

文章编号:1004-4213(2010)s1-0064-3

基于光纤马赫-曾德尔干涉仪光纤水听器的实验研究

曹振洲, 刘维

(首都师范大学 物理系, 北京 100048)

摘 要:本文对基于马赫-曾德尔干涉技术的光纤水听器系统进行了实验研究. 根据光外差检测原理, 利用自制的全光纤马赫-曾德尔干涉仪系统, 对鱼群活动引起的扰动信号进行了测量和分析. 得到在一定条件下, 随着鱼群活动区域面积的增加或温度的降低, 探测灵敏度呈线性减小, 最小分辨能力下降的结论. 实验结果表明: 随着活动区域直径的降低, 系统灵敏度分别为 1.606 6、2.349 9 和 2.412 5 $\mu\text{W}/\text{条}$, 最小分辨力分别为 14、10 和 8 条; 随着活动区域温度的降低, 系统灵敏度分别为 1.339 1、1.022 7 和 0.432 1 $\mu\text{W}/\text{条}$, 最小分辨力分别为 4、6 和 18 条, 测量结果与分析得到的结论一致.

关键词:全光纤马赫-曾德尔干涉仪; 水听器; 模拟实验; 光外差探测; 灵敏度

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb201039s1.0064

0 引言

光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)干涉仪由于具有抑制光源噪声和模式噪声的特点, 在高精度测量中应用越来越广泛, 它可以实现对温度、压力、磁场、电流和超声波等多种物理量的测量^[1-5].

本文利用自制的基于 M-Z 干涉技术的光纤水听器系统, 对鱼群活动引起的扰动信号进行了测试. 得到随着鱼群活动区域面积的增加或温度的降低, 探测灵敏度呈线性减小, 最小分辨能力下降的结论. 该项工作对于光纤传感器的民用发展是有意义的.

1 理论分析

光波在外界因素的作用下, 相位的变化 $\Delta\varphi$ 可以写成

$$\Delta\varphi = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \beta L(\Delta L/L) + L(\partial\beta/\partial n)\Delta n + L(\partial\beta/\partial a)\Delta a \quad (1)$$

式中 a 为光纤纤芯半径, $\beta = 2\pi/\lambda$ 为光波在光纤中的传播常数, ΔL 为光纤长度变化, Δa 为光纤半径变化. 从式(1)可以看出, 应力引起三方面的相位调制效应: 应变效应、光隙效应和泊松效应, 其中折射率的改变是应变光学效应的结果^[2].

相干探测是利用两个或多个光场(空间)相干交叠时, 产生的非线性光学效应实现对信号的探测, 典型的相干探测是光外差探测.

如果照射到探测面上的总波场为

$$E_{(t)} = E_{LO} \cos(\omega_{LO}t + \varphi_{LO}) + E_S \cos(\omega_S t + \varphi_S) \quad (2)$$

式中 LO 代表本振量或参考量, S 代表信号量, E 为电场强度, ω 和 φ 分别为光角频率和相位. 则光电转换的光电流为^[6]

$$i_{(t)} = \frac{e\eta A}{h\nu Z_0} [E_{LO} \cos(\omega_{LO}t + \varphi_{LO}) + E_S \cos(\omega_S t + \varphi_S)]^2 \quad (3)$$

式中 η 为量子效率, Z_0 为自由空间阻抗, A 为光入射表面面积, $\omega_S, \omega_{LO}, \omega_S + \omega_{LO}$ 分别为信号光角频率, 参考光角频率以及两者的合频. 它们都是光频段频率.

根据零拍探测和相位调制, 可以得到探测器的输出功率为

$$P_{if} = -4i_{LO}i_S \sin(\Delta\varphi)R_L \quad (4)$$

式中 i 为光电流, R_L 为负载电阻. 由于信号较小, 有

$$P_{if} = -4i_{LO}i_S \Delta\varphi R_L \quad (5)$$

将式(5)变形为

$$P_{if}/\Delta\varphi = -4i_{LO}i_S R_L \quad (6)$$

由弹性力学原理可知相位差 $\Delta\varphi$ 与应力的关系为^[7]

$$\Delta\varphi/PL = nk_0(2\mu/E) + (k_0/2E)n^3[(1-\mu)P_{11} + (1-3\mu)P_{12}] \quad (7)$$

式中 P 为作用在光纤上的压力, L 为承受作用力的光纤长度, p_{11}, p_{12} 是材料的弹光系数, n 是光纤材料

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60772064)和北京市教委科技发展项目(No. KM200810028007)资助

第一作者: 曹振洲(1988-), 男, 学士, 主要研究方向为应用光学和物理教育. Email: caozhenzhou@gmail.com

导师(通讯作者): 刘维(1965-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为应用光学. Email: lwei263@263.net

收稿日期: 2010-08-10; 修回日期: 2010-11-15

的折射率, μ 是泊松比, E 是弹性模量, k_0 是真空中
的波数.

由式(6)与式(7)得到

$$P_{if}/P = -4i_{l_0}i_sLR_L \times \left\{ nk_0 \frac{2\mu}{E} + \frac{k_0}{2E} n^3 [(1 - \mu)P_{11} + (1 - 3\mu)P_{12}] \right\} \quad (8)$$

根据式(8)可知输出功率与待测应力大小成正比关
系.

2 实验系统和测试

2.1 光纤 M-Z 干涉仪相位探测系统

用 50:50 的 3 dB 耦合器构成 M-Z 干涉仪探测
系统如图 1. 其中单模光纤激光器(金飞博 KF-10

型)波长为 1 550 nm, 系统所用光纤为单模光纤, 长
度约为 2.0 m. 在信号臂上引入扰动信号, 光功率计
(金飞博 KF-9 型)测量输出信号.

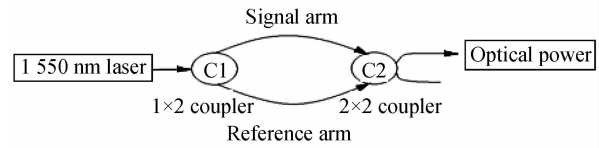


图 1 Mach-Zehnder 光纤水听器原理示意图

Fig. 1 The principle scheme of fiber-optic hydrophone based on M-Z interferometer

2.2 测试结果及分析

测量的结果如图 2 和图 3.

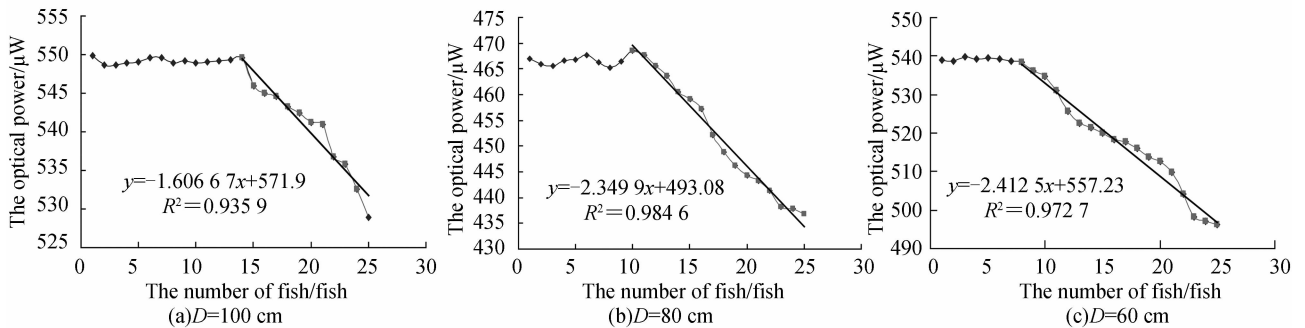


图 2 不同活动半径 D 的测试曲线

Fig. 2 The testing curve of different diameters D of activity

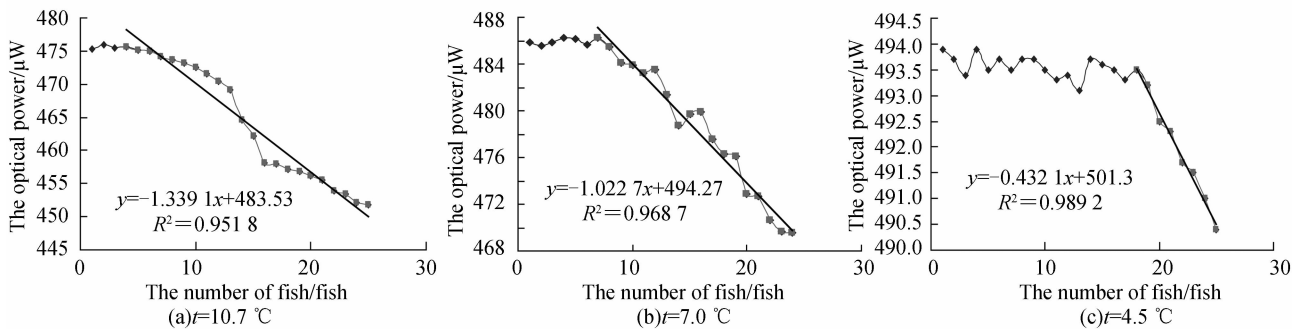


图 3 活动区域不同温度的测量曲线

Fig. 3 The testing curve of different temperature of activity area

1) 系统性能随活动区域变化的情况. 环境温度
15.2 °C, 水位深度不变.

由图 2(a)到图 2(c)可知, 在鱼数不太多的情况
下, 输出信号与鱼数呈线性关系. 随着活动区域直径
的降低, 探测灵敏度分别为 1. 606 6、2. 349 9 和
2. 412 5 μW /条, 即系统灵敏度增加; 最小分辨力分
别为 14、10 和 8 条, 分辨能力增强, 参数如表 1 所
示.

2) 系统性能随环境温度变化的情况. 此时活动
区域直径为 100 cm, 水位深度不变.

表 1 不同活动半径的测量灵敏度

Table 1 The sensitivity of different diameters of areas

The diameters of activities/cm	Sensitivity / ($\mu\text{W} \cdot \text{fish}^{-1}$)	Resolution/fish
100	1. 606 6	14
80	2. 349 9	10
60	2. 412 5	8

由图 3(a)到图 3(c)可知, 在鱼数不太多的情况
下, 输出信号与鱼数近似呈线性关系. 随着活动区域
温度的降低, 系统灵敏度分别为 1. 339 1、1. 022 7 和
0. 432 1 μW /条, 即系统灵敏度降低; 最小分辨力分
别为 4、6 和 18 条, 分辨能力减弱, 参数如表 2 所示.

实验结果中相关系数较小的主要原因是偏振态随机变化等因素的影响.

表 2 活动区域不同温度的测量灵敏度

Table 2 The sensitivity of different temperature of areas

Temperature /($^{\circ}\text{C}$)	Sensitivity /($\mu\text{W} \cdot \text{fish}^{-1}$)	Resolution/fish
10.7	1.339 1	4
7	1.022 7	6
4.5	0.432 1	18

3 结论

本文基于光外差检测原理,利用自制的全光纤马赫-曾德尔干涉仪系统,进行了相位调制光纤水听器鱼群模拟实验,得到如下结论:随检测区域面积变小,检测灵敏度变大,最小分辨率降低;随检测区域温度降低,检测灵敏度变小,最小分辨率增强,实验结果与原理中的结论一致.该项工作对于光纤干涉仪相位调制检测的应用有参考价值.

参考文献

- [1] LIU Bo, YANG Yi-fei, ZHANG Jian, *et al.* A fiber fence system based on M-Z interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):1013-1017.
刘波, 杨亦飞, 张健, 等. 基于 M-Z 干涉的光纤围栏系统实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):1013-1017.
- [2] SUN Xue-jun. Research on temperature sensor base on all-fibre Mach-Zehnder interferometer [D]. Jinan: Shandong University, 2007:16-20.
孙学军. 基于全光纤马赫-泽德尔干涉仪的温度传感器的研究[D]. 济南: 山东大学, 2007:1-20.
- [3] PENG Bao-jin, LIAO Mao, LIAO Yan-biao, *et al.* Study on measuring sensitivity of fibre-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.
- [4] WANG Yong-jie, LI Fang, XIAO Hao, *et al.* Fiber optic sound sensor based on Michelson interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1114-1117.
王永杰, 李芳, 肖浩, 等. Michelson 干涉仪式光纤空气声传感器[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1114-1117.
- [5] BAGNOLI P E, BEVERINI N, FALCIAI R. Development of an erbium-doped fibre laser as a deep-sea hydrophone [J]. *Journal of Optics A: Pure Applied Optics*, 2006, **8**(6): 535-539.
- [6] WU Wen-bin, LIU Wei, CUI Ye, *et al.* Study on the displacement measurement of intensity modulation based on all optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **5**(6):42-44.
武文彬, 刘维, 崔烨, 等. 基于光纤马赫-泽德尔干涉仪的强度测量研究[J]. *光学与光电技术*, 2008, **5**(6):42-44.
- [7] YUAN Jun-guo. The research of theory and application of distributed Mach-Zehnder interferometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006:20-25.
袁军国. 分布式马赫-泽德干涉仪的原理与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006:20-25.

Experimental Study on the Hydrophone Characteristics Based on All Optical Fiber Mach-Zehnder's Interferometer

CAO Zhen-zhou, LIU Wei

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The characteristics of the fiber-optical hydrophone systems based on the all optical fiber Mach-Zehnder's interferometer were tested and analyzed, according to optical fiber hydrophone working principle. The experimental system was built and the performances of fiber-optic hydrophone were tested in different conditions. The result shows that with the increasing of sphere of fish activities and the decreasing of surrounding temperature, the detection sensitivity is linear decline and the least resolution is decreased, which are corresponded with the calculated ones.

Key words: All optical fiber Mach-Zehnder interferometer; Fiber-optic hydrophone; Simulating experiment; Coherent detection; Sensitivity