

文章编号: 1001-3806(2013)06-0795-04

## 具有抗扰动的全光纤干涉系统及应用

熊显名, 朱剑锋, 王璐

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

**摘要:** 为了消除不良扰动对全光纤干涉系统的影响, 提出了一种抵抗时变扰动的新方法。采用两路具有恒定相位差的干涉信号, 经过简单的信号调理和数学运算, 消除单路信号中信号与噪声的比值容易受到光路偏置相位角和调制相位差大小影响的问题, 同时改善了信号质量。结果表明, 该系统能有效消除扰动噪声, 对耦合器的分光比无严格要求, 更具实用性。

**关键词:** 传感器技术; 抗扰动; 双光路平衡差动; 信噪比; 3 × 3 耦合器

**中图分类号:** TN29      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.020

### All optical fiber interferometer system with anti-disturbance and its application

XIONG Xian-ming, ZHU Jian-feng, WANG Lu

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to eliminate the impact of negative disturbance on the all-optical-fiber interferential system, a new method to resist time-varying disturbance was proposed. There are two routes of interferential signals with a constant phase difference, by means of simple signal modulation and mathematic computation, to avoid the problem that the useful signal to noise ratio in the single-channel signal easily affected by the differences of optical path bias phase angle and modulation phase difference, while improving the quality of signals. Experiments show that the system can effectively eliminate the disturbing noise without strict requirements on coupler prismatic ratio, and is more practical.

**Key words:** sensor technique; anti-disturbance; dual optic path balanced difference; signal-to-noise ratio; 3 × 3 coupler

### 引言

全光纤干涉系统广泛应用于时变信号测量, 其结构简单、调试方便, 能够采用低相干长度的激光作为系统的光源。系统采用单模光纤作为光的传输载体, 能方便地实现光束的空间相干。近年来, 全光纤干涉系统已经被应用于声音、温度、振动和速度测量等领域<sup>[1-4]</sup>。但是, 由于系统采用光纤作为载体, 外界的振动很容易使得光纤的曲率和端面发生畸变, 导致光纤中的光波强度、相位等发生改变, 增加了信号噪声和影响系统的稳定性。对于如何有效消除或者降低不良扰动<sup>[5]</sup>对全光纤干涉系统的影响, 这个问题很少有文献报道。

本文中提出了一种消除外界不良扰动对系统影

响的方法。该方法仅需要两路具有恒定相位差的干涉信号, 对具体相位差无要求、结构简单、没有复杂的数学运算、电路设计方便。由于外界扰动问题对于光纤干涉系统的影响很大, 使得其能够满足实际应用, 具有较强的参考和应用价值。

响的方法。该方法仅需要两路具有恒定相位差的干涉信号, 对具体相位差无要求、结构简单、没有复杂的数学运算、电路设计方便。由于外界扰动问题对于光纤干涉系统的影响很大, 使得其能够满足实际应用, 具有较强的参考和应用价值。

### 1 系统结构及实现原理

系统结构框图如图 1 所示。全光纤干涉仪的核心是由一个 3 × 3 耦合器构成的萨格纳克 (Sagnac)

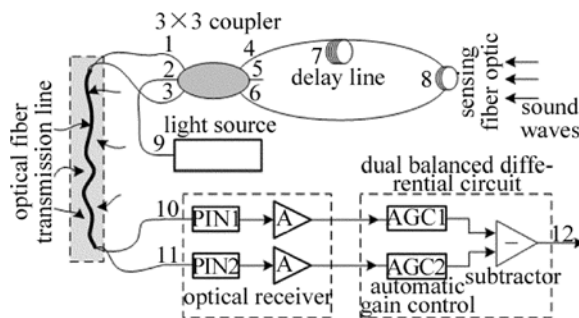


Fig. 1 The anti-disturbance type all fiber-optic interferometer system

作者简介: 熊显名 (1964-), 男, 研究员, 主要研究方向为光电测试、计算机辅助测试及光学遥感测试。

E-mail: nathan.cool@163.com

收稿日期: 2013-03-12; 收到修改稿日期: 2013-04-24

光纤环<sup>[6]</sup>,从耦合器输出的沿顺时针(4→7→8→6)和逆时针(6→8→7→4)传播的光束经过有外力作用的感应光纤时因到达时间不同,对称性被破坏,形成相位差,返回到耦合器时产生干涉。根据光纤耦合器的差频特性和线性对称耦合理论<sup>[7-8]</sup>,两个探测器上的光电流输出表达式表示如下:

$$I_1(t) = \frac{\eta_1 e}{h\nu} k_1 P(t) \{1 + \cos[\varphi(t) + \theta] + n_1(t)\} \quad (1)$$

$$I_2(t) = \frac{\eta_2 e}{h\nu} k_2 P(t) \{1 + \cos[\varphi(t) - \theta] + n_2(t)\} \quad (2)$$

式中, $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 分别为两个光电探测器的量子效率; $e$ 为电子的电量; $h$ 为普朗克常数; $\nu$ 为光子的频率; $k_1$ 和 $k_2$ 分别为两路干涉信号的光功率系数,与耦合器的分光比有关; $P(t)$ 为光源进入耦合器的光功

率; $\varphi(t)$ 为外力作用在感应光纤上引起的相位变化; $\theta$ 为光路引入的非互易的偏置相位,大小与耦合器的分光比及损耗有关<sup>[9-10]</sup>,能提高灵敏度和线性度,且 $0 < \theta < \pi$ ; $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 分别为两光纤干涉线上引入的外界扰动模量。

自动增益控制(automatic gain control, AGC)具有增益自动调节功能,能在一定范围内使信号的幅度保持恒定。图2所示为一个AGC电路(一个闭环反馈系统)。该环路包括可控增益单元、检测器、稳定的基准电压源和比较电路。该AGC电路使用宽动态范围的可变增益放大器LMH6505作为增益控制单元,有效值-直流转换器LTC1968作为检测器,低压差稳压器REF3012作为基准电压源和一个轨至轨的运算放大器AD8551。它通过调节可变电阻器 $R_9$ 来控制输出信号的幅度。

利用AGC电路能让信号幅度保持稳定的功能,

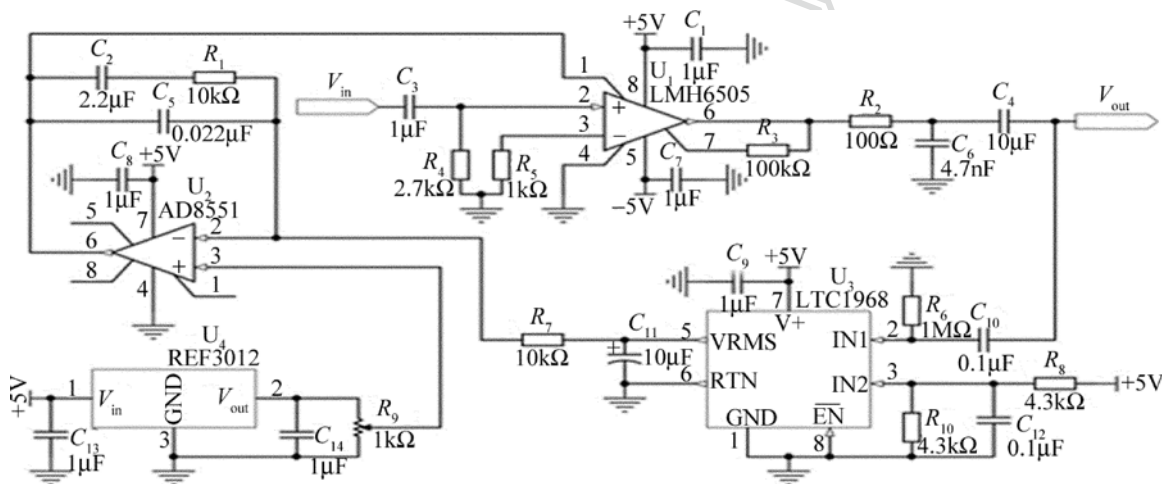


Fig. 2 Automatic gain control circuit

对常数做归一化处理,使得两路信号具有如下形式:

$$V_1(t) = P(t) \{1 + \cos[\varphi(t) + \theta] + n_1(t)\} \quad (3)$$

$$V_2(t) = P(t) \{1 + \cos[\varphi(t) - \theta] + n_2(t)\} \quad (4)$$

由于光源输出功率不稳定、光源自身的噪声以及受震动等产生的微弱功率的波动,进入耦合器的并非理想的恒定功率的光波,其光功率可表示为:

$$P(t) = a + e(t) \quad (5)$$

式中, $a$ 为一个正常数, $e(t)$ 为光源的相位噪声以及环境变化(如温度、电流、振动等)导致光源功率变化的叠加。当两光纤干涉线(见图1中的1→10和3→11)受到扰动时,将导致末端输出功率发生改变。通过将两条光干涉线作成对并行的黏连处理,此时认为它们受到的扰动模量是近似相同的,则有:

$$n_1(t) \approx n_2(t) = n(t) \quad (6)$$

$V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 通过减法器(差动放大器AD8276)后,得到:

$$V_{diff}(t) = V_2(t) - V_1(t) = 2P(t) \sin\theta \sin\varphi(t) \quad (7)$$

当相位调制变化差 $\varphi(t)$ 较小时,有 $\sin\varphi(t) \approx \varphi(t)$ ,那么有:

$$V_{diff}(t) = 2a \sin\theta \cdot \varphi(t) + 2 \sin\theta \cdot \varphi(t) \cdot e(t) \quad (8)$$

因为 $a$ 为常数, $e(t)$ 为随机噪声,则上式等号右边的第1项为有用信号,第2项为干扰噪声。由于信号中的有用信号功率与噪声功率之间的比值能反映信号质量,在不考虑其它因素(电路噪声等)的情况下,此时 $V_{diff}(t)$ 在理论上的有用信号与噪声之间的比值表达式为:

$$S_{\text{dif}} = 20\lg\left(\frac{|2a\sin\theta \cdot \varphi(t)|}{|2\sin\theta \cdot \varphi(t)| |e(t)|}\right) = 20\lg\left[\frac{a}{|e(t)|}\right] \quad (9)$$

同理,当  $\varphi(t)$  很小时,有  $\cos[\varphi(t) \pm \theta] \approx \mp \sin\theta \cdot \varphi(t) + \cos\theta$ ,若不考虑直流分量,可得  $V_1(t)$  和  $V_2(t)$  交流项:

$$V_{1AC}(t) = -a\sin\theta \cdot \varphi(t) + a \cdot n(t) + e(t) \times [1 - \sin\theta \cdot \varphi(t) + \cos\theta + n(t)] \quad (10)$$

$$V_{2AC}(t) = a\sin\theta \cdot \varphi(t) + a \cdot n(t) + e(t) \times [1 + \sin\theta \cdot \varphi(t) + \cos\theta + n(t)] \quad (11)$$

已知  $e(t)$  和  $n(t)$  互不为相关变量,所以两单路交流信号  $V_{1AC}(t)$  和  $V_{2AC}(t)$  在理论上的有用信号与噪声之间的比值表达式为:

$$S_{1AC} = S_{2AC} = 20 \times$$

$$\lg\left\{\frac{a}{\left[\frac{a \cdot |n(t)|}{|\sin\theta| |\varphi(t)|} + \left(\frac{1 + \cos\theta + |n(t)|}{|\sin\theta| |\varphi(t)|} + 1\right) |e(t)|\right]}\right\} \quad (12)$$

式中,  $S_{1AC}$  和  $S_{2AC}$  分别表示  $V_{1AC}(t)$  和  $V_{2AC}(t)$  的信噪比,其中下标 1AC 和 2AC 分别表示单路信号 1 和信号 2 的交流部分。

由于  $0 < |\sin\theta| < 1, \varphi(t)$  很小,则:

$$S_{\text{dif}} > S_{1AC} \quad (13)$$

受实际应用环境(如声压大小等)以及为保证系统的线性度的限制,  $\varphi(t)$  取值不宜过大。由上述推导可知,单路信号的有用信号与噪声之间的比值受调制相位差  $\varphi(t)$  和偏置相位  $\theta$  大小的共同影响,相位差  $\varphi(t)$  越小,信噪比越低。采用双光路平衡差动法能避免光干涉线上的扰动量  $n(t)$  的影响,其理论信噪比为稳定值,能提高信号质量,使得系统更加稳定。

## 2 仿真与计算

为验证以上结论,由(9)式、(12)式可得到关于单路信号和双光路平衡差动信号在理论上的有用信号与噪声之间比值曲线示意图。设光源的稳定功率  $a = 100\mu\text{W}$ ,光源噪声功率有效值  $|e(t)| = 0.01\mu\text{W}$ ,光路偏置角  $\theta = \frac{2\pi}{3}$ ,外界扰动模量的有效值  $|n(t)| = 0.0001$ ,相位调制变化差范围为  $-0.1 \leq \varphi(t) \leq 0.1$ 。由于选取的相位变化差值很小,保证了上述的推导成立及以系统工作在线性范围。两者的相应曲线如图 3 所示。

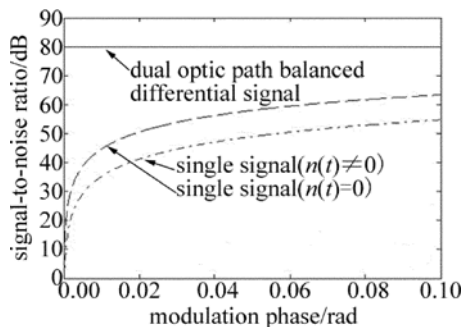


Fig. 3 A graph of the ratio between the useful signal and noise

$$(S_{1AC})_{\text{max}} = (S_{2AC})_{\text{max}} = 20 \times$$

$$\lg\left[\frac{100}{\frac{100 \times 0.0001}{0.1 \times \sqrt{3}/2} + \left(\frac{1 - 0.5 + 0.0001}{0.1 \times \sqrt{3}/2} + 1\right) \times 0.01}\right] \approx 54.7\text{dB} \quad (14)$$

$$S_{\text{dif}} = 20\lg\left(\frac{100}{0.01}\right) = 80\text{dB} \quad (15)$$

式中,  $(S_{1AC})_{\text{max}}$  和  $(S_{2AC})_{\text{max}}$  分别表示  $S_{1AC}$  和  $S_{2AC}$  的最大值。

在不存在外界扰动模量时,此时两单路信号中有用信号与噪声之间的比的最大值为:

$$(S_{1AC})_{\text{max}} = (S_{2AC})_{\text{max}} = 20 \times$$

$$\lg\left[\frac{100}{\left(\frac{1 - 0.5}{0.1 \times \sqrt{3}/2} + 1\right) \times 0.01}\right] \approx 63.4\text{dB} \quad (16)$$

采用双光路平衡差动法的有用信号与噪声之间的比值仅与光源的信噪比有关。从(14)式、(15)式和(16)式看出,它相比单路信号的比值高出至少 25dB 以上,即使在不存在外界扰动模量的情况下,也至少高出 17dB 以上。以上图形和计算结果,直观地表明了双光路平衡差动法在提高信号质量方面的优点。

## 3 实验验证

采用一种类似图 1 的系统构成干涉式全光纤声传感器对上面的理论进行验证。因为在一定范围内,感应光纤上所受的声压大小正比于光路相位变化差,所以该系统为线性系统。实验装置如图 4 所示,光源采用超辐射发光二极管<sup>[11-12]</sup>(super luminescent diode, SLD),中心波长为 1550nm,感应光纤为单模裸光纤,其它所用光纤均为普通的单模光纤,探测器为 PIN 光电二极管以及分光比为 36.2%/32.8%/31%的光纤耦合器。测试环境选在消音室内,感应光纤放置于扬声器正前方,两者相距 1m,用



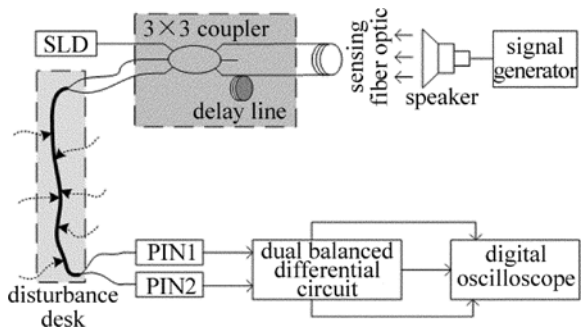


Fig. 4 Experimental setup

于声场信号的提取。信号发生器产生正弦信号,驱动扬声器生成声场信号,数字示波器用来记录和存储。同时,两条光纤干涉信号线在扰动台保持晃动状态,产生一个持续的不确定的外界扰动模量。

在此实验条件下,当信号发生器的频率为300Hz时,干涉式全光纤声传感系统实验结果如图5所示,其中通道1、通道2代表两路干涉输出信号,通道M表示经过双光路平衡差动处理后得到的信号。从图5的波形看出,通道1、通道2中除了包含互为反相的300Hz正弦波外,均携带了由于扰动产生的更低频率的同相噪声。通道M所显示的波形则是相对纯净的300Hz的正弦波,其波形稳定,有效地消除了低频扰动噪声。

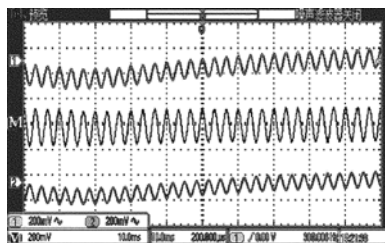


Fig. 5 Experimental result of interferometric optical fiber acoustic sensor

实验所得结果验证了上述关于双光路平衡差动法能够较好地消除外界扰动的理论,有效消除了单路信号容易受外界扰动影响的问题。根据理论模型和实验可知,两路信号通过自动增益电路后的幅值和时延必须一致,误差越小,抗扰动效果越明显;选用高精度差动放大器作为减法器,才更大程度地消除扰动噪声和光源衍生噪声。所以双光路平衡差动法的抗扰动效果,很大程度上由自动增益控制器和减法器的性能共同决定。此外,为了保证两路光干涉信号受到的外界扰动模量是相等的,两条光纤干

涉线的处理也很关键。

## 4 结论

从理论和实验两方面分析和验证了一种抗时变扰动的全光纤干涉系统的可行性。系统采用双光路平衡差动法消除外界扰动对系统信号的影响,提高了信号质量和稳定性。该方法不要求3×3光纤耦合器有均匀的分光比,无需标定,具有实际应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] ZHANG Q, ZHOU J, CHEN J P, *et al.* Temperature sensing characteristics of all-fiber Mach-Zehnder interferometer based on Bitaper-LPFG-Bitaper structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(3): 307-310 (in Chinese).
- [2] LIU B, WU Y F, ZHAO X C. Research on wavelet selection in all fiber displacement interference speed measurement system [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 251-254 (in Chinese).
- [3] LIU Ch G, LIU Q, LI Z R. Tiny vibration measurement based on all-fiber self-mixing interference[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 29-32 (in Chinese).
- [4] LI Ch R, WANG Ch, XIAO Q. Novel fiber length measurement system based on fiber interferometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(2): 415-419 (in Chinese).
- [5] XIE F, CHEN Zh M, REN J Y. A stabilized fiber 3×3 coupler interferometric measurement system based on a first order feedback loop[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(3): 297-299 (in Chinese).
- [6] WU D F, JIA B, ZHENG F L, *et al.* An all-fiber interference microphone using fiber-ring technique [J]. *Applied Acoustics*, 2007, 26(4): 218-222 (in Chinese).
- [7] JIA B, QIAN S R, HUA Zh Y. Beat frequency character and its application for optic-fiber couplers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(7): 605-608 (in Chinese).
- [8] SANZ I, MURIEL M A. New behavior in nonideal couplers[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(22): 4332-4334.
- [9] ZHANG J H. Effect of loss on output phase differences of optical fiber couplers[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 1999, 33(6): 17-21 (in Chinese).
- [10] HUANG Sh L, DAN W J, RAO Y J. Splicing loss analysis of single-mode fibers in practical conditions [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1994, 23(2): 127-132 (in Chinese).
- [11] WEI W Sh, ZHANG Ch X, MA J, *et al.* Study and application of super-luminescent diode [J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(6): 409-412 (in Chinese).
- [12] MA D G, DAN G W, LIU M D, *et al.* Effect of facet reflectivity on the output characteristics of superluminescent diode[J]. *Laser Technology*, 1996, 20(3): 168-172 (in Chinese).