

文章编号: 0253-2239(2007)01-0155-4

模式分裂对法布里-珀罗型光纤水听器 谐振曲线的影响*

康 崇¹ 张树全² 黄宗军¹ 刘宁宁¹ 魏 坤¹ 李 松¹

(¹ 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001
² 公安海警水面舰艇学校基础部, 宁波 315801)

摘要: 介绍了法布里-珀罗干涉型光纤水听器的工作原理,指出了工作点的选择依据及系统的实现方案。绘制了理想情况下光纤法布里-珀罗干涉的谐振曲线。用光弹学理论分析了光纤的应力双折射问题和谐振腔内模式分裂问题。用模式分裂的原理解释了水听器的谐振曲线畸变现象,提出了描述谐振曲线畸变的数学公式,用 MathCAD 软件仿真了模式分裂后水听器的干涉过程并绘制了理论曲线。用实验方法测量并记录了模式简并及分裂条件下各种谐振曲线的形状,通过实验照片与仿真曲线进行对比,理论仿真与实验结果吻合,这说明用光纤模式分裂理论解释谐振曲线畸变现象是可行的。

关键词: 光弹学; 光纤水听器; 应力双折射; 谐振曲线

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Influence of Mode Split upon Resonance Curve of Fabry-Pérot Optical Fiber Hydrophone

Kang Chong¹ Zhang Shuquan² Huang Zongjun¹ Liu Ningning¹ Wei Kun¹ Li Song¹

(¹ School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001
² Department of Basic Courses, Public Security Marine Police Academy, Ningbo 315801)

Abstract: Working principles of Fabry-Pérot optical fiber hydrophone is referred, and the reason for working point choosing and system solution are given. Under ideal circumstance, the resonance curve of Fabry-Pérot optical fiber interference is drawn. Stress birefringence of optical fiber and mode split within resonance cavity are analyzed by photoelasticity theory. With the theory of mode split, the distortion of resonance curve of hydrophone is explained and math formulas describing the distortion of resonance curve are given, and then the interference process of hydrophone after mode split is simulated by MathCAD and the theoretical curve is plotted. The result of experiments is consistent with the theoretical simulation. It shows that it is feasible to explain the distortion of resonance curves by the theory of mode split.

Key words: photoelasticity; optical fiber hydrophone; stress birefringence; resonance curve

1 引 言

现行的压电式水听器的灵敏度已接近极限,而潜艇的噪声又日益降低,在这种情况下,加强光纤水听器的研制具有重要的战略意义。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方向寻找突破。其中模式扰动及衰落是影响水听器单元稳定工作的重要因素之一。

在单模光纤中,只传输一个基模 HE_{11} ,但实际上这个基模可由两个偏振方向互相垂直的 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模式构成。在理想的单模光纤中, HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 的传播常量相等,这两个模式完全简并^[1]。但实际光纤是不完善的,例如,纤芯椭圆化,纤内残余应力,光纤弯曲扭转等微扰引起的应力应变,都将使 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模的简并受到破坏,引起传播常量不

* 哈尔滨工程大学基础研究基金(HEUF04015)资助课题。

作者简介: 康 崇(1970-),男,黑龙江人,哈尔滨工程大学教授,博士,主要从事光电子技术方面的研究。

E-mail: kangchong@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2006-03-16; 收到修改稿日期: 2006-06-06

再相等,这就是单模光纤的双折射现象。

作为构成法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 干涉^[2~8]水听器的单模光纤,不可避免地要受到应力、弯曲等因素的影响^[9]而产生线性双折射,使本来简并的单模分裂,随之产生两套谐振曲线,叠加后造成法布里-珀罗谐振曲线的畸变,最终影响水听器的工作点的选择及声场测量的稳定。

2 法布里-珀罗型光纤水听器的工作原理

2.1 法布里-珀罗型光纤水听器的透射光功率

如图 1 所示,法布里-珀罗型光纤水听器谐振腔端的两个反射镜面 M1、M2 垂直于光纤轴,M1、M2 的透射系数及反射系数分别为 t_1, t_2 和 r_1, r_2 。令入射光的振幅为 A_i ,经 M2 镜 p 次透射后所有透射光叠加而成的光振幅为 $A_t(p)$, \sqrt{a} 为谐振腔损耗因子,则

$$A_t(p) = t_1 t_2 \sqrt{a} [1 + Ra e^{i\delta} + \dots R^{(p-1)} a^{(p-1)} e^{i(p-1)\delta}] A_i, \quad (1)$$

式中 $R = r_1 r_2, \delta = \frac{4\pi}{\lambda} nl, n$ 为纤芯折射率, l 为腔长。

令 $F = 4aR/(1 - aR)^2$ ^[10], $\Phi = \delta/2$ 。由斯托克斯定律: $t_1 t_2 + R = 1$ ^[11], 当 $\sqrt{a} \approx 1$, 令透射率为 $T(\Phi)$

$$T(\Phi) = \left| \frac{A_t(p)}{A_i} \right|^2 = \frac{1}{1 + F \sin^2 \Phi}. \quad (2)$$

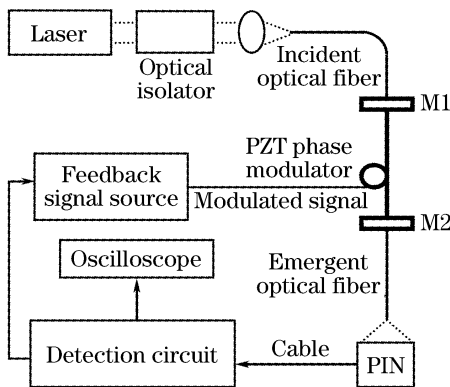


图 1 系统装置图

Fig. 1 Scheme of system structure

2.2 法布里-珀罗型光纤水听器的工作点选择

设 $\Phi = \Phi_0$ 时, $dT/d\Phi$ 达到最大,这就是水听器工作点的位置^[12], 由 $[d^2 T/d\Phi^2]_{\Phi=\Phi_0} = 0$ 给出, F 很大时,略去 $1/F^2$ 项,得

$$\Phi_0 = \frac{1}{2} \arccos \left(1 - \frac{2}{3F} \right). \quad (3)$$

由(3)式可见,法布里-珀罗光纤谐振腔的工作点是它的谐振曲线上斜率最大值所对应的相位值,

且只与该法布里-珀罗腔的精细度 F 有关,此点水听器的光强相位灵敏度最大。

2.3 法布里-珀罗型光纤水听器工作过程及谐振曲线的获得

如图 1 所示,单纵模稳频激光器的出射光经由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 二极管光电转换,送入检测电路,再经分频放大,将待测信号送至示波器,同时将分频后的噪声信号送至反馈信号源,经反相、积分放大等处理,加载于压电陶瓷换能器(PZT),使绕在 PZT 上部分法布里-珀罗腔的光纤产生伸缩,抵消噪声的干扰,稳定法布里-珀罗腔的工作点。

实验中用交流功率信号源发出大幅值的单频交流信号直接调制 PZT,使法布里-珀罗腔谐振^[13]。图 2 是对示波器的 CH1 显示通道拍摄的理想法布里-珀罗腔的谐振曲线。示波器上光电压 V 的单位是 5 mV/cm,扫描时间 t 单位是 0.2 ms/cm,该腔的腔长 $l=10$ m。

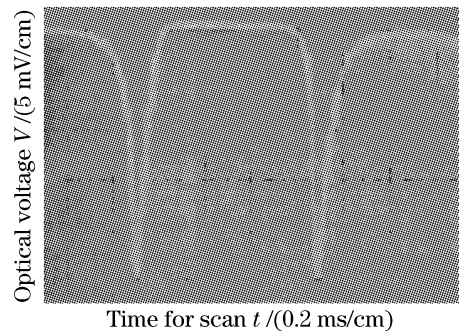


图 2 理想谐振曲线的示波器照片

Fig. 2 Oscillograph photo of ideal resonance curve

3 单模光纤的光弹效应

3.1 谐振腔段光纤的模式分裂

根据光弹学原理,当单模光纤受到应力 σ_i 时,其折射率的变化 Δn_i 与应变 ϵ_i 有如下关系式:

$$\Delta n_1 = -\frac{1}{2} n^3 (p_{11} \epsilon_1 + p_{12} \epsilon_2 + p_{12} \epsilon_3), \quad (4)$$

$$\Delta n_2 = -\frac{1}{2} n^3 (p_{12} \epsilon_1 + p_{11} \epsilon_2 + p_{12} \epsilon_3), \quad (5)$$

$i = 1, 2, 3$ 对应 x, y, z 方向。式中, ϵ_1 和 ϵ_2 是光纤的横向应变; ϵ_3 为光纤的纵向应变。 p_{11}, p_{12}, p_{44} 是光纤的光弹系数,且 $p_{44} = (p_{11} - p_{12})/2$ 。

设 k_0 是真空中波矢,光通过长度为 l 的谐振腔段光纤后,相位延迟 $\Phi(n) = k_0 nl$, 于是应力双折射效应使得 H_{11}^X 和 HE_{11}^X 模之间产生相移

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= k_0 l (\Delta n_1 - \Delta n_2) = \\ &= -k_0 l \frac{n^3}{2} (p_{11} - p_{12}) (\epsilon_1 - \epsilon_2) = \\ &= -k_0 n^3 p_{44} l (\epsilon_1 - \epsilon_2), \end{aligned} \quad (6)$$

即两个正交的偏振模式从简并到分裂,这样形成的干涉曲线也由一套分裂成两套,原来的工作点位置和灵敏度大小必然随之而改变。

3.2 法布里-珀罗谐振腔光纤的应力和应变

为了设计实验分析光纤的应力应变规律,如图 3,把芯径 10 μm,总长 10 m 的法布里-珀罗谐振腔的一段单模裸纤置于平面金属板上,其上水平覆盖铝合金盖板,板长 10 cm,盖板上施加垂直压力 F (加砝码实现)。光纤径向的应力应变满足如下关系

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1 + \nu} (\epsilon_1 - \epsilon_2), \quad (7)$$

其中 $E=7.6 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,是该光纤的杨氏模量。 $\nu=0.186$ 为泊松比。当砝码质量为 4.5 kg 时,相当于总长 10 m 的光纤谐振腔产生的平均应变 $\epsilon_1 - \epsilon_2 = 7 \times 10^{-8}$ 。

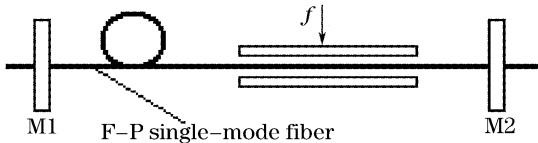


图 3 应力施加方案
Fig. 3 Project subjected to stress

4 计算机仿真与实验验证

4.1 模式简并时的谐振曲线

用 MathCAD 软件做(2)式对应的谐振曲线图,如图 4,横轴为 Φ ,纵轴为光透射率 $T(\Phi)$ 。此时光纤处于应力应变为零的理想情况,输出为简并的单模法布里-珀罗谐振状态,谐振曲线与实验照片图 2 吻合。

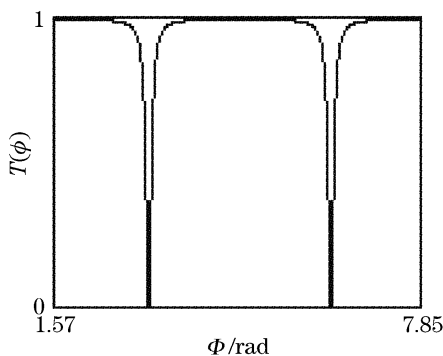


图 4 T 与 Φ 的曲线图
Fig. 4 Curve of T versus Φ

4.2 模式分裂时的谐振曲线

图 5 照片是在单模光纤受到应力时拍摄的,可

以看到模式分裂时的谐振曲线畸变形状(大谐振峰中夹带小峰)。

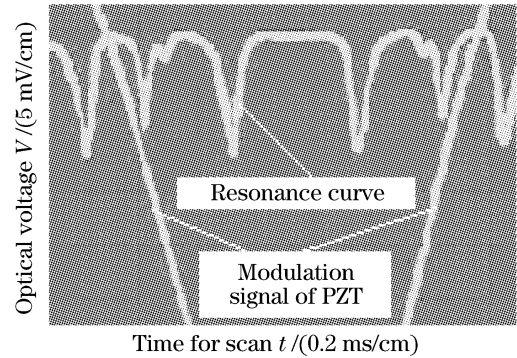


图 5 模式分裂的谐振曲线的示波器照片
Fig. 5 Oscillograph photo of resonance curve about mode split

曲线的特殊形状可以解释如下:由于应力等因素使谐振腔内振动方向相互垂直两个模式 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 的折射率不同,出现了模间相移,即发生模式分裂。振幅为 A_{in} 入射光在两个模上的投影分别为 A_{in}^x, A_{in}^y , 振幅平方比分别为 $K_1^2 = |A_{in}^x/A_{in}|^2, K_2^2 = |A_{in}^y/A_{in}|^2, K_1^2 + K_2^2 = 1$ 最终在示波器上产生随应力变化的两套谐振曲线的叠加,即

$$\begin{aligned} T(\Phi) &= \frac{K_1^2}{1 + F \cdot \sin^2 \Phi} + \\ &= \frac{K_2^2}{1 + F \cdot \sin^2 (\Phi + \Delta\Phi)} + \\ &= \frac{K_1^2}{1 + F \cdot \sin^2 \Phi} + \\ &= \frac{K_2^2}{1 + F \cdot \sin^2 [\Phi - k_0 n^3 p_{44} (\epsilon_1 - \epsilon_2)]}. \end{aligned} \quad (8)$$

实验中法布里-珀罗腔的精细度 $F = 36$,入射光波长 $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n=1.517$,腔长 $l=10 \text{ m}$ 。石英光纤 $p_{11} = 0.121, p_{12} = 0.270, p_{44} = -0.08$ 。选择 $K_1^2 = 0.125, K_2^2 = 0.875$ 。

当光纤上施加的砝码质量为 4.5 kg 时,即

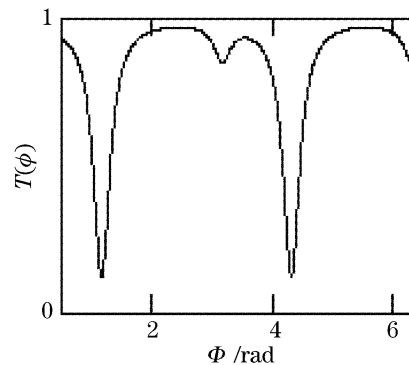


图 6 T 与 Φ 的曲线图
Fig. 6 Curve of T versus Φ

$\epsilon_1 - \epsilon_2 = 7 \times 10^{-8}$ 条件下,用 MathCAD 软件对(8)式作图,得到的谐振曲线如图 6 所示,图 6 曲线与实验照片图 5 吻合。

图 7 是当砝码质量为 7.5 kg 时拍摄的曲线,应力增加,导致腔内两分裂模的相移增大。相当总长 10 m 谐振腔平均应变增至 $\epsilon_1 - \epsilon_2 = 12 \times 10^{-8}$,用 MathCAD 软件绘出谐振曲线如图 8 所示,与实验照片图 7 吻合。

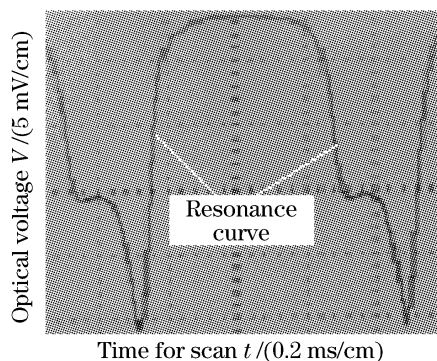


图 7 模式分裂的谐振曲线的示波器照片

Fig. 7 Oscillograph photo of resonance curve about mode split

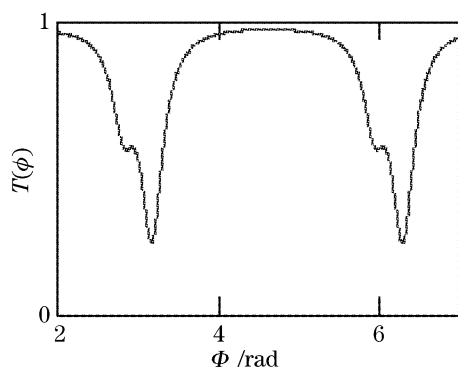


图 8 T 与 Φ 的曲线图

Fig. 8 Curve of T versus Φ

5 结 论

上述两分裂模实例说明,(8)式可以解释法布里-珀罗型光纤水听器的谐振曲线畸变问题,应力产生的腔内模式分裂是其主要原因。谐振曲线畸变可以由(8)式加以定量描述,理论分析与实验结果吻合,这为解决法布里-珀罗型光纤水听器谐振腔内模式分裂及衰落问题提供了参考。

参 考 文 献

- 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
- Changgui Lu, Zhuyuan Wang, Binfeng Yun *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
- 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
- Yang Haijing, Wang Yanhua, Zhang Tiancai *et al.*. Modulation-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
- Jiang Yi, Liu Li. Fiber optical Fabry-Perot vibration sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1059~1062 (in Chinese)
江毅,刘莉. 光纤 Fabry-Perot 腔振动传感器[J]. 光子学报, 2003, **32**(9): 1059~1062
- Kevin Hsu, Calvin M. Miller, Yufei Bao. Fiber Fabry-Perot interferometers with very low polarization sensitivity[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **33**(28): 6617~6619
- Zhan Yuanling, Lu Mingzhe. Theoretical analysis of multimode fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(9): 803~809 (in Chinese)
战元令,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
- Ruan Chi, Gao Yingjun, Liu Zhilin. Fiber optics Fabry-Perot level meter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1170~1174 (in Chinese)
阮驰,高应俊,刘志麟. 光纤法布里-珀罗腔液位传感器[J]. 光子学报, 2003, **32**(10): 1170~1174
- Shiao-min Tseng, Chin-lin Chen. Optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(3): 547~551
- 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
- Mu Guoguang, Zhan Yuanling. *Optics* [M]. Beijing: People's Education Press, 1979. 216~217 (in Chinese)
母国光,战元令. 光学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. 216~217
- 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
- Zhang Saoxian, 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