

一种新型的抗混叠滤波光纤水声传感器

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 为了进一步改善声低通滤波光纤水声传感器对高频声信号的抑制功能,在以往报道的二阶结构的基础上,提出了一种新型的四阶结构。利用电声类比理论和电路分析方法,建立了四阶声低通滤波光纤水声传感器的一般低频集中参量模型,并对其声压频响进行了理论分析。在驻波罐中对自制的四阶光纤水声传感器进行了测试,实验曲线与理论值具有大致相同的变化形式,测得的两个共振频率分别与各自的理论值基本一致,低频响平坦且非常吻合,平均声压灵敏度为 -140 dB,高频差异较大,主要受低频模型的限制。实验结果较好地验证了低频集中参量模型和理论分析的正确性。为解决光纤水声传感器系统实际应用中遇到的高频干扰引起的信号混叠问题提供了一种新的有效技术途径。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光纤水声传感器; 声压灵敏度; 低通滤波器

中图分类号 TB133; TB565+.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0065

New Anti-Aliasing Filtering Underwater Fiber-Optic Acoustic Sensors

Wang Zefeng Hu Yongming

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

Abstract To improve the high frequency attenuation qualities of the acoustic low-pass filtering underwater fiber-optic acoustic sensors, a new anti-aliasing filtering fiber-optic underwater acoustic sensor with a four-order acoustic low-pass filter is proposed, which is based on the two-order structure reported previously. The general low frequency lumped parameters model of the underwater acoustic sensor is constructed based on the theories of electro-acoustic analogy, and the acoustic performance is predicted by the circuit analysis methods. To test the model and the theories, a four-order acoustic low-pass filtering fiber-optic underwater acoustic sensor is fabricated and tested in a standing-wave tube filled with water. Apart from the high frequency response, the experimental results are well in agreement with the numerical curve. The measured low frequency response is very flat, and the acoustic sensitivity is about -140 dB. The measured two resonant frequencies are in well agreement with the corresponding numerical values, respectively. It is expected that the acoustic low-pass filtering underwater fiber-optic acoustic sensor will become a new class of sensors used to eliminate the aliasing in the future sonar systems.

Key words fiber optics; fiber-optic sensor; fiber-optic underwater acoustic sensor; acoustic pressure sensitivity; low-pass filter

1 引 言

在过去的三十年里,干涉型光纤水声传感器被广泛研究,是水声传感领域的研究热点。由于其灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰、便于复用构成大

规模阵列等诸多优点,正在被考虑构成现代的声纳系统^[1~4]。

基于光源频率调制的相位载波调制解调是国内外各种干涉型光纤水声传感系统采用最多的信号检

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z121)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0925)和国防科技大学优秀博士研究生创新基金(0623)资助课题。

作者简介: 王泽锋(1980—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

测方案之一,但高频引起的信号混叠是该方案必须解决的一个关键问题^[5]。为了有效解决该问题,我们曾首次提出了声低通滤波方案,基于声学滤波器的基本原理设计了一种简单的声低通滤波光纤水声传感器,并对其声压灵敏度频响特性进行了一系列的理论和实验研究^[6~9]。初步的研究结果表明,这种新颖的光纤水声传感器对高频声信号具有较强的抑制作用,能有效地解决信号混叠问题。

为了进一步提高光纤水声传感器对高频声信号的抑制作用,本文基于低通滤波电路中通过增加阶数来改善衰减特性的设计思想,提出了一种新型的由光传感轴和声低通滤波器构成的抗混叠滤波光纤水声传感器。基于电-声类比理论^[8],建立了该水声传感器的低频集中参量模型,利用电路分析方法对其频响特性进行了研究。结果表明,该光纤水声传感器系统与典型的四阶滤波电路具有相似的频响特性,因此称为四阶声低通滤波光纤水听器。实验测得的声压灵敏度频响曲线与数值计算结果基本吻合,较好地验证了模型和理论分析的正确性。

2 理论分析

图 1 是本文设计的全保偏 Michelson 干涉仪型声低通滤波光纤水声传感器的结构框图。其中,光纤传感轴与以往报道的二阶声低通滤波光纤水声传感器^[8]具有相同的结构。干涉仪传感臂和参考臂的光纤长度分别为 15 m 和 1 m,为熊猫型保偏光纤,纤芯和包层的直径分别为 8 μm 和 125 μm ,外涂敷层直径为 250 μm , $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处的传输损耗为 0.43 dB/km。声低通滤波器的外径为 26 mm,内径为 20 mm,总长度为 92 mm,四个端面的厚度都为 2 mm,长腔和短腔的长度分别为 64 mm 和 10 mm。

当声波频率较低时,传感器的线度远小于声波

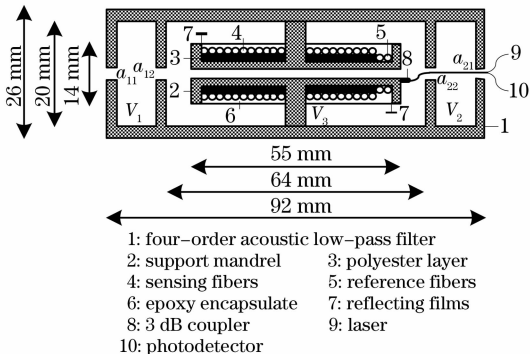


图 1 声低通滤波光纤水声传感器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acoustic low-pass filtering underwater fiber-optic acoustic sensor

波长,由电-声类比理论可建立其低频集中参量模型,此时系统用一个声学等效电路来描述。根据画图原则,可以直接得到图 1 所示的光纤水声传感器的等效电路,如图 2(a)所示。其中, p_1 和 p_2 分别为小孔 a_{11} 和 a_{21} 外表面的声压, p_i 为腔体 V_3 内的声压; C_{c1} 、 C_{c2} 、 C_{c3} 分别为图中腔体 V_1 、 V_2 、 V_3 的声容,且有 $C_c = V_c / (\rho c^2)$ ^[6],其中 V_c 为腔体的有效体积, c 是介质中的声速; $C_{\text{opt}} = \lambda H R^2 / (2nL) \cdot (\Delta\varphi / p)$ 为光纤传感轴的等效声容^[9],其中 H 和 R 分别是传感轴弹性柱面的长度和外半径, L 是传感光纤长度, n 是纤芯的有效折射率, $\Delta\varphi / p$ 是光纤传感轴的声压相位灵敏度; $M_{a_{ij}}$ 和 $R_{a_{ij}}$ 分别为小孔 a_{ij} 的声质量和声阻($i, j = 1, 2$),且有 $M_a = \rho(l + 1.7a) / (\pi a^2)$ 和 $R_a = \rho(l + 1.7a)(2\mu\omega)^{1/2} / (\pi a^3)$ ^[10],其中 ρ 和 μ 分别是介质的密度和运动粘滞系数, a 和 l 分别是小孔的半径和长度。便于讨论,利用电路等效变换原则可以得到图 2(a)的简化模型,如图 2(b)所示,其中 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 分别为流过各网孔边界的声流, $Z_{a_{ij}} = R_{a_{ij}} + sM_{a_{ij}}$, $Z_{c1} = 1/(sC_{c1})$, $Z_{c2} = 1/(sC_{c2})$, $Z_{c3} = 1/[s(C_{c3} + C_{\text{opt}})]$, $s = j\omega$ 。

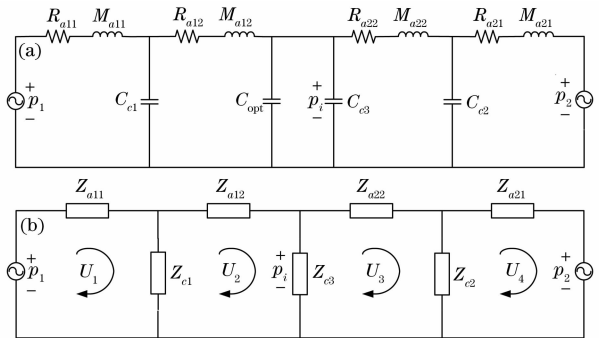


图 2 声低通滤波光纤水声传感器的声学等效电路图。

(a) 直接模型; (b) 简化模型

Fig. 2 Acoustic equivalent circuit of the acoustic low-pass filtering underwater fiber-optic acoustic sensor.

(a) Direct model; (b) simplified model

在图 2(b)中,由电路基尔霍夫定律可得各网孔的压降方程为

$$\begin{cases} -p_1 + (Z_{a_{11}} + Z_{c1})U_1 - Z_{c1}U_2 = 0, \\ (Z_{c1} + Z_{c3} + Z_{a_{12}})U_2 - Z_{c1}U_1 - Z_{c3}U_3 = 0, \\ (Z_{c2} + Z_{c3} + Z_{a_{22}})U_3 - Z_{c3}U_2 - Z_{c2}U_4 = 0, \\ p_2 + (Z_{a_{21}} + Z_{c2})U_4 - Z_{c2}U_3 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

上述线性方程组还可以写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} Z_{a_{11}} + Z_{c1} & -Z_{c1} & 0 & 0 \\ -Z_{c1} & Z_{c1} + Z_{c3} + Z_{a_{12}} & -Z_{c3} & 0 \\ 0 & -Z_{c3} & Z_{c2} + Z_{c3} + Z_{a_{22}} & -Z_{c2} \\ 0 & 0 & -Z_{c2} & Z_{a_{21}} + Z_{c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ 0 \\ 0 \\ -p_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

通过求解方程组可以得到各网孔的声流,腔体 V_3 内的声压为

$$p_i = (U_2 - U_3)Z_{c3}. \quad (3)$$

定义系统的声压传递函数为

$$T(s) = \frac{2p_i}{p_1 + p_2} = \frac{2(U_2 - U_3)Z_{c3}}{p_1 + p_2}, \quad (4)$$

当频率较低时,可认为声滤波器四周的声场是均匀的,即 $p_1 = p_2$ 。同时,假设水听器具有左右两端对称的结构,并记 $R_{a_{1i}} = R_{a_{2i}} = R_{a_i}, M_{a_{1i}} = M_{a_{2i}} = M_{a_i}$ ($i = 1, 2$), $C_{c1} = C_{c2} = C_1, C_2 = (C_{c3} + C_{opt})/2$, 则声压传递函数(4)式可以写成

$$T(s) = \frac{1}{\alpha s^4 + \beta s^3 + \gamma s^2 + \zeta s + 1}, \quad (5)$$

其中

$$\alpha = M_{a_1} M_{a_2} C_1 C_2, \quad (6)$$

$$\beta = (R_{a_1} M_{a_2} + R_{a_2} M_{a_1}) C_1 C_2, \quad (7)$$

$$\gamma = M_{a_1} (C_1 + C_2) + M_{a_2} C_2 + R_{a_1} R_{a_2} C_1 C_2, \quad (8)$$

$$\zeta = R_{a_1} (C_1 + C_2) + R_{a_2} C_2, \quad (9)$$

由(5)式可知,这是一个典型的四阶滤波系统,因此也称之为四阶声低通滤波光纤水声传感器。由于系统的损耗很小,共振方程近似为

$$M_{a_1} M_{a_2} C_1 C_2 s^4 + [M_{a_1} (C_1 + C_2) + M_{a_2} C_2] s^2 + 1 = 0, \quad (10)$$

解(10)式可得系统的两个共振频率 ω_1 和 ω_2 为

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{(\kappa \omega_{01}^2 + \omega_{02}^2) \pm \sqrt{\kappa^2 \omega_{01}^4 + \omega_{02}^4 + (2\kappa - 4) \omega_{01}^2 \omega_{02}^2}}{2}, \quad (11)$$

式中 $\kappa = 1 + M_{a_1}/M_{a_2}, \omega_{01} = [1/(M_{a_1} C_1)]^{1/2}, \omega_{02} = [1/(M_{a_2} C_2)]^{1/2}$ 。

对于本文设计的声低通滤波光纤水声传感器,内腔长度比外腔的大得多,而且光纤传感轴的声压灵敏度较高,因此有 $C_2 \gg C_1$, 即 $\omega_{01} \gg \omega_{02}$ 时,由(11)式可得两个共振频率分别

$$\omega_1 \approx \sqrt{\kappa} \omega_{01}, \quad \omega_2 \approx \frac{\omega_{02}}{\sqrt{2}}, \quad (12)$$

共振频率处对应的传递函数幅度分别为

$$|T(\omega_1)| \approx \frac{Q_2^2}{A \sqrt{1 + BQ_1^2}}, \quad (13)$$

$$|T(\omega_2)| \approx \frac{\sqrt{2}}{\epsilon} Q_2,$$

式中

$$A = \kappa(\epsilon - 1)/(\kappa - 1),$$

$$B = [(\kappa - 1)^2 + (\epsilon - 1)]^2/\kappa,$$

$$\epsilon = 1 + R_{a_1}/R_{a_2},$$

$Q_1 = (M_{a_1}/C_1)^{1/2}/R_{a_1}$ 和 $Q_2 = (M_{a_2}/C_2)^{1/2}/R_{a_2}$ 分别为短腔和长腔的声学品质因素。若所有小孔的结构尺寸相同,则有 $\kappa = \epsilon = 2$, 带入(12)式和(13)式可知与之前得到的结论相同^[7]。

3 实验结果与分析

为了验证上述模型及理论分析的正确性,在驻波罐中利用比较测量法对图 1 所示的光纤水声传感器进行了测试,信号检测采用基于光频调节的相位补偿法^[11,12]。实验结果表明,在测试频带 20~6000 Hz 上,光纤传感轴响应非常平坦,平均声压灵敏度约为 -140 dB,波动小于 ± 2 dB。并将实验测得的声低通滤波光纤水声传感器的声压灵敏度频响与数值计算结果进行比较,如图 3 所示,其中图 3(a)对应的内外端面小孔直径分别为 $d_1 = 1.0$ mm, $d_2 = 1.8$ mm, 图 3(b)对应的内外端面孔径 $d_1 = d_2 = 1.8$ mm, 小孔长度均为 2 mm。图 3(a)中,小圆点标记的曲线为实验测得的频响,虚线和实线分别是 $Q_2 = 7.8$ (按理论表达式计算得到)和 $Q_2 = 1.2$ (利用测得的最大声压灵敏度计算给出)对应的数值计算结果;图 3(b)中,小圆点标记的曲线为实验测得的频响,虚线和实线分别是 $Q_2 = 12.8$ (按理论表达式计算得到)和 $Q_2 = 2$ (利用测得的最大声压灵敏度计算给出)对应的数值计算结果。数值计算时,假设传感轴的声压灵敏度为 -140 dB,传感轴其它各参数取值为 $H = 38$ mm, $R = 6.5$ mm, $L = 14$ m, $n = 1.456$ 。

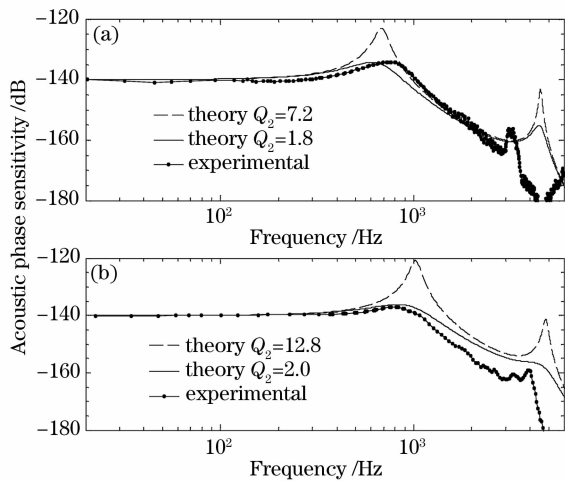


图3 四阶声低通滤波光纤水声传感器声压灵敏度频响的测量值与数值计算结果的对比。(a) $d_1 = 1.0$ mm, $d_2 = 1.8$ mm; (b) $d_1 = d_2 = 1.8$ mm

Fig. 3 Comparisons of measurement and numerical acoustic sensitivity frequency response of four-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone. (a) $d_1 = 1.0$ mm, $d_2 = 1.8$ mm; (b) $d_1 = d_2 = 1.8$ mm

在图3中,从实验测得的频响曲线可以清楚地看到两个共振频率,图3(a)分别为750 Hz和3200 Hz,图3(b)分别为850 Hz和4000 Hz,较低的共振频率与各自的理论值650 Hz和900 Hz基本一致,较高的共振频率分别低于理论值4500 Hz和4800 Hz,差异稍大。实际测得的最大声压灵敏度比理论值小很多,这表明系统的实际等效声阻要比理论值大得多,这主要来自两方面的贡献:其一,理论值是基于小孔内表面无限光滑给出的,这在实际加工中无法做到,小孔内表面的不光滑会增加小孔的等效声阻;其二,前面的低频模型假设声滤波器各壁面是刚性的,而实际在水中,由于滤波器各壁面存在微小的振动而产生辐射声阻,使得系统总的等效声阻增加^[13~15]。从图3中还可以看到,测试得到的频响曲线与理论值具有大致相同的变化形式,低频响应吻合较好,高频响应差异较大。而引起高频差异的主要原因有两个:其一,前面建立的集中参量模型只适用于频率较低的情况,当频率较高时,探头结构尺寸与声波波长可以相比拟,理论结果与实际情况的差异会随着频率的增加而急剧加大,到一定频率时,该模型将不再适用,必须建立更精确的模型进行求解;其二,由于高频声压灵敏度很低,因此实验中测得的信号幅度非常小,而加大声信号发射系统的声压级又会使声压罐中的声波波形产生畸变,因此高频的测量误差

要远大于低频。此外,实际测试时声低通滤波光纤水声传感器两端的声压不均匀、小孔的有效值与理想值会有出入等因素都会对测量结果,尤其是高频响应造成影响,更为详细的误差分析将在后续的文章中报道。

4 结 论

本文在二阶声低通滤波光纤水声传感器结构的基础上,设计了一种新型四阶结构。基于电-声类比理论,建立了该水声传感器的一般低频集中参量模型,得到了声压传递函数表达式。理论分析表明,该新型光纤水声传感器与典型的四阶低通滤波电路相似,因此称之为四阶声低通滤波光纤水声传感器。在驻波罐中对实际四阶声低滤波光纤水声传感器的声压相位灵敏度频响进行了测试。结果表明,除高频差异较大(主要由模型自身的条件限制引起)外,实验测得的频响曲线与理论曲线非常吻合,从而较好地验证了低频集中参量模型和理论分析的正确性。声低通滤波光纤水声传感器是解决未来声纳系统信号混叠问题的一种简单且行之有效的方案,其研制成功以及进一步的理论分析和优化设计,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 T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge *et al.*. Optical fiber sensor technology[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **18**(4): 626~665
- 2 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology[J]. *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 1996, **143**(3): 204~209
- 3 G. A. Cranch, P. J. Nash *et al.*. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. *IEEE Sensors J.*, 2003, **3**(1): 19~30
- 4 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
- 5 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophones[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 92~98
王泽锋,胡永明,孟洲等.干涉型光纤水声传感器相位载波调制-解调中信号混叠产生的机理及解决方案[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 92~98
- 6 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Fiber-optic hydrophone using a cylindrical Helmholtz resonator as a mechanical anti-aliasing filter[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 37~39
- 7 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Novel mechanical anti-aliasing fiber-optic hydrophone with a fourth-

- order acoustic low-pass filter[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1267~1269
- 8 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Experimental investigation on a fiber-optic hydrophone with a cylindrical Helmholtz resonator[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(5): 1606~1608
- 9 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Frequency response of second-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1883~1887
王泽锋,胡永明,孟洲等. 二阶水声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1883~1887
- 10 M. R. Stinson, E. A. G. Shaw. Acoustic impedance of small circular orifices in thin plates[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, **77**(6): 2039~2042
- 11 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 Optica Sinica*, 2007, **34**(1): 105~108
王泽锋,罗洪,熊水东等. 基于光频调节的干涉型光纤水声传感器相位补偿检测方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 654~658
- 12 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Working-point control method for readout of dynamic phase changes in interferometric fiber-optic sensors by tuning the laser frequency [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(19): 3524~3529
- 13 R. C. Chanaud. Effects of geometry on the resonance frequency of Helmholtz resonators[J]. *J. Sound and Vibration*, 1994, **178**(3): 337~348
- 14 Norris A N, Wickham G. Elastic Helmholtz resonators[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, **93**(2): 617~630
- 15 Horowitz S B, Nishida T, Cattafesta L N *et al.*. Characterization of a compliant-backplate Helmholtz resonator for an electromechanical acoustic liner [J]. *International J. Aeroacoustics*, 2002, **1**(2): 183~205