

文章编号: 0253-2239(2008)04-0783-04

一种具有声低通滤波特性的无源零差光纤水听器

王泽锋 胡永明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 报道了一种新颖的具有抗混叠功能的无源零差迈克耳孙型光纤水听器。它由一个普通的芯轴型光纤水听器和一个圆柱型亥姆霍兹共振器构成。在驻波罐中对其声压相位灵敏度频响进行了测量,结果表明该光纤水听器具有较好的声低通滤波特性,能有效地抑制声信号中的高频成分,从而实现抗混叠滤波。该光纤水听器的低频声压相位灵敏度主要由传感光纤长度和弹性增敏层的物理特性决定,约为 -159 dB (0 dB= 1 rad/ μ Pa)。在 1150 Hz 附近出现了一个共振峰,这主要由圆柱型亥姆霍兹共振器的声学特性决定。 $1150\sim 2280$ Hz 频段内的灵敏度衰减率约为 50 dB/倍频程, 1500 Hz 以后的灵敏度衰减量大于 10 dB。这对于提高我国未来声纳系统的抗干扰能力具有十分重要的意义。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光纤水听器; 声压相位灵敏度; 声低通滤波特性

中图分类号 TB133; TB565⁺.1 **文献标识码** A

A Novel Passive Homodyne Fiber-Optic Hydrophone of Acoustic Low-Pass Filtering

Wang Zefeng Hu Yongming

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

Abstract A novel passive homodyne Michelson interferometric fiber-optic hydrophone of anti-aliasing has been manufactured and demonstrated. This new fiber-optic hydrophone consists of a conventional mandrel fiber-optic hydrophone and a metal cylindrical Helmholtz resonator. The acoustic pressure phase sensitivity response has been measured in a standing-wave tube filled with water. Experimental results show that this new fiber-optic hydrophone is of acoustic low-pass filtering, which makes it available for suppressing high-frequency components in acoustic signal and eliminating aliasing in the future sonar system. The low frequency sensitivity of this fiber-optic hydrophone, as determined by the length of the sensing fiber and the performance of the elastic layer, is -159 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa). The frequency response has a resonance peak near 1150 Hz, which is determined by the cylindrical Helmholtz resonator. There is a measured roll-off of 50 dB/octave over the range of $1150\sim 2280$ Hz. The acoustic sensitivity attenuation beyond 1500 Hz is bigger than 10 dB. This new fiber-optic hydrophone is very important for enhancing the operation performance of the future sonar system.

Key words fiber optics; fiber-optic sensor; fiber-optic hydrophone; acoustic pressure phase sensitivity; acoustic low-pass filtering

1 引 言

自从 1977 年第一个光纤水听器被报道以来^[1,2],在军事和民用巨大应用前景的推动下,该技

术获得了迅速的发展,已从最初的基础研究发展到考虑构成未来的声纳系统^[3]。与传统的压电声纳系统相比,由光纤水听器构成的现代新型声纳系统具

收稿日期: 2007-08-22; **收到修改稿日期:** 2007-10-11

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z121)和国防科技大学优秀研究生创新项目(0623)资助课题。

作者简介: 王泽锋(1980—),男,湖南临武人,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,福建永定人,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

有传感端无源、水密性好、灵敏度高、动态范围大、检测频带宽、结构设计灵活、抗电磁干扰、耐高温高压等诸多优点^[3~5]。光纤水听器按工作原理可分为强度型^[5]、偏振型^[5]、干涉型^[6~9]、光纤光栅型^[10]等,其中最具有发展前途的是灵敏度最高的干涉型光纤水听器^[3,4]。虽然基于法布里-珀罗^[8]、萨尼亚克^[9]等各种干涉仪的光纤水听器已经被演示验证成功,但在各种系统中采用最多的是复用效率最高的基于迈克耳孙^[7]和马赫-曾德尔^[6]干涉仪的光纤水听器,它们最有可能构成未来的声纳系统^[3]。

在一般的声纳系统中,都需要对声传感器获得的原始信号进行抗混叠滤波预处理。由于干涉型光纤水听器是以高灵敏度的相干检测技术为基础的,当声场中存在高频干扰时,混叠在光学干涉信号中就已经产生,无法通过常规的电路抗混叠滤波技术来消除。唯一有效的途径是,在信号采样之前进行机械滤波。虽然机械的抗混叠滤波光纤水听器早有报道^[11,12],但它们都是采用柔软的海绵状橡胶吸声体来实现滤波。由于橡胶材料物理特性的不确定性,使得无法从理论上分析光纤水听器的声学特性。此外,由于海绵状橡胶非常松软,使得这种光纤水听器抗静水压的能力很差。

基于美国贝尔实验室的 J. L. Flanagan 教授提出的数字话音系统中的声滤波器设计原理^[13,14],本文设计了一种新颖的迈克耳孙型抗混叠光纤水听器。该光纤水听器利用一个金属圆柱型亥姆霍兹共振器来实现抗混叠滤波。金属圆柱的使用,大大提高了光纤水听器抗静水压的能力,而且有利于抗混叠声滤波器的设计和光纤水听器声学特性的理论分析。

2 光纤水听器设计

图 1 为设计的一种简单的无源零差抗混叠滤波光纤水听器示意图。它的传感部分是一个臂差为 15 m 的全保偏迈克耳孙光纤干涉仪。使用的光纤为熊猫型保偏光纤,纤芯直径为 8 μm ,外包层直径为 246 μm , $\lambda=1550$ nm 处的传输损耗为 0.43 dB/km。该光纤水听器由一个缠绕传感光纤的铝质芯轴和一个铝质圆柱型亥姆霍兹共振器构成,它们之间通过泡沫连接,泡沫起到隔声的作用。芯轴外表面覆有一层约 2 mm 厚的聚氨酯弹性增敏层,传感光纤紧绕在其外表面,光纤层的表面涂有一层很薄的环氧树脂,起到保护光纤的作用。芯轴长 50 mm,总外径(包括弹性层、光纤层以及保护层)为 15 mm,中间是一个直径为 5 mm 的孔。圆柱型亥姆霍兹共振

器的外径为 30 mm,总长度为 90 mm,圆柱面和两个端面的厚度都为 4 mm。端面的小圆孔直径为 1.6 mm。

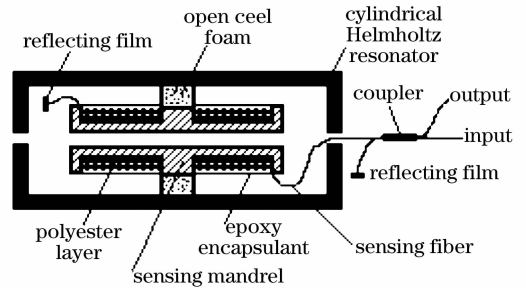


图 1 基于亥姆霍兹共振器的光纤水听器

Fig. 1 Fiber-optic hydrophone with a Helmholtz resonator

假设共振器各壁面满足刚性条件,则可得该光纤水听器系统的声学等效电路图,如图 2 所示。其中, R_o 和 M_o 分别是小孔的等效声阻和等效声质量, C_a 和 M_a 分别是腔体的等效声容和等效声质量。根据电路分析理论可知,该系统的声压传递函数为

$$F(\omega) = \frac{1 - \omega^2 M_a C_a}{[1 - \omega^2 C_a (M_a + M_o)] + j\omega C_a R_o}, \quad (1)$$

式中^[15,16]

$$M_o = \rho(l + \delta)/s, \quad (2)$$

$$M_a = \rho V/(3S^2), \quad (3)$$

$$C_a = V/(\rho c^2), \quad (4)$$

式中 ρ 为媒质的密度, c 为媒质中的声速; s 和 l 分别为小孔的面积和长度; V 和 S 分别为腔体的容积和横截面积,考虑到结构的对称性, V 为圆柱形腔体实际容积的一半; δ 是小孔长度的末端修正系数,一般取 $\delta = 0.85d$,其中 d 为小孔的直径。小孔的等效声阻 R_o 主要由媒质的粘滞特性决定。

由式(1)可知,当 $\omega^2 C_a (M_a + M_o) = 1$ 时系统发生共振,共振频率为^[17]

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{(l + 0.85d)V + L^2 s/3}}, \quad (5)$$

式中 L 为圆柱体长度的一半。将各参量带入式(5),

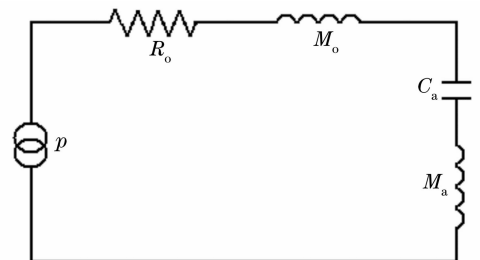


图 2 光纤水听器的声学等效电路图

Fig. 2 Acoustic equivalent circuit of the fiber-optic hydrophone

可得该系统的理论共振频率约为 1370 Hz。

3 实 验

3.1 实验设计

图 3 是光纤水听器测试系统原理图。实验在一个充气驻波罐中进行, 光纤水听器的声压相位灵敏度采用与一个标准压电水听器(型号为 CS-3, 中科院声学所生产, 其传感元件为一个直径为 10 mm, 高为 8 mm 的 PZT-5 压电陶瓷管)比较测量的方法获得。驻波罐由一根高为 25 cm、内径为 12.5 cm、壁厚为 4 mm 的钢管和一个水下扬声器构成, 扬声器位于钢管的底端。根据声波导理论, 该充气钢管的截止频率约为 7000 Hz, 即理论上, 当激发频率小于 7000 Hz 时, 可以在该测试罐中获得平面声波, 这是比较测量方法的理论基础。因此, 为了保证测量结果的准确可靠, 两水听器的声中心必须置于水下相同深度。可编程函数发生器(型号为 AFG3022, 美国 Tektronix 公司生产)输出的单频连续正弦信号经功放(型号为 YE2706, 江苏联能公司生产)进行功率放大后驱动扬声器, 在驻波罐中产生测量用的平面波声场。在声场的作用下, 光纤水听器产生一个干涉的光信号, 标准压电水听器产生一个与声场同频率的电压信号。干涉光信号经光电探测器转换成电压信号, 与压电水听器输出的电压信号同时输送到一个数字滤波器(型号为 Stanford SR650)进行放大滤波, 然后经数据采集卡(型号为 AC6111, 16 路 12 位 A/D 采样, 最大采样率为 400 kHz, 2 路 12 位 D/A 输出, 北京双诺公司生产)的 A/D 通道同时采集到计算机, 通过软件实现信号的傅里叶变换、滤波、光纤水听器工作点计算、声压相位灵敏度求解等处理。

光纤水听器信号检测采用一种基于光源波长调

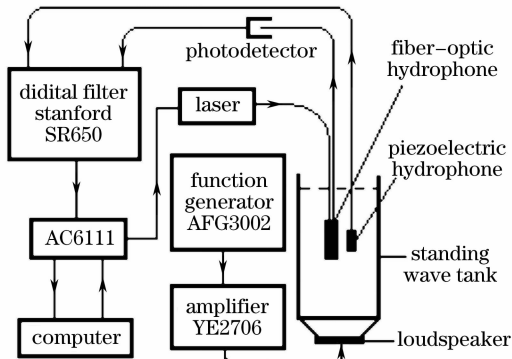


图 3 实验系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

节的相位补偿法^[18]。该方法通过采集卡的 D/A 通道输出一个直流电压信号作用到光源(自制的环形光纤激光器, 中心波长 1550 nm, 线宽小于 2 kHz)的波长调节器件(缠绕一定长度光纤的压电陶瓷)上, 改变光波长, 从而在非平衡干涉仪中产生补偿相位, 使干涉仪一直处于最灵敏的检测区域。该方法具有传感端无源、信号解调简单、工作频带宽等优点^[15]。

3.2 结果与分析

实际测试结果表明, 当频率高于 5500 Hz 或低于 30 Hz 时, 测量精度较低, 因此测量的频带选择为 30~5500 Hz。为了提高信噪比, 激发信号采用单频正弦信号, 利用函数发生器 AFG3022 的可编程功能, 实现了连续自动测量。光纤水听器的声压相位灵敏度频响如图 4 所示。其中, $R_1(f)$ 为不含亥姆霍兹共振器的芯轴型光纤水听器的频响曲线, $R_2(f)$ 为图 1 所示的含亥姆霍兹共振器的光纤水听器的频响曲线。可以看到, $R_1(f)$ 除高频段波动稍大, 在测试频带上基本平坦, 平均声压相位灵敏度约为 -159 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa), 低频波动小于 ± 2 dB。 $R_2(f)$ 低频部分与 $R_1(f)$ 基本一致, 在 1150 Hz 附近出现了共振峰, 这是由亥姆霍兹共振器的特性决定。从 1150 Hz 到 2280 Hz 响应衰减率约为 50 dB/octave, 1500~5000 Hz 灵敏度响应衰减量大于 10 dB。假设整个测试系统为线性响应, 则 $R_1(f)$ 和 $R_2(f)$ 分别可以写成

$$R_1(f) = T(f) \cdot H(f), \quad (6)$$

$$R_2(f) = T(f) \cdot H(f) \cdot F(f), \quad (7)$$

其中 $T(f)$ 为扬声器与测试罐的响应, $H(f)$ 为不含共振器的芯轴型光纤水听器的声压传递函数, $F(f)$ 为圆柱型亥姆霍兹共振器的声压传递函数。由(6)式和(7)式可得

$$F(f) = \frac{R_2(f)}{R_1(f)}, \quad (8)$$

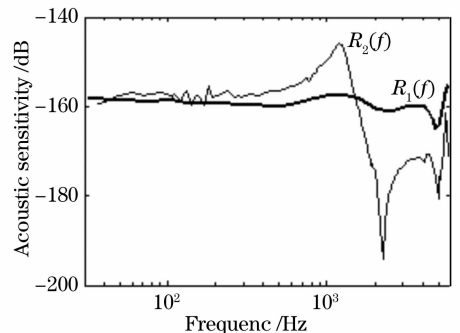


图 4 光纤水听器频响曲线

Fig. 4 Frequency response of fiber-optic hydrophone

图 5 为根据实验数据得到的亥姆霍兹共振器的声压传递函数 $F(f)$ 。从图中可以看到, $F(f)$ 和 $R_2(f)$ 具有相同的形式, 系统共振频率的测量值约为 1150 Hz, 与前面得到的理论值 1370 Hz 尚存在一定的差距。这主要是受到共振器各壁面弹性的影响。

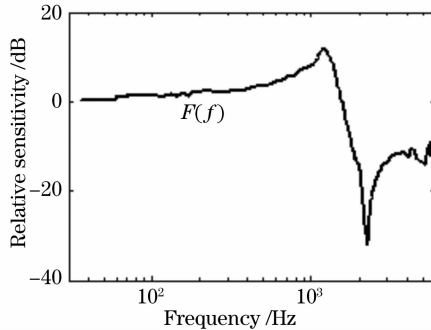


图 5 圆柱型亥姆霍兹共振器的传递函数

Fig. 5 Transfer function of cylindrical Helmholtz resonator

(5)式是在刚性假设的前提下得到的,用于计算空气中圆柱形亥姆霍兹共振器的共振频率时误差可以忽略。但是在水中,由于共振器各壁面的弹性形变与水的可压缩性可以相比拟,因此必须考虑各壁面弹性对共振频率的影响^[19,20]。由于光纤水听器弹性增敏层和保护层聚合物材料的不确定性,目前对误差进行定量分析尚存在一定困难,这里只进行定性分析。共振器各壁面的弹性可以用一个与腔体声容并联的等效声容来表示。该声容使得系统的总等效声容变大,也可以认为是使腔体的等效体积增加。因此,由(5)式可知考虑共振器各壁面的弹性后,亥姆霍兹共振器的实际共振频率将小于刚性假设时求得理想值。这就是共振频率的测量值小于(5)式给出的理论值的原因。

4 结 论

与以往基于海绵状橡胶吸声体的抗混叠光纤水听器相比,该光纤水听器具有抗静水压能力强、便于结构设计和理论分析等优点。在驻波罐中对其声压相位灵敏度频响进行了测试,结果表明该光纤水听器具有较好的声低通特性,能有效地实现抗混叠滤波。该光纤水听器的研制成功以及进一步的优化设计,对于提高我国未来声纳系统的作战能力具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- 1 J. H. Cole, R. L. Johnson, P. G. Bhuta. Fiber-optic detection of sound[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1977, **62**(5): 1136~1138
- 2 J. A. Bucaro, H. D. Dardy, E. F. Carome. Fiber optic

- hydrophone[J]. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1977, **62**(5): 1302~1304
- 3 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology[J]. *IEE Proc. Rador Sonar Navig.*, 1996, **143**(3): 204~208
- 4 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 J.*, 2003, **3**(1): 19~30
- 5 A. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1647~1653
- 6 G. A. Cranch, C. K. Kirkendall, K. Daley *et al.*. Large-scale remotely pumped and interrogated fiber-optic interferometric sensor array[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(11): 1579~1581
- 7 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 415~417
- 8 Kang Chong, Huang Zongjun, Tong Chengguo *et al.*. Operating point stabilization of Fabry-Pérot optical fiber hydrophone based on Fourier transform spectrum[J]. *Acta Optic Sinica*, 2007, **27**(7): 1156~1160
- 康 崇,黄宗军,佟成国等.用傅里叶变换谱稳定法布里-珀罗型光纤水听器的工作点[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1156~1160
- 9 Song Zhangqi, Wang Xin, Cao Chunyan *et al.*. Fiber-optic hydrophone based on Sagnac interferometer with saw-tooth wave phase biasing technique[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 957~961
- 宋章启,王 鑫,曹春艳等. Sagnac 光纤水听器锯齿波相位偏置技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 957~961
- 10 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1449
- 11 J. B. Carroll, D. R. Huber. A fiber-optic hydrophone with a mechanical anti-aliasing filter[J]. *J. Lightw. Technol.*, 1986, **LT-4**(1): 83~86
- 12 J. N. Roe, K. Dobashi, K. Kobayashi. Design study of an optical hydrophone array[C]. *Proc. SPIE*, 1992, **1756**: 42~47
- 13 J. L. Flanagan. Acoustic filters to aid digital voice[J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1979, **58**(4): 903~944
- 14 J. L. Flanagan. Direct digital-to-analog conversion of acoustic signals[J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1980, **59**(9): 1693~1719
- 15 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 Optic 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
- 16 R. L. Panton, J. M. Miller. Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonators[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1975, **57**(6): 1533~1535
- 17 M. R. Stinson, E. A. G. Shaw. Acoustic impedance of small circular orifices in thin plates[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, **77**(6): 2039~2042
- 18 Dah-You Maa. Potential of microperforated panel absorber[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **104**(5): 2861~2866
- 19 A. N. Norris, G. Wichham. Elastic Helmholtz resonators[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, **93**(2): 617~630
- 20 S. B. Horowitz, T. Nishida, L. N. Cattafesta *et al.*. Characterization of a compliant-backplate Helmholtz resonator for an electromechanical acoustic liner [J]. *International J. Aeroacoustics*, 2002, **1**(2): 183~205