

应用于拖曳细线阵的光纤水听器研究

运朝青 罗 洪 胡正良 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 研制了一种直径为 13 mm 的空气腔推挽式双臂对称补偿结构的光纤水听器, 介绍了该光纤水听器的工作原理, 优化设计了光纤水听器结构。在小直径情况下, 保证了较高的声压灵敏度, 同时获得了较低的加速度灵敏度。实验测得在 80~2500 Hz 频段内, 该光纤水听器的平均声压灵敏度为 -142.5 dB, 灵敏度的起伏小于 ± 0.8 dB, 加速度灵敏度小于 -20 dB。实验结果表明, 研制的空气腔推挽式双臂对称补偿结构的光纤水听器, 能很好地满足拖曳细线阵的使用要求。

关键词 传感器; 光纤水听器; 加速度灵敏度; 流噪声; 声压灵敏度; 拖曳细线阵

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1206004

A Fiber Optic Hydrophone Used for Thin Line Towed Array

Yun Zhaoqing Luo Hong Hu Zhengliang Hu Yongming

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

Abstract A type of fiber optic hydrophone used in thin line towed array is presented. The fiber optic hydrophone, with a diameter of 13 mm, based on air-backed push-pull double armed symmetrical compensated structure is developed. Moreover, the working principle of the fiber optic hydrophone is introduced, and an optimized design structure of the fiber optic hydrophone is proposed. In the case of small diameter of the fiber optic hydrophone, the higher acoustic-pressure sensitivity is ensured, and the lower acceleration sensitivity is obtained simultaneously. Over the frequency ranging from 80 Hz to 2500 Hz, the average acoustic-pressure sensitivity of the fiber optic hydrophone is -142.5 dB with undulation of 0.8 dB, while the acceleration sensitivity is less than -20 dB. Experimental results show that the fiber optic hydrophone can well meet requirements for the use of thin line towed arrays.

Key words sensors; fiber optic hydrophone; acceleration sensitivity; flow noise; acoustic-pressure sensitivity; thin line towed array

OCIS codes 060.2370; 120.0280; 060.2300

1 引 言

光纤水听器是一种建立在光纤、光电子技术基础上的水下声信号传感器。它具有灵敏度高、响应频带宽、抗电磁干扰、可实现水下湿端无源探测和易于大规模组阵等优点, 成为水声探测技术发展的重要方向。光纤水听器采用光纤进行信息传输, 抗干扰性强且传输损耗低, 适合远距离大范围水下监测。

拖曳细线阵声纳通过接收目标自身辐射噪声或反射回波, 对目标进行定向和识别, 是一种被动型

声纳。相对于传统的粗线阵, 拖曳细线阵阵列直径小, 声阵孔径大, 工作频率低, 有广阔的发展前景。拖曳细线阵的关键技术在于对高性能水听器探头的研制, 光纤水听器由于其自身特点很适合构建拖曳线列阵, 特别是细长线阵, 成为当前研究的热点。拖曳细线阵的工作方式、环境条件和结构安装等特点对光纤水听器的性能提出了许多特殊的要求, 特别是加速度灵敏度和抗流噪声。由于拖曳细线阵阵列直径减小, 声阵孔径变长, 使得它容易受拖缆抖动及

收稿日期: 2012-05-08; 收到修改稿日期: 2012-07-13

作者简介: 运朝青(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: yzq3105@163.com

导师简介: 胡永明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: yzq3105@163.com

拖曳速度变化等引起的加速度噪声影响,加速度灵敏度关系到拖曳细线阵能否有效地抑制这些干扰;由于阵列直径减小使得流噪声恶化,流噪声制约了拖曳细线阵对弱信号或远距离信号的探测效能。

本文从光纤水听器工作原理出发,采用法拉第旋光镜偏振控制技术和相位载波(PGC)调制解调技术,分别消除了干涉型光纤水听器的偏振衰落和随机相位衰落问题,实现了对干涉型光纤水听器信号的稳定检测。并借鉴国内外在提高光纤水听器声压灵敏度、降低加速度灵敏度和抑制流噪声方面的研究成果^[1~7],优化了结构设计,在小直径的情况下,保证了较高的声压灵敏度,同时获得了较低的加速度灵敏度。

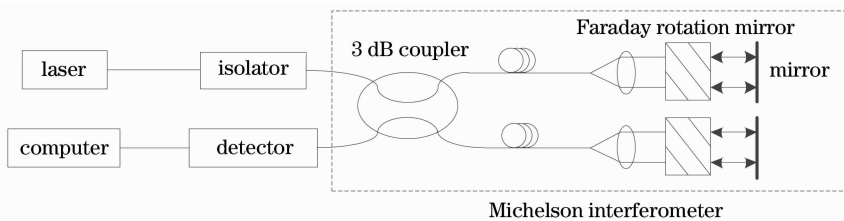


图 1 迈克耳孙型光纤水听器结构示意图

Fig. 1 Schematic of fiber optic hydrophone based on Michelson-interferometer structure

2.2 消除偏振衰落和随机相位衰落

在干涉型光纤水听器中,为了对信号进行稳定检测,必须要解决偏振衰落和随机相位衰落问题。偏振衰落是由光偏振态随机漂移导致的干涉信号随机涨落,为了抑制其影响,采用了法拉第旋光镜偏振控制技术。这种技术结构简单、技术成熟,并且随着法拉第旋光镜价格的不断降低,其在远距离、大规模阵列系统中的优势日益凸显。

2 光纤水听器工作原理

2.1 干涉型光纤水听器工作原理

光纤水听器从声传感机理上可分为强度型、偏振型和干涉型 3 大类。由于前两种类型灵敏度较低,且不适合组阵,因此目前实用化的光纤水听器均采用干涉型。采用干涉型光纤水听器,且基于高性能的迈克耳孙干涉仪结构,如图 1 所示。由激光器发出的光经光隔离器后,通过 3 dB 光纤耦合器被分为两束,分别进入干涉仪两臂,经光纤后端的反射镜反射后返回光纤耦合器进行干涉,干涉光信号经光电探测器转换为电信号,再进行信号处理就可以得到声波信息。

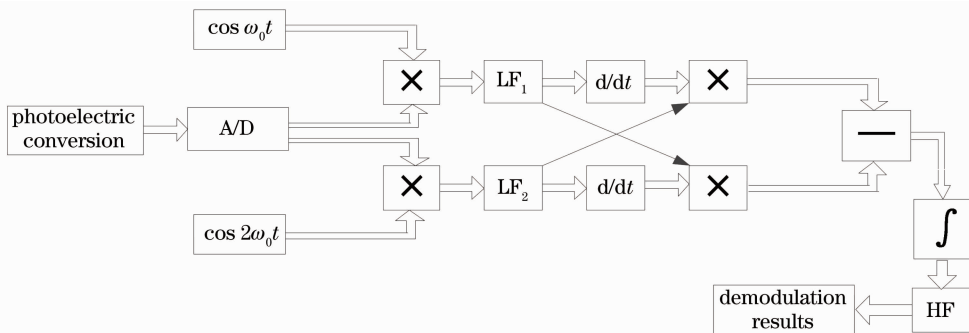


图 2 PGC 内调制解调数字化实现方案原理框图

Fig. 2 Block diagram of digital PGC demodulation

3 光纤水听器结构设计

应用于拖曳细线阵的光纤水听器结构设计主要包括提高声压灵敏度结构设计、降低加速度灵敏度

结构设计和抑制流噪声的小直径结构设计。在国内外对提高光纤水听器声压灵敏度、降低加速度灵敏度和抑制流噪声研究的基础上,设计了空气腔推挽

式双臂对称补偿结构的小直径光纤水听器。

3.1 提高声压灵敏度的结构设计

3.1.1 声压灵敏度的定义

光纤水听器的声压灵敏度定义为由声信号引起的光纤水听器的干涉仪两臂的相位差 $\Delta\phi$ 与在声场中引入水听器前存在于水听器声中心位置处的自由场声压 p 的比值,即 $M_p = \frac{\Delta\phi}{p}$, 其单位为 rad/Pa。

为了表达明了,通常提到光纤水听器声压灵敏度时均指声压灵敏度级,即

$$L_p = 20\lg(M_p/M_{pr}),$$

单位为 dB,基准值 $M_{pr} = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ 。声压灵敏度表征了水听器对微弱声信号的探测能力。声压灵敏度越高,即声压灵敏度的值越大,说明水听器对声信号越敏感,水听器的探测性能越高。

3.1.2 理论分析

光纤水听器的传感光纤长度、光纤折射率以及光纤直径变化都会对其相位差 $\Delta\phi$ 产生影响,因此其相位差 $\Delta\phi$ 可以表示为

$$\Delta\phi = \beta L \left(\frac{\Delta L}{L} \right) + L \left(\frac{\partial \beta}{\partial n} \right) \Delta n + L \left(\frac{\partial \beta}{\partial D} \right) D \left(\frac{\Delta D}{D} \right), \quad (1)$$

式中 β 为传输常量, $\beta = 2\pi n/\lambda$, n 为光纤纤芯折射率, λ 为传输光波长, L 为传感光纤长度, D 为光纤直径。一般情况下,光纤直径变化很小,因此(1)式中第3项可以忽略不计。

由传感光纤长度变化引起的相位差对应(1)式右边第1项

$$\Delta\phi_1 = 2 \frac{2\pi n \Delta L}{\lambda}, \quad (2)$$

由光纤折射率变化引起的相位差对应(1)式右边第2项

$$\Delta\phi_2 = -2 \frac{2\pi n \Delta L}{\lambda} P_c, \quad (3)$$

式中 P_c 为弹光系数。因此光纤水听器总的声压灵敏度为

$$M_p = \frac{\Delta\phi}{p} = 2 \frac{2\pi n \Delta L}{\lambda} (1 - P_c). \quad (4)$$

在国内外对提高光纤水听器声压灵敏度的研究基础上,推挽式芯轴型光纤水听器的干涉仪两个臂同时为传感臂,在声信号作用下,外臂光纤缩短,内臂光纤则被拉长,这样使得(4)式中的 ΔL 增大了一倍,从而使声压灵敏度增加了一倍;并且空气腔芯轴型光纤水听器中的空气可以提高声压灵敏度,因此采用空气腔推挽式结构可以有效提高光纤水听器的

声压灵敏度。

3.2 降低加速度灵敏度的结构设计

3.2.1 加速度灵敏度的定义

光纤水听器的加速度灵敏度定义为由某一方向做加速度运动引起的光纤水听器的干涉仪两臂的相位差 $\Delta\phi$ 与该方向上的加速度 a 的比值,即

$$M_a = \frac{\Delta\phi}{a},$$

单位为 rad/g(g 为重力加速度)。为了表达明了,通常提到光纤水听器加速度灵敏度时均指加速度灵敏度级,即

$$L_a = 20\lg(M_a/M_{ar}),$$

单位为 dB,基准值 $M_{ar} = 1 \text{ rad}/g$ 。

当拖曳细线阵在拖曳过程中,使光纤水听器产生加速度,这种加速度对光纤水听器接收有用的声信号起干扰作用,降低光纤水听器的加速度灵敏度可以提高信噪比,从而提高拖曳细线阵的探测能力。所谓降低加速度灵敏度就是使水听器尽可能只对声信号敏感而对加速度信号不敏感,加速度灵敏度的值越小对加速度信号越不敏感,水听器的抗加速度性能越高。

3.2.2 理论分析

作用于光纤水听器的加速度矢量可以分解为径向分量和轴向分量。由于芯轴型光纤水听器具有轴对称性,因此它对径向加速度分量本身就有抵消作用,所以其径向加速度灵敏度很低。因此,主要考虑降低轴向加速度灵敏度的结构设计^[11]。借鉴国外对降低光纤水听器加速度灵敏度的研究成果,在芯轴型空气腔结构中采用双臂对称补偿(中心支撑)结构降低加速度灵敏度。

当有加速度的作用时,双臂对称补偿结构中纵向对称的两段光纤的光相位变化大小相等、方向相反,因而可以抵消,这减小了光纤干涉仪的总相位差受加速度作用的影响,降低了光纤水听器的加速度灵敏度。

同时有限元方法为该结构能够有效降低加速度灵敏度提供了理论依据^[12]。由有限元方法知道,没有采用双臂对称补偿结构(底部支撑)时,位置上下对称的节点的径向形变方向相同,不能降低加速度灵敏度;而采用双臂对称补偿结构时,对称位置的径向形变总是大小相等、方向相反,因而可以有效降低加速度灵敏度。

为了使加速度灵敏度尽可能降低,同时保证较高的声压灵敏度,设计了空气腔推挽式双臂对称补

偿结构的光纤水听器。将干涉仪的两臂绕在两个不同直径的圆筒外壁上,两个圆筒套在一起,中间形成空气腔,用来进行声压灵敏度增敏。其中一个臂直接暴露于海水中,另外一个臂在空气腔中,形成推挽

式结构,以提高声压灵敏度。圆筒纵向对称分为两段,分别有一半的传感光纤绕于其上,形成双臂对称补偿结构,以降低加速度灵敏度。该种结构的光纤水听器,如图3所示。

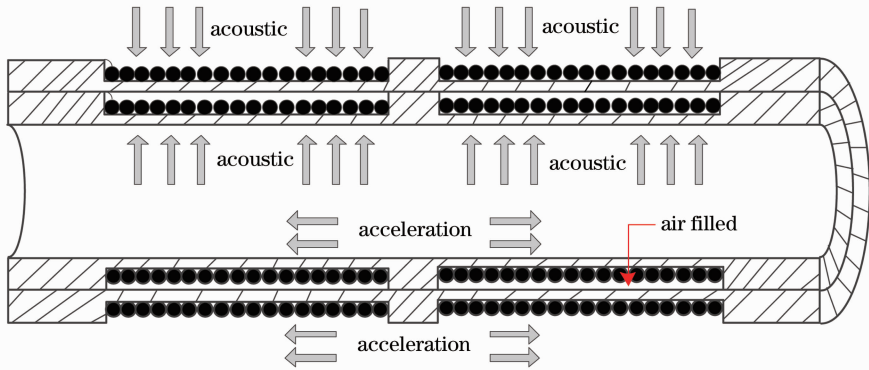


图3 空气腔推挽式双臂对称补偿结构光纤水听器

Fig. 3 Fiber optic hydrophone based on air-backed push-pull double armed symmetrical compensated structure

3.3 抑制流噪声的小直径结构设计

流噪声属于拖曳线列阵系统自噪声,它是由水听器周围湍流边界层的压力起伏产生的。在探测弱信号或者远距离信号时,流噪声对拖曳线列阵声纳的探测效能起重大制约作用。拖曳细线阵由于阵列直径的减小而使得流噪声恶化,而抑制流噪声最直接的方法就是减小水听器的径向尺寸。在满足应用于拖曳细线阵的光纤水听器性能指标的基础上,尽可能减小水听器的直径,增加声学护套表面与水听器接收面之间的距离,就可以减小传递到水听器表面的湍流边界层脉动压力^[7],从而提高拖曳细线阵的探测性能。因此,在护套尺寸一定的情况下,应在设计中结合具备的技术条件,尽量减小光纤水听器的直径。

综合考虑弯曲损耗的影响^[12],并定制、使用大数值孔径光纤,最终确定光纤水听器直径为13 mm。

4 实验结果

采用高相干可调谐激光器作为光源,输出光波长为1550 nm,干涉仪两臂光纤长度分别为15 m和20 m。最终研制得到的光纤水听器尺寸为 $\Phi 13\text{ mm} \times 56\text{ mm}$ 。在80~2500 Hz频段内,对研制的光纤水听器分别进行了声压灵敏度和加速度灵敏度的测试,其声压灵敏度和加速度灵敏度的频率响应曲线分别如图4和图5所示。

由图4可以看出,该光纤水听器平均声压灵敏度为-142.5 dB,起伏为 $\pm 0.8\text{ dB}$ 。由图5可以看出,其加速度灵敏度小于-20 dB,满足了拖曳细线

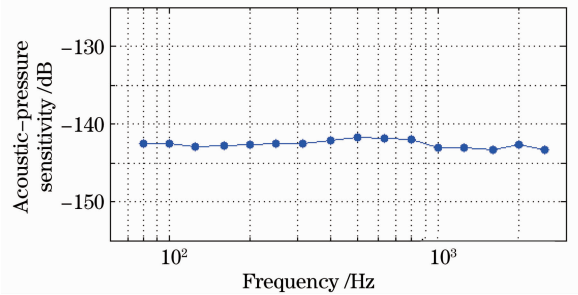


图4 声压灵敏度频率响应曲线

Fig. 4 Frequency-response curve of acoustic-pressure sensitivity

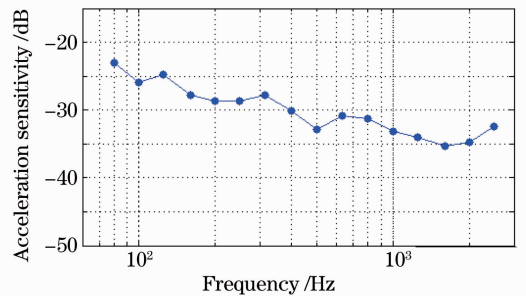


图5 加速度灵敏度频率响应曲线

Fig. 5 Frequency-response curve of acceleration sensitivity

阵对水听器加速度灵敏度的要求。从实验结果可以知道,这种光纤水听器结构设计,在保证较高的声压灵敏度的同时有效地降低了加速度灵敏度。

5 结 论

介绍了光纤水听器工作原理和光纤水听器结构设计,并研制了直径为13 mm的空气腔推挽式双臂

对称补偿结构的光纤水听器样品。实验测得,在80~2500 Hz 频段内,该光纤水听器平均声压灵敏度为-142.5 dB,灵敏度的起伏小于±0.8 dB,加速度灵敏度小于-20 dB。实验测试结果表明,这种小直径结构的光纤水听器具有较高的声压灵敏度和较低的加速度灵敏度,且其声压灵敏度频率响应平坦,研制的光纤水听器能够很好地满足拖曳细线阵的使用要求。这对光纤水听器在拖曳细线阵中的应用起到了推动作用。

参 考 文 献

- 1 Yin Kai, Zhou Hongpu, Zhang Min *et al.*. Optimization design of the pressure phase sensitivity of the fiber-optic air-backed mandrel hydrophone[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1940~1945
- 殷 锴, 周宏朴, 张 敏等. 芯轴型光纤水听器灵敏度的优化设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1940~1945
- 2 G. L. Assard. Complementary Interferometry Hydrophone[P]. US Patent 4799202, 1989
- 3 S. Uchil, P. K. Bhushan, G. M. Naik *et al.*. A flexural push-pull fibre-optic hydrophone incorporating acceleration cancelling and feedback stabilization[J]. *J. Optoelectronics*, 1993, **8**(4): 419~424
- 4 O. H. Waagaard, G. Bjarte, G. Wang. An investigation of the pressure-to-acceleration responsivity ratio of fiber-optic mandrel hydrophones [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(7): 994~1003
- 5 S. L. Garrett, D. A. Brown, B. L. Beaton *et al.*. A general purpose fiber optic hydrophone made of castable epoxy[C]. *SPIE*, 1990, **1367**: 13~29
- 6 Li Dingshan, Cao Jianian, Liu Yuntao. Reduction of acceleration sensitivity of fiber optic hydrophone[J]. *J. Harbin Engineering University*, 2001, **22**(6): 32~35
- 李丁山, 曹家年, 刘云涛. 降低光纤水听器加速度灵敏度的研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2001, **22**(6): 32~35
- 7 Gu Zhenfu, Cui Xiaowen, Gong Kai *et al.*. Flow noise aggravating suppression of thin array [J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2004, **75**(3): 8~11
- 顾振福, 崔晓文, 龚 凯等. 细线阵流噪声恶化的抑制[J]. *声学与电子工程*, 2004, **75**(3): 8~11
- 8 Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone using phase-generated-carrier techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1536~1540
- 曹家年, 张立昆, 李绪友等. 干涉型光纤水听器相位载波调制及解调方案研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1536~1540
- 9 Ni Ming, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Dynamic range of fiber optic hydrophone using digitized phase generated carrier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(2): 33~37
- 倪 明, 胡永明, 孟 洲等. 数字化 PGC 解调光纤水听器的动态范围[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(2): 33~37
- 10 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone[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
- 11 Luo Hong, Xiong Shuidong, Hu Yongming. A fiber optic hydrophone to be used in thin line towed array [J]. *Appl. Acoustics*, 2006, **25**(2): 65~68
- 罗 洪, 熊水东, 胡永明等. 拖曳线列阵用光纤水听器的研究[J]. *应用声学*, 2006, **25**(2): 65~68
- 12 Luo Hong. Research on Fiber Optic Hydrophone Used for Towed Line Array [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. 26
- 罗 洪. 拖曳线列阵用光纤水听器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007. 26

栏目编辑: 王晓琪