

# 压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响

余有龙<sup>1</sup> 谭玲<sup>1</sup> 李茜<sup>1</sup> 王贤虎<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)  
(<sup>2</sup> 安徽水利水电职业技术学院机械工程系, 安徽 合肥 231603)

**摘要** 对于光纤光栅传感的非平衡干涉解调技术,理论和实验均证实充当其驱动元件的压电陶瓷通电发热会引入热噪声,导致解调输出的相移信息中出现附加相移。为排除热噪声对解调结果的干扰,提出了将驱动元件从干涉装置中分离出来的新方案。对于无温度控制、有温度控制以及分离驱动元件的三种 Michelson 非平衡干涉解调装置,实验证实第三种方案不仅可根除热噪声的影响,且无需克服热惯性而达到新的热平衡。系统传感灵敏度的实验值为  $0.9609^\circ/\mu\epsilon$ ,分辨率可达  $5.5 \text{ ne}$ 。

**关键词** 光纤光学;光纤光栅传感器;干涉解调装置;温度控制;迈克耳孙干涉仪

**中图分类号** TP212.1      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS201434.0506005

## Influence of Thermal Effect Caused by Piezoelectric Transducer on Interferometric Demodulation for Fiber Bragg Grating Sensor

Yu Youlong<sup>1</sup> Tan Ling<sup>1</sup> Li Qian<sup>1</sup> Wang Xianhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Anhui Water Conservancy Technical College, Hefei, Anhui 231603, China

**Abstract** A scanning unbalanced Michelson interferometer is used to act as a demodulator in fiber Bragg grating sensor system. Additional phase-shift, caused by thermal noise, is demonstrated to occur in the output of the interferometer theoretically and experimentally, when a piezoelectric ceramic (PZT) is acted as the driving element of the interferometer. To eliminate the thermal noise, a new method by separating the driving element from the interference device is introduced. Comparing with the conventional with/without temperature controlling interferometric demodulation scheme, thermal noise is demonstrated to be disappeared experimentally in the new scheme, and there is also no thermal inertia needed to be overcome. The predicted resolution of the system is  $5.5 \text{ ne}$ , and the experimental sensitivity is  $0.9609^\circ/\mu\epsilon$ .

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating sensor; interferometric demodulation device; temperature controlling; Michelson interferometry

**OCIS codes** 060.2370; 120.3180; 120.5050; 120.6810

## 1 引言

本征型波长编码的光纤光栅(FBG)传感器,其传感结果免受光能波动以及电磁场的影响,传感回路易于植入或粘附在结构表面,能够实时提供应变、温度以及结构完整性方面的信息,并进行分布式监测,因而引起了人们的极大兴趣<sup>[1-4]</sup>。便捷的解调

方法是其推广使用的关键,已报道的解调法包括滤波法、干涉法以及色散法<sup>[5-8]</sup>,其中干涉法利用非平衡扫描干涉技术,将来自传感光栅的波长漂移信息变为相移信息,有极高的分辨率,适合于动态参数的监测而广受关注<sup>[6-7]</sup>。无论是 Mach-Zehnder 干涉解调装置<sup>[6]</sup>,还是 Michelson 干涉解调装置<sup>[7]</sup>,目前

收稿日期: 2013-11-26; 收到修改稿日期: 2014-01-03

作者简介: 余有龙(1965—),男,博士,教授,主要从事光纤传感和结构健康监测方面的研究。

E-mail: youlongyu@163.com(中国光学学会会员号: S042011463S)

均由压电陶瓷(PZT)充当其驱动元件。现有的技术是将 PZT 和非平衡干涉仪置于同一盒中,为克服 PZT 通电发热对解调结果的影响,常引入温度控制技术<sup>[9-10]</sup>,这不仅增加了解调装置的复杂程度,且克服热惯性达到热平衡往往要花费半个小时以上的时间。

本文以 Michelson 干涉解调装置为例,研究 PZT 发热对解调结果的影响,提出将驱动装置与干涉装置分离的方法,从而将此影响消除。本工作有利于推动干涉解调技术的实用化。

## 2 非平衡 Michelson 干涉解调的原理

对于非平衡全光纤 Michelson 干涉解调装置<sup>[7]</sup>,来自传感光栅的波长为布喇格波长( $\lambda_B$ )的光波平均分成两束,分别在两臂中往返传输,输出干涉场的光强分布取决于光波的相干长度、偏振取向、两臂间的光程差  $D$  以及初相位  $\Phi_0$ 。记纤芯的折射率为  $n$ ,假设两臂中光束的偏振方向一致,反射镜对布喇格波长光波的反射率为 1,不计光纤的传输损耗,则干涉输出为

$$I = I_0 [1 + k \cos(\Phi + \Delta\Phi_B + \Phi_0)]. \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光强,  $k$  对应条纹的可见度,  $\Phi$  为两臂

间的静态相差,  $\Delta\Phi_B$  为动态相差, 可表示为

$$\Delta\Phi_B = \Delta\Phi|_{\lambda_B} + \Delta\Phi|_D, \quad (2)$$

式中  $\Delta\Phi|_{\lambda_B}$  为波长漂移引起的相移,  $\Delta\Phi|_D$  为两臂间光程差波动引起的相移,  $\Delta\Phi|_D$  可表示为

$$\Delta\Phi|_D = \Delta\Phi|_L + \Delta\Phi|_T, \quad (3)$$

式中  $\Delta\Phi|_L$  为光纤受驱动元件 PZT 拉伸引起的相移,  $\Delta\Phi|_T$  为温度波动对相移的贡献。造成温度波动的主要原因是 PZT 释放的热量以及解调装置所在环境温度的起伏( $\Delta T$ ), 可表示为

$$\Delta\Phi|_T = \Delta\Phi|_{PZT} + \Delta\Phi|_{\Delta T}.$$

若传感元仅受轴向待测应变  $\epsilon_x$  的作用, 布拉格波长漂移( $\Delta\lambda_B$ )引起的动态相移为<sup>[11]</sup>

$$\Delta\Phi|_{\lambda_B} = -\frac{4\pi D}{\lambda_B} (1 - p_e) \epsilon_x, \quad (4)$$

式中  $\epsilon_x$  为轴向应变,  $p_e$  为有效弹光系数。

将短臂缠绕在受周期为  $T$  的锯齿波信号驱动的 PZT 上, 机械拉伸引起的动态相移为

$$\Delta\Phi|_L = -\frac{4\pi n \Delta L_0}{\lambda_B T} \text{comb}\left(\frac{t}{T}\right) \otimes \left[t \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)\right], \quad (5)$$

式中  $\Delta L_0$  为臂长差扰动的幅值,  $\otimes$  为卷积符号。这样(1)式变为

$$I = I_0 \left\{ 1 + k \cos \left[ \Phi - \frac{4\pi D}{\lambda_B} (1 - p_e) \epsilon_x - \frac{4\pi n \Delta L_0}{\lambda_B T} \text{comb} \left( \frac{t}{T} \right) \otimes \left[ t \cdot \text{rect} \left( \frac{t}{T} \right) \right] + \Delta\Phi|_{PZT} + \Delta\Phi|_{\Delta T} + \Phi_0 \right] \right\}.$$

用 PZT 驱动信号的基频信号作为参考信号, 与上述信号进行锁相, 不计  $\Phi$  和  $\Phi_0$ , 得到相移值为

$$\Delta\Phi = -\frac{4\pi D}{\lambda_B} (1 - p_e) \epsilon_x + \Delta\Phi|_{PZT} + \Delta\Phi|_{\Delta T}. \quad (6)$$

(6)式意味着常规的干涉解调装置的解调结果将受到 PZT 发热和环境温度变化的影响。将 PZT 从扫描干涉装置中分离出来, 并对干涉仪进行绝热或温控处理, 意味着排除了  $\Delta\Phi|_{PZT}$  和  $\Delta\Phi|_{\Delta T}$  的影响, 将有利于提高干涉解调装置工作的稳定性。

## 3 实验结果

将 PZT 从 Michelson 非平衡干涉解调装置中分离出来的光纤光栅传感系统实验装置示意图如图 1 所示。LED 发出的光波, 由 3 dB 耦合器  $C_1$  至 FBG 传感器, FBG 所在光纤的长度为 50 cm, 其一端固定, 另一端受分辨率达  $0.05 \mu\text{m}/\text{pulse}$  的程控微动平台驱动而拉伸, 从而为 FBG 提供轴向应变。布喇格反射光波再由耦合器  $C_1$  进入非平衡扫描干

涉仪, 其输出经探测器转换为电信号, 放大并滤去干涉引起的高频载波后, 作为待测信号输入相位计。

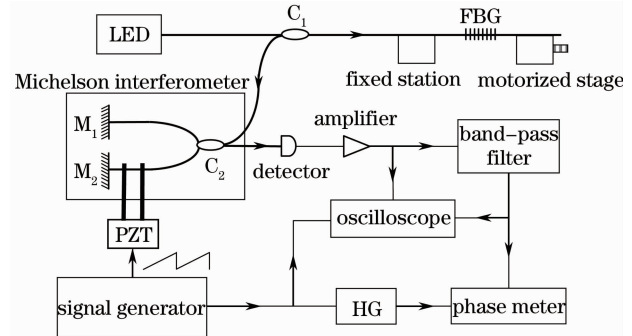


图 1 分离出 PZT 的 Michelson 干涉解调装置示意图

Fig. 1 Michelson interferometric demodulation scheme for separating PZT from interferometer

干涉装置和扫描驱动装置各置于一铝盒中, 两盒间用石棉板隔热。利用绝热材质的两传动杆传递 PZT 提供的驱动力。将干涉仪短臂上的一段光纤固定于两传动杆之间, 并使之呈紧绷状<sup>[12]</sup>。锯齿波电

压驱动信号是函数信号发生器提供的弱锯齿波信号经 PZT 驱动器进行功率放大后的输出,受其驱动,PZT 伸缩将引起两臂间光程差的周期性变化,实现扫描干涉输出;弱锯齿波信号同时用来触发谐波发生器(HG),产生一次谐波为相位计提供参考信号。

为验证该装置能有效抑制 PZT 引起的热噪声,将其解调结果与常规干涉解调装置<sup>[7]</sup>的结果进行比较。常规干涉解调装置又分无温度控制和带温度控制两种。带温度控制的解调装置是借助热敏电阻 Pt1000 对铝盒中干涉仪所在区域温度进行精确监测,利用 PID 型控制器根据监测到的温度波动情况,修正温差电致冷组件(TEC)的工作电流,达到控温目的。

系统的传感灵敏度与干涉仪两臂间的光程差成正比<sup>[10]</sup>,但光程差的增加会导致条纹对比度降低,进而降低信噪比,因而有必要选择合适的差值。实验中无温度控制、带温度控制、分离 PZT 三种干涉解调装

置的臂长差分别为 2.04、2.04、1.97 mm,各装置所用端镜  $M_i (i=1,2)$  的反射率均为 90%,纤芯的折射率为 1.4556。传感光栅的长度为 1 cm,带宽  $\Delta\lambda_{1/2} = 0.1621$  nm,自由状态下其中心波长为 1562.7777 nm。锯齿波驱动信号频率为 150 Hz,占空比为 1,峰值为 21.8 V,直流电平为 5.5 V。相位计的响应时间为  $3 \times 100$  ms,灵敏度为  $2 \times 100$  mV,分辨率为  $0.01^\circ$ ;设置带通滤波器的频率范围为 145~155 Hz,增益为 40 dB。

将探测器输出经放大后的信号 C2 与其经滤波处理后的信号以及函数信号发生器输出信号 C1 分别接入示波器的三个输入端,同一应变作用下,三种装置对应的输出波形如图 2 所示,图中 C3 为 C2 经带通滤波、反相以及增益处理后的信号。随着  $\epsilon_x$  的增大,示波器显示出曲线 C2 和 C3 整体左移,反之则右移。与此同时,相位计上同步显示相移值的增加和减少。

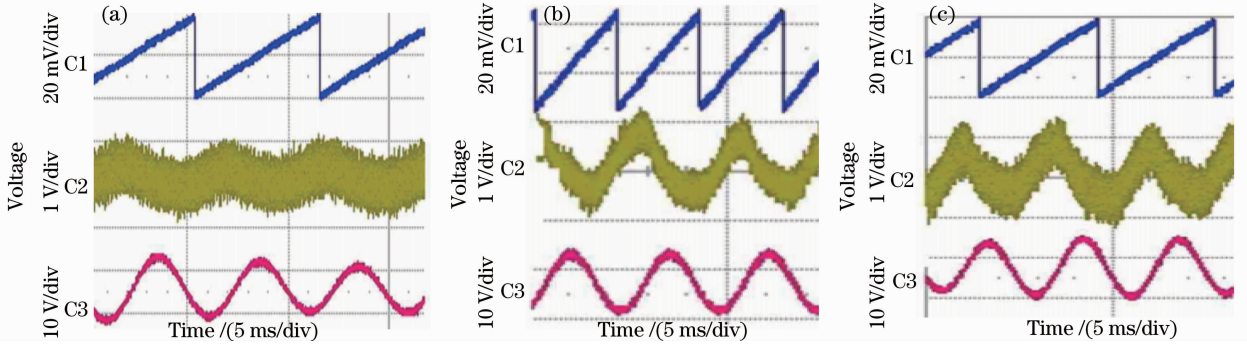


图 2 相同应变作用下三种解调装置中探测器及其滤波输出。(a)无温度控制;(b)带温度控制;(c)将 PZT 与干涉仪分离

Fig. 2 Under the same strain, the output waveform from the photodetector and the filter of the three devices.

(a) Without temperature controlling; (b) with temperature controlling; (c) separating PZT from interferometer

将微动平台的步距设为  $1 \mu\text{m}/\text{pulse}$ ,图 3(a)为三种装置获得的相移随待测应变  $\epsilon_x$  变化的实验关系,其中实线为光纤中  $p_e = 0.22$  时由(4)式所得的理论曲线。图 3(b)则为图 3(a)局部的纵向放大,并且无温度控制的解调装置曲线不再给出。

无温度控制情况下,PZT 通电发热产生的附加相移  $\Delta\Phi|_{\text{PZT}}$  对解调结果的影响如图 3(a)所示。其数据偏离理论值很多,且分布剧烈波动,这主要源于 PZT 通电发热产生的热噪声以及环境温度的干扰。该结果意味着无温度控制的干涉解调装置不宜采用。

对于温度控制的解调装置,温控半小时后才获得稳定的干涉输出。其解调结果与理论预期接近,但热惯性使得数据分布仍存在一定的波动性。分离

出 PZT 的干涉解调装置的解调结果不仅与理论预期基本一致,且数据分布的波动性获得改善。

两臂中光强的变化以及扫描过程可能引起参与干涉的两束光波偏振方向的波动,虽影响条纹的对比度,却不影响干涉解调的结果,这也体现出该类传感器波长编码的优越性。

带温度控制、分离 PZT 两装置对应系统的传感灵敏度分别为  $1.0789^\circ/\mu\epsilon$  和  $0.9609^\circ/\mu\epsilon$ ,而根据(4)式获得的理论值为  $1.0252^\circ/\mu\epsilon$ 。少许偏差主要源于:1)引入的  $p_e$  值与所用光纤的实际值有出入;2)被粘贴的光纤未呈紧绷状态;3)臂长差存在测量误差。

为进一步比较带温控与分离出 PZT 的两解调装置的性能,将微动平台的步距增至  $10 \mu\text{m}/\text{pulse}$ ,

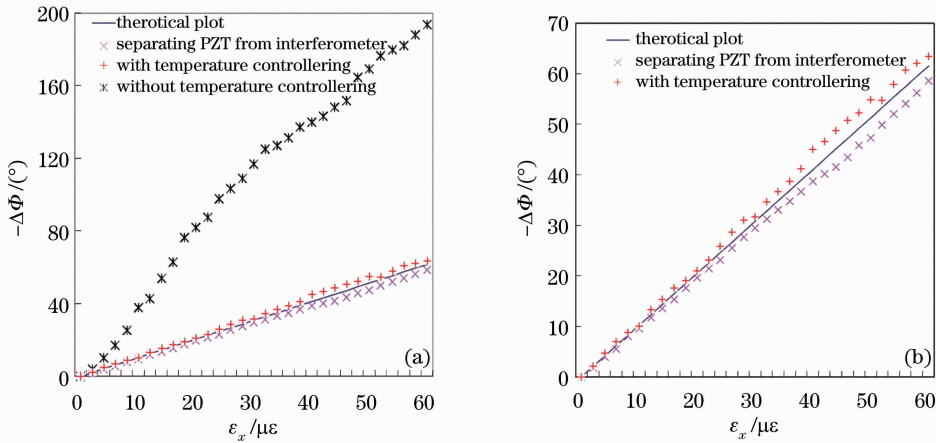


图 3 应变与相移间的关系曲线。(a)实验和理论结果；(b)图 3(a)的局部放大

Fig. 3 Relationship between applied strain and phase-shift. (a) Experimental and theoretical results; (b) detail view of Fig. 3(a)

使应变以  $20 \mu\epsilon$ /次递增, 获得相移与轴向应变的实验关系如图 4 所示。可以看出, 对于带温度控制的装置, 虽然 PZT 发热引起的温度波动可被迅速探测, 但热传递缓慢的特点以及解调装置较大的热惯性使得 TEC 与 PZT 两个热源很难保证干涉装置时刻维系热平衡状态, 这就是实验中前期数据分布具有良好的线性度, 而后期出现较大幅度波动的主要原因。对于分离出 PZT 的装置, 实验结果的稳定性表明该方案从根本上消除了 PZT 通电发热对解调结果的影响。

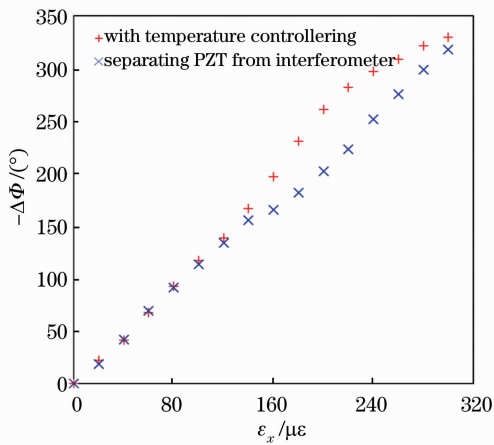


图 4 不同解调装置观测到的相移与应变间关系

Fig. 4 Relationship between the applied strain and the observed phase-shift for different demodulators

系统的传感分辨率主要取决于干涉仪两臂间光程差以及相位计的读数精度, 所用干涉仪和相位计对应传感系统的分辨率为  $5.5 \text{ n}\epsilon$ 。

对于其它扫描干涉解调装置(如 Mach-Zehnder 解调装置), 分离驱动元件同样可以避免驱动装置发

热对解调结果的影响。

## 4 结 论

光纤光栅传感技术的非平衡扫描干涉解调装置中的驱动元件 PZT 发热对传感结果影响明显, 将其从非平衡干涉解调装置中分离出来, 可从根本上解决其发热对解调结果的影响, 且有利于解调装置结构简单化, 增强系统工作的稳定性。实验中传感系统分辨率的理论值为  $5.5 \text{ n}\epsilon$ , 灵敏度实验值为  $0.9609^\circ / \mu\epsilon$ 。

## 参 考 文 献

- 1 S Gupta, T Mizunami, T Yamao, *et al.*. Fiber Bragg grating cryogenic temperature sensors [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(25): 5202-5205.
- 2 M G Xu, L Reekie, Y T Chow, *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor [J]. *Electron Lett*, 1993, 29(4): 398-399.
- 3 Yu Youlong, Tam Hwaya, Liu Shunye, *et al.*. Temperature-independent fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(4): 538-542.  
余有龙, 谭华耀, 廖信义, 等. 免受温度影响的光纤光栅位移传感器[J]. *光学学报*, 2000, 20(4): 538-542.
- 4 Yu Youlong, Ye Hong'an, Liu Zhiguo, *et al.*. Fiber Bragg grating current sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(5): 586-588.  
余有龙, 叶宏安, 刘治国, 等. 光纤光栅电流传感器[J]. *光学学报*, 2001, 21(5): 586-588.
- 5 L A Ferreira, J L Santos, F Farahi, *et al.*. Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber Bragg grating sensors using two matched gratings [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9(4): 487-489.
- 6 A D Kersey, T A Berkoff, W W Morey, *et al.*. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron Lett*, 1992, 28(3): 236-238.
- 7 Yu Youlong, Tam Hwaya, Chung Wenghong. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(8): 987-989.

- 余有龙, 谭华耀, 锺永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. 光学学报, 2001, 21(8): 987—989.
- 8 S W James, M L Dockney, R P Tatam. Photorefractive volume holographic demodulation of in-fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(5): 664—666.
- 9 Qi Ming, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Tunable differential phase-shift keying demodulator using the Mach-Zehnder interferometer [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(12): 1643—1647.
- 齐 鸣, 张新亮, 黄德修. 可调马赫-曾德尔干涉仪型差分相移键控解调器[J]. 中国激光, 2006, 33(12): 1643—1647.
- 10 余有龙. 光纤光栅传感器及其网络化技术[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2003. 221.
- 11 G A Ball, W W Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser [J]. Opt Lett, 1992, 17(6): 420—422.
- 12 余有龙, 谭 玲. 免受驱动装置热影响的光纤光栅传感信号干涉解调装置:中国, 201010046559.X[P]. 2010-07-28.

栏目编辑: 殷建芳