

文章编号: 1001-3806(2016)01-0064-04

基于 3×3 耦合器相位解调的光纤声音传感器设计

吴 锋¹, 吴柏昆¹, 余文志¹, 钱银博^{1*}, 何 岩²

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074; 2. 烽火通信科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘要: 为了在某些应急情况下无源传输声音信号, 采用基于光纤迈克尔逊干涉仪原理光纤声音传感的方法结合了收音弹性盘片和光纤粘接的工艺设计, 使用 3×3 耦合器相位解调方法对传感信号进行相位解调, 实现了一种新型光纤声音传感器系统。给出了干涉仪 3 路输出信号相位差的表达式, 利用最小二乘法拟合求出干涉仪 3 路输出信号的平均相位差, 取得了仿真与实际测试数据。经过测试, 该系统可以准确有效地还原出设计带宽内的声音信号。结果表明, 该光纤声音传感器系统适用于电磁恶劣等应急环境中, 验证了该设计方案的可行性。

关键词: 传感器技术; 3×3 耦合器; 相位差; 解调; 光纤; 声音传感器

中图分类号: TP212.4⁺4

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.014

Design of fiber acoustic sensors based on 3×3 coupler phase demodulation

WU Feng¹, WU Baikun¹, YU Wenzhi¹, QIAN Yinbo¹, HE Yan²

(1. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China, 2. Fiberhome Telecommunication Technologies Co. Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to transport acoustic signal passively in some emergent cases, a fiber acoustic sensor was designed based on the principle of an optical fiber Michelson interferometer, processing techniques of elastic discs and optical fiber adhesion, 3×3 coupler phase demodulation. The expressions of three phase differences of output signals were presented, and the average phase differences were calculated based on the least square method. Simulation data and test data were acquired. Experimental results demonstrate that a fiber acoustic sensor can restore acoustic signal accurately and effectively within designed bandwidth. A fiber acoustic sensor can be used in emergent environments such as severe electro-magnetic situation. The test results verify the feasibility of a fiber acoustic sensor.

Key words: sensor technique; 3×3 coupler; phase difference; demodulation; fiber; acoustic sensor

引言

光纤传感是 20 世纪 70 年代中期随着光纤技术不断发展进步而应运而生的一门技术, 光纤传感器在电流、电磁、气体、温度、加速度、光纤陀螺等测量场合有着广泛的应用^[1-2]。光纤声音传感器与其它声音传感器相比, 具有抗电磁干扰、灵敏度高、动态范围大、可利用信号远距离传输等独特优势, 可以运用到某些特定需求的场合。干涉型光纤传感器以高灵敏度、结构简单等引起了人们的重视, 但是在实际工程应用中, 如何快速准确地提取出相位信息成为一个制约其快速发展的重要因素, 本文中设计并制作了一种基于 3×3 耦

合器相位解调方法^[3]与迈克尔逊干涉仪原理结合的光纤声音传感器系统, 它结合收音盘片换能结构, 实现对声音信号的高准确度测量还原, 该方法系统结构简单、原理方便易行、可操作性强, 经过实验室的测试, 可以有效还原出初始声音信号。

1 系统原理

光纤耦合器是一种常见的无源光器件, 在光通信与光纤传感中有着广泛的应用, 其作用是将光信号在耦合区内进行耦合并功率分配。利用 3×3 光纤耦合器相位解调方法可以实现干涉型光纤传感器的无源零差相位解调, 其原理如下: 在光纤干涉解调系统中, 3×3 耦合器相位解调方法可以构建 3 路相位差为 120° 的待解调光信号, 利用硬件电路处理运算可以解调出需要的待测信号^[4]。 3×3 耦合器相位解调方法相对于其它的相位解调技术的优点有: 不需要任何调制器件; 解调信号动态范围大; 可实现全光纤传感; 在多路复用光纤传感系统中有良好的应用前景。 3×3 光纤耦合

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61290315); 国家科技支撑计划资助项目 (2012BAH06B03)

作者简介: 吴 锋 (1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光纤传感的研究。

* 通讯联系人。E-mail: qianyinbo@hust.edu.cn

收稿日期: 2014-11-21; 收到修改稿日期: 2015-01-19

器相位解调系统中光纤光声音传感器 (fiber optical sound sensor, FOSS) 部分如图 1 所示。

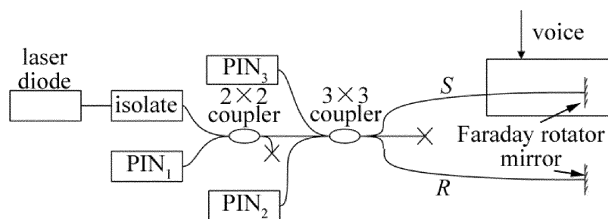


Fig. 1 Fiber acoustic sensors

由图 1 可知,光电二极管 PIN₁ 接收的光信号相比 PIN₂ 和 PIN₃ 多经过一个 2×2 的耦合器,其光功率应该是 PIN₂ 和 PIN₃ 的一半,在实际试验中,光电接收电路采用合适的放大倍数的跨阻放大电路,通过光电接收电路的“光-电流-电压”转换后,可以得到近乎幅值相等的 3 路待解调电压信号,3 路待解调电压信号可为:

$$I_n = A + B \cdot \cos\left[\varphi(t) - \frac{2\pi}{3}(n-1)\right] \quad (1)$$

式中, I 为 3 路输出信号强度, A 和 B 为光强系数,其中 $n=1,2,3$, $\varphi(t) = \phi(t) - \psi(t)$, $\phi(t)$ 为传感的声音信号, $\psi(t)$ 为环境变化等产生的相位误差。将 3 路信号之和乘以 $-1/3$,再与每一路 I 分别相加去掉信号直流分量,可得:

$$\begin{cases} a = B\cos\varphi(t) \\ b = B\cos\left[\varphi(t) - \frac{2\pi}{3}\right] \\ c = B\cos\left[\varphi(t) - \frac{4\pi}{3}\right] \end{cases} \quad (2)$$

将 3 路去直流信号的每一路都与另外两路微分后的差值相乘,可以得到:

$$\begin{cases} d = a(\dot{b} - \dot{c}) = \sqrt{3}L^2\dot{\varphi}(t)\cos^2\varphi(t) \\ e = b(\dot{c} - \dot{a}) = \sqrt{3}B^2\dot{\varphi}(t)\cos^2\left[\varphi(t) - \frac{2\pi}{3}\right] \\ f = c(\dot{a} - \dot{b}) = \sqrt{3}B^2\dot{\varphi}(t)\cos^2\left[\varphi(t) - \frac{4\pi}{3}\right] \end{cases} \quad (3)$$

把 d, e, f 3 路信号相加可得:

$$Q = d + e + f = \frac{3\sqrt{3}B^2}{2}\dot{\varphi}(t) \quad (4)$$

由于(4)式中依然有不确定因子 B ,可以构建 3 路去直流信号的平方和:

$$\begin{cases} M = a^2 + b^2 + c^2 = \frac{3B^2}{2} \\ P = \frac{Q}{M} = \sqrt{3}\dot{\varphi}(t) \end{cases} \quad (5)$$

从而去掉 B 值的影响,最后对 P 进行积分就可以得到待解调信号。环境变化等产生的相位误差一般为缓慢变化量,通过设定好相关参量的高通滤波器可以

将其滤除^[5],从而最终得到完整解调的声音信号。

光纤空气声传收音装置是利用声源通过空气传播声波到收音弹性膜片上,弹性膜片在声压的作用下发生弹性形变,进而在膜片表面上形成相应的应力应变。将 Michelson 干涉仪信号臂 S 的光纤(见图 2a)绕圈粘结缠绕于收音弹性膜片上,同时对参考臂 R 进行消敏处理。由激光器光源发出的光分别经过两个干涉臂,膜片的应力变化使得光纤干涉仪信号臂的长度和折射率发生变化,从而导致干涉光的相位发生变化,最终表现为干涉光强度发生变化^[6-7]。

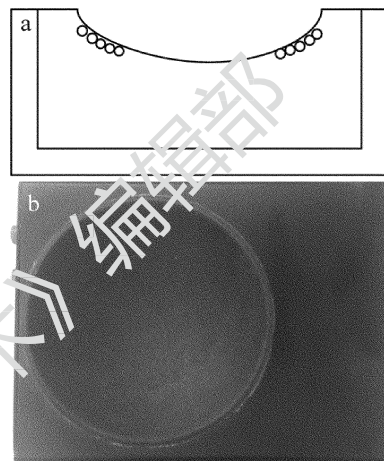


Fig. 2 a—section of fiber acoustic sensor b—shape of fiber acoustic sensor

收音装置如图 2b 所示,光纤粘结缠绕在用于专用于音响设备上的聚丙烯盆构造的整个收音弹性膜片上,利用隔音棉包裹参考臂光纤减小声音信号对参考臂的影响,采用金属材料作为传感器机箱使传感器能够适应较为恶劣电磁的工作环境。

光纤传感器中偏振状态对系统的影响非常大,在实际工程运用中,作者使用法拉第旋光镜 (Faraday rotator mirror, FRM) 法来抑制偏振诱导信号衰落^[8-9], FRM 法消除偏振衰落效果技术是在普通单模迈克尔逊干涉仪两臂各加一个 FRM,当其旋转角度为 45°时,使得反射光的偏振状态变化正好抵消入射光的偏振态变化,干涉仪的可见度保持为 1。这种方法结构相对简单、成本也较低,且可以得到良好的抗偏振衰落效果^[10]。

2 实验分析

3×3 耦合器相位解调光纤声音传感器探测的 3 路信号可以通过基于数字信号处理器 (digital signal processing, DSP) 或现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 等硬件构成的电路解调出原始声音信号^[11],但是为了可以对整个系统更方便直观地分析,本系统中采用了数据采集卡和 MATLAB 的软硬

件结合解调解决方法^[12]。

语音信号的频率一般在 300Hz ~ 4000Hz 范围内,测试时使用语音信号频率范围内的正弦波信号驱动音响,设定数据采集卡采样频率为 150kHz,满足奈奎斯特定律,将探测到的 3 路待解调信号数据读入电脑通过 MATLAB 处理。为了说明系统工作原理,分析误差对系统的影响等,对 1000Hz 频率信号情况进行了取例分析,根据 3 × 3 耦合器相位解调方式原理,3 路探测光电信号 V_1 , V_2 和 V_3 中任意两组信号应该有标准 120° 的相位差,以这两组信号分别为 x , y 坐标轴可以构建椭圆图表,即两组信号的李萨如图形,如图 3 所示。

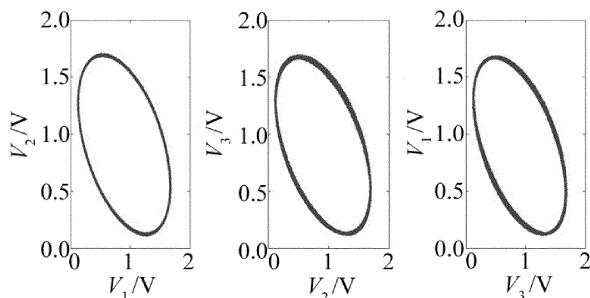


Fig. 3 Relationship of three output signals

由于受激光器光源功率变化、环境噪声影响、光电转化电路增益起伏、电路噪声及光器件的偏振相关性的影响^[13], (1) 式中各项系数会在小范围内随时间变化,这导致了如图 3 所示的相互关系椭圆图形呈现出一定的厚度,而非表现为一个单一细曲线的椭圆。对用实验数据所做椭圆图形进行最小二乘法数学拟合,可以得到相关拟合后椭圆参量,对比由表达式推出的参量方程,可以求出 3 路输出信号之间的平均相位差^[14]分别为: 117.93°, 120.21°, 121.85°, 由系统原理可知, 3 × 3 耦合器相位解调方法依赖于耦合器的特性在理想情况下输出 3 路光功率 1:1:1, 相位相差 120°, 但事实上, 由于耦合器制作工艺的问题以及光在传播过程中带来的偏振衰落和光强损耗等并不能保证耦合器 3 路输出的光信号分光比相等和相位差恒为 120°, 由参考文献可知, 相位差误差在 5% 的小范围内并不影响解调信号波形的完整性与准确性, 在较小的相位差误差范围情况下, 整个 3 × 3 耦合器相位解调系统依然能够符合仿真结果正常工作。对于实际工程使用中 3 × 3 耦合器的光功率分配也并非完全相等, 在小范围光功率分配不等情况下, 可以使用合适的匹配跨阻放大, 采用自动增益控制系统 (automatic gain control, AGC)、软件去直流后归一化等方法减小耦合器不理想等所造成的对解调声音信号的影响。

(1) 式中 3 路信号因为实际工程应用中各种参量

会出现不平衡的情况, 为了模拟参量变化对解调结果的影响, 由拟合算出的平均相位差和假设 5% 光功率误差设定仿真参量如下:

$$\begin{cases} I_1 = 0.95 + 0.95\cos[\varphi(t) - 117.93^\circ] \\ I_2 = 1 + \cos\varphi(t) \\ I_3 = 1.05 + 1.05\cos[\varphi(t) + 121.85^\circ] \end{cases} \quad (6)$$

仿真时使用 1000Hz 正弦波作为声音信号对光纤声音传感器系统进行 MATLAB 仿真^[15], 得到的仿真信号解调信号频谱和波形图如图 4 和图 5 所示。

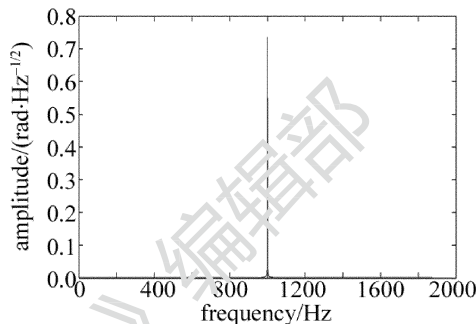


Fig. 4 Simulation spectrum of 1000kHz signal

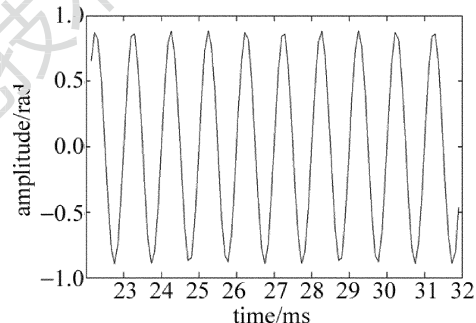


Fig. 5 Simulation waveform of 1000kHz signal

仿真结果说明: 环境噪声、器件干扰等造成的 3 路输出信号轻微不平衡并不影响 3 × 3 耦合器相位解调方法顺利解调出声音信号波形。

在实际系统测试中, 采用器件型号参量如下: 激光器的型号为 TRDFB-1550-PIA-FCAPC, 生产厂商为成都天润光电, 输出波长为 1550nm, PIN 光电二极管型号为 PDCS985-APH, 生产商为武汉电信器件有限公司, 其 1550nm 响应度为 0.94A/W。选定较普通安静的工作测试环境, 根据 (1) 式 ~ (5) 式编写解调软件程序, 通过软件解调^[12], 对于低频环境变化产生的相位误差可以通过设定合适的截止频率的高通滤波器滤除, 最终可得到如图 6 和图 7 所示频率为 1000Hz 的解调信号频率谱及波形曲线。

比较仿真结果与实际测试结果可知, 在 3 路探测信号两两相位差在 120° 左右较小范围内变化、直流项或者干涉条纹可见度在小范围波动情况下, 3 × 3 耦合器解调方法依然能够相对有效地解调出 1000Hz 声音

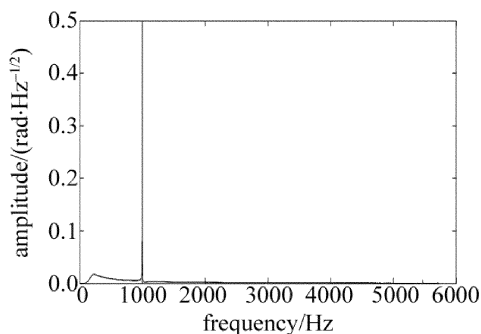


Fig. 6 The actual test spectrum of 1000kHz signal

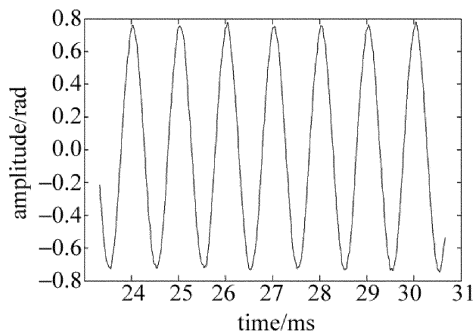


Fig. 7 The actual test waveform of 1000kHz signal

信号波形,说明 3×3 耦合器解调方法对光电器件、电路等的性能要求相对不是很严苛,比较容易达到工程实用应用要求,可以适用于某些特定需求环境。

3 结 论

研究制作了一种基于结合 3×3 耦合器相位解调方法与 Michelson 干涉仪的光纤声音传感器,利用最小二乘法拟合算出耦合器 3 路输出信号相位差分别为 117.93° , 120.21° , 121.85° , 和理论相位差 120° 偏差在很小范围内,采用自动功率控制和软件数据去直流归一化等方法减小了耦合器实际输出光功率分光比不同的影响。在实际测试中,采用了 $300\text{Hz} \sim 3000\text{Hz}$ 正弦波声音信号驱动音响,通过一系列软硬件解调能够还原声音正弦波信号波形,对 1000Hz 频率信号情况进行了取例分析,并将实际实验数据和波形与 MATLAB 模型仿真进行了对照,环境实验信号的频谱与波形与仿真相匹配,通过实验数据分析证明,光纤声音传感系统能够完整还原设计带宽内的声音信号。该光纤声音传感器系统可以用于煤矿等电磁环境较为恶劣的场所。

参 考 文 献

- [1] BUBEL G M, KRAUSE J, BICKTA B J, *et al.* Mechanical reliability of metallized optical fiber for hermetic terminations [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(10): 1488-1493.
- [2] TAN J R, LIU Y Z, HUANG L. Development of fiberoptic gyroscope [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 544-547 (in Chinese).
- [3] KOOK P, TVETEN A B. Passive stabilization scheme for fiber interferometers using 3×3 fiber directional couplers [J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 41(7): 616-618.
- [4] REN G, JIANG Sh, YAN Q Zh, *et al.* Location technology of fiber intrusion detection system based on Fox-Smith interferometer with 3×3 coupler [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4): 480-483 (in Chinese).
- [5] ZHANG X, KANG C, SUN J H. Demodulation method based on the 3×3 optical fiber coupler [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(5): 665-671 (in Chinese).
- [6] WANG Y J, LI F, XIAO H, *et al.* Sensitivity calculation of disk-type fiber-optic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1387-1392 (in Chinese).
- [7] WANG Y J, LI F, XIAO H, *et al.* Fiber optic sound sensor based on michelson interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1114-1117 (in Chinese).
- [8] WANG Y, WANG Z P, SUN S, *et al.* Effect of temperature characteristic of Faraday rotator on passively demodulated all-optical fiber current transformers [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(1): 206-210 (in Chinese).
- [9] TAN J, CHEN W M, FU Y M. Application of Jones matrix in the research of polarization effects of the distributed optic fiber sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(2): 120-125 (in Chinese).
- [10] WANG J F, WANG X, LUO H. Influence of rotation angle and working wavelengths of Faraday rotation mirror on single-mode fiber optics michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 1043-1046 (in Chinese).
- [11] WANG R, HAO X J, ZHOU H Ch, *et al.* Design of infrared signal detection circuit in a temperature calibration system [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 247-250 (in Chinese).
- [12] HE Y, LIU D M, SUN Q Z. Phase demodulation method of optic fiber sensor based on LabVIEW [J]. *Journal of Xinyang Normal University*, 2006, 19(1): 94-97 (in Chinese).
- [13] CHEN D S, XIAO L, CUI J, *et al.* Analysis of 3×3 coupler demodulation method for optical fiber interferometer and polarization fading [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(5): 523-525 (in Chinese).
- [14] HE J, XIAO H, FENG L, *et al.* Analysis of phase characteristics of fiber michelson interferometer based on a 3×3 coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1868-1873 (in Chinese).
- [15] WANG X, ZHANG Y, MA J, *et al.* Three road output demodulation simulation of fiber optical hydrophone [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(3): 75-78 (in Chinese).