

文章编号: 0253-2239(2008)10-1883-05

二阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性

王泽锋 胡永明 孟洲 罗洪 熊水东 倪明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 信号混叠是基于光纤水听器的现代声纳系统走向应用必须解决的一个关键问题。初步的实验结果已经表明, 声低通滤波光纤水听器是解决信号混叠问题的一种简单且行之有效的方案。基于电-声类比理论, 建立了声低通滤波光纤水听器的低频集中参量模型, 利用电路分析的方法对其频响特性进行了研究。结果表明, 这种光纤水听器系统与典型的二阶低通滤波电路具有相似的频响特性。为了验证理论分析的正确性, 设计制作了一个简单的声低通滤波光纤水听器, 并在驻波罐中对其声压灵敏度频响特性进行了测试, 实验结果与数值计算的结果基本吻合。该光纤水听器低频响应非常平坦, 声压灵敏度约为 -141 dB, 测量共振频率为 985 Hz, 与理论值 1270 Hz 基本一致。共振频率处的声压灵敏度为 -126.8 dB, 衰减速率约为 20 dB/倍频程, 3000 Hz 以后的灵敏度衰减幅度大于 20 dB。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光纤水听器; 声压灵敏度; 低通滤波器

中图分类号 TB133; TN565⁺.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082810.1883

Frequency Response of Two-Order Acoustic Low-Pass Filtering Fiber-Optic Hydrophones

Wang Zefeng Hu Yongming Meng Zhou Luo Hong Xiong Shuidong Ni Ming

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

Abstract Signal aliasing is a key problem in applications of modern sonar systems based on fiber-optic hydrophones. Preliminary experimental results have shown that the acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone is a simple and effective anti-aliasing scheme. We construct the low frequency lumped parameter model of acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone based on the theories of electro-acoustic analogy. The frequency response of the fiber-optic hydrophone is estimated using the circuit analysis method. Theoretical results show that the fiber-optic hydrophone system has the similar response characteristics as a classical two-order low-pass filtering circuit. A simple low-pass filtering fiber-optic hydrophone is designed and manufactured to test the theory. And the acoustic sensitivity frequency response is measured in a standing-wave tube. Experimental results are, on the whole, in agreement with the numerical values. The low frequency acoustic sensitivity is about -141.5 dB. The measured resonant frequency is 985 Hz, which accords well with the theoretical value of 1270 Hz. The acoustic sensitivity at resonant frequency is -126.8 dB, and the attenuation rate is about 20 dB/octave. The attenuation beyond 3 kHz is bigger than 20 dB.

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

1 引 言

干涉型光纤水听器具有灵敏度高、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声纳系统^[1~4]。信号混叠是基于光纤水听器的现代声纳系统走向应用必须解决的一个关键问题^[5~7]。为了解决该问题, 曾提出了声

收稿日期: 2008-01-07; 收到修改稿日期: 2008-04-25

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z121)、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)资助项目。

作者简介: 王泽锋(1980—), 男, 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, 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

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听器,并对其声压灵敏度频响特性进行了一系列的实验研究^[7~9]。初步的结果表明,这种新颖的光纤水听器对高频声信号具有很强的抑制作用,能有效地解决光纤水听器系统的混叠问题。这些研究以实验为主,通过实际测量给出声低通滤波光纤水听器的频响曲线,并对其共振频率进行了简单的理论分析。但是,没有考虑光纤传感轴弹性形变的影响。进一步的实验研究表明,当光纤水听器的声压灵敏度较高时,传感轴的弹性形变对共振频率和声压灵敏度频响的影响非常大,甚至是决定性的因素。

本文基于电-声类比理论^[10],建立了声低通滤波光纤水听器的低频集中参量模型。巧妙地利用反推的方法,给出了光纤传感轴的等效声顺与其声压灵敏度的关系式,并利用电路分析方法对其频响特性进行了研究。

2 理论分析

2.1 探头设计

图1是本文设计的全保偏 Michelson 型声低通滤波光纤水听器结构框图。与以往的相比,该光纤水听器选用了弹性系数更大的聚氨酯材料进行增敏,同时将耦合器嵌入到支撑骨架里以提高其稳定性。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,λ=1550 nm 处的传输损耗为 0.43 dB/km。传感光纤(信号臂)均匀地紧绕在弹性增敏层上,参考光纤直接绕在铝骨架上。二阶声低通滤波器由一个两端开孔的封闭铝质圆柱筒构成,传感轴与声滤波器之间通过泡沫连接,泡沫起到隔声的作用。传感轴上

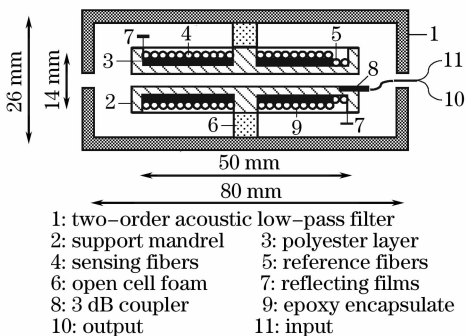


图1 二阶声低通滤波光纤水听器结构框图

Fig. 1 Sketch of two-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone

聚氨酯弹性层的厚度约为 2.5 mm,光纤表面涂有一层很薄的环氧树脂,起到保护光纤的作用。传感轴长 50 mm,总外径(包括弹性层、光纤层以及保护层)为 14 mm,中间是一个直径为 5 mm 的孔。声滤波器的外径为 26 mm,内径为 20 mm,总长度为 80 mm,两个端面的厚度都为 2 mm,端面小圆孔的直径都为 1.6 mm。

2.2 集中参量模型及频响特性

假设声滤波器各壁面满足刚性条件,则当声波波长远远大于光纤水听器结构尺寸时,可以认为两端开口处的声压相同,根据电-声类比的原理,可以直接画出该光纤水听器系统的等效声学电路图,如图 2(a)所示。其中, R_a 和 M_a 分别是小孔的等效声阻和等效声质量; C_c 和 C_o 分别是腔体和传感轴的等效声顺。为方便讨论,根据电路分析理论,可以得到该系统的简化等效电路图,如图 2(b)所示。其中, C 等于空腔和传感轴的总等效声顺的一半; p_1 和 p_2 分别是孔口和腔内的声压。

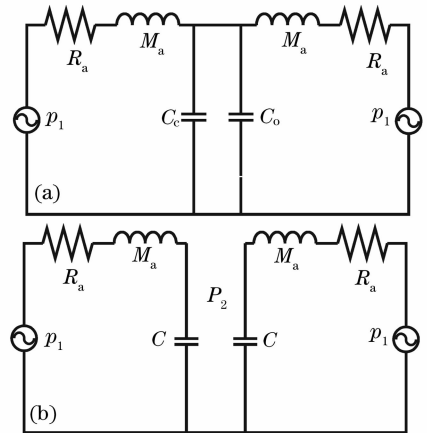


图2 光纤水听器的声学等效电路图。

(a) 直接模型, (b) 简化模型

Fig. 2 Acoustic equivalent circuit of the fiber-optic hydrophone. (a) Direct model, (b) simplified model

根据图 2(b),利用电路分析理论可以得到该系统的声压传递函数为

$$T(\omega) = \frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{1 + j\omega R_a C - \omega^2 M_a C}, \quad (1)$$

其中

$$C = \frac{C_c + C_o}{2}, \quad (2)$$

若令 $j\omega = s$,则(1)式可以写成

$$T(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + (\omega_0/Q)s + \omega_0^2}, \quad (3)$$

式中

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_a C}}, \quad Q = \frac{1}{R_a} \sqrt{\frac{M_a}{C}}, \quad (4)$$

(3)式是一个典型的二阶低通滤波电路的传递函数表达式^[11],其中 ω_0 和 Q 分别是等效声学电路的谐振频率和声学品质因数。

二阶低通滤波系统的幅度频率特性可以从(3)式求出为

$$|T(j\omega)| = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega_0^2/Q^2)\omega^2}}, \quad (5)$$

从式中可以看到,它与 Q 值有关,不同 Q 值时的幅度频率特性如图3所示。

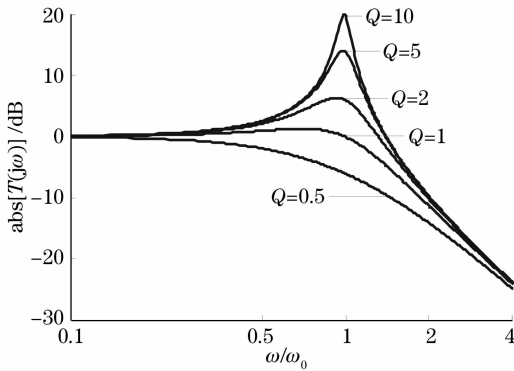


图3 二阶低通滤波系统幅度频率特性与 Q 值的关系

Fig. 3 Frequency response of two-order low-pass filtering system with different Q

小孔的等效声质量 M_a 和等效声阻 R_a 可以分别由下面的式子给出^[12]:

$$M_a = \frac{\rho(l + \delta)}{\pi a^2}, \quad (6)$$

$$R_a = \frac{\rho(l + \delta) \sqrt{2\mu\omega}}{\pi a^3}, \quad (7)$$

当频率较低时,腔体主要表现为容性,其等效声顺 C_c 可以表示为^[10]

$$C_c = \frac{V_c}{\rho c^2}, \quad (8)$$

式中 ρ 和 μ 分别为介质的密度和运动粘滞系数, c 为介质中的声速; a 和 l 分别为小孔的半径和长度; V_c 为腔体的有效体积,等于圆柱的容积减去光纤传感轴的体积; δ 为小孔长度的末端修正系数,一般取 $\delta = 1.7a$ 。

2.3 光纤传感轴的等效声顺

光纤传感轴的等效声顺 C_o 可以利用弹性力学基本原理,建立集中等效模型进行求解。但是,传感轴的弹性柱面上紧绕了光纤,不能直接利用经典的单层圆柱壳应力应变理论进行求解,必须建立多层模型,比较复杂。而且,聚氨酯材料的杨氏模量和泊

松比很不确定,一般由实验测量给出。本文巧妙地采用反推的方法,即利用光纤传感轴自身的声压灵敏度来求解其等效声顺,具体推导过程如下。

假设光纤传感轴的等效弹性系数为 K_m ,表面径向位移为 Δr ,则由胡克定律可得

$$F = -K_m \cdot \Delta r, \quad (9)$$

式中 $F = p_2 \cdot S$ 是弹性层外表面受到的压力, p_2 为腔内声压, S 为弹性柱面的表面积。

对于 Michelson 干涉仪,两列光波的相移 $\Delta\phi$ 与传感光纤长度的变化量 Δl 之间的关系可以写成

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} n \Delta l = \frac{4\pi}{\lambda} n N \Delta C, \quad (10)$$

式中 n 为纤芯的折射率, λ 为光波波长, N 是弹性层上缠绕的光纤圈数, ΔC 为弹性柱面圆周长的变化。由于受到声压的作用,弹性柱面的周长变化非常小,它与表面径向位移 Δr 之间有如下关系:

$$\Delta C = 2\pi \cdot \Delta r, \quad (11)$$

联立(9)式~(11)式可得

$$\frac{\Delta\phi}{p_2} = \frac{8\pi^2 N n S}{\lambda K_m}, \quad (12)$$

式中左边即为光纤传感轴的声压灵敏度。利用弹性系数 K_m 、力顺 C_m 以及声顺 C_o 之间的关系式^[10]

$$C_m = \frac{1}{K_m}, \quad C_o = C_m S^2, \quad (13)$$

可得光纤传感轴等效声顺的表达式

$$C_o = \frac{\lambda H R^2}{2nL} \left(\frac{\Delta\phi}{p_2} \right). \quad (14)$$

式中 H 和 R 分别为弹性增敏层的高度(即长度)和外半径, L 为传感光纤长度。

3 实验结果与分析

在驻波罐中利用比较测量法对图1所示的光纤水听器进行了测试,信号检测采用基于光频调节的相位补偿法^[7,8,13]。将实验测得的声压灵敏度频响与数值计算的结果进行了比较,如图4所示。其中,小圆点和星号标记的曲线分别为光纤传感轴自身(不含声低通滤波器)和声低通滤波光纤水听器声压灵敏度频响的测量结果,实线和虚线分别是 $Q=40$ [按(4)式计算得到的理论值]和 $Q=5.5$ (利用测量得到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 -141 dB,各参数取值为 $H=38$ mm, $R=6.5$ mm, $L=14$ m, $n=1.456$ 。

从图4中可以看到,光纤传感轴在测量频带 $20 \sim 5000$ Hz上响应非常平坦,平均声压灵敏度约

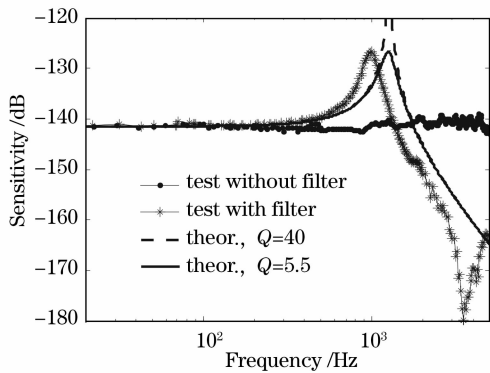


图4 二阶声低通滤波光纤水听器声压灵敏度频响的测量值与数值计算结果的对比

Fig.4 Comparisons of measured and numerical acoustic sensitivity frequency response of two-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone

为 -141 dB(0 dB = 1 rad/ μ Pa),波动小于 ± 2 dB。除共振频率和高频部分稍有差别外,测量得到的光纤水听器声压灵敏度频响与 $Q=5.5$ 对应的理论曲线非常吻合,很好地验证了低频集中参量模型和理论分析的正确性。实际测量得到的最大声压灵敏度比理论值($Q=40$ 对应的值)小很多,这表明系统的实际等效声阻要比(7)式给出的理论值大得多,这主要来自两方面的贡献:其一,(7)式是基于小孔内表面无限光滑给出的值,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,前面的低频集中参量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。实验测得的共振频率为 985 Hz,低于数值计算的结果 1270 Hz,引起这种差别的原因主要有两个:其一,输入输出光纤使得孔径的有效值减少(如图1所示,光纤的外包层直径为 0.25 mm,使得有效孔径减少 0.5 mm),由(4)式和(7)式可知,共振频率与孔径成正比,孔径的减少使得共振频率往低频移动;其二,当各壁面不是很厚时,其弹性形变与腔内水的压缩量以及传感轴的形变相比,并不能完全忽略^[14~16],这相当于在腔体和传感轴的等效声顺上再并联一个声顺,使得总的等效声顺增大,由(4)式可知,这也会使共振频率变低。而引起高频差异的原因也可能有两个:其一,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;其二,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,集中参量模型给出的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,集中参量模型不再适用,必须建立更精确的模型进行求解。

4 结 论

本文基于电-声类比理论,建立了声低通滤波光纤水听器的低频集中参量模型,巧妙地利用反推的方法,给出了光纤传感轴的等效声顺与其声压灵敏度的关系式。利用电路分析方法对其频响特性进行了理论研究。结果表明,这种光纤水听器系统与典型的二阶低通滤波电路具有相同的频响特性。在驻波罐中对二阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响进行了测量。实验结果与数值计算的结果非常吻合,从而有效地验证了集中参量模型和理论分析的正确性。

参 考 文 献

- 1 T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge *et al.*. Optical fiber sensor technology[J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1982, **MTT-30**(4): 472~511
- 2 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology[J]. *IEE Proc. Rador Sonar Navig.*, 1996, **143**(3): 204~208
- 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 J. B. Carroll, D. R. Huber. A fiber-optic hydrophone with a mechanical anti-aliasing filter[J]. *J. Lightw. Technol.*, 1986, **LT-4**: 83~86
- 6 J. N. Roe, K. Dobashi, K. Kabayashi. Design study of an optical hydrophone array[C]. *Proc. SPIE*, 1992, **1756**: 42~47
- 7 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.干涉型光纤水听器相位载波调制-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
- 8 Wang Zefeng, Hu Yongming, Ni Ming *et al.*. A fiber-optic hydrophone with a cylindrical Helmholtz resonator[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6781**: 7~12
- 9 Wang Zefeng, Hu Yongming, Ni Ming *et al.*. A fiber-optic hydrophone with an acoustic filter[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6830**: 11~15
- 10 Du Gonghuan, Zhu Zheming, Gong Xiufen. *Principles of Sound* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981. 112~159
杜工焕,朱哲明,龚秀芬. *声学基础* [M]. 上海:上海科技出版社, 1981. 112~159
- 11 Li Yuanwen, Hu Jun. *Design of Active Filters* [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 1986. 6~10

- 李远文, 胡 筠. 有源滤波器设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1986. 6~10
- 12 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
- 13 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, **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
- 14 R. C. Chanaud. Effects of geometry on the resonance frequency of Helmholtz resonators[J]. *J. Sound and Vibration*, 1994, **178**(3): 337~348
- 15 Norris A N, Wickham G. Elastic Helmholtz resonators[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, **93**(2): 617~630
- 16 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

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。执笔人(第一作者)应是在激光及其相关领域具有一定造诣,对某一方面有较深入研究的专家、学者。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。投稿同时,请作者提供详细的作者简介(包括研究领域、主要研究成果等)。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

投稿方式,网上投稿:www.opticsjournal.net 或 E-mail:mayi@siom.ac.cn

咨询电话:021-69918427

《中国激光》编辑部