

压差式光纤矢量水听器驻波场校准特性研究

王付印, 罗洪, 熊水东

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 利用压差式光纤矢量水听器获取复声阻抗下的声场信息, 不仅需对实声阻抗下声信号的相位进行校准, 还必须对虚阻抗下声信号的幅度作校准。驻波场下声阻抗为虚数, 可实现声信号幅度的校准, 由于2个传感基元灵敏度存在差异, 声压梯度值与理论值存在幅度的差异, 指向性特性为一大一小的“8”字型, 凹点发生偏移。采用双光纤干涉仪结构的一维压差式光纤矢量水听器进行测试, 证明了上述结论, 采用灵敏度修正, 可将两基元灵敏度非一致对指向性造成的影响消除, 得到较理想的指向性曲线, 实现对声信号幅度的校准。

关键词: 矢量水听器; 光纤水听器; 水听器校准; 压差式; 驻波场

中图分类号: TN253; O427 **文献标识码:** A

Study on The Characteristic of Fiber Optic Pressure Gradient Hydrophone Calibration under Standing Wave Field

WANG Fuyin, LUO Hong, XIONG Shuidong

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To get the information of underwater acoustic field with the complex acoustic impedance using the fiber optic pressure gradient hydrophone, the calibration must be implemented both for phase of acoustic signal under real impedance and for amplitude of acoustic signal under imaginary impedance. As the impedance of standing wave field is purely imaginary, it can be used for calibration of the amplitude of the acoustic signal. There exists a difference between the acoustic pressure gradient value and the theoretical gradient value because of the unaccordance of sensitivity between the two sensing elements, the directivities like two figures of “8” with one big pattern and one small pattern with an offset of the concave points. The experiment has been carried out by using one-dimension pressure gradient hydrophone with two fiber interferometers structure and the results have been showed that the above-mentioned result is correct. The ideal directivity pattern can be got by modifying the sensitivity of sensor elements, and the calibration of amplitude can be finally achieved.

Key words: vector hydrophone; fiber optic hydrophone; hydrophone calibration; pressure gradient; standing wave

0 引言

矢量水听器作为一种新型水下声传感器, 可同步共点地获得声场的标量信息和矢量信息^[1], 结合光纤水听器技术和矢量水听器技术而成的光纤矢量水听器也得到一定的研究。在国外, 压差式光纤矢量水听器是最早研究并报道的光纤矢量水听器^[2-5]; 在国内压差式光纤矢量水听器的研究还处于起始阶段, 哈尔滨工程大学首先对压差式光纤矢量水听器进行了报道^[6], 采用单迈克尔逊干涉仪结构对压差式光纤矢量水听器进行了一定的研究^[7-9], 中科院张文涛等采用有源光纤光栅技术对压差式光纤矢量水听器也进行了实验研究^[10]。以上这些研究多是基于单光纤干涉仪结构, 本文采用双光纤干涉仪结构

对压差式光纤矢量水听器的驻波场校准特性进行研究, 讨论驻波场校准的可行性和必要性, 并给出实验校准结果。

1 驻波场校准的理论

1.1 工作原理

在理想流体、连续均匀介质中, 小振幅波的传播规律满足如下的运动方程

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

式中: p 为声场中的声压分布; v 为声场中的质点的振速; ρ_0 为水介质密度。当水中声波长 $\lambda \gg l$ (l 为声场中两个质点的距离) 时, 声压在一个方向上的梯度就可由该方向上距离很近的 2 个点的声压有限差分

收稿日期: 2011-06-09

作者简介: 王付印(1988-), 男, 河南信阳人, 硕士生, 主要从事光纤传感技术研究。

近似得到,式(1)即为压差式光纤矢量水听器工作的物理基础。

目前关于压差式矢量水听器应用的大多数算法^[11-12]都是基于平面行波场进行分析和校准的,此时波阻抗为实数,声压和质点振速同相,但在驻波场下波阻抗为虚数,声压和质点振速间存在相位差,此时声压和振幅求相关后的损失就会增加^[11],这并不能说明压差式矢量水听器在驻波场中不能工作,式(1)对驻波场也是成立的。在大多数应用中,波阻抗都为复数,其实部可等效为平面行波场下的声阻抗,虚部可等效为驻波场下的波阻抗。在平面行波场下,2个测量点只存在主要校准声信号的相位的差异;而在驻波场下,2个测量点只存在幅度的差异,可实现声信号幅度的校准。因此有必要在驻波场下对压差式矢量水听器进行校准。

压差式光纤矢量水听器(以下简称压差式矢量水听器)探头结构有两种具体实现方式:

1) 双干涉仪式,即2个传感基元分别采用2个光纤声压水听器探头,得到各自声压信号再进行处理。

2) 单干涉仪式,即将2个传感基元分别看作干涉仪的2个传感臂,解调得到的声信号直接为2个传感基元所处位置声压信号的差。本文采用双干涉仪结构,可方便地测量每个干涉仪的灵敏度,且输出增加1倍,能获得更丰富的声场信息。

1.2 驻波管下的校准特性

在假设空气-水界面为纯软边界的条件下,可得到驻波管中的声压^[13]分布满足

$$p = p_0 \sin kd \cdot e^{j\omega t} \quad (2)$$

式中: p_0 为与换能器激励有关的参数; k 为声波波长; d 为观察点距水面的距离; ω 为声波圆频率。由式(2)可看出,驻波管中各质点处的声压幅度不完全相同,但相位却完全一致,因此可用来实现压差式光纤矢量水听器声压幅度的校准。

在(0,1)阶简正波的截止频率以下,驻波管中传播的声波是沿管的轴向传播的平面驻波,其质点振速方向也必然沿轴向,因此采用压差式矢量水听器进行校准时,不同角度测试得到的振速分量不同,校准的结果也必然呈 $\cos \theta$ 的8字型指向性。在 $\lambda \gg l$ 的情况下,近似有

$$\Delta p = \frac{\omega}{c} l \cos \theta \cdot p_0 \cos kd \cdot e^{j\omega t} \quad (3)$$

式中: c 为水中声速; θ 为矢量水听器测量轴与垂直方向的夹角, $\frac{\Delta p}{l} = \frac{\partial p}{\partial r}$,与理论值相符。由于2个传感基元的工艺不完全一致,式(3)可改写为

$$\Delta p' = \sqrt{a^2 - 2a \cos(kl \cos \theta) + 1} \cdot p_0 \cos(kd - \delta) e^{j\omega t} \quad (4)$$

式中: a 为2个传感基元灵敏度相差的倍数(选取距离水面较近的传感基元为参考基元); $\delta = \arctan \frac{(a-1)\cos(kl \cos \theta/2)}{(a+1)\sin(kl \cos \theta/2)}$ 。声压差的相位与理论相同,幅度存在差异。灵敏度和指向性分别表示为

$$M_p = \sqrt{a^2 - 2a \cos(kl) + 1} \cdot \frac{\cos(kd - \delta')}{\sin kd} \cdot M \cdot \tan kd \quad (5)$$

$$D_\theta = \sqrt{a^2 - 2a \cos[(\omega l/c) \cos \theta] + 1} \cdot \cos(kd - \delta) \quad (6)$$

式中: M 为参考传感基元的灵敏度; δ' 为 $\theta=0$ 时 δ 的值。声压灵敏度和指向性不仅与2个传感基元的灵敏度差异、声信号频率有关,还与入水深度有关,以上的声压灵敏度和指向性与理论值的偏差是由于两传感基元灵敏度差异带来的,因此可通过先测量2个传感基元的灵敏度,然后对2个传感基元的测量结果进行修正再相减,从而消除灵敏度差异的理想,得到与理论值相符的结果。由于可校准单个传感基元的声压相位灵敏度,且单个传感基元的灵敏度频响并非理想的平坦直线,因此对压差式矢量水听器声压相位灵敏度的校准意义不大,所以主要考虑校准压差式矢量水听器的指向性特性。选取入水深度为0.175 m,信号频率为315 Hz,仿真得到的指向性曲线,如图1所示。

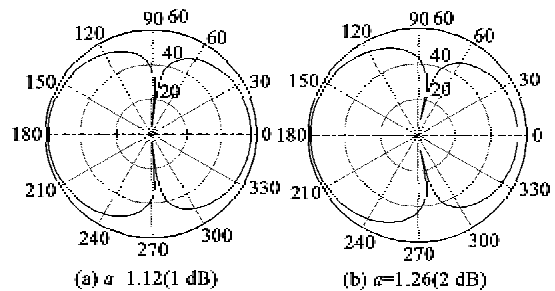


图1 两传感基元灵敏度存在差异时驻波场下的指向性曲线
由图1(a)可知,当2个传感基元的灵敏度存在差异时,“8”字型曲线就会出现一个大一个小的情况,且最小值点已不再是 $\cos \theta$ 为0的点,其凹点出

现偏移,灵敏度差异越大,凹点偏移越多,指向性最大值的不对称性越明显。

2 实验结果与讨论

采用 2 个光纤声压水听器作为压差式矢量水听器的 2 个传感基元,在驻波场中对其进行校准,校准系统原理框图如图 2 所示。

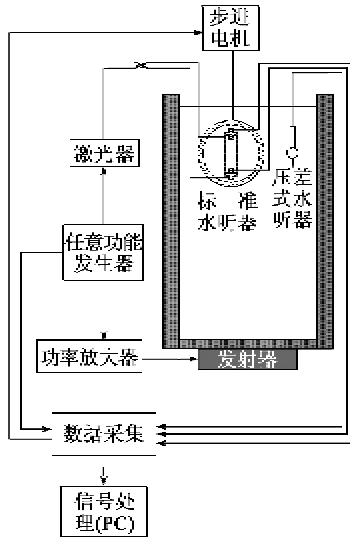


图 2 压差式矢量水听器校准系统原理图

压差式矢量水听器声中心与标准水听器置于同一深度,驻波管测试系统可测试的频率范围为 20~2 000 Hz。测试光源为 1 550 nm 超窄线宽可调谐光纤激光器,采用 PGC(Phase Generated Carrier)内调制解调方案,光源调制频率为 12.5 kHz,测试得到的灵敏度频响曲线较平坦,2 个传感基元的灵敏度在 160 Hz 处分别为 -163.0 dB($\text{dB}=1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$)和 -163.7 dB,在 315 Hz 时分别为 -162.7 dB 和 -163.4 dB。压差式矢量水听器 2 个传感基元的间距为 10 cm,将其置于水下 17.5 cm 处,初始时 2 个传感基元方向沿驻波管轴向,分别测量了 160 Hz 和 315 Hz 2 个频点的指向性曲线。

图 3、4 分别为 160 Hz、315 Hz 的测试结果。图 3、4 中曲线的毛刺是由声场不稳定造成的。由图 3(a)、4(a)可知,两传感基元的灵敏度存在差异时,得到一大一小的‘8’字型指向性图。通过加入单个传感基元的灵敏度作修正,得到图 3(b)、4(b)的指向性,由图可看出,该指向性就是希望得到‘8’字型指向性,在此情况下,测得指向性图的凹点深度分别为 46.6 dB 和 58.1 dB。由图 3(c)、4(c)可看出,在驻波管中对矢量水听器进行校正时,2 个传感基元

处的声信号相位不完全相等,因此在作指向性时,直接利用 2 个传感基元测得的声信号的幅度相减,而不是利用 2 个声信号直接相减或做灵敏度修正后直接相减然后再求声压差。

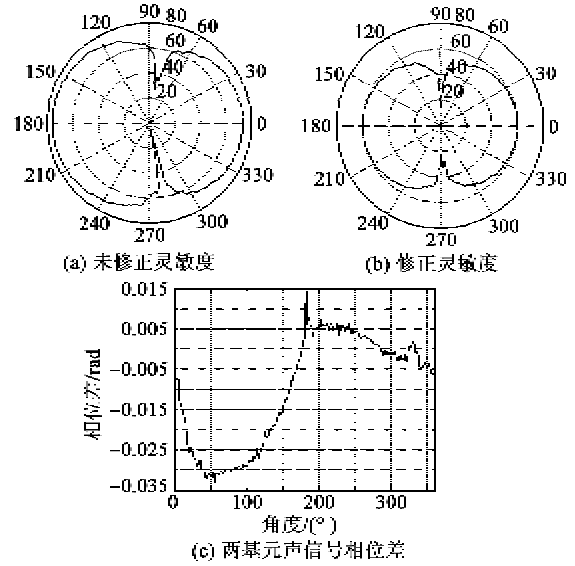


图 3 160 Hz 测试结果

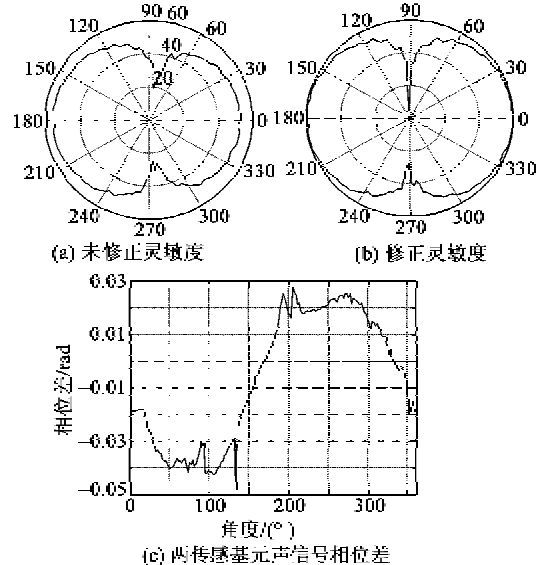


图 4 315 Hz 测试结果

3 结束语

利用压差式光纤矢量水听器来实现对水中声场信息的获取,就必须正确地解调出声信号的相位和幅度,这是压差式光纤矢量水听器不同于普通的波速形成器的地方。要达到以上目的,不仅需对声信号的相位信息作出校准,还必须对压差式光纤矢量水听器进行的幅度校准。经这样校准后的光纤矢量水听器才能准确全面地反映声场信息,在后续的目的

标方位估计时提高估计精度和阵增益。

本文介绍了驻波场下压差式光纤矢量水听器的校准特性,由于2个传感基元灵敏度存在差异,会使声压梯度的值与理论值相比存在幅度的差异,指向性特性为出现一大一小的‘8’字型,凹点位置也会偏移。在驻波场情况下对基于双光纤干涉仪的一维压差式光纤矢量水听器进行了校准,校准结果不仅证实了上述结论,也表明采用灵敏度修正,可将两传感基元灵敏度不一致造成的影响消除,得到较为理想的指向性曲线。

参考文献:

- [1] 杨德森,洪连进. 矢量水听器原理及应用引论[M]. 北京:科学出版社,2009:40-47.
- [2] GARY B. MILLS. Fiber optic gradient hydrophone [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School,1984:17-42.
- [3] MACDONALD G E. Fiber optic gradient hydrophone construction and calibration for sea trial[D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 1985: 69-109.
- [4] FELDMANN P A. Construction of a fiber optic gradient hydrophone using a Michelson configuration[D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 1986:30-70.
- [5] MEI S H, ZHOU Y, LAM Y L, et al. An all fiber interferometric gradient hydrophone with optical path length compensation[C]//S. I. ; Conference on Lasers and Electro-Optics,1999:432-432.
- [6] 康崇,张敏,陈洪娟,等. 薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器[J]. 中国激光,2008,35(8):1214-1219.
KANG Chong, ZHANG Min, CHENG Hongjuan, et al. Pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical shell [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8):1214-1219.
- [7] LV Wenlei, PANG Meng, SHI Qingping, et al. Study on fiber-optic gradient hydrophone based on Interferometer[C]//S. I. ; 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology; Optical Systems and Optoelectronic Instruments, Proc SPIE, 71561E, 2009.
- [8] 吕文磊,庞盟,王利威,等. 基于顺变柱体和膜片符合结构的压差式光纤矢量水听器研究[J]. 光学学报,2010,30(2):340-346.
LV Wenlei, PANG Meng, WANG Liwei, et al. Study on optic fiber gradient hydrophone based on composite structures of compliantly variable cylinder and diaphragm[J]. Acta Optica Sinica,2010,30(2):340-346.
- [9] 吕文磊,庞盟,王利威,等. 压差式矢量水听器驻波场校准实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2010,31(8):1079-1064.
LV Wenlei, PANG Meng, WANG Liwei, et al. Standing wave calibration of a gradient hydrophone[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(8): 1079-1064.
- [10] ZHANG Wentao, ZHANG Faxiang, LI Fang, et al. Investigation on a pressure-gradient fiber laser hydrophone[J]. Meas Sci Technol,2010,21(9):4037-4041.
- [11] 梅红芳. 一种矢量水听器拖曳噪声抵消方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.
- [12] 程彬彬,杨士莪. 基于二维压差式矢量水听器源估计误差分析[J]. 西北工业大学学报,2006,24(6):800-803.
CHENG Binbin, YANG Shi'e. Analysis of source estimating error based on two-dimension gradient hydrophone[J]. Journal of Northwest Polytechnical University,2006,24(6):800-803.
- [13] 全国声学标准技术委员会. GB/T 4130~2000. 声学水听器低频校准方法[S]. 北京:中国标准出版社,2000.

(上接第518页)

参考文献:

- [1] 史亦韦. 超声检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 吴伟城. 缺陷状况对缺陷回波高度的影响[J]. 广船科技,2007,98(4):45-48.
- [3] 郝光香. 用标准反射体作起始灵敏度定缺陷当量的方法探讨[J]. 无损检测,1999(4):4-6.
- [4] 杨继斌. 超声波检测中关于大平底计算法与试块当量法的差别的探讨[J]. 无损检测,2010,34(4):12-15.
- [5] 丁辉,张俊,张益成,王中亚,李晓红. 超声检测声场计算模拟的建立与仿真软件的开发[J]. 无损检测,2009,31(8):614-618.
- [6] 杜功焕. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社,2001.
- [7] 苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社,2007.