

文章编号: 0258-7025(2009)08-2121-05

光纤干涉仪动态相移测量的新方法及应用

王泽锋 胡永明 孟洲 倪明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出了一种光纤干涉仪动态相移测量的新方法。该方法无需对光源进行调制,直接利用干涉信号的直流量和一次谐波分量,通过构造匹配函数的方法求解动态相移,实现了无源零差检测,而且具有信号解调简单、工作频带宽等特点。为了验证该方法的有效性,搭建了一个全保偏 Mach-Zehnder 光纤干涉仪系统,对压电陶瓷(PZT)产生的模拟动态相移进行求解。结果表明,求解得到的动态相移幅度与加载在 PZT 上的电压具有很好的线性关系,这与 PZT 的低频小信号特性一致。最后将该方法用于干涉型光纤水听器声压相位灵敏度频响的测量,实验结果与采用相位载波调制解调方法获得的结果基本吻合。

关键词 光纤干涉仪;无源零差;动态相移;声压灵敏度

中图分类号 TH744 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2121

New Measurement Method for Dynamic Phase Changes in Fiber Interferometer and Its Applications

Wang Zefeng Hu Yongming Meng Zhou Ni Ming

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A new measurement method for dynamic phase changes in fiber interferometers is demonstrated. The amplitude of the dynamic phase is obtained directly from the zero and fundamental frequency components of the fiber interferometer output by method of constructing match-functions without modulating the laser. It has the advantages of no active element in the interferometer, simple signal demodulation and large operating bandwidth. To test this new method, an all polarization-maintaining Mach-Zehnder fiber interferometer is constructed, and the simulation dynamic phase change induced by PZT is measured. Experimental results show that the calculated amplitude of the dynamic phase shift is a good linear function of the voltage applied to the PZT, which accords well with PZT's properties of low-frequency and small amplitude. This method is applied to the measurement for the acoustic sensitivity of interferometric fiber-optic hydrophones, and the test results are in agreement with the results obtained by phase generated carrier method.

Key words fiber-optic interferometer; passive homodyne; dynamic phase changes; acoustic sensitivity

1 引言

光学干涉是一种高灵敏度的相位检测方法,被人们广泛研究,特别是光纤干涉仪的出现,使得干涉法的应用获得了极大的发展^[1,2]。因其具有灵敏度

高、结构设计灵活、抗电磁干扰、耐高温高压等优良的特性,被广泛应用到温度、应力应变、电磁场、水声、地震波等的测量中^[1~6]。由光学干涉理论可知,光纤干涉仪输出的干涉光强是一个关于两臂相位差

收稿日期: 2008-10-22; 收到修改稿日期: 2008-12-19

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z121)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0925)和国防科技大学优秀博士研究生创新基金(0623)资助课题。

作者简介: 王泽锋(1980—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: hotrosemaths@163.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

的余弦变化量,其中相位差由一个变化非常缓慢的大幅度随机相移(主要由环境温度变化引起)和待测物理量引起的快速变化的动态相移组成^[1~7]。由于受随机相移的影响,干涉光强的幅度会随机涨落,使得动态相移的测量非常困难。为了正确获取动态相移,提出了许多检测方法并得到了验证^[8,9],主要包括相位跟踪检测,3×3耦合器法,相位载波(PGC)调制解调以及各种外差法。这些方法要么无法实现无源或宽带检测,要么需要复杂的光学系统或解调算法,都不能同时满足某些应用场合对于信号检测方法简单、无源、宽带的要求。

本文直接利用干涉信号的直流量和一次谐波分量,通过构造匹配函数的方法巧妙地实现了动态相移的求解。该方法无需对光源进行调制,干涉仪中无声光移频器,实现了无源零差检测,同时信号解调算法简单,检测频带宽。理论上,该方法可以用于任意幅度的动态相移求解,而且不受随机相移的影响。为了验证该方法,搭建了一个全保偏 Mach-

Zehnder 光纤干涉仪系统,利用该方法对压电陶瓷(PZT)产生的模拟动态相移进行求解。最后,将该方法用于干涉型光纤水听器声压相位灵敏度频响的测量,获得了较好的实验结果。

2 基本原理

当光纤干涉仪受到单频、正弦变化的物理量作用时,输出的干涉光信号经光电探测器转换成电压信号后可以写成

$$V(t) = A + B\cos[c_s \sin(\omega_s t + \varphi_s) + \varphi_0(t)], \quad (1)$$

式中, A, B 为与输入光功率及光电探测器的转换效率成正比的常量, B 还与干涉仪的相干系数有关, c_s 为待测信号引起的最大相移, ω_s 为信号的角频率, φ_s 为相位常数, $\varphi_0(t)$ 为变化非常缓慢的随机相移,它主要决定于环境的温度变化。将(1)式用第一类贝塞耳(Bessel)函数展开可得

$$V(t) = A + BJ_0(c_s)\cos\varphi_0(t) + \left\{ 2B \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(c_s)\cos[2k(\omega_s t + \varphi_s)] \right\} \cos\varphi_0(t) - \left\{ 2B \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k-1}(c_s)\sin[(2k-1)(\omega_s t + \varphi_s)] \right\} \sin\varphi_0(t), \quad (2)$$

式中, $J_k(c_s)$ 为第一类 k 阶 Bessel 函数。由于 $\varphi_0(t)$ 变化非常缓慢,因此在时间足够短的一段数据上,可以认为 $\sin\varphi_0(t)$ 和 $\cos\varphi_0(t)$ 为常数。由(2)式容易获取其近似直流量和一次谐波量,幅度分别记为 V_{dc} 和 V_{ac} ,则有

$$V_{dc} = A + BJ_0(c_s)\cos\varphi_0(t), \quad (3)$$

$$V_{ac} = 2BJ_1(c_s)\sin\varphi_0(t), \quad (4)$$

若 A, B 已知,则利用(3)式和(4)式可以求解出信号引起的相移幅度 c_s 。一般的求解方法为,假设信号幅度 $c_s \ll 1$,即有 $J_0(c_s) \approx 1$ 和 $J_1(c_s) \approx c_s/2$,然后利用(3)式可以求解出随机相移 $\varphi_0(t)$,将其代入(4)式即可得到信号幅度 c_s 。这种处理方法只适用于信号幅度非常小且 $\varphi_0(t)$ 在正交工作点附近的情况。随着信号幅度和随机相移偏离量(相对正交工作点)的增加,求解误差会急剧上升。

为了克服传统方法的不足,提高系统的动态范围并减少随机相移 $\varphi_0(t)$ 的影响,提出了一种全新的求解算法。利用基本三角函数关系式 $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$,由(3)和(4)式可得

$$G^2 J_0^2(c_s) + H^2 J_1^2(c_s) = J_0^2(c_s) J_1^2(c_s), \quad (5)$$

式中, $H = (V_{dc} - A)/B, G = V_{ac}/(2B)$ 。在计算机中利用数值的方法,可以快速得到方程(5)在某一区间上的所有非零解,分别记为 x_1, x_2, \dots, x_N 。将每一个解代入(3)式或(4)式,可以得到对应的随机相移,分别记为 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ 。利用这 N 组参数 (x_n, φ_n) 可以构造 N 组匹配函数

$$V_n(t) = A + B\cos(x_n \sin \omega_s t + \varphi_n), \quad (6)$$

其中, $n = 1, 2, \dots, N$ 。求出每组函数 $V_n(t)$ 与实际 $V(t)$ 的相关系数,分别记为 c_1, c_2, \dots, c_N 。假设最大的相关系数为 c_i ,其对应的参数为 (x_i, φ_i) ,则有 $c_s = x_i, \varphi_0(t) = \varphi_i$ 。

3 实验验证

3.1 实验结果

为了验证新算法的有效性,搭建了如图1所示的全保偏 Mach-Zehnder 光纤干涉仪实验系统。干涉仪的信号臂绕在一个 PZT 上,信号发生器输出正弦电压信号加载在 PZT 上,用以产生模拟的动态相移。光电探测器输出的信号经数字滤波器进行放大滤波后,被采集到计算机做相关的快速傅里叶变换(FFT)、数字滤

波、动态相移求解等处理。实验使用的光源为窄线宽环形光纤激光器,中心波长为 1550 nm。

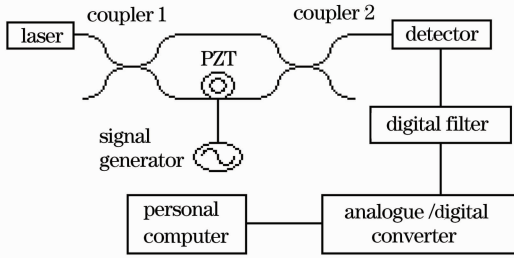


图 1 Mach-Zehnder 光纤干涉仪实验原理图

Fig. 1 Experimental setup of Mach-Zehnder fiber interferometer

由分析可知,求解动态相移幅度必须知道 A, B 的值。通过加载一个高频、大幅度、线性电压信号到 PZT^[10],可以得到 A, B 。实验中,对 B 值的稳定性进行测试,结果如图 2 所示,其中采样间隔为 15 s,总的测试时间约为 2 h。从图 2 中可以看到, B 的均值约为 0.794,2 h 内波动约为 $\pm 3.76\%$ 。由于采用了全保偏光纤,偏振态变化的影响可以忽略,因此可以认为 B 值的波动就等于光源功率的变化。

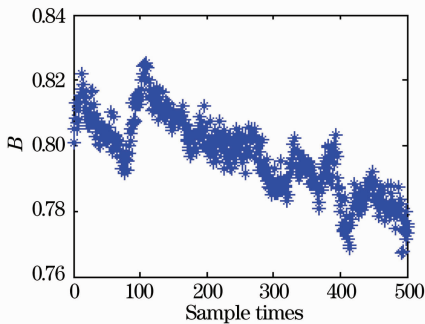


图 2 实际测得的 B 值波动

Fig. 2 Measured fluctuation of B

基于软件 LabView 和 Matlab 编写了数据采集、处理、显示程序,利用介绍的方法对 PZT 产生的动态相移 c_s 进行求解,结果如图 3 和图 4 所示,实验中加载在 PZT 上的电压信号频率为 2.5 kHz。其中,图 3 为 c_s 的求解稳定性,采样间隔为 20 s,总的测试时间约为 1.5 h,从图 3 中可知求解得到的动态相移幅度 c_s 均值约为 1.3 rad,波动为 $\pm 7.69\%$,约为光源功率波动的 2 倍。图 4 是分别采用传统方法和提出的新方法求解得到的动态相移幅度 c_s 与加载在 PZT 上的电压幅度之间的关系,其中传统算法对应的随机相移变化范围在正交工作点约 5° 以内。由图 4 可见,传统算法只适用于动态相移幅度 c_s 非常小的情况,当 $c_s > 0.4$ rad 后求解误差急剧上升;而采用介绍的新方法,当加载在 PZT 上的电压

幅度达到 2 V,解调信号幅度 $c_s \approx 4.52$ rad 时,二者还保持很好的线性关系,这与 PZT 的低频、小信号特性非常吻合。从图 4 中还可以计算得到 PZT 的相位调制系数(单位电压产生的相移幅度)约为 2.25 rad/V。

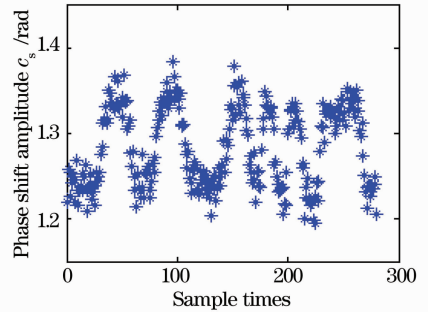


图 3 动态相移幅度 c_s 的求解稳定性

Fig. 3 Stability of calculated dynamic phase shift c_s

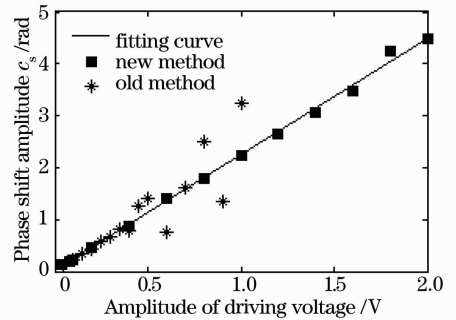


图 4 动态相移幅度 c_s 与 PZT 调制电压的关系

Fig. 4 Experimental phase shift c_s as a function of voltage applied to the PZT

3.2 误差分析

由于计算机数值求解的精度可以很高,因此利用(5)式求解动态相移幅度 c_s 带来的误差可以忽略不计,信号解调精度主要受 A, B 波动的影响。假设实际的动态相移幅度和随机相移分别为 c_{s0} 和 φ_0 ,同时由于是全保偏系统,可以认为 A, B 的相对变化幅度都等于光源功率的波动,记为 Δ ,则由(3)~(5)式可得

$$H^2 \approx (1 \pm 2\Delta)\kappa_0^2 \pm 2\Delta \cdot \kappa_0/k, \quad (7)$$

$$G^2 \approx (1 \pm 2\Delta)\kappa_1^2, \quad (8)$$

其中, $k = B/A$ 为干涉仪的相干系数, $\kappa_0 = J_0(c_{s0})\cos\varphi_0$, $\kappa_1 = J_1(c_{s0})\sin\varphi_0$ 。将(7)式和(8)式代入(5)式可得动态相移幅度的测量值 c_s 与实际值 c_{s0} 以及随机相移 φ_0 之间的关系,然后进行仿真,结果如图 5 和表 1 所示。其中,图 5 假设 A, B 不变,即 $\Delta = 0$,随机相移 φ_0 分别取 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 。由图 5 可见,动态相移的求解结果不再受随机相移 φ_0 的影响。表 1 为不同 Δ 对应的动态相移求解结果 c_s ,仿真时取

$\varphi_0 = 60^\circ, c_{s0}$ 分别取 0.01, 0.1, 1.0 和 4 rad。由表 1 可见, 求解的相对误差 (c_s 与 c_{s0} 的差的绝对值比上 c_{s0}) 约等于 2Δ , 即为光源功率波动的 2 倍, 与实验结果一致。

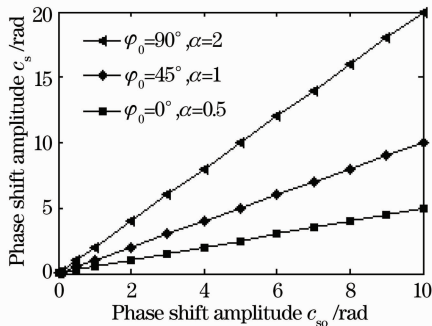


图 5 不同 φ_0 时 c_s 与 c_{s0} 的关系

Fig. 5 Relations of c_s and c_{s0} with different φ_0

表 1 c_s 随 c_{s0}, Δ 的变化

Tab. 1 Relations of c_s, c_{s0} and Δ

Δ	c_{s0}/rad			
	0.01	0.1	1.0	4
0.01	0.0102	0.102	1.01	4.07
0.02	0.0104	0.096	0.97	3.90
0.03	0.0094	0.106	1.04	3.78
0.04	0.0109	0.109	0.94	4.45
0.05	0.0089	0.089	1.07	3.65
0.08	0.0119	0.119	1.13	4.74
0.10	0.0125	0.126	1.17	4.90

理论上, 介绍的方法可以用于任意幅度的动态相移测量, 而且不受随机相移的影响。实际上, 随着相移幅度的增大, $J_0^2(x)J_1^2(x)$ 的值越来越小, 最后趋近于零, 如图 6 所示。这使得测量误差会随着相移幅度的增加而变大, 最后无法获得正确的求解结果。实际测量结果表明, 当相移幅度大于 10 rad 时, 将得到错误的求解结果。此外, 当随机相移位于 0° 和 90° 附近时, 由于信号幅度非常小, 使得测量误差急剧上升。因此实际测量时, 可以通过多次测量

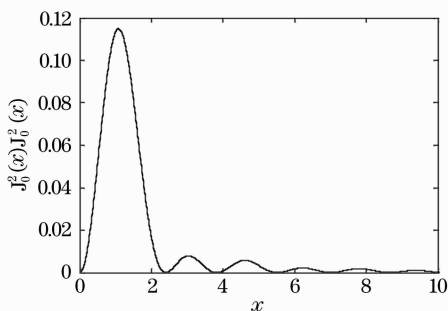


图 6 函数 $J_0^2(x)J_1^2(x)$

Fig. 6 Function of $J_0^2(x)J_1^2(x)$

求平均的方法来减小随机相移的影响。

4 应 用

利用提出的新方法, 对于干涉型光纤水听器的声压灵敏度频响进行了测量, 实验设计如图 7 所示。光纤水听器的声压灵敏度通过与标准压电水听器比较的方法获得, 实验中选用的压电水听器是中国船舶重工集团公司第 715 所生产的型号为 RHS3 的标定用水听器, 响应非常平坦。信号源输出的单频正弦信号经功率放大器后驱动扬声器, 从而在充水驻波罐中产生测量用的准平面声波。受到声压的作用, 光纤水听器产生一个干涉光信号, 经光电探测器转换成电压信号, 与压电水听器信号一起被滤波后经数据采集系统转换成离散的数字信号, 然后输送到计算机进行相关的处理。

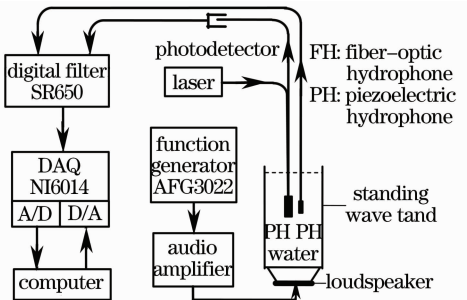


图 7 光纤水听器声压灵敏度测量系统

Fig. 7 Measurement setup for the acoustic sensitivity of fiber-optic hydrophone

受驻波罐有效工作频带的限制, 利用介绍的新方法在频率范围 20~5000 Hz 上对光纤水听器的声压灵敏度频响进行了测试, 并与标准的 PGC 调制解调系统测得的结果进行了比较, 如图 8 所示。星号和小圆圈标注的曲线分别是采用介绍的新方法和 PGC 解调法测量的结果。其中, PGC 解调系统的光源调制频率为 6250 Hz, 由 PGC 解调的原理可知, 其极限测量带宽为 3125 Hz^[10], 实际测试结果显示其有效带宽为 2500 Hz, 因此采用 PGC 法测量的实际频率范围为 20~2500 Hz。采用新方法测量时, 信号幅度尽量控制在 2 rad 以内, 然后对于每个测量频点采取多次测量取平均的方法减小随机相移的影响, 以提高测量精度。

由图 8 可见, 除低频波动稍大外, 采用新方法测量与采用 PGC 法测量的结果基本一致。光纤水听器的声压灵敏度平均值约为 -140 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa), 20~300 Hz 上频响波动约为 ± 1.25 dB, 而 300~5000 Hz 上频响波动约为 ± 0.45 dB。由基

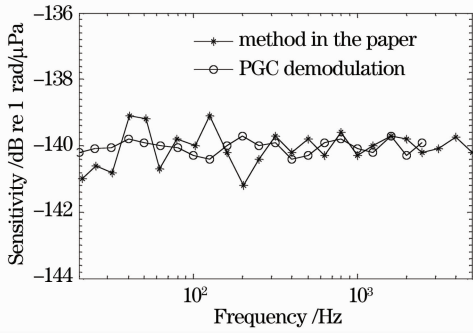


图 8 光纤水听器声压灵敏度频响

Fig. 8 Acoustic sensitivity frequency response of fiber-optic hydrophone

本原理可知,介绍的新方法适合于随机相移变化速率远小于信号频率的情况。为了保证随机相移近似为常量,用于信号处理的数据序列时间必须足够短。随着被测信号频率的降低,有效数据序列对应的信号周期数不断减少,这是造成低频测量误差偏低的主要原因。光纤水听器声压灵敏度频响测量结果进一步验证了新方法的有效性。

5 结 论

提出了光纤干涉仪动态相移测量的一种简单可行的新方法。该方法直接利用干涉信号的直流量和一次谐波分量,通过构造匹配函数的方法求解动态相移,实现了无源、零差、宽带测量,该方法非常简单,便于实现,但是需要通过多次测量求平均的方法来减少随机误差的影响,因此测量速度相对较慢,不太适合于一些需要实时监测的应用场合。

参 考 文 献

1 T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge *et al.*. Optical fiber sensor technology [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1982, **30**(4): 472~511

2 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology [J]. *IEE Proc. Rador, Sonar, Navig.*, 1996, **143**(3): 204~208

3 G. A. Cranch, P. J. Nash, C. K. Kirkendall *et al.*. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(1): 19~30

4 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 415~417

孟 洲,胡永明,熊水东等. 全保偏光纤水听器阵列 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 415~417

5 Zhang Xueliang, Zhou Xiaojun, Hu Yongming. All polarization maintaining fiber earth magnetic field sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1516~1519

张学亮,周晓军,胡永明. 全保偏光纤地磁传感器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1516~1519

6 Luo Hong, Xiong Shuidong, Hu Yongming *et al.*. Research on three-component all polarization maintaining fiber optic accelerometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1382~1386

罗 洪,熊水东,胡永明等. 三分量全保偏光纤加速度传感器的研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1382~1386

7 A. Dandridge, A. Tveten, T. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1647~1653

8 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. A $J_0 \sim J_1$ method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric fiber sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 105~108

王泽锋,罗 洪,熊水东等. 一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 $J_0 \sim J_1$ 法 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 105~108

9 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. Phase compensating detection method of interferometric fiber-optic hydrophones based on tuning the frequency of the laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 654~658

王泽锋,罗 洪,熊水东等. 基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 654~658

10 Wang Zefeng, Hu Yongming Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 92~98

王泽锋,胡永明,孟 洲等. 干涉型光纤水听器相位载波调制-解调中信号混叠产生的机理及解决方案 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 92~98