

# 基于 $3 \times 3$ 耦合器干涉仪的正负反馈判断及 高频振动探测研究

井帅奇, 黄磊, 董文辉, 荣健\*

电子科技大学物理学院, 四川 成都 611731

**摘要** 研究了基于  $3 \times 3$  耦合器的光纤马赫-曾德尔干涉仪的三路输出干涉信号的特点, 针对相位衰落问题, 提出了一种根据所得的正交信号来判断反馈正负性的方案。实验通过 LabVIEW 软件来实现正交信号的获得及反馈输出信号的处理。测量和分析得到了直接输出反馈信号时会出现干涉信号短暂偏离稳定点的情况, 整个过程的时间约为 35 ms, 而采用所提反馈正负判断方案后, 相位稳定所需时间约为 18 ms。通过一个光纤准直聚焦系统把光入射到被测物体表面并接收反射光, 探测到了与输入信号频率一致的 1.5 MHz 的高频振动信号。验证了正负反馈判断方案及设计干涉系统的可行性和有效性。

**关键词** 光纤光学; 反馈正负性; 正交信号; 高频振动

**中图分类号** TP212.1; TN913.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201939.0712001

## Positive and Negative Feedback Judgment and High-Frequency Vibration Detection by Interferometer Based on $3 \times 3$ Coupler

Jing Shuaiqi, Huang Lei, Dong Wenhui, Rong Jian\*

School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

**Abstract** This study investigates the characteristics of the three-channel output interference signals from a fiber Mach-Zehnder interferometer based on a  $3 \times 3$  coupler. The phase-fading problem is solved using a scheme that judges the positive and negative feedback based on the orthogonal signals. The LabVIEW software is used to realize the acquisition of orthogonal signals and the processing of feedback output signals. Measurement and analysis reveal that when the feedback signal is directly output, the interference signal briefly deviates from the stable point. The whole process requires approximately 35 ms. However, the proposed feedback-judgment scheme reduces the phase-stabilization time to approximately 18 ms. An optical-fiber collimation focusing system directs the light to the surface of the test object and receives the reflected light. A high-frequency (1.5 MHz) vibrational signal consistent with the input signal frequency is detected. The feasibility and effectiveness of the proposed feedback-judgment scheme and designed interference system are verified.

**Key words** fiber optics; positive and negative feedback; orthogonal signal; high-frequency vibration

**OCIS codes** 060.2370; 060.5060; 280.4788

## 1 引 言

光纤干涉仪具有极高的灵敏度以及体积小、抗电磁干扰、价格低廉等优点, 备受研究人员的关注, 目前已经在水声、弱磁场、压力、应变等方面得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。但是外界环境的变化会造成干涉仪两臂相位差的漂移, 导致信号衰落, 使干涉仪的灵敏度降低甚至失效, 需要采用一定的方法来稳定干涉

仪。 $3 \times 3$  耦合器具有独特的相差特性, 在光纤传感解调方面的应用越来越广泛<sup>[5-8]</sup>。

目前, 针对光纤干涉相位衰落问题的解决办法主要有相位载波法<sup>[9]</sup>、主动零差检测法、被动零差检测法以及外差检测法等。文献[10]介绍了一种直流相位跟踪系统, 并用其来解决光纤迈克耳孙干涉仪的相位漂移问题。文献[11]基于 LabVIEW 平台实现了对光纤迈克耳孙干涉仪的主动反馈控制。文

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(ZYGX2015J146)

\* E-mail: rongj@uestc.edu.cn

献[12]采用声光调制器构造光纤外差的办法来探测超声信号。文献[13]利用光纤 3×3 耦合器和光纤光栅构成的干涉仪实现了对位移的测量。文献[14]采用设计电路方案对光纤干涉仪进行动态补偿,并研究了温度和振动对干涉系统的影响及动态补偿方案的效果。相位载波法和被动零差检测法虽然比较简单,容易解调,但一般应用于较低频率信号的探测。外差检测法由于会引入高频器件,导致成本增加及解调复杂。相对而言,主动零差检测法容易实现且线性度好,但需要引入反馈控制部分。尽管目前在光纤传感及稳定方面已有很多研究,但对于高频(兆赫兹甚至几十兆赫兹)振动信号的探测,有些解调方法不适用,或者现有的解调系统过于复杂,因此有必要研究一种具有结构简单、容易实施且能够实现对外高频信号进行探测的光纤传感系统。

本文通过分析由 3×3 耦合器构成的光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的输出特性,设计了能够判断反馈正负的方案,并且在 LabVIEW 软件平台上实现了对光纤干涉仪相位差的判断和动态反馈控制。在干涉仪稳定的基础上,通过光纤环形器和准直聚焦系统将光入射到被测物体表面,实现了对高频振动信号的探测。

## 2 方法与理论分析

### 2.1 基于 3×3 耦合器的光纤 MZI

实验采用如图 1 所示的光纤马赫-曾德尔干涉仪方案。利用分光比分别为 1:1 和 1:1:1 的 1×2 耦合器和 3×3 耦合器构成一个光纤马赫-曾德尔干涉仪。激光器发出的中心波长为 1550 nm、线宽为 50 kHz 的光被 1×2 耦合器分为参考臂和探测臂两路光,两路光分别接入 3×3 耦合器的两个输入端(一输入端悬空),然后在耦合器发生干涉,从耦合器输出的三路干涉光分别被三个光电探测器(PD)接收。为了保持两路干涉光的偏振态一致,将其中的一路(探测臂)接入偏振控制器。由于系统探测的目标信号为高频信号,而光纤本身作为传感单元无法感应高频振动,所以考虑将光从光纤射出变为空间光入射到被测物体表面,这样信号的频率就会叠加到空间光信号中。由于光的频率极高,空间光中叠加的信号频率范围可以达到几十甚至上百兆。三端光纤环形器中从端口 1 入射的光,经端口 2 出来后通过一个光纤准直聚焦系统入射到被测物体表面,反射光又重新被接收返回端口 2,然后从端口 3 射出。考虑到光入射到物体表面被接收后会造成光功

率的极大损耗,在参考臂接入一个可调光纤衰减器来调节两路光功率,以提高干涉信号的干涉度。未加衰减器时,两路光功率分别为 5 μW 和 350 μW,实验测得干涉信号的最大值和最小值分别为 4.2 mV 和 2.8 V,干涉度约为 0.2。加入衰减器调节后使两路光功率为 5 μW,实验测得干涉信号的最大值和最小值分别为 150 mV 和 30 mV,干涉度约为 0.66。

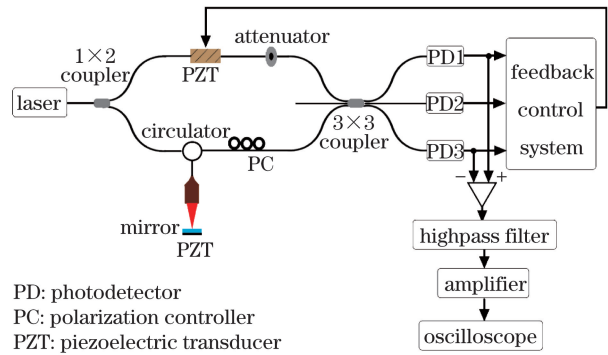


图 1 基于 3×3 耦合器的光纤马赫-曾德尔干涉系统  
Fig. 1 Fiber Mach-Zehnder interference system based on 3×3 coupler

3×3 耦合器的三路干涉信号经光电探测器转化后输出的电压可表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} V_1 = D + E \cos(\Delta\phi - 2\pi/3) \\ V_2 = D + E \cos(\Delta\phi) \\ V_3 = D + E \cos(\Delta\phi + 2\pi/3) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  分别为 PD1、PD2、PD3 的输出电压; $D$ 、 $E$  均为与输入光功率及光电探测器灵敏度有关的常量; $\Delta\phi = \phi_s + \phi_0 + \phi_n$ ,其中  $\phi_s$  为被测信号引起的相位变化, $\phi_0$  为干涉仪两臂的初始相位差, $\phi_n$  为外界环境引起的随机相位变化。一般情况下, $\phi_s$  是幅度很小的高频信号, $\phi_n$  是幅度较大的低频信号,干涉信号会随着  $\phi_n$  的变化发生涨落。PD1 和 PD3 的输出电压送入差分电路后得到的信号  $V_4$  为

$$V_4 = V_1 - V_3 = -\sqrt{3} E \sin(\Delta\phi). \quad (2)$$

经过差分后可以去除直流信号,并可以抑制电源电压、激光器功率波动等共模干扰。差分输出信号  $V_4$  经过高通滤波器和放大器后被示波器采集。由(2)式可知,当  $\phi_n + \phi_0 = n\pi$  ( $n$  取整数)时,干涉仪工作在线性区间的中间位置,此处的线性度和灵敏度最高,由于  $\phi_s$  的幅值很小,故(2)式可以写成

$$V_4 = -\sqrt{3} E \sin(\phi_s + n\pi) = \pm\sqrt{3} E \phi_s. \quad (3)$$

因此,利用(3)式可以实现信号的检测,并且解调信号与原信号呈近似线性关系,频率一致。但是系统中存在低频(小于 100 Hz)的环境干扰信号以及相

位反馈补偿信号(可达千赫兹),因此系统可以探测的信号频率应超过了千赫兹,而且在信号输出部分的高通滤波器的带宽范围内。

### 2.2 反馈控制系统

为了稳定光纤干涉仪在最灵敏位置,通过加在参考臂上的压电陶瓷(PZT)对干涉仪相位进行补偿,补偿相位由反馈控制信号提供。本实验采用了基于 LabVIEW 平台的反馈控制系统,利用 PCIe 6343 数据采集卡进行干涉电压信号的模数转换、信号处理以及反馈控制信号的数模转换。软件平台采用硬件定时单点采样,实现毫秒级的输入与输出同步,提供高速反馈控制。反馈控制系统采用的算法流程如图 2 所示。

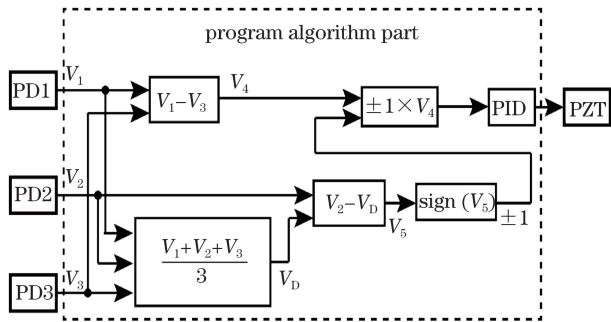


图 2 反馈控制方案算法流程图

Fig. 2 Flow chart of feedback control program algorithm

首先,三路干涉输出电压信号相加取平均得到直流信号  $V_D = D$ , 设信号  $V_2$  去除直流后的信号为  $V_5$ , 则有

$$V_5 = V_2 - V_D = E \cos(\Delta\phi). \quad (4)$$

然后把信号  $V_5$  符号运算后的结果与  $V_4$  相乘,得到具有正负号的偏离零值的信号,最后送入比例-积分-微分(PID)运算模块,PID 运算模块的输出即为反馈控制信号。

由于反馈信号是相位差的正弦形式,在一个周期内具有两个相反的单调区间,因此无法区别反馈的正负性。本文利用与反馈信号正交的输出信号来判断反馈的正负性,其原理如图 3 所示,图 3 中去掉直流信号的  $V_5$  是信号  $V_4$  的正交信号,  $\text{sign}(V_5)$  是信号  $V_5$  取符号运算后的结果。要从信号  $V_4$  中解调探测信号,需要稳定其相位差在 0 或者  $\pi$  (即  $V_4 = 0$ ) 的位置。当相位差在  $[-\pi/2, \pi/2)$  范围内时,需要稳定在 0, 相位差的增加、减小与信号  $V_4$  的正负性正好对应,此时对应的  $\text{sign}(V_5)$  曲线的幅值为 1, 相乘后保持信号  $V_4$  的正负性不变。当相位差在  $[\pi/2, 3\pi/2)$  范围内时,需要稳定在  $\pi$ , 相位差的增加、减小与信号  $V_4$  的正负性正好相反,此时对应的

$\text{sign}(V_5)$  曲线的值为  $-1$ , 相乘后改变信号  $V_4$  的正负性。

综上所述,采用本文所提的判断反馈正负性的方法,无论相位差处在什么位置,相位差的增加或减小都与反馈信号的正负性一致。

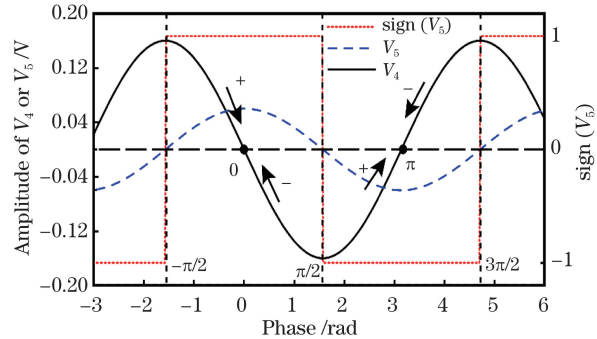


图 3 正负反馈判断原理图

Fig. 3 Schematic of positive and negative feedback judgment

### 3 实验结果及分析

实验采用图 1 所示的干涉仪及反馈控制系统,激光器的型号是 HP8168F,光电探测器采用的是 Thorlabs 公司的 PDB450C,光纤干涉仪中压电陶瓷的电压与相移之间的关系为

$$\Delta\phi = 0.163\Delta U, \quad (5)$$

式中: $\Delta\phi$  为相移改变量; $\Delta U$  为电压改变量。实验中干涉臂和参考臂的光功率均为  $5 \mu\text{W}$ 。

#### 3.1 反馈控制系统的性能测试

在实验室环境条件下测试了未判断反馈正负和采用本文所提判断反馈正负方法的反馈控制系统的性能。为了准确测量反馈开始的时间,在软件程序中加入一个显示波形,当反馈开始时,其值从 0 变为 0.3,如图 4 中的 reference 曲线所示。图 4 中的 output 曲线为信号  $V_4$  的输出,它是判断反馈控制结果的依据,可以看出,在反馈控制之前,它的幅值在  $-0.6 \sim 0.6$  之间随机变化,反馈控制后迅速趋于 0 并在 0 附近小幅波动。图 4(a)~(b)是未添加正负反馈判断时两种不同情况下的测量结果。由图 4(a)可知,当相位差在  $[-\pi/2, \pi/2)$  范围时,相位差的增大、减小与反馈的正负性正好一致,所以信号  $V_4$  直接迅速稳定在 0 附近,响应时间约为 16 ms。由图 4(b)可以看出,当相位差在  $[\pi/2, 3\pi/2)$  范围内时,相位差的增大、减小与反馈的正负性正好相反,信号  $V_4$  先向偏离 0 的方向变化,然后再趋向 0,整个响应时间约为 35 ms,约为图 4(a)情况下响应时间的 2 倍。图 4(c)~(d)是添加正负反馈判断相位

差时两个不同范围内的测量结果,可以看出,信号  $V_4$  总是直接迅速稳定在 0 附近,响应时间分别为 17 ms 和 18 ms,与图 4(a)情况下的响应时间基本一

致。因此,采用本文提出的正负反馈判断方法可以在任意相位差条件下,以约十几毫秒的时间将干涉仪稳定在最灵敏位置。

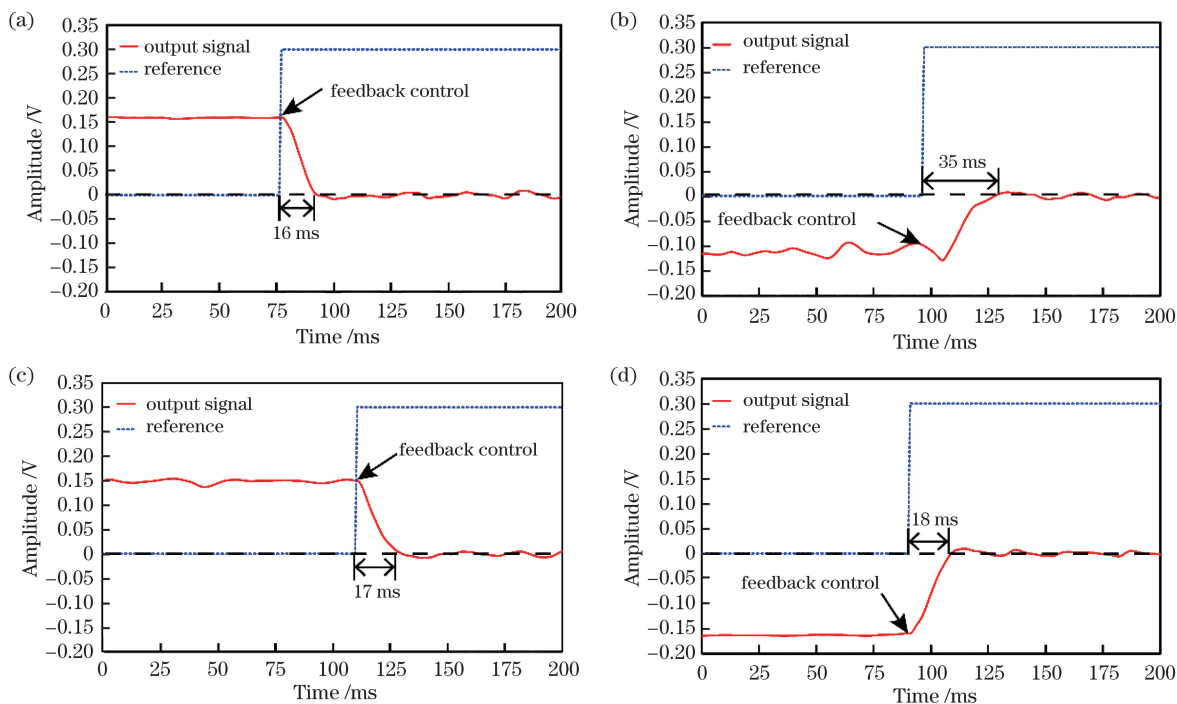


图 4 反馈控制结果。(a)(b)未添加正负反馈判断;(c)(d)添加正负反馈判断

Fig. 4 Results of feedback control. (a)(b) Without positive and negative feedback judgment; (c)(d) with positive and negative feedback judgment

### 3.2 高频振动探测

为了实现对高频信号的探测,如图 1 所示,在被测物体反射镜背面粘贴了一块压电陶瓷薄片。实验中采用函数发生器产生频率为 1.5 MHz、幅值为 400 mV 的正弦波信号,如图 5 所示。正弦波信号通过功率放大器后接在压电陶瓷上。为了解调高频信号,在信号输出端安装截止频率为 200 kHz 的高通滤波器和 50 dB 的信号放大器,最后利用示波器 (DPO 3012) 采集信号。输出得到的稳定的信号如

图 6 所示,其幅度谱如图 7 所示,可以看到其频率为 1.5 MHz,与输入信号的频率一致。同时,为了证明系统可以探测不同频率的信号,进行了一系列频率的测量。在实验中,由于压电陶瓷存在一定的振动频率范围,所以测量了 1 MHz 到 4.2 MHz(步长为 0.1 MHz)范围的信号,系统测量频率与原信号频率一致,通过计算每个频率处测量所得信号的频谱幅值,可以得到如图 8 所示的结果。由于压电陶瓷的振动源在每个频率下产生的振动幅值不一致,所

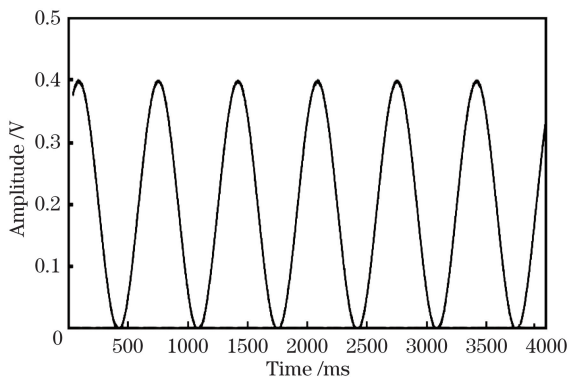


图 5 输入信号

Fig. 5 Input signal

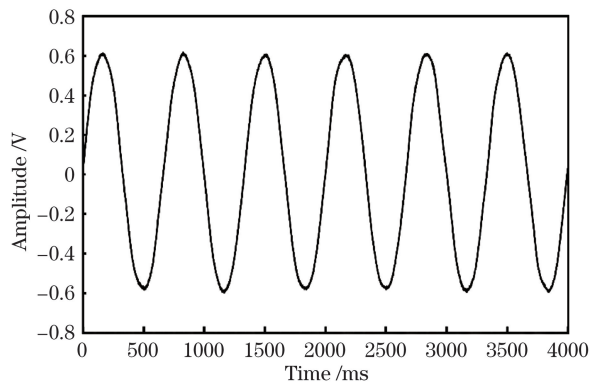


图 6 干涉系统的探测信号

Fig. 6 Signal detected by interference system

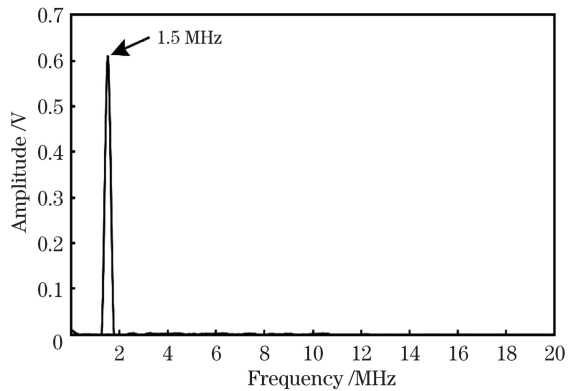


图 7 干涉系统探测信号的幅度谱

Fig. 7 Amplitude spectrum of signal detected by interference system

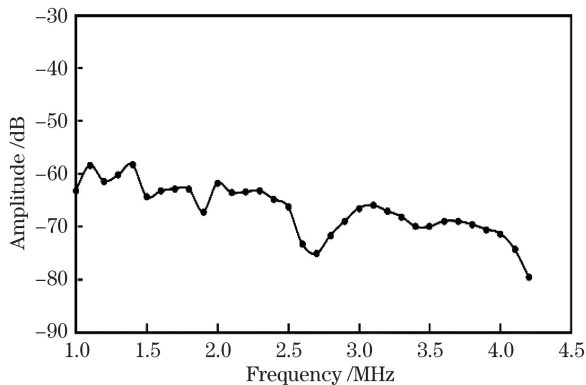


图 8 干涉系统探测信号的频谱图

Fig. 8 Frequency spectrum of signal detected by interference system

以该图未准确反映系统的频率响应,只是为了说明系统可以探测不同频率的信号。

## 4 结 论

根据  $3 \times 3$  耦合器的输出特性,采用软件处理算法实现了反馈正负的自动判断,可以在相位差处于任意位置时,在约 18 ms 的时间内将干涉仪稳定在最灵敏位置。实验测得了频率高达 1.5 MHz 的高频振动信号,同时还进行了 1 MHz 到 4.2 MHz 范围一系列频率信号的测量。结果表明,本文提出的反馈方案容易实施且具有可行性,具备探测高频信号的能力,这为进一步提高光纤干涉仪相位反馈控制的速度和精度以及可探测频率范围提供了参考。在下一步的工作中,需要进一步精确测量干涉仪的稳定程度以及开展对更高频率信号的探测研究。

## 参 考 文 献

- [1] Tang M G, Liao B F, Liu S Q, *et al.* Development of interferometric optical fiber acoustic sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, 8(1): 67-74.
- 唐明光, 廖波帆, 刘树杞, 等. 干涉型光纤声传感器的研究[J]. *光学学报*, 1988, 8(1): 67-74.
- [2] Fang Z J, Qin G G, Qu R H, *et al.* Fundamentals of fiber optical sensors[M]. Beijing: Science Press, 2014: 283-311.
- 方祖捷, 秦关根, 瞿荣辉, 等. 光纤传感器基础[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 283-311.
- [3] Li X T, Liao Y B. Improvement in phase tracking homodyne detection system for interferometric sensors[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(4): 16-17.
- 李昕彤, 廖延彪. 干涉型光纤传感器直流相位跟踪检测系统的改进[J]. *激光杂志*, 2003, 24(4): 16-17.
- [4] Wang T T, Shen J, Wang F, *et al.* Ultra-compact all-fiber Mach-Zehnder interferometer and its strain characteristics[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 39(3): 350-353.
- 王婷婷, 沈娟, 王菲, 等. 超紧凑全光纤马赫-曾德尔干涉仪及其应变特性研究[J]. *半导体光电*, 2018, 39(3): 350-353.
- [5] Huang C, Cai H W, Geng J X, *et al.* Wavelength interrogation based on a Mach-Zehnder interferometer with a  $3 \times 3$  fiber coupler for fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1397-1400.
- 黄冲, 蔡海文, 耿健新, 等. 基于  $3 \times 3$  耦合器的马赫-曾德尔干涉仪的光纤光栅波长解调技术[J]. *中国激光*, 2005, 32(10): 1397-1400.
- [6] Jiang Y, Chen S F. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on  $3 \times 3$  coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(11): 1487-1490.
- 江毅, 陈淑芬. 用  $3 \times 3$  耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号[J]. *光学学报*, 2004, 24(11): 1487-1490.
- [7] Chen Y, Lin J, Meng Q, *et al.* Digitized demodulation scheme of fiber optical hydrophones based on  $3 \times 3$  coupler[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(4): 755-759.
- 陈宇, 林京, 孟强, 等. 基于  $3 \times 3$  耦合器光纤水听器的数字化解调方案[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(4): 755-759.
- [8] Zhang B, Wang K R, Yan B B, *et al.* Phase unwrapping method based on dual wavelength and  $3 \times 3$  fiber coupler with interferometric measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0412004.
- 张冰, 王葵如, 颜纷纷, 等. 基于双波长和  $3 \times 3$  光纤耦合器的干涉测量相位解卷绕方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0412004.
- [9] Zhou X D, Tang W Z, Zhang Y. Realization of phase generated carrier scheme interferometric fiber optic

- sensor[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(8): 1177-1181.
- 周效东, 汤伟中, 张宇. 干涉型光纤传感器相位载波调制—解调技术的研究与实现[J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1177-1181.
- [10] Xue Q, Chen J P, Zhang Y, *et al.* Stability of Michelson interferometric fiber-optic magnetic sensor[J]. Optical Fiber & Electric Cable and their Applications, 2006(2): 19-21, 26.
- 薛青, 陈建平, 张翼, 等. Michelson干涉型光纤磁场传感器稳定性研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2006(2): 19-21, 26.
- [11] Wang Z F, Hu Y M. A working-point control system of interferometric fiber-optic hydrophone by closed-loop based on LabVIEW[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(10): 1154-1157.
- 王泽锋, 胡永明. 基于 LabVIEW 的光纤水听器闭环工作点控制系统[J]. 光电子·激光, 2007, 18(10): 1154-1157.
- [12] Park S J, Eom J, Kim Y H, *et al.* Noncontact photoacoustic imaging based on all-fiber heterodyne interferometer[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4903-4906.
- [13] Li M, Xie F, Chen Z M. High stability fiber 3×3 coupler interferometric displacement measurement system[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2010, 21(2): 235-239.
- 李敏, 谢芳, 陈志敏. 高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉位移测量系统[J]. 光电子·激光, 2010, 21(2): 235-239.
- [14] Yu X Z, Li Z Y, Wang Z H, *et al.* Effect of temperature and vibration on optical fiber Mach-Zehnder interferometer and dynamic compensation[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1041-1046.
- 余向志, 李政勇, 王志豪, 等. 温度和振动对光纤马赫-曾德干涉仪的影响与动态补偿研究[J]. 光子学报, 2012, 41(9): 1041-1046.
- [15] Jiang Y, Lou Y M, Wang H W. Software demodulation for 3×3 coupler based fiber optic interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(2): 152-155.
- 江毅, 娄英明, 王惠文. 基于对称 3×3 耦合器的光纤干涉信号的软件解调技术[J]. 光子学报, 1998, 27(2): 152-155.