

doi: 10.3788/gzxb20124109.1041

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

余向志, 李政勇, 王志豪, 吴重庆

(北京交通大学 发光与光信息技术教育部重点实验室, 光信息研究所, 北京 100044)

摘 要: 环境温度变化和振动会引起光纤马赫-曾德干涉仪两臂相差随机性变化, 致使干涉仪输出不稳定. 本文研究了自然条件下外界温度和振动对基于 3×3 耦合器干涉仪的影响, 分析结果表明, 温度和振动所引起的干扰主要集中于 100 Hz 以下的低频成分中. 为了消除这些干扰, 设计了单臂补偿的反馈回路以稳定输出信号, 并提出了一种利用象限判决方法来区分反馈正负性的动态补偿方法. 实验中利用 3×3 耦合器 3 个输出端中其中 2 个进行光电变换、差分放大等反馈电路后驱动管状压电陶瓷, 使缠绕在其上的光纤伸缩, 动态补偿干涉仪相差的漂移, 稳定干涉仪输出即 3×3 耦合器第三输出端口的信号. 针对自然环境下温度和振动引起的干扰, 本文研制了一种稳定的动态补偿装置, 能有效抑制 160 Hz 以下的低频干扰, 实时补偿干涉仪两臂的相差漂移, 干涉仪输出稳定的干涉信号, 波动幅度小于 5.64%.

关键词: 光纤马赫-曾德干涉仪; 3×3 耦合器; 相位补偿; 反馈; 稳定性

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)09-1041-6

0 引言

光纤干涉仪具有体积小、重量轻、抗电磁干扰、能波分复用、高度集成和价格低廉等诸多优点, 在光纤通信和光纤传感领域有着巨大的应用潜力, 因而备受研究者关注^[1-7]. 在实际应用中, 外界环境的随机变化, 如温度变化、振动甚至空气对流都会引起光纤干涉仪两臂的相位和偏振态的显著改变^[8-9], 导致输出干涉信号的不稳定. 因此, 为进一步推进光纤干涉仪的实用化, 有必要深入研究自然条件下外界环境对干涉仪的影响, 探索有效的补偿措施, 解决干涉仪的稳定性问题.

目前, 对光纤干涉仪稳定性研究主要集中于补偿环境温度引起的相位漂移^[8-12], 文献[8]利用光纤 3×3 耦合器和光纤光栅, 并结合反馈环节, 构成一种稳定的光纤迈克尔逊干涉仪位移测量系统. 文献[9]对光纤马赫-曾德干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 的稳定性进行了研究, 并通过双臂相位补偿的方式稳定了干涉仪输出. 此外, 文献[10]还进一步研究了光纤 MZI 的工作点稳定性问题. 在反馈补偿设计方面, 文献[11]报道了一种直流相位跟踪系统, 以解决光纤迈克尔逊干涉仪相位漂

移问题. 另外, 文献[12]还提出一种互相关解调的锁定放大技术来稳定基于光纤干涉仪的弱磁传感系统.

尽管目前在光纤干涉仪稳定性方面的研究逐渐增多, 但很少有文献关注外界振动对光纤干涉仪的影响, 而且, 现有的相位补偿方案多数比较复杂, 因此有必要进一步研究, 获得更为实用的光纤干涉仪. 本文在光纤 MZI 的理论分析基础上, 详细研究了自然环境条件下, 温度和振动对光纤 MZI 输出稳定性的影响, 温度变化由自然环境产生, 振动干扰用激振器进行模拟, 根据干扰信号的频谱分析结果, 设计了反馈电路, 利用象限判决方法来区分反馈的正负性, 通过单臂补偿的方式, 对干涉仪的相差漂移进行动态补偿, 实现了光纤 MZI 的稳定输出.

1 理论分析

1.1 温度和振动对光纤 MZI 的影响

实验采用图 1 所示的光纤 MZI 方案. 2×2 耦合器 C_1 与 3×3 耦合器 C_2 的分光比分别为 $1:1$ 和 $1:1:1$, 两耦合器各有一端输入悬空. 设 P_1 为 C_1 输入端口 1 的光功率, P_i ($i=4, 5, 6$) 分别为 C_2 三个输出端口的光功率, 根据文献[8-9], 忽略偏振影响,

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60907027, No. 61077048)和北京市自然科学基金(No. 4112042)资助

第一作者: 余向志(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信. Email: 10121931@bjtu.edu.cn

责任作者/导师(通讯作者): 李政勇(1974-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信. Email: zhyli@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2012-02-27; 修回日期: 2012-04-12

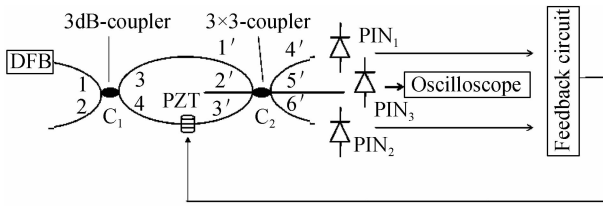


图1 基于3×3耦合器的单臂补偿型光纤MZI原理
Fig.1 Principle of 3×3 coupler-based fiber MZI with one-arm compensation

光纤 MZI 输出端功率为

$$\begin{bmatrix} P_{4'} \\ P_{5'} \\ P_{6'} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} P_1 \begin{bmatrix} 1 + \sin(\Delta\varphi - 2\pi/3) \\ 1 + \sin \Delta\varphi \\ 1 + \sin(\Delta\varphi + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\Delta\varphi = 2\pi n\Delta L/\lambda$ 为干涉仪固有相差, n 为光纤的有效折射率, ΔL 为干涉仪两臂长度差, λ 为激光的波长。

对于实际的激光光源, 相干长度有限, 光纤 MZI 两臂长度差不能超过相干长度. 在影响光纤干涉仪输出的诸多环境因素中, 温度影响最为明显, 实验室环境下环境温度缓慢漂移, 引起的干扰主要集中在低频成分中. 光纤 MZI 两干涉臂处在同一实验室环境中, 设两臂所处环境温度变化相同, 均为 ΔT . 环境温度变化引起的干涉仪附加相差为^[8,13]

$$\Delta\varphi(t) = 43.49\Delta L\Delta T(t) \quad (2)$$

干涉仪所受到的环境振动是一种随机的强迫振动, 包含有不同频率和不同振幅的振动信号, 主要来自地面传播的振动和周围空气的流动. Ruiz 等人对实验室中光学平台所受的来自地面的振动进行了测量, 结果表明环境振动的能量主要集中于 100 Hz 以下的低频成分中, 对于 100 Hz 以上的高频环境振动, 其振幅往往很小, 且环境中高频振动的成分很少^[14-15].

综合考虑环境温度变化和振动, 设振动引起的干涉仪附加相差为 $\Delta\psi(t)$, 则式(1)应修正为

$$\begin{bmatrix} P_{4'} \\ P_{5'} \\ P_{6'} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} P_1 \begin{bmatrix} 1 + \sin(\Delta\varphi + \Delta\varphi(t) + \Delta\psi(t) - 2\pi/3) \\ 1 + \sin(\Delta\varphi + \Delta\varphi(t) + \Delta\psi(t)) \\ 1 + \sin(\Delta\varphi + \Delta\varphi(t) + \Delta\psi(t) + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 相位补偿方案

本文采用图 2 所示的相位补偿方案. 光纤 MZI 的 4' 端口和 6' 端口的输出光经 PIN 管转换为电流, 通过取样电阻取出电压信号, 并送入差分电路, 去除直流信号并抑制电源电压、激光器输出功率的波动等共模干扰. 差分后的信号送入二阶有源低通滤波电路, 根据噪音频率的大小, 设置合适的低通截止频率, 将低频噪音取出并跟随. 跟随后的信号分成两路, 一路直接送入象限判决电路, 另一路积分后再送

入象限判决电路, 象限判决电路的输出便是反馈控制信号.

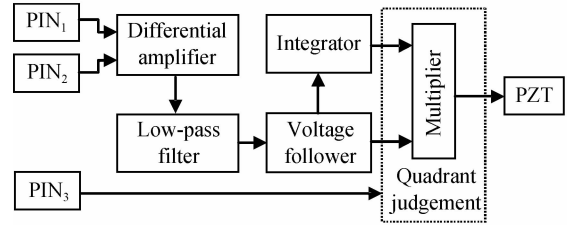


图2 相位补偿电路框图

Fig.2 Phase compensation circuit diagram

光电转换后的取样电压分别为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RMP_1 [1 + \sin(\Delta\Phi(t) + 2\pi/3)]/3 + v_s(t) \\ RMP_1 [1 + \sin(\Delta\Phi(t) - 2\pi/3)]/3 + v_s(t) \\ RMP_1 [1 + \sin(\Delta\Phi(t))]/3 + v_s(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $\Delta\Phi(t) = \Delta\varphi + \Delta\varphi(t) + \Delta\psi(t)$, R 为取样电阻, M 为 PIN 管的响应度, $v_s(t)$ 为电源共模干扰. 由于 PIN 管共用一个电源, 且采用对称设计, 因此它们所受的电源共模干扰几乎相同. 差分后输出电压 V_4 为

$$V_4 = V_2 - V_1 = -\sqrt{3}RMP_1 \cos(\Delta\Phi(t))/3 \quad (5)$$

设电压跟随输出电压 V_5 , 积分器输出电压 V_6 , 乘法电路的输出电压为 V_7 , 则有

$$V_5 = k_1 \cos(\Delta\Phi(t)) \quad (6)$$

$$V_6 = k_2 \int \cos(\Delta\Phi(t)) dt \quad (7)$$

$$V_7 = k_3 \cos(\Delta\Phi(t)) \int \cos(\Delta\Phi(t)) dt \quad (8)$$

式中, k_1, k_2, k_3 均为常系数. 实验中, 取 $R = 10 \text{ k}\Omega$, $P_1 = 320 \mu\text{W}$, PIN 管的响应度 $M = 0.955 \text{ A/W}$, 忽略 $v_s(t)$, 则监测端输出电压 V_3 为

$$V_3 = 1 + \sin(\Delta\Phi(t)) \quad (9)$$

实验选用的 PZT 外径 $D = 30 \text{ mm}$, 壁厚 $d = 1 \text{ mm}$, 压电系数 $d_{33} = 0.4 \text{ nm/V}$, PZT 所加电压与相移的关系为

$$\Delta\varphi' = \frac{2\pi^2 n D d_{33} U}{\lambda d} = 0.224U \quad (10)$$

补偿后, $\cos(\Delta\Phi(t)) = 0$, 则 $\Delta\Phi(t) = \pm\pi/2$, 即干涉仪两臂相差被锁定在 $\pm\pi/2$, 由式(9)可知, 监测端输出电压 V_3 为 2 V.

由于反馈信号是相差的余弦形式, 补偿时需考虑反馈的正负性问题. 这里依据相差所属象限来区分反馈的正负性. 结合乘法器输出电压的正负性和监测端输出电压的大小, 即可判别出相差所属象限. 如图 3, 当相差在第一象限(如图中 A 点)时, 锁定后相差为 $\pi/2$, 则需要增大相差, 采用正反馈补偿; 当相差在第二象限(如图中 B 点)时, 锁定后相差为 $\pi/2$, 则需要减小相差, 采用负反馈补偿; 当相差在第三象限(如图中 E 点)时, 锁定后相差为 $-\pi/2$, 则需要

增大相差,采用正反馈补偿;当相差在第四象限(如图中 F 点)时,锁定后相差为 $-\pi/2$,则需要减小相差,采用正反馈补偿.反馈信号的正负性恰好和乘法电路输出电压的正负性一致,故采用乘法电路的输出电压作为反馈控制信号.

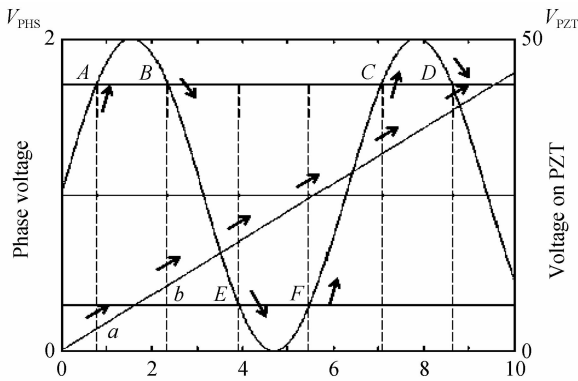


图3 动态补偿原理分析
Fig.3 Analysis of dynamic compensation principle

2 实验研究

实验所用的干涉仪如图 1 所示,整个装置搭建在光学平台上,DFB 激光器的相干长度为 20.2 cm,干涉仪两臂长度差为 4.46 cm,低通滤波器的截止频率设置为 160 Hz.

2.1 实验室环境下的干扰及其补偿

实验采用 PT100 温度传感器,测定了实验室环境下温度的漂移情况,如图 4 所示.应用 Welch 加 Hann 窗的方法计算环境干扰的功率谱密度^[16-17],频谱分析结果表明,温度变化比较缓慢,频率主要集中在 100 Hz 以内,如图 5 所示.

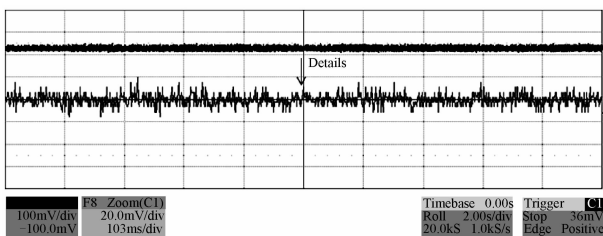
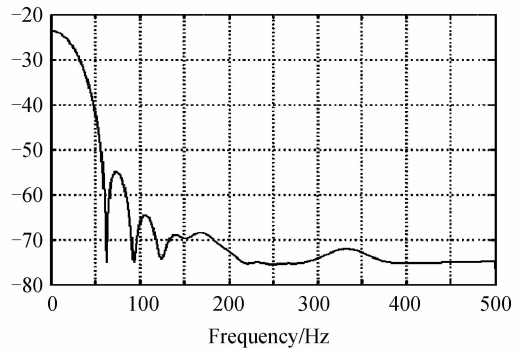
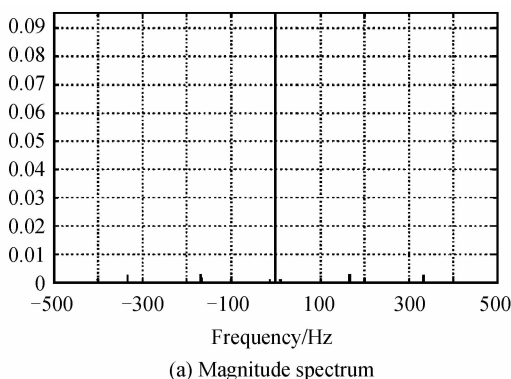


图4 温度变化曲线
Fig.4 Temperature variation curve



(b) Power spectral density estimate
图5 温度变化的幅度谱和功率谱密度估计
Fig.5 Magnitude spectrum and power spectral density estimate for temperature changes

补偿前,干涉仪监测端输出电压在 0~2 V 之间随机变化.补偿后,干涉仪监测端输出电压均值 1.951 V,上下波动 0.11 V,波动幅度约为 5.64%,接近理论值 2 V,如图 6.

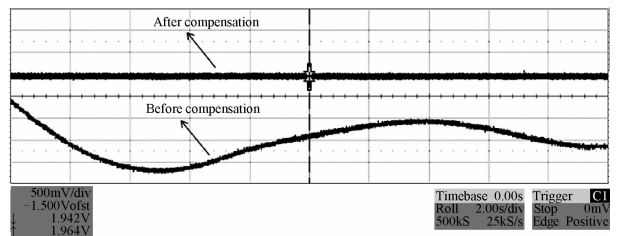


图6 监测端输出电压波形
Fig.6 Output voltage waveform of monitoring port

由于实验室条件的限制,不能对地面和实验台本身的随机受迫振动进行直接测量.自然情况下,温度变化引起的干扰和振动引起的干扰交叠在一起,难以分离.因而,我们在对自然环境干扰补偿的前提下,通过激振器给地面和实验台分别加载一个冲击,以模拟自然环境下的振动干扰情况.从图 7 及所采集的实验数据,可计算出反馈电路的响应时间大约为 0.6 s.在响应时间内,给地面和实验台分别加一个瞬间冲击,利用监测端输出波形分析振动引起的干扰情况.

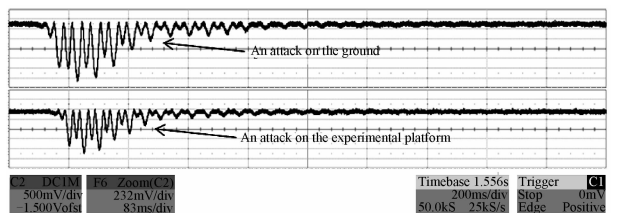


图7 在光纤 MZI 附近加一个冲击时监测端输出电压波形
Fig.7 Output voltage waveform of monitoring port when giving an attack around the fiber MZI

应用前面相同的频谱分析方法,得到冲击振动产生干扰的幅度谱和功率谱密度,如图 8~10 所示.

由图 5 及图 8~10 不难看出,实验室环境下温度和振动引起的干扰主要集中在 100 Hz 以下的低

频段,100 Hz 以上的高频段干扰要小得多,可以忽略不计,因此,补偿电路的低通滤波器截止频率设置为 160 Hz 是合理的. 比较加振动冲击时,补偿前(图 9)

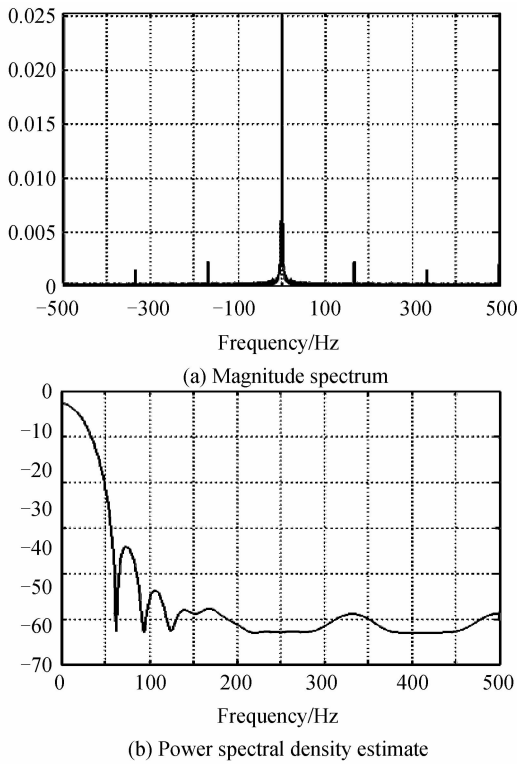


图 8 加冲击前的幅度谱和功率谱密度估计
Fig. 8 Magnitude spectrum and power spectral density estimate before adding an attack

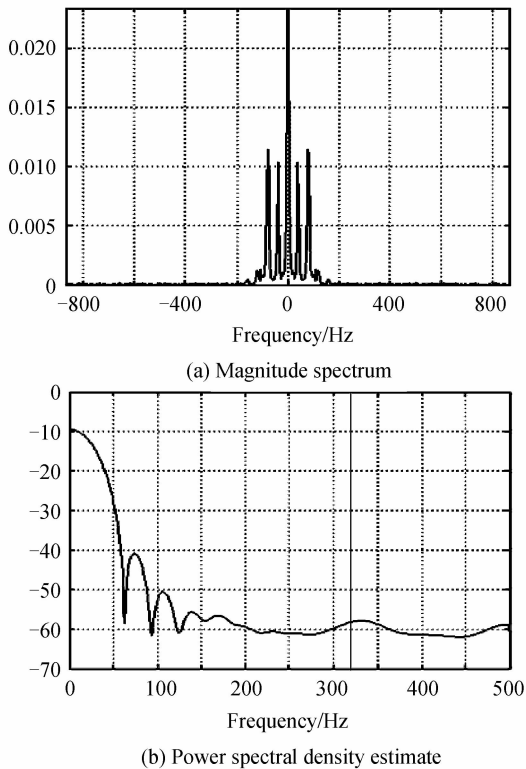


图 9 加冲击未补偿的和功率谱密度估计
Fig. 9 Magnitude spectrum and power spectral density estimate when adding an attack without compensation

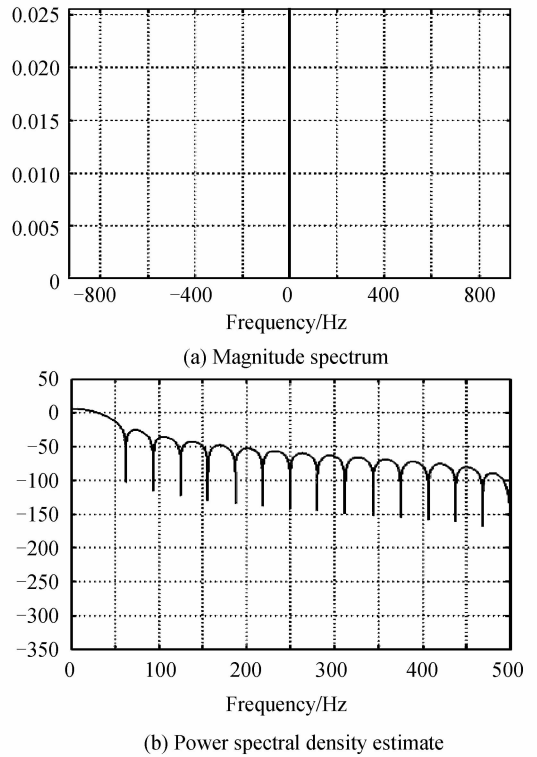


图 10 冲击补偿后的幅度谱和功率谱密度估计
Fig. 10 Magnitude spectrum and power spectral density estimate after compensation

与补偿后(图 10)的幅度谱和功率谱密度估计,不难发现反馈补偿后低频环境干扰得到了有效地抑制.

2.2 人为添加干扰的补偿

2.2.1 叠加 150 Hz 的正弦冲击振动干扰

在前面冲击实验基础上,调节激振器产生 150 Hz 的正弦冲击干扰,作用于光学平台上的光纤 MZI 附近. 分别测量补偿前后干涉仪的输出波形,得到图 11 所示的结果. 可以看出,补偿前,干涉仪监测端输出电压不仅受温度、振动等环境因素影响发

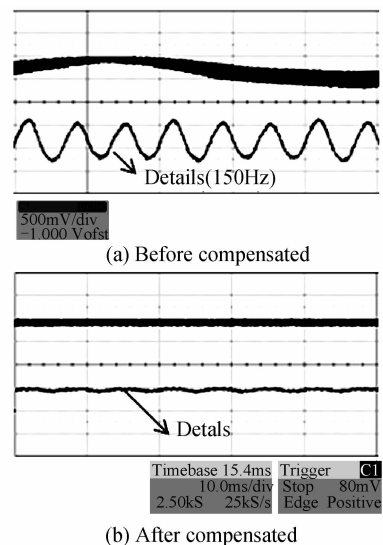


图 11 叠加 150 Hz 冲击干扰补偿前后监测端输出电压波形
Fig. 11 Output voltage waveform of monitoring port before and after compensated with 150 Hz attack

生随机漂移,波形展开后看细节,还包含有 150 Hz 的正弦成分(即人为添加的冲击干扰).补偿后,干涉仪监测端输出电压均值 1.915 V,上下波动 88 mV,波动幅度约 4.60%,展开后看细节,已无明显的交流成分.

2.2.2 叠加 200Hz 的正弦冲击振动干扰

将激励器产生的冲击干扰频率调节到 200 Hz,测量补偿前后干涉仪的输出波形,所得结果如图 12 所示.从补偿前的波形细节可以看出,确实包含有 200 Hz 的正弦成分.补偿后,干涉仪监测端输出电压均值 1.894 V,上下波动 122 mV,波动幅度约 6.44%,展开后看细节,发现仍包含有 200 Hz 的交流成分.这是由于二阶有源低通滤波器能很好地削减高频信号,但不能完全阻止高频信号的通过.所以叠加的 200 Hz 正弦干扰会有部分得到补偿,因而会在输出波形上仍包含有 200 Hz 的交流成分,但不再是正弦形式.

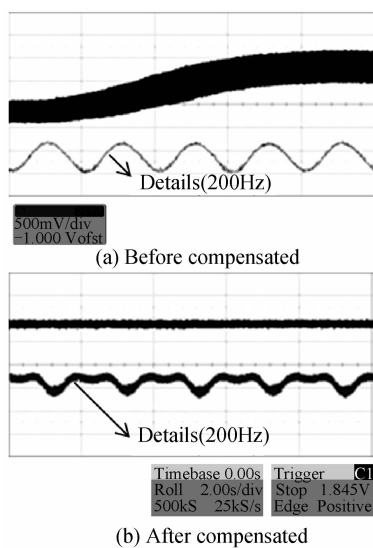


图 12 叠加 200 Hz 冲击干扰补偿前后监测端输出电压波形
Fig. 12 Output voltage waveform of monitoring port before and after compensated with 200 Hz attack

图 11 与图 12 的结果表明:当干扰频率低于 160 Hz 时,补偿效果良好;当干扰频率高于 160 Hz 时,补偿效果较差,这与补偿电路低通滤波器的截止频率设置相符合.如果需要补偿较高频率的干扰,只需提高低通滤波器的截止频率即可.

3 结论

本文在光纤 MZI 输出光强的理论分析基础上,详细研究了温度特别是振动对光纤 MZI 输出稳定性的影响,并跟据干扰信号频谱分析结果,设计了反馈电路,提出了一种利用象限判决来区分反馈正负性的动态补偿方案.分析结果表明,实验室环境下温度变化和振动引起的干扰频谱集中在 100 Hz 以下,

实验所设计的反馈电路对 160 Hz 以下的低频干扰均能有效补偿.补偿前,干涉仪监测端输出电压在 0~2 V 随机缓慢漂移,补偿后监测端输出电压接近 2 V,波动幅度不超过 5.64%,相差锁定在 $\pm\pi/2$,补偿效果良好.

参考文献

- [1] 廖延彪. 光纤光学——原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [2] JING Zhen-guo, YIN Kai, ZHANG Min, *et al.* Polarization induced fading eliminating technique for interferometric optical fiber sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2024-2028.
荆振国,殷楷,张敏,等.干涉型光纤传感器的消偏振衰落技术研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 2024-2028.
- [3] HU Liang, YU You-long, LI Ruo-ming, *et al.* Research on pressure sensing based on all-fiber Mach-Zehnder interferometer covered by silicon rubber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1277-1280.
胡亮,余有龙,李若明,等.使用硅橡胶涂敷的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的压力传感研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1277-1280.
- [4] JUNG Y, LEE S, LEE B H, *et al.* Ultracompact in-line broadband Mach-Zehnder interferometer using a composite leaky hollow-optical-fiber waveguide [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(24): 2934-2936.
- [5] LI Y, HARRIS E, CHEN L, *et al.* Application of spectrum differential integration method in an in-line fiber Mach-Zehnder refractive index sensor[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(8): 8135-8143.
- [6] TIAN Z, YAM S S, BARNES J, *et al.* Refractive index sensing with Mach - Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2008, **20**(8): 626-628.
- [7] 吴重庆. 光波导理论[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [8] LI Min, XIE Fang, CHEN Zhi-min. Vibration measurement system based on a highly stabilized fiber 3 × 3 coupler interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(2): 549-553.
李敏,谢芳,陈志敏.高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉仪测量系统[J]. *光电子激光*, 2010, **21**(2): 235-239.
- [9] HUANG Tao, WU Chong-qing, WANG Rui-feng, *et al.* Phase compensation of all-fiber mach-zehnder interferometer [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(4): 58-60.
黄涛,吴重庆,王瑞峰,等.全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪相位补偿的研究[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(4): 58-60.
- [10] GAO Ya-cheng. Study on the stability and operating point of the optical fiber interferometer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
高亚成. 光纤干涉仪稳定性及其工作点的研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [11] XUE Qing, CHEN Jian-ping. Study on the stability of magnetic field sensor based on optical fiber Michelson interferometer[J]. *Fiber and Cable and Their Applications*, 2006, **18**(2): 19-21.
薛青,陈建平. 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, **18**(2): 19-21.
- [12] DU Zhi-gang. Research on the stability of the demodulation system of the weak magnetic sensor based on optical fiber interferometer[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.

- 都智刚. 干涉型光纤弱磁传感器解调系统稳定性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [13] NI Su-min. A way to improve the sensitivity of optical fiber sensor based on interferometer [J]. *Sensor Technology*, 1994, **13**(4): 54-55.
倪苏敏. 提高干涉型光纤传感器灵敏度的一种方法[J]. 传感器技术, 1994, **13**(4): 54-55.
- [14] RUIZ P D, HUNTLEY J M, SHEN Y, *et al.* Vibration-induced phase errors in high-speed phase-shifting speckle-pattern interferometry[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(13): 2117-2125.
- [15] GROOT P J, DECK L L. Numerical simulations of vibration in phase-shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(13): 2172-2178.
- [16] 刘磊, 王琳. 随机信号与系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [17] WU Dong. Study on the adaptive anti-vibration technology of the phase-shifting interferometer [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology and Engineering, 2004.
吴栋. 移相干涉仪自适应抗振技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.

Effect of Temperature and Vibration on Optical Fiber Mach-Zehnder Interferometer and Dynamic Compensation

YU Xiang-zhi, LI Zheng-yong, WANG Zhi-hao, WU Chong-qing

(Key Lab of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology; Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Environment temperature changes and vibration will cause the random change of phase difference between two arms in the Mach-Zehnder interferometer (MZI), resulting in the instability of interferometer outputs. In this paper, the effect of temperature and vibration on the 3×3 coupler-based interferometer was studied in detail under natural conditions. Results show that the interference frequency caused by temperature and vibration is mainly concentrated in the low frequency section below 100 Hz. In order to eliminate these disturbances, a single-arm compensation feedback loop was designed to stabilize the output signal, and a dynamic compensation method was proposed based on quadrant judgment for distinguishment of positive and negative feedback. In the experiments, two of the three outputs of the 3×3 coupler are transformed from optical single to electrical one, and drives the piezoelectric ceramic to stretch the fiber wound on it after differential amplifier and other feedback circuits, which dynamically compensate the phase difference drift of the interferometer and stabilize the output namely the third output of the 3×3 coupler. Considering the disturbances caused by the temperature and vibration under nature environment, a stable dynamic compensation device was successfully demonstrated which can effectively suppress low-frequency interference below 160 Hz, and compensate real-time the phase difference drift between two arms of the interferometer, while the output becomes stable with fluctuations less than 5.64%.

Key words: Optical fiber Mach-Zehnder interferometer; 3×3 coupler; Phase compensation; Feedback; Stabilization