

文章编号: 0258-7025(2008)05-0726-03

# 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法

葛 强 徐长春 吴许强 钱 楷 李志军 俞本立

(安徽大学光电信息获取与控制教育部重点实验室 安徽 合肥 230039)

**摘要** 基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪结构,构造了全保偏光纤传感系统,以单频窄线宽保偏光纤激光器作为光源,采用了光源光电负反馈和双光路平衡检测双重降噪方法,降低了光源的附加强度噪声,使系统信噪比(SNR)提高了约15 dB,达到60 dB。

**关键词** 光纤光学;光纤传感器;双光路检测;光电负反馈

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Two Noise Reduction Methods in Interferential Optical Fiber Sensor

Ge Qiang Xu Changchun Wu Xuqiang Qian Kai Li Zhijun Yu Benli

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Acquisition and Manipulation of  
Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)

**Abstract** A fiber sensor based on all polarization-maintaining fiber Mach-Zehnder interferometer is presented, in which the single-frequency polarization-maintaining optical fiber laser is used as a light source. An active feedback loop for laser source and a balanced-mixer receiver are adopted to suppress the noise of the sensor system. This system makes the intensity noise reduce about 15 dB, and the signal-to-noise ratio of the system is up to 60 dB.

**Key words** fiber optics; fiber sensor; twin-channel optic path balancing detection; photoelectric inverse feedback

## 1 引 言

自 20 世纪 80 年代以来,光纤传感的研究日益受到人们的重视,特别是其中具有高灵敏度的干涉型光纤传感器技术得到了迅速发展,它在温度、电场、水声、微振动和液体参量等的测量方面有着重要的应用<sup>[1~3]</sup>。

在高灵敏度干涉型光纤传感系统中,光源的强度噪声常常是系统噪声的主要来源,同时光源的相位噪声会因参考臂和信号臂之间的光程差而成为系统的噪声来源,显然热噪声、暗电流噪声、散粒噪声等<sup>[4,5]</sup>噪声信号也可能构成系统噪声的主要因素。确定传感系统噪声的主要来源,采取有效解决方法,是提高传感系统灵敏度和信噪比(SNR)的重要手段。本文基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪

结构,构造了全保偏光纤传感器系统,以单频窄线宽保偏光纤激光器作为光源。主要从强度噪声入手,采用光电负反馈方法,降低光源的强度噪声<sup>[5~9]</sup>;同时采用双光路平衡检测以降低光源的附加强度噪声给系统带来的噪声影响。

## 2 原理分析

### 2.1 光电负反馈降噪原理及其控制技术

在小于弛豫振荡频率的低频范围内,激光器的强度噪声主要受抽运噪声的影响,基本处于抽运噪声水平,光电负反馈的目的就是通过抑制抽运噪声,进而抑制光源的强度噪声<sup>[10~14]</sup>。

光电负反馈降噪原理框图如图 1 所示,光纤激光器的输出激光经 1:99 的输出耦合器分成两路,其

收稿日期:2007-04-16;收到修改稿日期:2007-11-27

基金项目:安徽优秀青年科技基金(04042045)和安徽省高等学校青年教师科研“资助计划”基金(2005jq1027)资助项目。

作者简介:葛 强(1982—),男,安徽人,硕士研究生。主要从事光纤激光器、光纤传感方面的研究。

E-mail:geqiang@ahu.edu.cn

导师简介:俞本立(1963—),男,安徽人,教授,博士生导师,主要从事光电技术、光传感、数据传输等方面的研究。

E-mail:benliyu@ahu.edu.cn (通信作者)

中1%的激光入射到光电探测器(PD)接收转换为电信号,再经过比例-积分-微分(PID)电路处理后反馈到抽运激光器的驱动电路中,从而起到抑制光源强度噪声的作用。比例-积分-微分电路分别由比例、积分、微分三部分电路组成,比例电路的作用是按比例反应系统的偏差;积分电路的作用是使系统消除稳态误差,主要对低频的变化进行响应;而微分电路的作用则是反映系统偏差信号的变化率,具有预见偏差变化趋势的性能,能够对高频变化作出快速响应。合理调整比例、积分、微分三部分电路的参数,可使比例-积分-微分电路改善整个反馈网络的性能,通过反馈信号改变抽运激光器的输出特性,以达到抑制激光器强度噪声的效果。

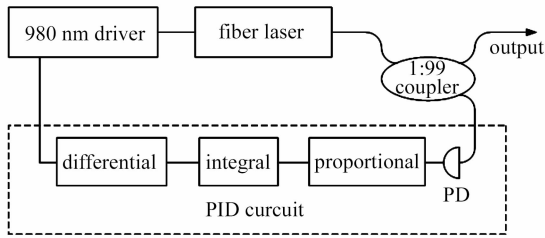


图1 光电负反馈电路结构图

Fig.1 Schematic of optoelectronic negative feedback

## 2.2 双光路平衡检测原理

双光路平衡检测实验装置如图2所示,以传统的马赫-曾德尔干涉仪为基础,采用全保偏光纤结构,其中laser source为光源,C1,C2为两个3 dB耦合器,RF为参考臂,SF为信号臂,D1,D2为光电探测器,A为减法器,通过处理电路,可得到待测信号。在图2所示的双光路平衡检测实验装置中,若两个探测器完全一致,则两个探测器的光电流输出方程可以表示为<sup>[5]</sup>

$$I_1 = \frac{\eta e}{h\nu} \left[ \frac{1}{2} (p_{lo} + p_{sb}) + (p_{lo} p_{sb})^{\frac{1}{2}} \sin(\Delta\omega t + \varphi) \right], \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{\eta e}{h\nu} \left[ \frac{1}{2} (p_{lo} + p_{sb}) - (p_{lo} p_{sb})^{\frac{1}{2}} \sin(\Delta\omega t + \varphi) \right], \quad (2)$$

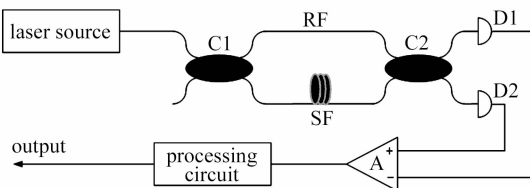


图2 系统双光路平衡检测结构图

Fig.2 Schematic of twin-channel optical path detection system

式中 $\eta$ 为量子效率, $h\nu$ 为光子能量, $p_{lo}$ 、 $p_{sb}$ 分别为参考光和信号光的光功率, $\Delta\omega = \omega_{sb} - \omega_{lo}$ , $\varphi$ 为信号光和参考光的相位差。经减法器后的输出为

$$I_d = I_1 - I_2 = 2 \frac{\eta e}{h\nu} (p_{sb} p_{lo})^{1/2} \sin(\Delta\omega t + \varphi). \quad (3)$$

采用双光路平衡测量,C1,C2为3 dB耦合器,所以参考光和信号光的光功率相等,即 $P_{lo} = P_{sb} = \bar{P} - \Delta P$ ,其中 $\bar{P}$ 为不含噪声的光功率, $\Delta P$ 为光源附加强度噪声功率。则(3)式可改写为

$$I_d = 2 \frac{\eta e}{h\nu} (\bar{P} + \Delta P) \sin(\Delta\omega t + \varphi), \quad (4)$$

同样,对于单路探测,(1)式可改写为

$$I_s = \frac{\eta e}{h\nu} (\bar{P} + \Delta P) + \frac{\eta e}{h\nu} (\bar{P} + \Delta P) \sin(\Delta\omega t + \varphi). \quad (5)$$

计算信噪比时,由于 $\sin(\Delta\omega t + \varphi)$ 的平均值为1/2,则单路探测时,第一项中的 $\bar{P}$ 被隔直电路滤除而 $\Delta P$ 不能被滤除,其信噪比为

$$\text{SNR}_s = \left( \frac{1}{2} \bar{P} \right)^2 / \left( \frac{1}{2} \Delta P + \Delta P \right)^2 = \frac{1}{9} \left( \frac{\bar{P}}{\Delta P} \right)^2, \quad (6)$$

双路平衡探测时的信噪比为

$$\text{SNR}_d = (\bar{P} / \Delta P)^2, \quad (7)$$

从(6),(7)两式可以看出,采用双路平衡探测后信噪比提高了9倍,约9.5 dB。

但是在实际情况中,由于耦合器的分光比不能严格平衡,两个光电探测器的量子效率和前置放大器的性能也不能做到绝对对称,从而使双光路平衡检测的降噪效果有所下降。为解决这个问题,采取调节前置放大器增益的方式达到进入减法器的两路信号的平衡。

## 3 实验结果

图3所示为采用光电负反馈系统前后光源的附加强度噪声频谱比较图。从图中可以看出,采用光电负反馈技术后光纤激光器的弛豫振荡峰明显后移,而且峰值有大幅度的下降。对本实验系统的噪声本底影响较大的为低频噪声(约为20 kHz以下),其幅度下降约10 dB,最大下降幅度约30 dB,从而能够有效地抑制光源的附加强度噪声。

图4为光纤传感系统采用单光路检测A,双光路平衡检测B,以及光源光电负反馈加双光路平衡检测C三种检测方法的频谱比较图。实验中在信号臂通过压电陶瓷施加了信号幅度为0.2 rad,频率为1 kHz的模拟应变信号(图4中1 kHz处的尖峰即

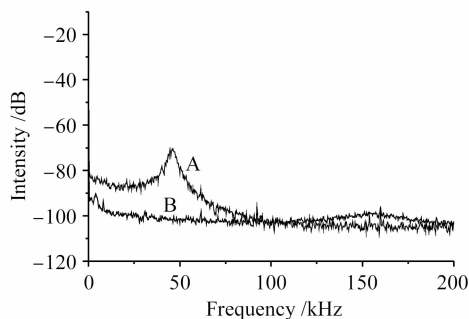


图3 光电负反馈降低光源强度噪声效果图

A: 不加反馈; B: 加反馈

Fig. 3 Effect of using optoelectronic negative feedback.

A; without optoelectronic negative feedback; B; with optoelectronic negative feedback

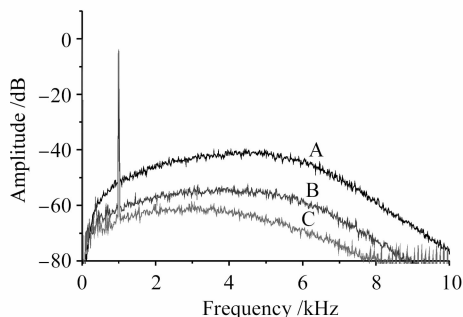


图4 三种检测方法检测结果比较图。A: 单光路检测;

B: 双光路检测; C: 光电负反馈加双光路检测

Fig. 4 Comparison of three detection methods. A;

single-channel; B; twin-channel; C;

optoelectronic negative feedback and twin-channel

为施加的模拟信号),从图中可以看出,在1 kHz处,双光路平衡检测比单光路检测的噪声本底降低了大约10 dB,与理论计算一致。当同时采用光源的光电负反馈和双光路平衡检测的降噪措施可以使系统噪声降低约15 dB,系统的信噪比可以达到60 dB。图4中小于1 kHz和大于5 kHz处频谱的下降是由于采用了带通滤波器所致。进一步对比实验证明,此时的系统噪声已接近光源引发的散粒噪声极限。

实验中由于耦合器的分光比不能严格平衡,两个光电探测器的性能也不能绝对对称,从而导致双光路平衡检测的降噪效果有所下降。如果能够更好地改进系统的平衡对称性,将使系统的信噪比得到进一步提高。

## 4 结 论

通过实验得出,当光源的强度噪声是影响光纤传感器灵敏度和信噪比的主要来源时,采用光电负

反馈和双光路平衡检测措施可以明显降低系统的噪声,有效提高系统的信噪比和灵敏度,同时可以看出光电负反馈是对双光路平衡检测降噪措施的有力补充。

## 参 考 文 献

- 1 Yannian Wang, Zhuangde Jiang. Application of golay codes to distributed optical fiber sensor for long-distance oil pipeline leakage and external damage detection [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3):141~144
- 2 Duan Mengmeng, Chen Changle, Lei Songhe *et al.*. Study on absorption fiber-optic temperature sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8):1207~1210
- 段萌萌,陈长乐,雷松鹤等. 吸收式光纤温度传感器的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8):1207~1210
- 3 Zhang Na, Feng Xia. Using of fiber optical sensor to measure liquid parameters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):67~71
- 张娜,冯霞. 光纤传感器在液体参量测量中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):67~71
- 4 Nicholas Lagakos, W. J. Trott, T. R. Hickman *et al.*. Microbend fiber-optic sensor as extended hydrophone [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10):1633~1638
- 5 R. Stierlin, R. Battig, P.-D. Henchoz *et al.*. Excess-noise suppression in a fibre optic balanced heterodyne detection system [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1986, **18**:445~454
- 6 A. Dendridge, A. B. Tveten, R. O. Mille *et al.*. Laser noise in fiber-optic interferometer systems [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**(6):526~528
- 7 H. P. Yuen, V. W. S. Chan. Noise in homodyne and heterodyne detection [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(3):177~179
- 8 G. L. Abbas, V. W. S. Chan, T. K. Yee. Local-oscillator excess-noise suppression for homodyne and heterodyne detection [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(8):419~421
- 9 T. C. Ralph, C. C. Harb, H. A. Bachor. Intensity noise of injection-locked lasers: Quantum theory using a linearized input-output method [J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **54**(5):4359~4369
- 10 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low noise fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):217~220
- 俞本立,甄胜来,朱军等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):217~220
- 11 C. C. Harb, M. B. Gray, H. A. Bachor *et al.*. Suppression of the intensity noise in a diode pumped neodymium: YAG nonplanar ring laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(12):2907~2913
- 12 Zhang Jing, Ma Hongliang, Wang Runlin *et al.*. Suppression of intensity noise of LD pumped single-frequency ring Nd:YVO<sub>4</sub> laser by opto-electronic feedback [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9):1031~1035
- 张靖,马红亮,王润林等. 光电负反馈抑制全固化单频激光器的强度噪声[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9):1031~1035
- 13 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Chen Yanli *et al.*. Intensity noise properties of LD pumped single frequency ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1311~1316
- 张靖,张宽收,陈艳丽等. 激光二极管抽运的环形单频激光器的强度噪声特性研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10):1311~1316
- 14 Li Ye, Cao Jianping, Deng Yongkai *et al.*. Study on the properties and suppression of the intensity noise in semi-planar monolithic lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1050~1054
- 李烨,曹建平,邓勇开等. 半非平面单块激光器强度噪声及其抑制的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1050~1054