能波分复用、高度集成、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、加速度、应变以及温度等参量进行测量^[1-10]。

对于光纤干涉位移测量系统, 光纤仅是用来传光, 干涉信号的相位的变化应只由被测位移的变化引起, 但是由于光纤长度对温度等环境干扰非常敏感, 这些干扰将引起干涉信号的相位随机地变化。这种随机变化将降低测量精度, 甚至使测量系统无法正常工作。为了提高测量精度, 需要对环境干扰引起的相位的随机变化进行补偿。

作者研究一个具有自我补偿功能的复合光纤迈克尔逊干涉测量系统, 能有效地补偿环境干扰所带来的随机相位漂移, 使测量系统具有很强的抗干扰能力。

该系统利用一个光纤3×3耦合器, 即光纤光栅作为反射镜构成光路复合在一起的两个光纤迈克尔逊干涉仪; 其中一个光纤迈克尔逊干涉仪通过1阶反馈电路处理后驱动一个压电陶瓷管调节参考臂的光程, 使该干涉仪始终保持在正交状态(相位差保持在 $\pi/2$), 从而实现对环境干扰进行补偿, 使整个测量系统保持在稳定状态; 另一个干涉仪用来完成测量工作。1阶反馈的带宽为0Hz~21Hz, 该测量系统适合用于在线实时测量。

1 测量系统的原理

1.1 测量原理

系统的测量原理如图1所示。利用一个光纤3×3耦合器和光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)作为反射镜, 构成两个光路重合的光纤迈克尔逊干涉仪。两支中心波长分别为 $\lambda_1 = 1557.32\text{nm}$ 和 $\lambda_2 = 1558.52\text{nm}$ 的分布反馈式激光器(distributed feed-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675018)

作者简介: 谢芳(1966-), 女, 副教授, 主要从事精密测试、光纤传感、精密仪器方面的研究。

E-mail: fxie@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2009-06-09; 收到修改稿日期: 2009-07-15

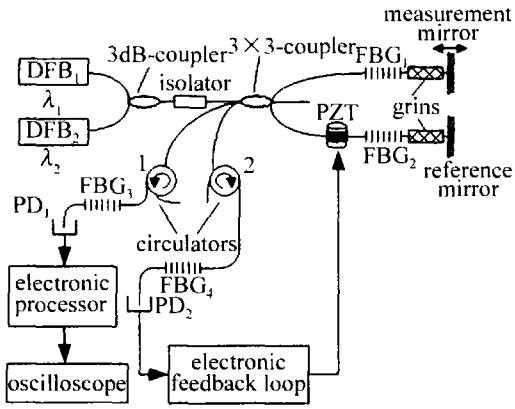


Fig. 1 The principle of the measurement system

back, DFB) 发出的光由于光纤布喇格光栅的波分复用分别作用于这两个光纤迈克尔逊干涉仪中。一个

光纤迈克尔逊干涉仪用于完成稳定测量系统的工作,另一个光纤迈克尔逊干涉仪用于完成测量工作。两支激光器发出的光在 20dB 的谱宽为 0.2nm。光纤布喇格光栅 FBG₁, FBG₂ 和 FBG₃ 的中心波长为 1557.32nm,布喇格反射谱 3dB 带宽为 0.3nm;FBG₄ 的中心波长为 1558.52nm,布喇格反射谱 3dB 带宽为 0.3nm。

第 1 个以 FBG₁ 和 FBG₂ 为反射镜的光纤迈克尔逊干涉仪用于补偿环境干扰。波长为 $\lambda_1 = 1557.32\text{nm}$ 的 DFB 激光器发出的光经过 3dB 耦合器,光纤隔离器,光纤 3×3 耦合器后被分为 3 路,其中两路光分别被 FBG₁ 和 FBG₂ 反射,这两束光在 3×3 耦合器相遇并发生干涉。第 1 路干涉信号由于光纤隔离器的作用无法到达光源,因此,不会对光源产生影响;第 2 路干涉信号经过环行器 1 后被 FBG₃ 反射,再由环行器 1 导出测量系统;第 3 路干涉信号经过环行器 2 及 FBG₄ 后,被探测器 (photodetector, PD) PD₂ 探测,PD₂ 探测到的信号经过反馈环节处理后输出一个修正电压驱动压电陶瓷管 (piezoelectric ceramics, PZT),管长 35mm,外径 35mm,壁厚 2mm, PZT 上缠有约 11m 的参考臂的光纤。修正电压驱动 PZT 调节参考臂的光程,使此干涉仪的两个臂的相位差始终保持在 $\pi/2$,由此实现对干涉仪的稳定。

第 2 个以测量镜和参考镜为反射镜的迈克尔逊干涉仪用于完成测量工作。波长为 $\lambda_2 = 1558.52\text{nm}$ 的 DFB 激光器发出的光经过 3dB 耦合器,光纤隔离器,光纤 3×3 耦合器后被分为 3 路,其中两路光经过 FBG₁ 和 FBG₂,然后被光纤准直镜(变折射率透镜)准直后分别被测量镜和参考镜反射回系统,并在 3×3 耦合器相遇并干涉。第 1 路干涉信号由于光纤隔离器的作用不能到达光源,因此不会对光源产生影响;第 2 路干涉信号经过环行器 1 和 FBG₃ 后被探测器 PD₁ 探

测;第 3 路干涉信号经过环行器 2 后,被 FBG₄ 反射,再由环行器 2 导出测量系统。

因为 FBG₁ 和 FBG₂ 与光纤准直镜紧邻,光纤准直镜的端面与反射镜的距离小于 1mm,所以,两个干涉仪的两个干涉臂的光路几乎重合。当第 1 个光纤迈克尔逊干涉仪稳定后,第 2 个用于测量的光纤迈克尔逊干涉仪也稳定了。

1.2 1 阶反馈环节及分析

1 阶反馈环节的原理如图 2 所示。PD₂ 探测到的

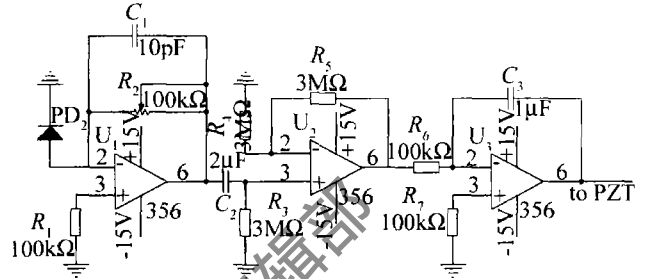


Fig. 2 Schematic diagram of the first order feedback loop circuit

干涉信号可表示如下:

$$u = u_0 [1 + k \cos(\phi_j + \phi_s)] \quad (1)$$

式中, u_0 是一个与输入光强有关的量; k 是干涉条纹的可见度; ϕ_j 是两个干涉臂的静态相位差, ϕ_s 是由于环境干扰引起的随机相位差。

PD₂ 探测的信号经过截止频率为 0.02Hz 的高通滤波器 U_1 后,滤去直流分量, U_2 输出为:

$$u_1 = k \cos(\phi_j + \phi_s) \quad (2)$$

当干涉仪处于正交状态(相位差为 $\pi/2$)时,即 $\phi_j + \phi_s = \frac{\pi}{2}$,有 $u_1 = 0$,在正交状态附近,(2)式可表示为:

$$u_1 = K_1 \Delta\phi \quad (3)$$

式中, K_1 是 U_2 输出的干涉信号在正交点附近的增益; $\Delta\phi = (\phi_j + \phi_s) - \frac{\pi}{2}$ 。在正交状态附近 u_1 与干涉仪偏离正交点的大小成正比,因此,本系统将 u_1 经过一个积分器 U_3 后作为修正信号驱动 PZT,实现对环境干扰的补偿。

反馈环节的框图如图 3 所示,反馈环节输出信号

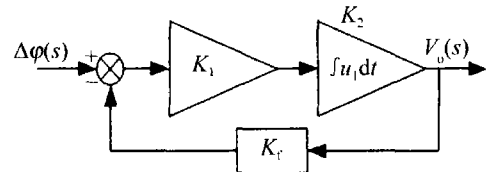


Fig. 3 Block diagram of the feedback loop circuit

的拉普拉斯变换 $V_0(s)$ 为:

$$V_0(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \Delta\phi(s) = \frac{K_1}{R_6 C_3 s + K_1 K_f} \Delta\phi(s) \quad (4)$$

式中, s 为拉普拉斯变量; $\Delta\varphi(s)$ 为积分器 U_3 输出信号的拉普拉斯变换; K_f 是压电陶瓷的相位-光程转换系数。

(4)式说明该反馈环节是1阶环节,由特征方程 $1 + G(s)H(s) = 0$ 有:

$$R_6 C_3 s + K_1 K_f = 0 \quad (5)$$

由(5)式可知,拉普拉斯变量 s 恒为负值,说明该反馈环节有绝对的稳定性。

反馈环节的截止频率为:

$$f = \frac{K_1 K_f}{2\pi R_6 C_3} \quad (6)$$

当反馈环节没有工作(处于开环状态),用锯齿波电压驱动 PZT,记下锯齿波电压的幅值及对应的 PD_2 的干涉信号的相位变化量,即测得 PZT 的相位-光程转换系数 K_f ,实际测得 $K_f = 3.14 \text{ rad/V}$ 。将各参量代入(6)式,可得 $f = 21.65 \text{ Hz}$ 。

2 实验及实验结果

当无反馈补偿,且测量镜和参考镜静止时,探测器 PD_1 探测到的干涉信号一直在波动,如图4所示,干涉

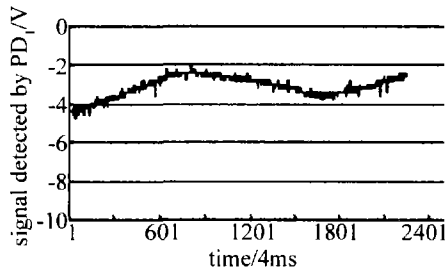


Fig. 4 Signal detected by PD_1 when the feedback loop is out of operation

信号的波动是由于温度漂移等环境干扰引起,图中横坐标单位为4ms。在实验时,整个光纤测量系统被放置在一个纸板盒子里,由于纸盒子的隔振作用,频率较高的环境干扰被纸盒隔离,所以干涉信号的波动很短时间内, PD_1 探测到的信号均稳定在 -2V 这一固定值,如图5所示,图中横坐标单位为4ms。

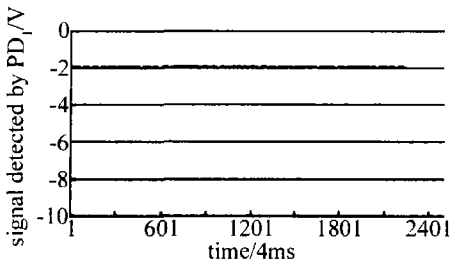


Fig. 5 Signal detected by PD_1 when the feedback loop is in operation

在无反馈补偿时,给压电陶瓷加一个三角波电压,探测器 PD_1 探测到的信号如图6所示(图中横坐标单位为4ms),峰-峰值为8V,对应的相位变化为 $2\pi \text{ rad}$ 。

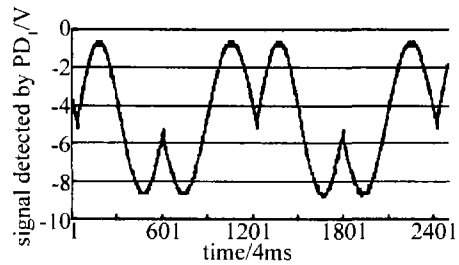


Fig. 6 Signal detected by PD_1 when a deltaic voltage is applied on PZT 在加上反馈环节时,探测器 PD_1 的输出信号的波动幅值仅为 0.1V ,相当于 0.0785 rad ,稳定度达到 99.9% 。这说明环境干扰的影响被有效地消除,本测量系统有极高的稳定性,适合于在线精密测量。

3 结论

研究了一个高稳定的适合于在线精密测量的光纤 3×3 耦合器的迈克尔逊干涉测量系统。利用一个 3×3 耦合器以及光纤光栅,构成两个光路重合在一起的光纤迈克尔逊干涉。一个干涉仪通过一个1阶反馈完成稳定工作,另一个干涉仪完成测量工作。本系统能对 21Hz 的干扰信号进行补偿,使测量系统适合于在线测量。

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]. *Opt Lett*, 1993, 18(16): 1361-1363.
- [2] LIN D J, JIANG X Q, XIE F. High stability multiplexed fiber interferometer and its application on absolute displacement measurement and on-line surface metrology[J]. *Optics Express*, 2004, 12(23): 5729-5734.
- [3] XIE F, ZHANG Sh, LI Y, *et al.* Study on the reflected wavelength shift based on sensing elements of in-fiber Bragg grating[J]. *Laser Technology*, 2002, 26(2): 84-85 (in Chinese).
- [4] 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]. *Appl Opt*, 1980, 19(17): 2926-2929.
- [5] FRITSCH K, ADAMOVSKY G. Simple circuit for feedback stabilization of a single-mode optical fiber interferometer[J]. *Review of Science Instrument*, 1981, 52(7): 996-1000.
- [6] UDD E. An overview of fiber-optic sensors[J]. *Review of Science Instrument*, 1995, 66(8): 40151-4030.
- [7] KERSEY A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology[J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, 2(3): 291-317.
- [8] JIANG M, GERLAND 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.
- [9] 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.
- [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).