

四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 倪 明

(国防科技大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2008 年 11 月 5 日收到,2008 年 12 月 20 日收到修改稿)

对四阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性进行了详细的理论和实验研究.在已有的低频集中参量模型中引入了一个机械声阻,用于描述系统的机械损耗,从而得到了改进的声学等效电路.相位频响特性对于光纤水听器的阵列应用非常重要,关系到阵列的波束形成效果,进而影响系统定位、识别与跟踪目标的能力,因此在分析幅度频响特性的同时研究了相位频响特性.仿真分析了各主要参量对声压传递函数的影响,得到了一些对声低通滤波光纤水听器设计具有重要指导意义的结论.实测声压灵敏度频响曲线与仿真结果基本一致,较好地验证了理论分析的正确性.四阶声低通滤波光纤水听器的研制成功,对于提高光纤水听器阵列的抗高频混叠性能具有重要的作用.

关键词:光纤传感器,光纤水听器,声压灵敏度,低通滤波器

PACC:4281C,4281P,4320,4330

1. 引 言

光纤水听器是基于光电子学、光纤光学、水声学等多门学科的一种新型水声传感器,在军事和民用上都具有巨大的应用前景.自 70 年代末被提出以来,光纤水听器获得了广泛的研究并取得了迅速的发展,正在被考虑构成未来的光电声纳系统^[1-4].一般的声纳系统,为了避免超系统工作带宽引起的高频混叠,在数字采样之前都要对原始信号进行抗混叠滤波预处理^[5,6].对于传统的压电声纳系统,采用成熟的抗混叠滤波电路即可有效解决高频混叠问题.然而,在基于相位载波调制解调的光纤水听器阵列中,同时存在采样频率过低引起的采样混叠和光源调制频率过低引起的调制混叠,后者无法用常规的电路抗混叠滤波技术来消除^[5-7].解决该问题的技术途径之一是尽量加大系统的工作带宽,但成本会急剧上升,而且将给信号处理带来极大的困难^[7].为了更加有效地解决光纤水听器阵列的高频混叠问题,我们曾提出了声低通滤波方案,并设计了二阶、

四阶声低通滤波光纤水听器^[7-11].初步的理论分析和实验结果表明,声低通滤波光纤水听器对高频信号具有较强的抑制作用,为消除光电声纳系统的高频混叠提供了一种有效的技术途径.

本文对四阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性进行了详细的理论和实验研究.仿真分析了衰减因子、腔体长度、小孔直径、小孔长度等主要参量对声低通滤波光纤水听器声压传递函数的影响,得到了一些有意义的结论.在充水驻波罐中采用比较测量法得到的声压灵敏度频响曲线与仿真结果基本一致,较好地验证了理论分析的正确性.本文的研究对于声低通滤波光纤水听器的阵列应用具有重要的指导意义.

2. 理 论

图 1 是左右两端对称的四阶声低通滤波光纤水听器,由一个四阶声滤波器和光纤传感轴构成.图 1(a)(b)(c)分别为实物图、结构原理图和声学等效电路.其中,光纤传感轴的核心是一个 Michelson 光

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA09Z121)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-06-0925)、国防科技大学优秀博士研究生创新重点基金(批准号:0623)资助的课题.

[†] E-mail: hotrosemaths@163.com

纤干涉仪,使用的光纤为熊猫型保偏光纤(中国电子科技集团第四十六所生成),纤芯直径为 $8\ \mu\text{m}$,包层直径为 $125\ \mu\text{m}$,涂覆层直径为 $246\ \mu\text{m}$.图 1(c)中, R_{a1}, M_1, R_{a2}, M_2 分别为外、内端面小孔的等效声阻和声质量; C_{c1}, C_{c2} 和 C_{opt} 分别为短腔、长腔和光纤传感轴的等效声容; p_1 和 p_2 分别是外端面小孔外表面和长腔内的声压; R_{D1} 和 R_{D2} 是为了描述系统的机械损耗而引入的参量,称为机械声阻.

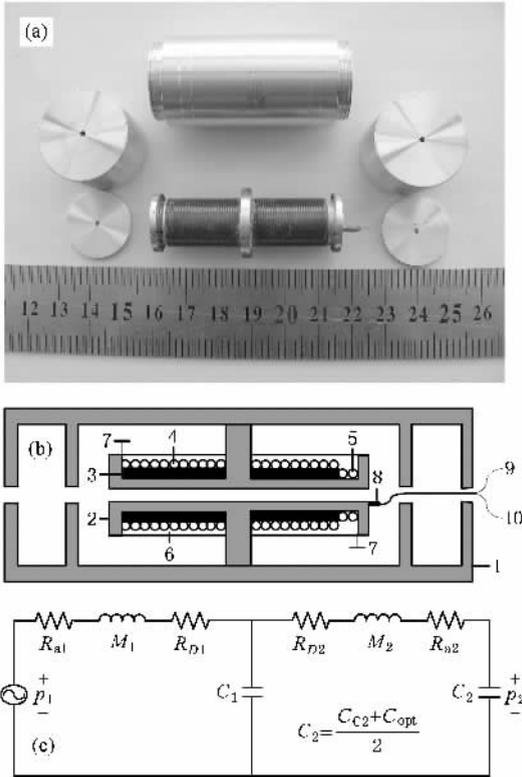


图 1 四阶声低通滤波光纤水听器 (a)实物图;(b)结构原理图(1 为四阶声滤波器,2 为支持骨架,3 为聚氨酯弹性层,4 为传感光纤,5 为参考光纤,6 为环氧保护层,7 为镀膜反射端面,8 为 3 dB 耦合器,9 为激光,10 为光电探测器);(c)声学等效电路图

一般来说,机械损耗与小孔的长度成正比,与小孔的直径和腔体的体积成反比,因此可以定义

$$R_{D1} = \zeta_1 \sqrt{M_1/C_1}, R_{D2} = \zeta_2 \sqrt{M_2/C_2}, \quad (1)$$

式中 ζ_1 和 ζ_2 是衰减因子,它与小孔表面的粗糙度、测量状态等因素有关,一般很难从理论上给出确切值,但是可以利用实验测得的数据计算得到.

我们知道,任何一个四阶系统都可以用两个二阶系统相乘得到,其传递函数一般表达式可以写成^[12,13]

$$T(s) = \frac{1}{s^4 + as^3 + bs^2 + cs + d}, \quad (2)$$

其中

$$a = 2(\xi_1 \omega_1 + \xi_2 \omega_2) = \frac{(R_1 M_2 + R_2 M_1) C_1 C_2}{M_1 M_2 C_1 C_2}, \quad (3)$$

$$b = \omega_1^2 + 4\xi_1 \omega_1 \xi_2 \omega_2 + \omega_2^2 = \frac{M_1(C_1 + C_2) + M_2 C_2 + R_1 R_2 C_1 C_2}{M_1 M_2 C_1 C_2}, \quad (4)$$

$$c = 2\omega_1 \omega_2 (\xi_1 \omega_2 + \xi_2 \omega_1) = \frac{R_1(C_1 + C_2) + R_2 C_2}{M_1 M_2 C_1 C_2}, \quad (5)$$

$$d = \omega_1^2 \omega_2^2 = \frac{1}{M_1 M_2 C_1 C_2}, \quad (6)$$

式中 ω_1 和 ω_2 分别为两个二阶系统的共振频率, ξ_1 和 ξ_2 分别为各自对应的衰减因子; $R_1 = R_{a1} + R_{D1}$, $R_2 = R_{a2} + R_{D2}$.

求解方程组(3)–(6),可以得到两个二阶系统的四个参数 $\omega_1, \omega_2, \xi_1$ 和 ξ_2 . 一般情况下的求解非常复杂,但是对于本文研究的声低通滤波光纤水听器而言,系统的低频损耗非常小,即声阻可以忽略,近似地认为 $\xi_1 \approx 0$ 和 $\xi_2 \approx 0$,于是联立(4)和(6)式可得

$$\omega_1^2 + \omega_2^2 = \kappa \omega_{01}^2 + \omega_{02}^2, \quad (7)$$

$$\omega_1^2 \omega_2^2 = \omega_{01}^2 \omega_{02}^2, \quad (8)$$

其中

$$\kappa = 1 + M_1/M_2, \quad (9)$$

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{M_1 C_1}}, \omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{M_2 C_2}}. \quad (10)$$

联立方程(7)和(8)可解得系统的两个共振频率 ω_1 和 ω_2 为

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

当小孔的结构参数相同时,记 $R_{a1} = R_{a2} = R_a$ 和 $M_1 = M_2 = M_a$,则声压传递函数可以简化成

$$T(\omega) = \frac{\omega_{01}^2 \omega_{02}^2}{\omega^4 - j\left(\frac{\omega_{01}}{Q_1} + \frac{\omega_{02}}{Q_2}\right) \omega^3 - \left(\omega_{02}^2 + 2\omega_{01}^2 + \frac{\omega_{01} \omega_{02}}{Q_1 Q_2}\right) \omega^2 + j\left[\left(\frac{\omega_{01}}{Q_1} + \frac{\omega_{02}}{Q_2}\right) \omega_{01}^2 + \frac{\omega_{01}}{Q_1} \omega_{02}^2\right] \omega + \omega_{01}^2 \omega_{02}^2}, \quad (12)$$

式中

$$Q_1 = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{M_a}{C_1}}, Q_2 = \frac{1}{R_2} \sqrt{\frac{M_a}{C_2}} \quad (13)$$

当频率较低时,小孔的等效声阻 R_a 和等效声质量 M_a 可分别写成 $R_a = \rho(l + 1.7a)(2\mu\omega)^{1/2}/(\pi a^3)$ 和 $M_a = \rho(l + 1.7a)(\pi a^2)$,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^[14].腔体和传感轴的等效声容可分别写成 $C_1 = V_{c1}(\rho c^2)$, $C_2 = (V_{c2} - V_{opt})(\rho c^2)$ 和 C_{opt}

$= \lambda HR^2(2nL)(\Delta\varphi/p)$ 其中 V_{c1} , V_{c2} 和 V_{opt} 分别为短腔、长腔和光纤传感轴的体积; c 是介质中的声速^[9,11]; 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,主要来自弹性层形变引起的光纤长度变化,而光弹效应对声压灵敏度的贡献可以忽略.

由(12)式可得系统声压传递函数的幅度和相位频响分别为

$$|\mathcal{T}(\omega)| = \frac{\omega_{01}^2 \omega_{02}^2}{\left| -j\left(\frac{\omega_{01}}{Q_1} + \frac{\omega_{02}}{Q_2}\right)\omega^3 - \left(\frac{\omega_{01}\omega_{02}}{Q_1 Q_2}\right)\omega^2 + j\left[\left(\frac{\omega_{01}}{Q_1} + \frac{\omega_{02}}{Q_2}\right)\omega_{01}^2 + \frac{\omega_{01}}{Q_1}\omega_{02}^2\right]\omega \right|} \quad (14)$$

$$\arg \mathcal{T}(\omega) = \tan^{-1} \frac{\left(\frac{\omega_{01}}{Q_1} + \frac{\omega_{02}}{Q_2}\right)\omega_{01}^2 \omega + \frac{\omega_{01}}{Q_1}\omega_{02}^2 \omega - \left(\frac{\omega_{01}}{Q_1} + \frac{\omega_{02}}{Q_2}\right)\omega^3}{\omega^4 + \omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - \left(\omega_{02}^2 + 2\omega_{01}^2 + \frac{\omega_{01}\omega_{02}}{Q_1 Q_2}\right)\omega^2} \quad (15)$$

下面分3种情况进行讨论.

1) 当 $C_2 \gg C_1$ 即 $\omega_{01} \gg \omega_{02}$ 时,由(11)式可得系统的两个共振频率分别为

$$\omega_1 \approx \sqrt{2}\omega_{01}, \omega_2 \approx \frac{\omega_{02}}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

将共振频率代入(14)式可得两个共振频率对应的声压传递函数幅度分别为

$$|\mathcal{T}(\omega_1)| \approx \frac{Q_2^2}{2\sqrt{2}Q_1^2 + 1}, |\mathcal{T}(\omega_2)| \approx \frac{Q_2}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

由(16)式可知,此时系统较低的共振频率主要由内腔决定,较高的共振频率则主要由外腔决定.在实际应用中如果采用这种设计,则可以方便地对系统的两个共振频率分别进行控制.

2) 当 $C_1 = C_2$ 即 $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$ 和 $Q_1 = Q_2 = Q$ 时,由(11)式可得系统的两个共振频率分别为

$$\omega_1 \approx \left[\frac{(3 + \sqrt{5})}{2} \right]^{1/2} \omega_0, \omega_2 \approx \left[\frac{(3 - \sqrt{5})}{2} \right]^{1/2} \omega_0 \quad (18)$$

将共振频率代入(14)式可得两个共振频率对应的声压传递函数幅度分别为

$$|\mathcal{T}(\omega_1)| \approx \frac{Q^2}{\sqrt{5aQ^2 - a^2}}, |\mathcal{T}(\omega_2)| \approx \frac{Q^2}{\sqrt{5bQ^2 - b^2}} \quad (19)$$

式中 $a = (3 + 5^{1/2})/2$, $b = (3 - 5^{1/2})/2$.由(18)式可知,

此时系统的两个共振频率的比值保持不变.

3) 当 $C_2 \ll C_1$ 即 $\omega_{01} \ll \omega_{02}$ 时,由(11)式可得系统的两个共振频率分别为

$$\omega_1 \approx \omega_{01}, \omega_2 \approx \omega_{02} \quad (20)$$

将共振频率代入(14)式可得两个共振频率对应的声压传递函数幅度分别为

$$|\mathcal{T}(\omega_1)| \approx Q_1, |\mathcal{T}(\omega_2)| \approx \frac{Q_1^2}{Q_2} \quad (21)$$

可见,此时系统的两个共振频率分别等于两个二阶滤波器单独存在时的共振频率,因此也可以对系统的共振频率分别进行控制.

3. 仿 真

从前面的分析可以看到,四阶声低通滤波光纤水听器的声压传递函数与各参数的关系很复杂,直接利用传递函数表达(12)式进行理论分析非常困难.因此,本节利用(14)和(15)式分别仿真分析了各参量对四阶声低通滤波光纤水听器声压传递函数幅度和相位频响特性的影响,结果如图2—9所示.仿真结果中光纤传感头的参数为:长 50 mm,弹性层长度 $H = 40$ mm,外半径 $R = 7$ mm,传感光纤长度 $L = 15$ mm,光源波长 $\lambda = 1550$ nm,纤芯折射率 $n = 1.456$,声压灵敏度为 -140 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa),柱

形腔体内径均为 20 mm. 图中各符号的含义如下: t_1 和 d_1 为外端面小孔的长度和孔径; t_2 和 d_2 为内端面小孔的长度和孔径; L_1 和 L_2 分别为外腔和内腔的长度; ζ_1 和 ζ_2 分别为外腔和内腔对应的衰减因子. 从仿真的结果可见, 四阶声低通滤波光纤水听器有两个共振频率, 与前面理论分析的结果一致. 下面具体分析与讨论各主要参数对声压传递函数频响特性的影响.

3.1. 衰减因子 ζ 的影响

图 2 是衰减因子对四阶声低通滤波光纤水听器声压传递函数的影响, 对应的参数为: $t_1 = t_2 = d_1 = d_2 = 2$ mm, $L_2 = 60$ mm, $L_1 = 15$ mm. 内腔的等效声容为外腔的四倍多, 属于上面讨论的第一种情况, 由 (16) 式可得到系统的两个共振频率分别为 4850 和 1580 Hz, 与图中仿真的结果 5100 和 1770 Hz 基本一致.

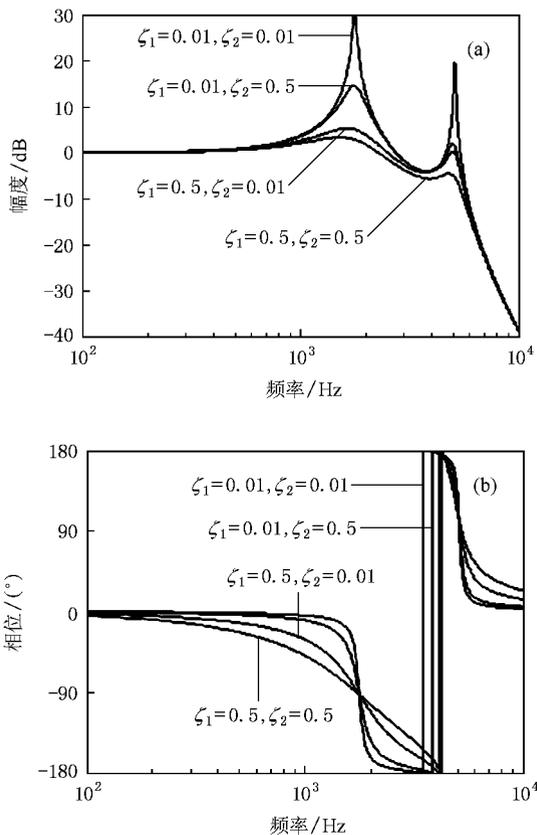


图 2 声压传递函数随衰减因子 ζ_1 和 ζ_2 的变化 (a)幅频曲线 (b)相频曲线

由图 2 可见, 衰减因子只影响共振频率附近的响应, 对其他频段的响应基本没影响. 随着衰减因子

的增加, 共振频率处的传递函数幅度逐渐变小, 使得低频响应变平坦, 但系统的低频线性相位特性变差. ζ_1 对较低共振频率处响应的影响比 ζ_2 的影响大, 也就是说 ζ_1 对内腔特性的影响更大, 这是因为 ζ_1 对内腔的影响经外腔被放大了. 当频率较低或较高时, 内腔中的声压与滤波器外面的声压同相位, 与二阶时高频的反相位不同, 这是因为高频声信号经外腔和内腔两次反相而变成了同相.

3.2. 外腔长度 L_1 的影响

在四阶声低通滤波光纤水听器的实际设计中, 由于内腔中光纤传感头的长度比较固定, 调节外腔长度来改变系统的频响特性更为方便, 因此这里只仿真分析了外腔长度对声压传递函数的影响, 结果如图 3 所示. 仿真结果对应的参数为: $L_2 = 60$ mm, $t_1 = t_2 = d_1 = d_2 = 2$ mm, $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.15$.

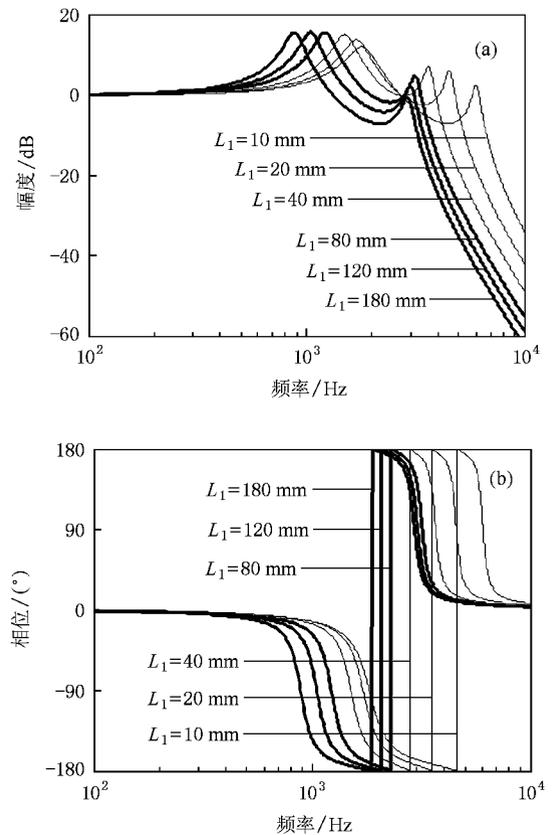


图 3 声压传递函数随外腔长度 L_1 的变化 (a)幅频曲线, (b)相频曲线

从图 3 可见, 当外腔长度 L_1 较小时, 随着 L_1 的增加较高的共振频率快速下降, 而较低的共振频率基本保持不变; 当外腔长度 L_1 较大时, 随着 L_1 的增

加较高的共振频率基本不变,而较低的共振频率下降较快,这与上面理论分析的结果一致.这是由于当 L_1 较小时,外腔的等效声容 C_1 比内腔的等效声容 C_2 小得多,属于上面讨论的第一种情况,此时系统较高的共振频率由外腔决定,较低的共振频率则由内腔决定;当 L_1 较大时,外腔的等效声容 C_1 比内腔的等效声容 C_2 大得多,属于上面讨论的第三种情况,此时系统较高的共振频率由内腔决定,而较低的共振频率则由外腔决定.随着外腔体积的增加,相频曲线向低频移动.

3.3. 小孔直径 d 的影响

小孔直径是声低通滤波光纤水听器最重要的参量之一,对其声学特性影响较大,而且在实际设计加工时,孔径是最容易改变的参数.因此,本节就孔径对四阶声低通滤波光纤水听器声压传递函数的影响进行了详细的仿真,结果如图4—6所示.仿真参数: $t_1 = t_2 = 2 \text{ mm}$, $L_1 = 15 \text{ mm}$, $L_2 = 60 \text{ mm}$, $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.15$,图4中 $d_2 = 1 \text{ mm}$,图5中 $d_1 = 1 \text{ mm}$.

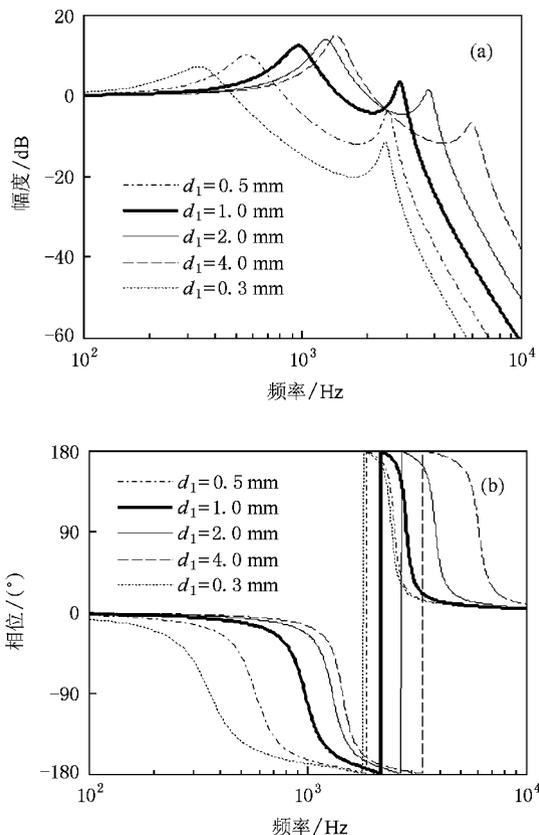


图4 声压传递函数随 d_1 的变化 (a)幅频曲线 (b)相频曲线

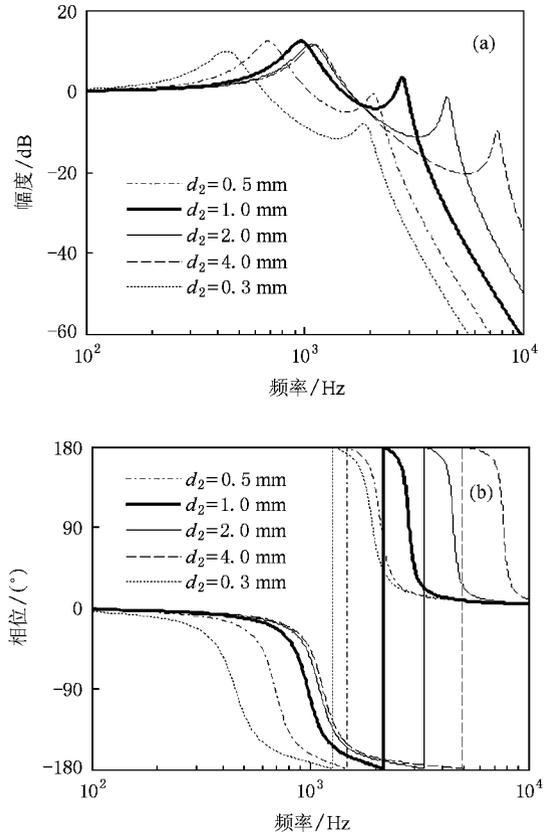


图5 声压传递函数随 d_2 的变化 (a)幅频曲线 (b)相频曲线

从图4和图5可见,若 d_2 (或 d_1)保持不变,则当 d_1 (或 d_2)小于 d_2 (或 d_1)时,随着 d_1 (或 d_2)的减小,较低的共振频率迅速向低频移动,较高的共振频率则缓慢向低频移动,并趋近于一个常数,即由 d_2 (或 d_1)和短腔构成的共振器的特征频率;当 d_1 (或 d_2)大于 d_2 (或 d_1)时,随着 d_1 (或 d_2)的增加,较高的共振频率迅速向高频移动,而较低的共振频率则缓慢向高频移动,也趋近于一个常数,即由 d_2 (或 d_1)和长腔构成的共振器的特征频率.从图6可见,当 $d_1 = d_2$ 时,随着孔径的增加,系统幅频曲线和相频曲线都整体向高频移动,形状保持不变.

3.4. 小孔长度 t 的影响

小孔长度是另一个比较重要的参量,同时实际设计时也是比较容易改变的参数,因此知道小孔长度对声低通滤波光纤水听器声压传递函数的影响非常重要.图7—9是四阶声低通滤波光纤水听器的声压传递函数随小孔长度的变化曲线.仿真参数为: $d_1 = d_2 = 2 \text{ mm}$, $L_1 = 15 \text{ mm}$, $L_2 = 60 \text{ mm}$, $\zeta_1 = \zeta_2 =$

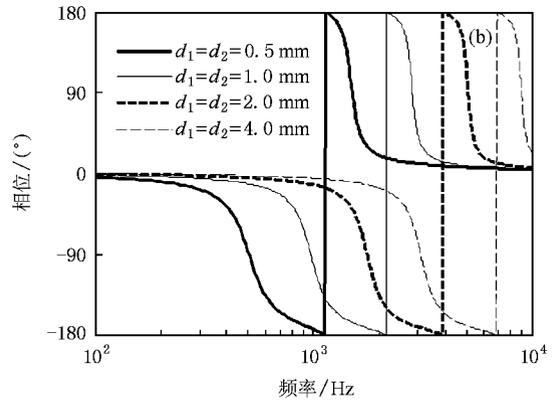
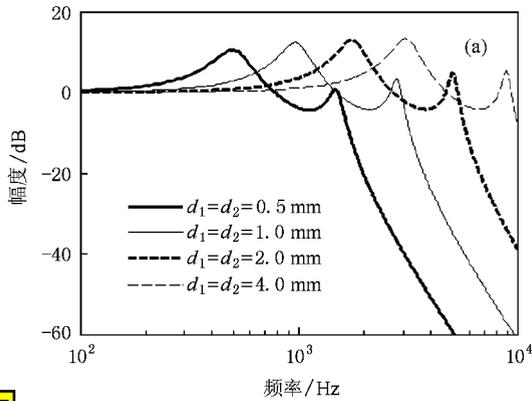


图 6 声压传递函数随 d 的变化 (a)幅频曲线 (b)相频曲线

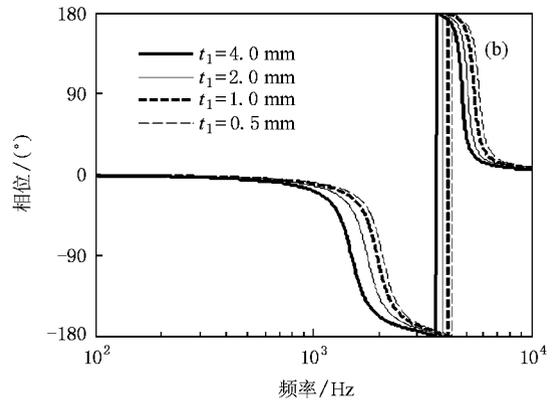
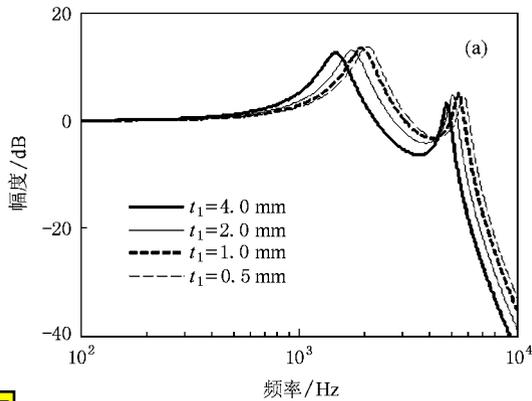


图 7 声压传递函数随 t_1 的变化 (a)幅频曲线 (b)相频曲线

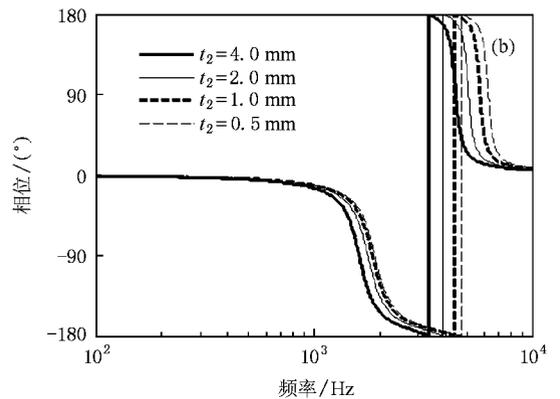
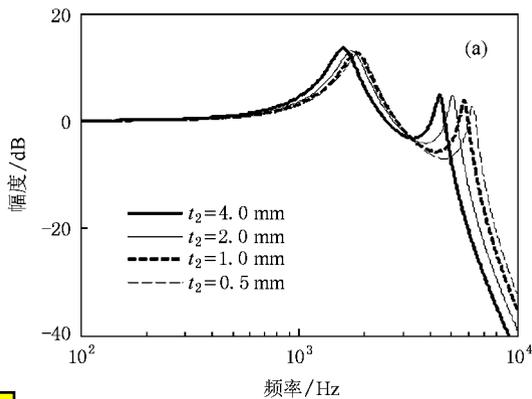


图 8 声压传递函数随 t_2 的变化 (a)幅频曲线 (b)相频曲线

0.15, 图 7 中 $t_1 = 2 \text{ mm}$ 图 8 中 $t_2 = 2 \text{ mm}$.

从图 7 可见,当 t_2 保持不变时,随着 t_1 的增加,较低的共振频率缓慢向低频移动,较高的共振频率基本保持不变;从图 8 可见,当 t_1 保持不变时,随着

t_2 的增加,较高的共振频率缓慢向低频移动,较低的共振频率基本保持不变;从图 9 可见,当 $t_1 = t_2$ 时,随着小孔长度的增加,系统的幅频曲线和相频曲线都整体缓慢向低频移动,形状保持不变.

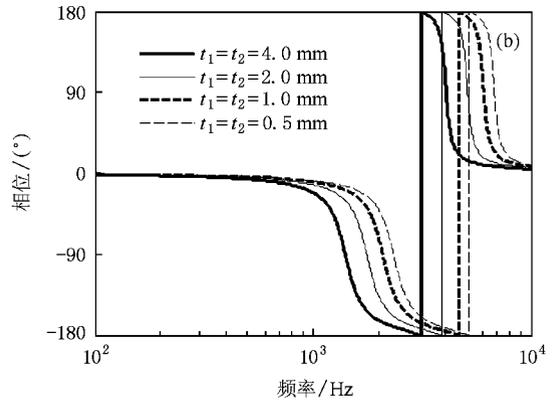
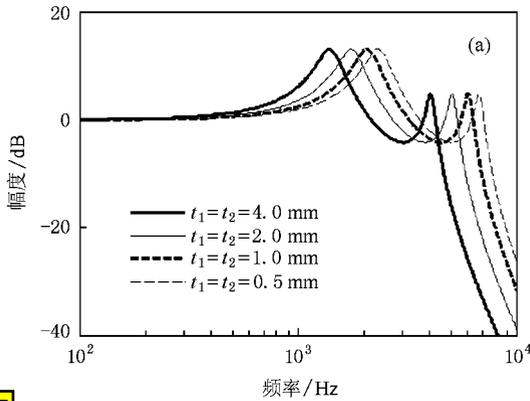


图9 声压传递函数随 t 的变化 (a)幅频曲线 (b)相频曲线

4. 实 验

为了验证理论分析和仿真结果的正确性,设计了图 10 所示的实验系统,在充水驻波罐中利用比较测量法对自行设计并制作的四阶声低通滤波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^[15,16].为了正确获得声低通滤波光纤水听器的相位频响特性,需要对光纤水听器和压电水听器信号通道的相位不一致性进行补偿.具体的做法是将信号源输出的标准正弦信号分成两路,分别进入光纤水听器和压电水听器经过的两路通道,然后同时采集到计算机,利用求相关函数的方法可以得到两路信号的相位差 $\Delta\theta$.假设两个水听器对声信号的响应是同相位的,而且两路系统的相位差固定,则在实际测量声低通滤波光纤水听器的相频特性时,可以用 $\Delta\theta$ 进行补偿.

声低通滤波光纤水听器声压灵敏度频响与仿真结果的比较,各图中(a)(b)两图分别对应幅度和相位频响.其中,理论曲线假设传感轴声压灵敏度为 -140 dB,腔体内径 D 均为 20 mm.图 11 对应的参数为:总长 96 mm,外腔长 $L_1 = 10$ mm,内腔长 $L_2 = 68$ mm,孔径 d 均为 1 mm,理论曲线对应的衰减因子 $\zeta_1 = 0.15$, $\zeta_2 = 0.35$;图 12 对应的参数为:总长 108 mm,外腔长 $L_1 = 16$ mm,内腔长 $L_2 = 68$ mm,孔径 d 均为 1 mm,理论曲线对应的衰减因子 $\zeta_1 = 0.30$, $\zeta_2 = 0.35$;图 13 对应的参数为:总长 108 mm,外腔长 $L_1 = 16$ mm,内腔长 $L_2 = 68$ mm,孔径 d 均为 1.6 mm,理论曲线对应的衰减因子 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.2$.

从图 11—13 中的测量曲线可见,四阶声低通滤波光纤水听器有两个共振频率,与理论分析和仿真的结果一致.实际测得的声压相位灵敏度频响曲线(包括幅频特性和相频特性)都与相应的理论曲线具有大致相同的变化趋势,低频响应非常符合,随着频率的增加差别逐渐变大,实际测得的较高共振频率处的频响幅度比理论值小得多,但两个共振频率基本一致,较低的共振频率测量值比理论值低,较高的共振频率测量值比理论值高,如表 1 所示.

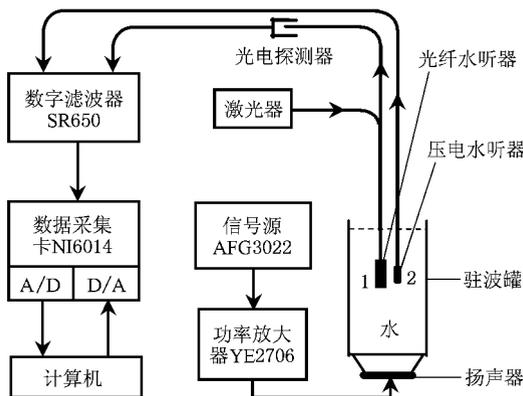


图 10 驻波罐测试系统结构框图

表 1 共振频率测量值与理论值的比较

结构参数/mm		$L_1 = 10,$	$L_1 = 16,$	$L_1 = 16,$
		$L_2 = 68,$	$L_2 = 68,$	$L_2 = 68,$
		$d = 1.0$	$d = 1.0$	$d = 1.6$
较低的	理论值/Hz	940	850	1320
共振频率	测量值/Hz	740	750	1100
较高的	理论值/Hz	3300	2600	4020
共振频率	测量值/Hz	3700	3200	4800

图 11—13 是实验测得的不同结构参数的四阶

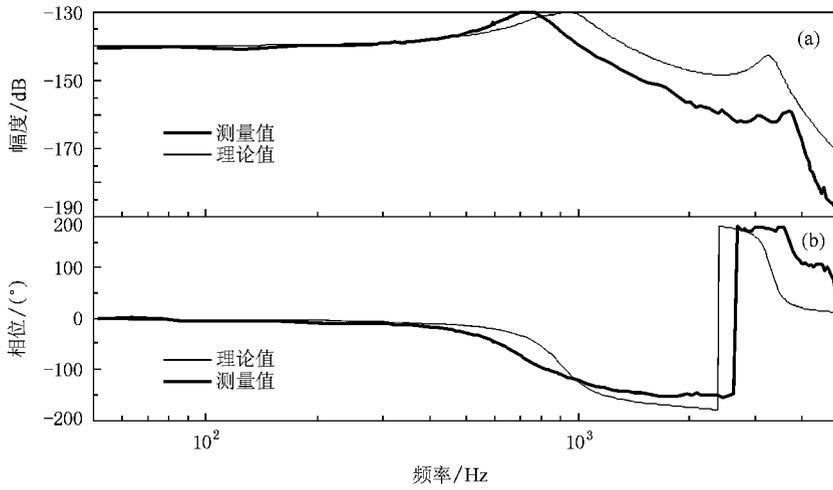


图 11 结构参数为 $L_1 = 10 \text{ mm}$, $L_2 = 68 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$ 时实测频响曲线与理论值的比较 (a) 幅频曲线 (b) 相频曲线

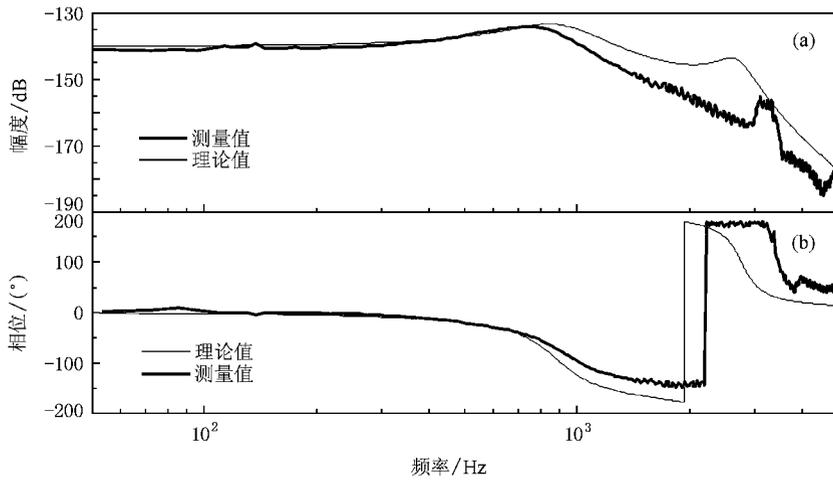


图 12 结构参数为 $L_1 = 16 \text{ mm}$, $L_2 = 68 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$ 时实测频响曲线与理论值的比较 (a) 幅频曲线 (b) 相频曲线

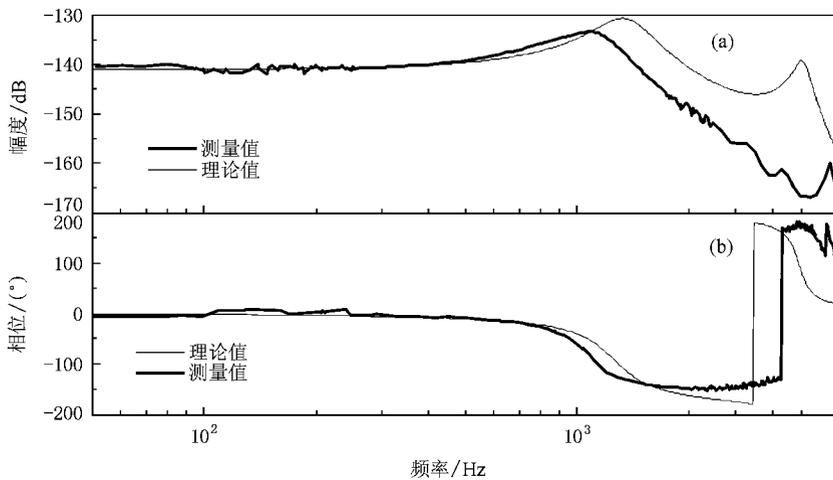


图 13 结构参数为 $L_1 = 16 \text{ mm}$, $L_2 = 68 \text{ mm}$, $d = 1.6 \text{ mm}$ 时实测频响曲线与理论值的比较 (a) 幅频曲线 (b) 相频曲线

引起高频差异的主要原因可能有两个:一是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;二是本文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.由于光纤传感轴的声压灵敏度较高,内腔的声容远大于外腔的声容,此时较低的共振频率主要由内腔特性决定.因此,当滤波器各壁面不是很厚时,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^[14,17,18].这相当于在内腔和传感轴的等效声顺上再并联一个声顺,使得内腔总的等效声顺增大,由(10)式可知,这会使实际的共振频率变低,这就是实际测得的较低的共振频率低于理论值的主要原因.此外,输入输出光纤使得孔径的有效值减少,这也会降低实际的共振频率.

5. 结 论

详细研究了四阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性.在已有的低频集中参量模型的基础上,引入了一个用于描述系统的机械损耗的机械声阻,从而得到了改进的声学等效电路.仿真分析了各主要参量对声压传递函数的影响,结果表明当光纤传感轴的声压灵敏度较高时,低频特性主要由内腔决定,高频特性主要由外腔决定,设计时可以分别进行控制;小孔直径是最重要的参量,对声压传递函数的影响最大,因此设计时可以方便地通过改变小孔直径来获得想要的频响曲线.为了验证理论分析和仿真结果,在驻波罐中对不同结构的四阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性进行了测试,实际测得的频响曲线与仿真曲线基本一致.声低通滤波光纤水听器是解决未来光电声纳阵列信号混叠问题的一种简单且行之有效的方案,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.

- [1] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 1302
- [2] Nash P 1996 *IEE Proc. Radar Sonar Navig.* **143** 204
- [3] Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K 2003 *IEEE Sens. J.* **3** 19
- [4] Cranch G A, Kirkendall C K, Daley K, Nash P J 2003 *IEEE Photonic Tech. Lett.* **15** 1579
- [5] Carroll J B, Huber D R 1986 *J. Lightw. Technol.* **LT-4** 83
- [6] Roe J N, Dobashi K, Kabayashi K 1992 *SPIE* **1756** 42
- [7] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, Ni M, Xiong S D 2008 *Acta Opt. Sin.* **27** 92 (in Chinese)[王泽锋、胡永明、孟洲、倪明、熊水东 2007 光学学报 **27** 92]
- [8] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, Ni M 2008 *Opt. Lett.* **33** 37
- [9] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, Ni M 2008 *Opt. Lett.* **33** 1267
- [10] Wang Z F, Hu Y M 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 783 (in Chinese)[王泽锋、胡永明 2008 光学学报 **28** 783]
- [11] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, Luo H, Ni M 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1883 (in Chinese)[王泽锋、胡永明、孟洲、罗洪、倪明 2008 光学学报 **28** 1883]
- [12] Horowitz S B, Nishida T, Cattafesta L N, Sheplak M 2002 *Int. J. Aeroacous.* **1** 183
- [13] Li Y W, Hu J 1986 *Design of Active Filters* (Beijing: People Posts and Telecommunications Press) p36 (in Chinese)[李远文、胡筠 1986 有源滤波器设计(北京:人民邮电出版社)第36页]
- [14] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, Ni M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 338 (in Chinese)[王泽锋、胡永明、孟洲、倪明 2008 物理学报 **57** 338]
- [15] Wang Z F, Luo H, Xiong S D, Ni M, Hu Y M 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 654 (in Chinese)[王泽锋、罗洪、熊水东、倪明、胡永明 2007 光学学报 **27** 654]
- [16] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, Ni M 2008 *Appl. Opt.* **47** 3524
- [17] Norris A N, Wickham G 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 617
- [18] Wang Z F, Hu Y M, Xiong S D, Luo H, Meng Z, Ni M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 120 (in Chinese)[王泽锋、胡永明、熊水东、罗洪、孟洲、倪明 2009 物理学报 **58** 120]

Frequency response of fourth-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones^{*}

Wang Ze-Feng[†] Hu Yong-Ming Meng Zhou Luo Hong Ni Ming

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

(Received 5 November 2008 ; revised manuscript received 20 December 2008)

Abstract

Response properties of the fourth-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones are investigated theoretically and experimentally. A mechanical acoustic resistance, which is used to describe the system's mechanical loss, is introduced into the previous lumped parameters model of the hydrophone, and an improved acoustic equivalent circuit is given. Phase frequency response is an important parameter for the hydrophone array applications. It has great effect on beamforming, which affects the abilities of locating, discerning, and tracking targets. Therefore, the phase response properties is studied with the amplitude response properties. Some results, which are instructive for designing of acoustic low-pass filtering hydrophone, are obtained by numerical simulation. The measured response curves are in good agreement with the simulation results, which verifies the correctness of the theory and the model. The fourth-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones are useful for improvement of the anti-aliasing ability of modern sonar arrays.

Keywords : fiber-optic sensor, fiber-optic hydrophone, acoustic pressure sensitivity, low-pass filter

PACC : 4281C, 4281P, 4320, 4330

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA09Z121), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NECT-06-0925), and the Innovation Science and Technology Foundation for Excellent PhD Students of National University of Defense Technology, China (Grant No. 0623).

[†] E-mail : hotrosemaths@163.com