

文章编号: 0253-2239(2007)07-1156-5

用傅里叶变换谱稳定法布里-珀罗型 光纤水听器的工作点*

康 崇 黄宗军 佟成国 魏 坤

(哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍了闭环反馈控制法稳定法布里-珀罗型光纤水听器相位工作点的基本原理, 给出了法布里-珀罗型光纤水听器的声压相移灵敏度的表达式, 推导了法布里-珀罗干涉透射光强替代函数的傅里叶变换解析式, 用 MathCAD 软件绘制了该式对应的傅里叶变换谱线, 通过谱线可以直观地了解系统输出信号的组成和特点。在实验中用频谱分析仪器记录了法布里-珀罗型光纤水听器透射光强的傅里叶变换谱, 与软件仿真的理论谱线较好地吻合。通过实验进一步指出反馈临界点频率的选择方法, 检验了反馈控制法在法布里-珀罗型光纤水听器相位工作点稳定过程中的实际效果, 证明了该方法的可行性。

关键词: 光纤光学; 光纤水听器; 法布里-珀罗干涉; 傅里叶变换; 频谱

中图分类号: TP253 文献标识码: A

Operating Point Stabilization of Fabry-Pérot Optical Fiber Hydrophone Based on Fourier Transform Spectrum

Kang Chong Huang Zongjun Tong Chengguo Wei Kun

(School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: We introduce the fundamental of the phase operating point stabilization of Fabry-Pérot interference optical fiber hydrophone based on the loop-locked feedback control method, present the sound pressure phase-shift sensitivity expression of the Fabry-Pérot optical fiber hydrophone and deduce the Fourier transformation formula of transmission intensity substitution function of Fabry-Pérot interferometer. By MathCAD, we draw the Fourier transformation spectra of the above formula. Following the spectra, we can directly understand the composition and the characteristic of the system output signal. In experiments, the Fourier transformation spectral from transmission intensity of Fabry-Pérot optical fiber hydrophone is recorded by a spectral analysis instrument, which tallies well with the spectral drawn by MathCAD. Through the experiment, we further point out the choice method of the critical feedback point frequency, and examine the actual effect of the feedback control method in the stabilization of phase operating point process of Fabry-Pérot interference optical fiber hydrophone. The validity of the method is proved.

Key words: fiber optics; optical fiber hydrophone; Fabry-Pérot interference; Fourier transform; frequency spectrum

1 引 言

干涉式光纤水听器的研究已经脱离了方案论证阶段, 正向阻碍其实用化进程的各个关键性技术展开突破。法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 型光纤水听器属于多光束干涉^[1~4], 具有极高的光学相位灵敏度, 但其工作的稳定性不易控制, 相位工作点易受

到临场海况噪声的干扰、漂移, 进而无法正常工作^[5~7]。因此对法布里-珀罗型光纤水听器工作点进行反馈控制具有实际意义。对法布里-珀罗型光纤水听器的输出信号进行傅里叶变换, 可以得到光强谱分布, 从而了解布设海域各级海况噪声的构成和规律。对于水听器反馈临界频率选择、确定反馈

作者简介: 康 崇(1970—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术和光纤传感技术方面的研究。E-mail: kangchong@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-11-07

信号频率范围具有指导意义。

2 法布里-珀罗型光纤水听器的工作原理

2.1 透射光强系数

如图 1, 法布里-珀罗型光纤水听器谐振腔端的两个反射镜面 M_1 、 M_2 垂直于纤轴, M_1 、 M_2 的反射系数为 r_1 、 r_2 。令透射光强系数为 $T(\Phi)$ ^[8]:

$$T(\Phi) = \frac{1}{1 + F \sin^2(\Phi + \Delta\Phi)}, \quad (1)$$

式中 $F = \frac{4ar_1r_2}{(1-ar_1r_2)^2}$ ^[9,10], $\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}nl$ 为初相位, $\Delta\Phi$

为待测声压和噪声信号共同引起的微相移。 a 为法布里-珀罗腔损耗因子, 损耗较小时, $a \approx 1$ 。 n 为纤芯的折射率, l 为光腔长度, λ 为入射光波长。

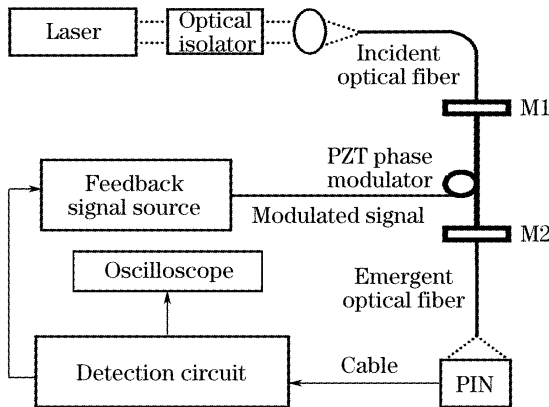


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

2.2 静态工作点

令 $\Phi = \Phi_0$ 时, $dT/d\Phi$ 达到最大, 即水听器相位灵敏度最大, 这就是水听器静态工作点的位置, 由 $d^2T/d\Phi^2|_{\Phi=\Phi_0} = 0$ 给出, 当 F 很大时, 略去 $1/F^2$ 项, 得

$$\Phi_0 = 2k\pi \pm \frac{1}{2} \arccos\left(1 - \frac{2}{3F}\right), \quad (2)$$

k 为整数。

2.3 闭环反馈控制法对静态工作点的稳定与选择

单纵模稳频激光器的出射光经光隔离器耦合至法布里-珀罗腔, 在腔内进行多光束干涉, 待测信号通过改变干涉相位调制出射光强, 经 PIN 结光电管光电转换, 进入检测电路, 经变频放大, 待测信号波形被示波器显示, 同时变频后的噪声信号进入反馈信号源, 经反相、积分放大等处理, 加载于压电陶瓷 (PZT), 使绕在压电陶瓷上部分法布里-珀罗腔的光纤产生与噪声调制反相的伸缩, 从而抵消噪声干扰, 稳定法布里-珀罗腔的工作点。

可调直流信号同时也加载于压电陶瓷, 以调节静态腔长 l_0 恰好使 $\Phi = \Phi_0$, 即水听器工作在相位灵敏度最大值处, 这就是静态工作点的选择调节。

2.4 声压相移灵敏度

根据拖曳线阵有关单元水听器的指向性要求, 实际设计的水听器的声学结构为中空圆柱形聚氯乙烯 (PVC) 壳体, 法布里-珀罗谐振腔段光纤紧绕在壳体外表面上, 采取水密设计, 保证壳内空气腔结构, 如图 2 所示。

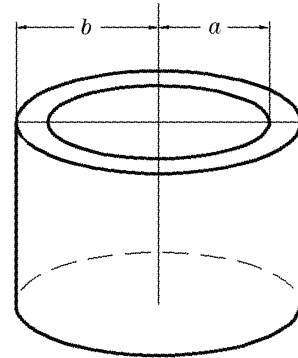


图 2 弹性圆柱薄壁壳体示意图

Fig. 2 Thin wall schematic of elastic column

为简化分析, 设壳体与光纤之间具有良好的弹性传递 (通过合理配比封灌胶体, 使其杨氏模量与聚氯乙烯壳体一致), 且两者之间应变连续, 从上述结构的准静态弹性理论分析得到法布里-珀罗型光纤水听器的声压相移灵敏度表达式^[11]

$$\frac{\Delta\Phi}{P(t)} = \frac{2\pi n l_0 b^2 (2\sigma - 1)}{\lambda Y (b^2 - a^2)} \times \left[1 - \frac{n^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \right], \quad (3)$$

式中 σ 为壳体材料的泊松系数, Y 为杨氏模量, a 、 b 分别为壳体的内、外半径。 p_{11} 、 p_{12} 为光纤的光弹系数, 对于石英光纤 $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.270$ 。 $P(t)$ 为壳体在水中所受压力, 由于流体静压力可以实测并通过静态工作点的调节消除, $P(t)$ 可理解为水中噪声与信号的混合声压, 表示为

$$P(t) = \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \phi_i), \quad (4)$$

式中 A_i 、 ω_i 、 ϕ_i 分别为水中某一简谐声压信号 i 的振幅、角频率和初相位。

3 透射光强的傅里叶变换

对于确定的弹性壳体, (3) 式右端等于常量, 令

$$H = \frac{2\pi n l_0 b^2 (2\sigma - 1)}{\lambda Y (b^2 - a^2)} \left[1 - \frac{n^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \right].$$

于是 $\Delta\Phi = H \cdot \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \phi_i)$ 。由 (2) 式, 当 F 很

大时, 工作点 $\Phi_0 \approx 2k\pi$ 。代入(1)式, 得

$$T[\Phi(t)] = \frac{1}{1 + F \sin^2 \left[H \cdot \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \right]}, \quad (5)$$

图 3 是由(5)式所描述的水听器在吸声水池中的实测时域输出信号, 横轴为扫描时间 t , 纵轴是光电压 V 。模拟声源的发射换能器中心频率是 400 Hz。从波形上看, 噪声干扰使得正弦波形的畸变比较严重。由于噪声和信号的复杂性, 从这个波形上不能了解背景噪声和待测信号分布情况, 因此对于反馈信号确定没有参考意义。

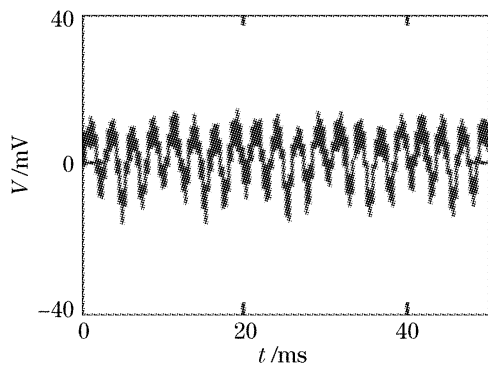


图 3 水听器输出信号实测波形

Fig. 3 Actually measured waveform of the output signal from hydrophone

为分析方便, 设水中仅有单一频率正弦信号, 且初相位为零, 即 $P(t) = A_0 \sin(\omega_0 t)$ 。对(5)式进行化简, 令

$$Z(t) = 1 + \frac{2}{F} - \frac{2}{F \cdot T[\Phi(t)]} = \cos[2HA_0 \cdot \sin(\omega_0 t)]. \quad (6)$$

由图 4 可见, $Z(t)$ 随着 $T[\Phi(t)]$ 单调递增, 在区间 $(0, 1)$ 范围内, $Z(t)$ 可以代表 $T[\Phi(t)]$ 的增减性。因此, 对 $T[\Phi(t)]$ 进行的变换和讨论可以转而由 $Z(t)$ 进行。对 $Z(t)$ 进行傅里叶变换, 得像函数

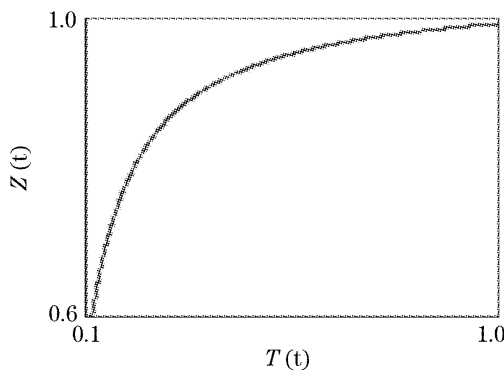


图 4 $Z(t)$ 与 $T[\Phi(t)]$ 的关系曲线

Fig. 4 Relationship between $Z(t)$ and $T[\Phi(t)]$

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(2HA_0) [\delta(\omega - n\omega_0) + \delta(\omega + n\omega_0)], \quad (7)$$

式中 $J_n(x)$ 为 n 阶贝塞尔函数。

用 MathCAD 作(7)式对应的谱线图, 如图 5 所示。任取 $\omega_0 = 400$ Hz, $2HA_0 \approx 0.1$ rad 是声压引起水听器干涉相位变化的峰-峰值。为了能做出 δ 函数示意图, 在 MathCAD 中重新定义 $\delta(0) = 1$ 。

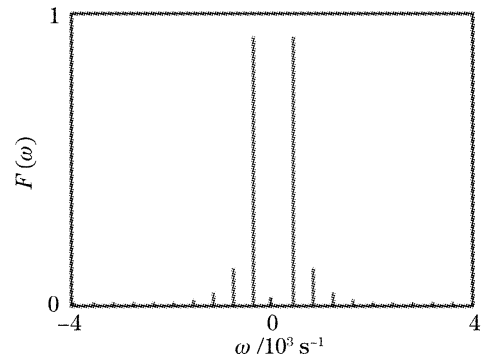


图 5 $F(\omega)$ 的 MathCAD 仿真谱线

Fig. 5 MathCAD simulation spectral of $F(\omega)$

傅里叶变换后的(7)式把时域信号转到频域, 可以清晰地了解信号的谱分布, 了解信号、噪声组成、特点, 对于反馈信号临界频率的确定具有参考意义。

4 实验结果与分析

4.1 水听器傅里叶变换谱线实测

图 6 是用 TDS220+2MM 频谱分析模块对水听器输出信号实时快速傅里叶变换(FFT)后的谱线照片, 其中模拟声源的发射频率 400 Hz, 对应图中峰值最高的谱线, 次高、第三高谱线分别为二次、三次谐波。其频谱分布规律与理论仿真曲线图 5 一致, 各次谐波的发生频率与理论预示完全相同, 只是实际声场环境还含有大量的低频和本底噪声。由于图 6 是针对 $T[\Phi(t)]$ 进行的傅里叶变换, 而图 5 是

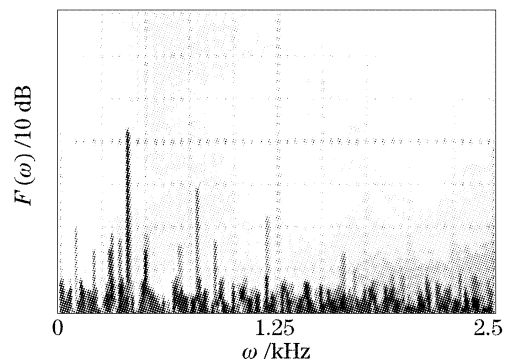


图 6 实测水听器傅里叶变换谱线照片

Fig. 6 Fast Fourier transform (FFT) spectra of hydrophone in actual measurement

对 $Z(t)$ 进行的傅里叶变换,因此两图中各次谐波的强度比不同。

4.2 依据傅里叶变换谱线稳定水声输出信号

温度引起谐振腔长的低频漂移及低频噪声扰动是水听器工作点漂移的主要因素^[12],它们以与待测声信号相同的调制方式作用于水听器谐振腔上,共同改变腔长,无法区分,唯一区别就是频率范围不同,但实际情况往往非常复杂。用闭环反馈控制法稳定水听器静态工作点时,需要了解水听器工作水域声场情况,如背景噪声谱分布,最好能预测信号大致频谱特征及范围。这样就能很好地确定补偿临界频率值,划分哪些是噪声信号,哪些是待测信号。在反馈补偿工作点漂移时很好地抑制噪声而又不使待测信号一并被补偿。图 7 是对图 3 中水听器的实测输出波形进行数字采集后用 MathCAD 进行傅里叶变换后的谱线图。主频 400 Hz,低频噪声和二次谐波非常明显。可以清晰地看出在这次实验中小于主频 400 Hz 出现了两个明显的噪声峰,峰值大约在 100 Hz 附近及 0~30 Hz。而在高频段噪声较小,可以忽略。

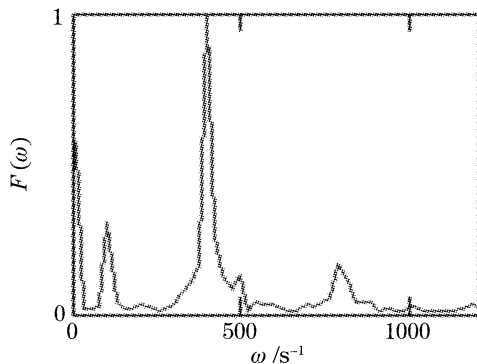


图 7 波形图 3 对应的傅里叶变换谱线

Fig. 7 Fast Fourier transform (FFT) spectra of Fig. 3

根据图 7,可以把反馈临界频率设定为 100 Hz,通过滤波器和减法器把凡小于 100 Hz 的噪声电压与压电陶瓷上静态工作点电位相减后倒相,即取负值、再积分、放大施加于压电陶瓷上,构成了闭环负反馈系统,闭环周而复始地循环工作,使所有的低频噪声包括温度引起的工作点漂移都被反馈抵消了,保证了噪声不再使光学相位工作点发生移动,同时尽可能多地保留了探测信号窗口宽度。

反馈前,由于温度等低频扰动使工作点漂移,系统输出信号幅度大约每经过十几秒到几十秒就经历一次极大、极小再到极大的无规则起伏,这对水声探测来说是不能接受的。反馈后,系统实现连续长时间稳定输出,且低频噪声得到了很好的抑制。图 8

是闭环反馈后的系统输出,相对于反馈前的波形图 3,信号质量得到了较好的还原和改善。图 9 是用 MathCAD 软件对图 8 波形采集后傅里叶变换的谱线,可以看到大部分低频噪声被消除了。

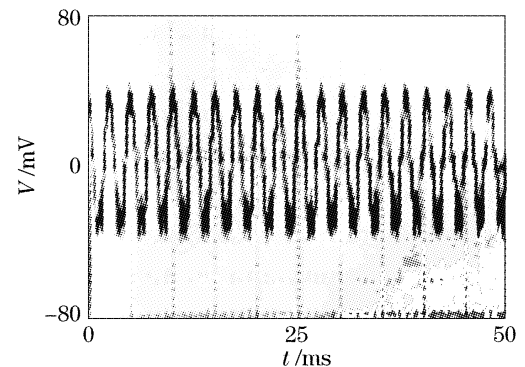


图 8 反馈控制后的输出波形

Fig. 8 Output waveform after feedback control

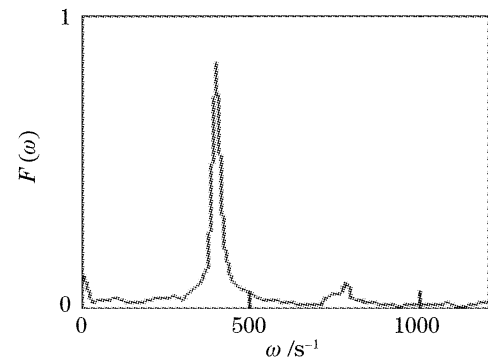


图 9 反馈控制后的输出频谱

Fig. 9 Output frequency spectrum after feedback control

傅里叶变换谱线还可以直接应用在水声信号特征谱识别检测中。鱼雷、舰船、潜艇的发动机、螺旋桨、船体结构等会产生属于其自身的独特声谱,即特征谱。建立一套完整的特征谱数据库,把水听器测量声信号的傅里叶变换谱在特征谱数据库中实现计算机快速识别,不仅能测量舰船种类、数量,甚至能够精准地识别舰船的编号。对于鱼群的监测同样如此。建立舰船及鱼群的特征谱库是艰巨而有意义的工作。

5 结 论

通过实验分析指出了反馈临界频率的选择依据及频率范围的选择原则。最终得出依据傅里叶变换谱,通过合理选择反馈信号范围,用闭环反馈控制法可以稳定法布里-珀罗型光纤水听器静态相位工作点的结论,证明了该方案可行。这为干涉式光纤水听器的实用化研究提供了参考。

参 考 文 献

- free frequency stabilization of a laser based on a confocal Fabry-Perot cavity[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(3): 316~320 (in Chinese)
- 杨海菁,王彦华,张天才等. 基于共焦法布里-珀罗腔的无调制激光频率锁定[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 316~320
- 2 Chen Haixing, Gu Peifu, Lü Weige *et al.*. Superprism effect in thin film Fabry-Pérot filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 157~160 (in Chinese)
- 陈海星,顾培夫,吕维阁等. 薄膜法布里-珀罗滤光片中的超棱镜效应[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 157~160
- 3 Du Zhijing, Zhang Yuchi, Wang Xiaoyong *et al.*. Locking multiple wavelength lasers to the transition of cesium atoms by using a Fabry-Pérot transfer cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 452~457 (in Chinese)
- 杜志静,张玉驰,王晓勇等. 不同波长的激光器通过法布里-珀罗腔相对于铯原子谱线的锁定[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 452~457
- 4 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 631~635 (in Chinese)
- 饶云江,周昌学,冉曾令等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频分复用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 631~635
- 5 Zhan Yuanling, Lu Mingzhe. Theoretical analysis of multimode fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(9): 803~809 (in Chinese)
- 战元龄,路明哲. 多模光纤 Fabry-Perot 干涉仪的分析[J]. *光学学报*, 1989, **9**(9): 803~809
- 6 Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai, Zhu Yong *et al.*. EFPI/FBG strain-temperature sensor and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 85~87 (in Chinese)
- 饶云江,曾祥楷,朱永等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪光纤布拉格光栅应变温度传感器及其应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 85~87
- 7 Lü Changgui, Wang Zhuyuan, Yun Binfeng *et al.*. Stable single frequency Er-doped all-fiber ring laser with fiber Bragg grating Fabry-Perot filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4): 212~214
- 8 Kang Chong, Wang Zhengping, Huang Zongjun *et al.*. Influence of the fineness of optical fiber Fabry-Perot resonant cavity on the phase sensitivity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 428~430 (in Chinese)
- 康崇,王政平,黄宗军等. 光纤 Fabry-Perot 谐振腔的精细度对相位灵敏度的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 428~430
- 9 Yi Ming. *Optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 87~93 (in Chinese)
- 易明. *光学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 87~93
- 10 Mu Guoguang, Zhan Yuanling. *Optics* [M]. Beijing: People's Education Press, 1979. 216~217 (in Chinese)
- 母国光,战元龄. *光学*[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. 216~217
- 11 Cui Sanlie, Zhou Fuhong Xu Yande. Investigation on the acoustonotive pressure sensitivity of a single mode fiber hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(1): 72~76 (in Chinese)
- 崔三烈,周福洪,徐彦德. 单模光纤水听器声压灵敏度的研究[J]. *光子学报*, 1995, **24**(1): 72~76
- 12 Zhang Saonian, Zeng Xuefei, Liu Yongzhi. A kind of optical gyroscope structure based on ring resonator and Mach-Zehnder interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 117~120 (in Chinese)
- 张少先,曾雪飞,刘永智. 调谐腔马赫-曾德尔干涉集成光波导陀螺[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 117~120