

文章编号: 0258-7025(2007)01-0105-04

一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 J_0 - J_1 法

王泽锋, 罗 洪, 熊水东, 倪 明, 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出了一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 J_0 - J_1 法, 实现了无源零差检测, 而且信号解调算法简单, 检测频带宽。详细介绍了该方法的基本检测原理, 并对解调误差进行了理论分析与仿真, 得出了系统能够检测的最大动态相移幅度与干涉仪的工作点允许变化的范围相互制约的结论。编写了实时的信号采集、处理程序, 对某一干涉型光纤水听器探头的声压灵敏度进行了测量。在频带 20~1300 Hz 上, 平均声压灵敏度为 -162 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa), 波动 $< \pm 1.0$ dB, 单频点 500 Hz 的灵敏度变化 $< \pm 0.5$ dB, 与采用相位载波 (PGC) 调制解调法测量的结果基本一致, 验证了 J_0 - J_1 法的可行性。

关键词 测量; 光纤传感器; 信号检测; 无源零差; 工作点控制; 相位载波调制解调

中图分类号 TB 212.14 文献标识码 A

A J_0 - J_1 Method for Measurement of Dynamic Phase Changes in an Interferometric Fiber Sensor

WANG Ze-feng, LUO Hong, XIONG Shui-dong, NI Ming, HU Yong-ming

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

Abstract A J_0 - J_1 method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric optical fiber sensor is described. This method has the advantages of no electric elements in the sensing head and the simplicity of signal processing. The detection principle of this method is introduced in details. The demodulation error is analyzed and simulated theoretically. The measurable amplitude of the dynamic phase change and the permitted varying range of the work-point restrict each other. A system of data acquisition and processing is programmed, and an interferometric fiber-optic hydrophone is tested. The average acoustic pressure sensitivity is -162 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa) over the frequency range of 20 Hz to 1300 Hz, the fluctuation is smaller than ± 1.0 dB, and the change at 500 Hz is smaller than ± 0.5 dB, which accords well with the results obtained with the method of phase generated carrier (PGC) modulation and demodulation. The experimental results prove that this J_0 - J_1 method is feasible.

Key words measurement; fiber-optic sensors; signal detection; passive homodyne; work point control; phase generated carrier modulation and demodulation

1 引言

自 20 世纪 70 年代以来, 光纤传感器作为一门新的技术日益受到人们的重视。特别是基于相干检

测技术的干涉型光纤传感器, 因其灵敏度高、动态范围大且便于复用, 被广泛应用到温度、电场、磁场、水声、地震波等的测量中^[1~7]。

当光纤受到外界物理场的作用时, 干涉仪输出

收稿日期: 2006-03-13; 收到修改稿日期: 2006-05-25

作者简介: 王泽锋 (1980—), 男, 湖南临武人, 博士研究生, 主要从事光纤信息技术和光纤传感技术的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com

导师简介: 胡永明 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤信息技术、光纤光栅的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

一个相位调制信号,通过检测相位的变化,就可获得外界物理场的信息。由于受到温度变化、压力波动、机械抖动等因素的影响,干涉仪两臂的相位差会随机漂移,从而引起信号幅度的随机涨落,即所谓的相位衰落现象^[1]。为了解决干涉型光纤传感器相位随机漂移的问题,一般有两种方案。一种是对相位进行有源补偿,让系统一直工作在最灵敏的区域,称为主动相位补偿^[1,4];另一种是用一个检测信号频带之外的高频、大幅度载波信号对相位进行调制,通过一定的算法可以实现信号的解调,称为相位载波(PGC)调制解调^[8~10]。主动相位补偿法操作简单,但由于传感部分含有源器件,降低了系统的可靠性,在许多应用场合是不可取的。相位载波调制解调实现了传感部分的全光纤化和解调部分的数字化^[8],但解调算法复杂,而且受光源调制频率的限制,信号检测的频带宽度有限,无法满足某些应用场合对于信号检测方法简单、宽频的要求。

本文提出了一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 J_0 - J_1 新方法。用一个大幅度的低频信号对光源进行调制,虽然不能保证系统一直工作在最灵敏的区域,但避免了长时间处于非灵敏区,而且可以对光源功率的漂移进行补偿。然后利用干涉信号的直流分量和一次谐波分量就可实现动态相移的测量。与有源相位补偿法相比,传感部分不含有源器件,实现了无源检测;与相位载波调制解调法相比,对光源和调制源的要求很低,且解调算法简单、检测频带宽。

2 J_0 - J_1 法的基本原理

如图 1 所示,用一个低频的大幅度余弦信号对光源进行调制,则当光纤受到外界物理场作用时,光电探测器输出的信号为

$$V = A + B\cos[\varphi_s + \varphi_0 + \varphi_n + C_m \cos(\omega_m t)], \quad (1)$$

式中 A, B 为与输入光功率成正比的常量, B 还与干涉仪的相干系数有关; C_m, ω_m 分别为调制信号产生

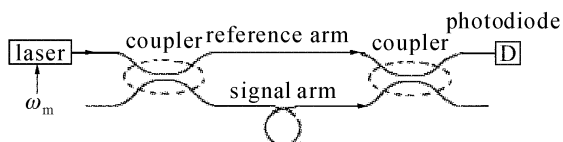


图 1 J_0 - J_1 法信号检测的光路示意图

Fig. 1 Optical configuration of J_0 - J_1 method

的最大相移和调制信号的角频率; φ_s 为被测量引起的相位变化; φ_0 为干涉仪两臂的初始相位差; φ_n 为各种噪声(主要包括温度变化、压力波动、机械抖动等)引起的随机相位变化。

若定义系统的工作点为

$$\varphi_p = \varphi_0 + \varphi_n + C_m \cos(\omega_m t), \quad (2)$$

则(1)式可以写成

$$V = A + B\cos(\varphi_s + \varphi_p). \quad (3)$$

假设待测信号为单频正弦信号,即有 $\varphi_s = C_s \sin\omega_s t$, C_s 为待测信号引起相移的最大值, ω_s 为待测信号的角频率。将它代入(3)式且用第一类贝塞耳函数展开,得到

$$V = A + B\{[J_0(C_s) + 2\sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(C_s)\cos 2k\omega_s t]\cos\varphi_p - 2[\sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(C_s)\sin(2k+1)\omega_s t]\sin\varphi_p\}, \quad (4)$$

式中 $J_k(C)$ 为第一类 k 阶贝塞耳函数。对(4)式低通滤波,去掉所有倍频项,得到

$$V = A + BJ_0(C_s)\cos\varphi_p - 2BJ_1(C_s)\sin\varphi_p\sin\omega_s t. \quad (5)$$

由于 φ_n 是一个低频信号,若 $\omega_m \ll \omega_s$, 则 φ_p 也是一个变化非常缓慢的信号。因此,在足够短的时间里可以认为 φ_p 是个常数,此时(5)式近似为一个含直流量的正弦信号,频率与待测信号相同。由(5)式,容易得到它的直流量和交流量,分别记为 V_D, V_A

$$V_D = A + BJ_0(C_s)\cos\varphi_p, \quad (6)$$

$$V_A = 2BJ_1(C_s)\sin\varphi_p, \quad (7)$$

当满足 $C_m > \pi$ 时,可采集足够长的一段数据,取出一组相邻的极大极小值,分别记为 V_{\max}, V_{\min} , 由(1)式可知 $V_{\max} = A + B, V_{\min} = A - B$, 因此有

$$A = (V_{\max} + V_{\min})/2, \quad B = (V_{\max} - V_{\min})/2, \quad (8)$$

求得 A, B 后,代入(6),(7)式就可得到相移幅度 C_s 和工作点 φ_p 。具体的求解过程为:

假设 $J_0(C_s) \approx 1$ (由后面的误差分析可知,只要 φ_p 和 C_s 满足一定的条件,这种假设是合理的),则由(6)式以及关系式 $\cos^2\varphi_p + \sin^2\varphi_p = 1$ 容易得到

$$\sin\varphi_p = \sqrt{1 - (V_D - A)^2/B^2}, \quad (9)$$

将(9)式代入(7)式,且只保留一阶贝塞耳函数的前三项,得到

$$C_s^5 - 24C_s^3 + 192C_s - P_0 = 0, \quad (10)$$

$$P_0 = 192V_A / \sqrt{B^2 - (V_D - A)^2}, \quad (11)$$

通过求解(10)式即可得到动态相移幅度 C_s 。

3 误差分析

假设真实的信号幅度和工作点分别为 C_{s0}, φ_{p0} ，那么由(6),(7)式可以得到真实的信号直流分量和交流分量,分别记为 V_D^0 和 V_A^0

$$V_D^0 = A + BJ_0(C_{s0})\cos\varphi_{p0}, \quad (12)$$

$$V_A^0 = 2BJ_1(C_{s0})\sin\varphi_{p0}, \quad (13)$$

由(9),(12),(13)式可得

$$\sin\varphi_p = \sqrt{1 - [J_0(C_s)\cos\varphi_{p0}]^2}, \quad (14)$$

(14)式即为假设 $J_0(C_s) \approx 1$ 时解调得到的工作点与真实工作点之间的关系,图2是其仿真结果。可以看出,小信号时,这种假设引入的工作点求解误差非常小;随着信号幅度的增大,只要将工作点控制在 $\pi/2$ 附近一定的范围内,误差还是很小。因此,只要信号幅度不是太大,这种假设是合理的。

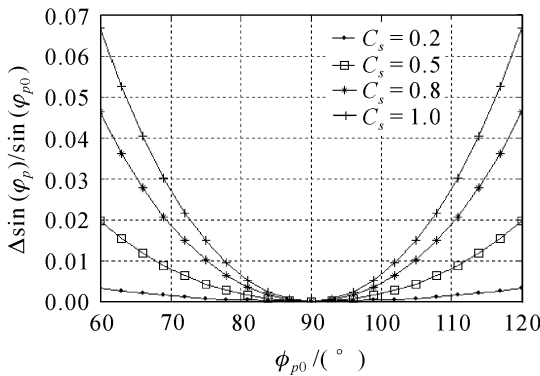


图2 取 $J_0(C_s) \approx 1$ 引入的误差与信号幅度、工作点的关系

Fig. 2 Relation of C_s, φ_p and error introduced by $J_0(C_s) \approx 1$

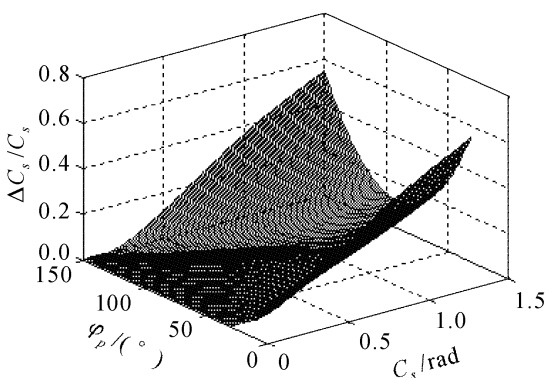


图3 相对测量误差 $\Delta C_s/C_s$ 与信号幅度 C_s 、工作点 φ_p 的关系

Fig. 3 Relation of $\Delta C_s/C_s, C_s$ and φ_p

将(12),(13)式代入(11)式得到

$$P_0 = \frac{384J_1(C_{s0})\sin\varphi_{p0}}{\sqrt{1 - [J_0(C_{s0})\cos\varphi_{p0}]^2}}, \quad (15)$$

再将(15)式代入(10)式即可得到信号幅度的测量值

C_s 与真实值 C_{s0} 以及工作点 φ_p 之间的关系,图3是其仿真的结果,其中 $\Delta C_s = |C_s - C_{s0}|$ 。可以看到,当误差一定时,相移幅度越小,工作点可以变化的范围就越大;相反,相移幅度越大,特别是接近1时,工作点必须控制在 $\pi/2$ 附近很小的范围内,否则误差会急剧增加。

4 实验及结果

为了验证 J_0 - J_1 法的可行性,搭建了图4所示的测量系统,并用 Labview 结合 Matlab 编写了实时的数据采集、处理程序,利用与标准压电水听器比较的方法对某一干涉型光纤水听器的声压灵敏度 M_p 进行了测量^[11],结果如图5和图6所示。图5中3条灵敏度频响曲线分别对应大信号和小信号下 J_0 - J_1 法测量的结果以及采用相位载波调制解调法测量的结果。相位载波调制解调系统的光源调制频率为6.25 kHz,由相位载波解调原理可知,它的有效检测频带约为几十赫兹到1300 Hz^[10]。在频带 20~1300 Hz上,三条曲线非常吻合,平均声压灵敏度约为 -162 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa),频响波动 $< \pm 1.0$ dB,与同类型的水听器在国防水声一级计量站标定的结果基本一致。受声压罐高频发声质量

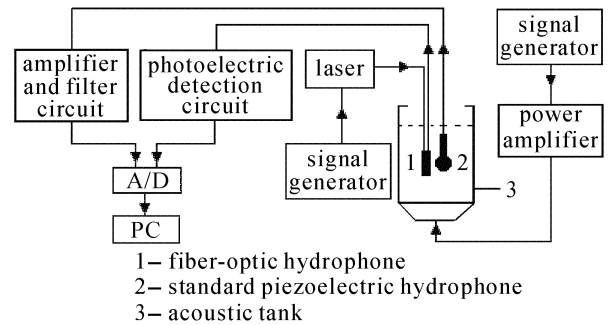


图4 光纤水听器声压灵敏度测量的实验框图
Fig. 4 Experimental diagram of test for acoustic pressure sensitivity of fiber-optic hydrophone

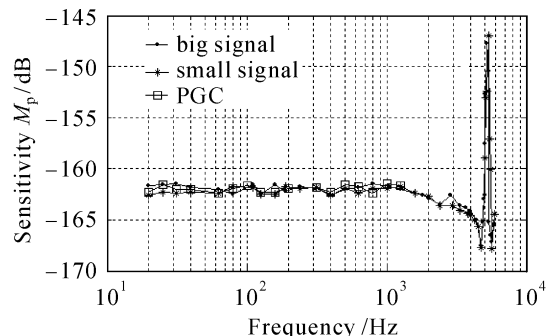


图5 光纤水听器声压灵敏度 M_p 频响图
Fig. 5 Frequency response of acoustic pressure sensitivity M_p of fiber-optic hydrophone

的影响,高频对应的频响波动变大。图中峰值对应的频率约为5.3 kHz,是探头结构的一阶共振频率,与有限元仿真的结果5.36 kHz非常吻合^[12]。图6中500 Hz对应的灵敏度稳定性波动 $< \pm 0.5$ dB,基本满足国军标对光纤水听器灵敏度测量的要求。

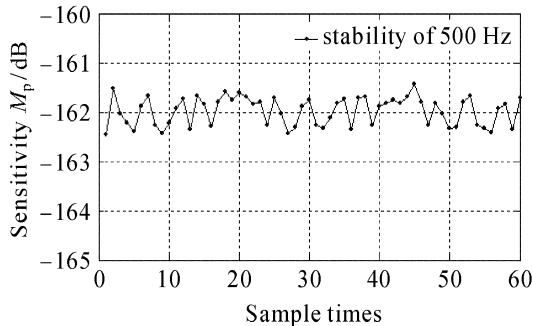


图6 光纤水听器声压灵敏度 M_p 稳定性波动图

Fig. 6 Stability of acoustic pressure sensitivity M_p of fiber-optic hydrophone

5 结 论

提出了一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 J_0 - J_1 法。该方法具有传感部分无源、信号解调算法简单、检测频带宽等优点,能被广泛应用到各种干涉型光纤传感器的信号检测中。通过对解调误差的理论分析与仿真,得出了系统能够检测的最大信号幅度与工作点允许变化的范围相互制约,这对于实验操作有指导意义。搭建了实验平台,编写了实验程序,对某一干涉型光纤水听器的声压灵敏度进行了测量,验证了 J_0 - J_1 法的可行性。

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 Techniq.*, 1982, **MTT-30**(4):472~511
- 2 G. A. Cranch, P. J. Nash, C. K. Kirkendall. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(1):19~30
- 3 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
- 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 Hu Yongming, Meng Zhou, Xiong Shuidong *et al.*. Development of interferometric all polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Acta Acustica*, 2003, **28**(2):155~158
胡永明,孟洲,熊水东等.干涉型全保偏光纤水听器阵列研制[J].声学学报,2003, **28**(2):155~158
- 6 Zhang Xueliang, Zhou Xiaojun, Hu Yongming *et al.*. All polarization maintaining fiber earth magnetic field sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1516~1519
张学亮,周晓军,胡永明等.全保偏光纤地磁传感器[J].中国激光,2005, **32**(11):1516~1519
- 7 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
- 8 Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone using phase-generated-carrier techniques [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11):1536~1540
曹家年,张立昆,李绪友等.干涉型光纤传感器相位载波调制及解决方案研究[J].光学学报,1999, **19**(11):1536~1540
- 9 Bo Linhou, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1324~1327
柏林厚,廖延彪,张敏等.干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J].光子学报,2005, **34**(9):1324~1327
- 10 Ni Ming, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Dynamic range of fiber-optic hydrophone using digitized phase generated carrier [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(2):33~37
倪明,胡永明,孟洲等.数字化PGC解调光纤水听器的动态范围[J].激光与光电子学进展,2005, **42**(2):33~37
- 11 Peng Baojin, Liao Mao, Liao Yanbiao *et al.*. Study on measuring sensitivity of fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1633~1638
彭保进,廖茂,廖延彪等.光纤水听器灵敏度测试研究[J].光子学报,2005, **34**(11):1633~1638
- 12 Li Qiushi, Luo Hong, Meng Zhou *et al.*. Research on the pressure sensitivity of the interferometric fiber-optic hydrophone with a concentric mandrel [J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2005, **19**(4):402~407
李秋实,罗红,孟洲等.同轴干涉型光纤水听器声压灵敏度特性分析[J].测量技术学报,2005, **19**(4):402~407