

外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列

郭振, 高侃*, 杨辉, 代志国, 吴晔炎, 张俊

中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 200437

摘要 基于干涉型光纤水听器技术, 设计实现了外径为 20 mm 的光纤光栅型拖曳水听器阵列。首先利用多波长光纤光栅连续刻写技术实现了单纤“无熔点”的光纤水听器阵列, 水听器单元的平均声压灵敏度达到 -143.9 dB, 起伏幅度小于 3 dB。利用弱反光栅组阵技术抑制了光栅阵列中的串扰噪声, 串扰噪声抑制达到 53 dB; 利用三路偏振分集接收技术消除了阵列中的偏振衰落噪声。最终制作了外径为 20 mm 的 32 元光纤光栅拖曳水听器阵列。

关键词 光纤光学; 光纤水听器; 光栅; 串扰; 偏振衰落

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1106003

20-mm-Diameter Interferometric Hydrophone Towed Array Based on Fiber Bragg Gratings

Guo Zhen, Gao Kan*, Yang Hui, Dai Zhiguo, Wu Bingyan, Zhang Jun

No. 23 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200437, China

Abstract Based on a interferometric optical fiber hydrophone, a fiber Bragg grating (FBG) hydrophone towed array with a diameter of 20 mm is realized. This single-fiber hydrophone array without splices is realized by using the multi-wavelength FBG continuous writing technique. The average acoustic pressure sensitivity of a hydrophone unit is -143.9 dB, and the fluctuation of sensitivity is limited within 3 dB. To suppress the crosstalk in the FBG hydrophone array, weak-reflectivity FBGs are utilized, reducing the crosstalk to 53 dB. Moreover, polarization-induced fading is eliminated by three-channel polarization diversity receiving. A 32-element FBG hydrophone towed array with a diameter of 20 mm is fabricated.

Key words fiber optics; fiber hydrophone; fiber Bragg grating; crosstalk; polarization induced fading

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 190.7070

1 引 言

近年来,随着水下探测的需求和海洋工程技术的发展,光纤水听器凭借其灵敏度高、抗电磁干扰和易复用等优势得到广泛应用^[1-2]。其中,水下自主式无缆机器人/无人水下航行器等小型化平台,由于小巧、轻便易投放,且易形成水下探测网络,受到越来越多的关注^[3-4]。但由于此类小型化平台空间有限,所以对水听器阵列的尺寸、探测频率等也提出了更严苛的要求。传统的干涉型光纤水听器,单元光路结构复杂,元器件数目较多,成阵后会影响到阵列尺寸和可靠性。目前,为实现光纤水听器小型化,多采用光纤光栅的方案,而光纤光栅方案分为以下两类:一类是基于分布式反馈光纤激光器(DFB)的光纤水听器,一类是基于光纤光栅对(P-FBG)的干涉型水听器。

基于 DFB 的光纤水听器光路系统简单,传感单元仅为一根光纤,封装便捷,理论上可以实现超细的光纤水听器阵列。英国 Hill 等^[5]于 1999 年首次利用光纤激光器实现 4 元传感器阵列,2014 年 Foster 等^[6]制作了基于 DFB 激光的 8 元水听器进行海试。2017 年海军工程大学唐波等^[7-8]制作了缆径 16 mm 的 32 元激光水听器拖曳阵列并成功进行了湖试。经过多年研究,其声压灵敏度、频响特性及抗加速等性能都不断得到改进。

基于 P-FBG 干涉型水听器的光路结构也为一根光纤,在光纤上制作多个 FBG 形成“在线”反射镜,各 FBG 之间的声敏感线圈绕制于弹性体上,实现水听器阵列的全光纤化,便于制作小型化的水听器阵列。该技术采用不同波长的成对光栅实现波分复用,极大地减少了耦合器和熔点的数量。2008 年

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-07-03; 录用日期: 2019-07-15

* E-mail: gaokan@siom.ac.cn

以来挪威 Optoplan 公司基于该结构制作了大范围的海底地震和能源探测系统^[9-10],在 200 km 长的传输线缆上安装了 4000 多个 4C 传感基元。基于 P-FBG 的光纤水听器一方面实现了水听器阵列的全光纤化,另一方面其传感机理仍是基于弹性体线圈,对应的单元一致性、抗加速度和大规模成阵能力较好,具有较高的可靠性和技术成熟能力。但是,对于基于 P-FBG 的光纤水听器阵列而言,仍有部分关键技术待解决,如光栅阵列制作、偏振衰落和串扰噪声等。

本文通过解决大规模多波长的光纤光栅阵列制作,利用低反射率光栅阵列和偏振分集分别解决串扰噪声和偏振衰落等问题,最终设计并制作了 32 元、外径 20 mm 的 P-FBG 干涉型光纤水听器阵列,对于超小型化水听器阵列的工程应用具有重要意义。

2 光纤光栅干涉型水听器单元

光纤光栅干涉型水听器的工作原理如图 1(a)所示。水听器单元由传感线圈与两侧对称分布的两个同波长的光栅组成。当访问脉冲进入水听器阵列

时,会在第一个光纤光栅处发生部分反射形成 FBG1 脉冲,在第二个光栅处发生部分反射形成 FBG2 脉冲。两反射脉冲经过补偿干涉仪后对其进行信号解调,最终得到传感声压信号。由于 FBG 本身具有波长选择性,所以仅利用不同反射波长的 FBG 就可以实现大规模的波分-时分复用水听器阵列。

由于光纤光栅本身即为传感器件,其反射中心波长会随着外界温度或应力的作用而变化,而在该水听器单元中仅需其波长选择反射的功能,因此需要对光纤光栅的封装进行退敏设计。本文设计的光纤光栅水听器结构如图 1(b)所示,中间位置为声压弹性体,对声音信号敏感,在其上均匀绕制敏感光纤,在两侧设计光栅封装区域,对光纤光栅进行密封保护,隔绝外界环境的影响。基于此设计的水听器外径为 10 mm,长度为 90 mm。图 1(c)下半部分为制作的单元结构件,上半部分为绕制敏感线圈和光栅封装后的水听器单元,在加工完成后,对水听器进行灌封保护,既可保证其质量及外形的均匀性,也可增加工程可靠性。

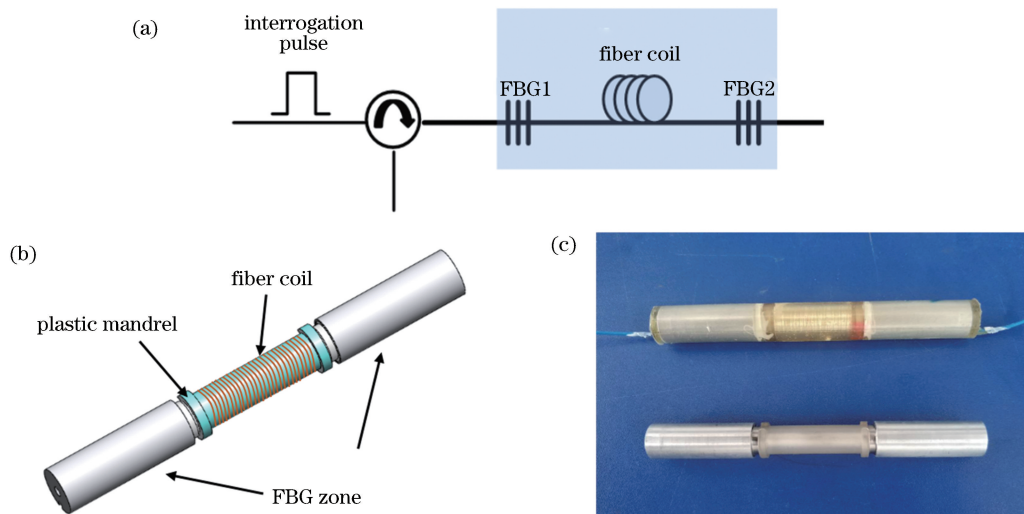


图 1 P-FBG 干涉型水听器。(a)原理图;(b)水听器单元设计结构图;(c)上图为灌封后单元,下图为单元结构件
Fig. 1 P-FBG interferometric hydrophone. (a) Schematic diagram; (b) structure of hydrophone unit design;
(c) encapsulated unit (up) and unit structure (down)

利用该水听器的单纤型光路结构,一方面大幅减少了光学元器件的使用,降低了水听器单元及阵列的尺寸,另一方面也大量减少了阵列中熔点数目。为进一步发挥光纤光栅干涉型水听器阵列的优势,本文设计实现了“无熔点”的水听器阵列,如图 2(a)所示。该 4 元水听器阵列由 2 波分 \times 2 时分复用而成,其光栅的中心波长分别为 1558.17 nm (ITU-C24)和 1551.72 nm (ITU-C32),组阵由 C24-C32-

C24-C32 组成。整个阵列仅由一根光纤组成,在该根光纤不同位置上刻写特定波长的光纤光栅,且整条光纤没有熔点。水听器单元的声压灵敏度与弹性体结构、敏感线圈长度和线圈绕制工艺有关,本单元采用的弹性体工艺的材料和机械加工能力成熟,可以保证敏感线圈长度一致、线圈绕制排列整齐、绕制过程中的张力恒定等,因此保证阵列中各个水听器单元性能一致。4 单元阵列的声压灵敏度如图 2(b)

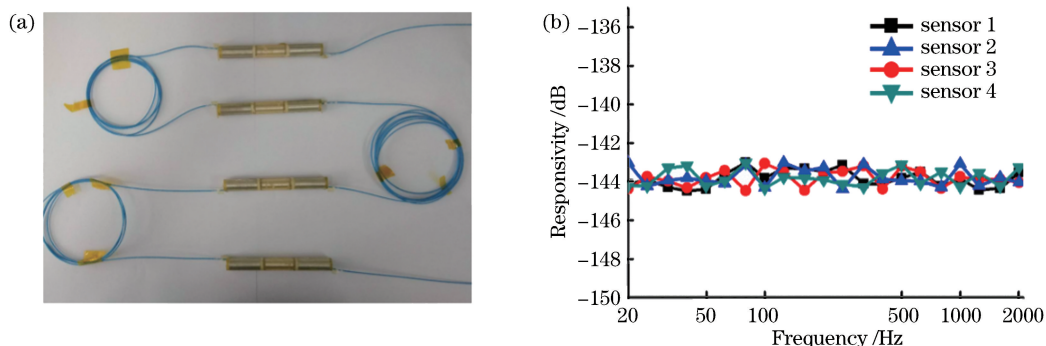


图 2 4 元 P-FBG 型水听器阵列。(a) 无熔点阵列实物图; (b) 各单元的声压灵敏度

Fig. 2 Four-element P-FBG hydrophone array. (a) Hydrophone array without melting points;

(b) acoustics pressure sensitivity of each unit

所示,水听器单元在 20~2000 Hz 下的平均声压灵敏度为 -143.9 dB,起伏幅度小于 3 dB。

3 光纤光栅干涉型水听器系统

虽然光栅型水听器拥有诸多优点,但同时存在一些问题。例如单纤型光路中的串扰和偏振衰落噪声等。串扰是由光栅的反射和透射双重特性引起的,如图 1(a)中脉冲在 FBG2 发生反射后经过光栅 1 时,仍然会有部分光发生后向反射,再经光栅 2 反射回到接收端,这部分光会影响下一时分单元的解调,因此会形成串扰信号。随着阵列单元数目的增加,每个访问脉冲在经过一次光纤光栅时都会产生反射和透射产生两个脉冲,形成干扰脉冲的数目也呈指数增加。采用低反射率光栅可以有效抑制串扰噪声,文献[11]中利用反射率为 2% 的低反光栅实现了 34 dB 的串扰抑制。利用相位掩模法制作的弱反光栅线宽为 0.19 nm,旁瓣抑制比为 27.3 dB。另外串扰噪声属于时分噪声,采用低反光栅后,经过多次反射的串扰强度是呈指数衰减的。为了进一步降低串扰噪声,在阵列复用中采用了时分-波分混合复用方式,如-波长 1

单元-波长 2 单元-波长 1 单元-波长 2 单元。为了测试串扰噪声大小,对第一个水听器单元 sensor1 施加水声信号,然后分别测量其他单元的噪声水平。如图 3 所示,在外加 800 Hz 的声音信号下,串扰抑制达到 53 dB,证明利用低反射率的光栅和时分-波分复用方式,可以有效降低时分串扰的影响。另外从图中可以看出,除了信号单元,其余各路信号的串扰噪声幅值比较一致,与普通时分串扰噪声分布不一致,进一步研究发现该现象是由单纤光路中的多普勒噪声引起的。该多普勒噪声的产生原理如下:当单个脉冲经过带有外加信号的光纤时,对应的相位变化 $\Delta\varphi(t)$ 为

$$\Delta\varphi(t) = kn \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [(1 - \nu)\rho_{12} - \nu\rho_{11}] \right\} \Delta L, \quad (1)$$

式中: ν 为光纤泊松比, ρ_{11} 和 ρ_{12} 为普克尔系数, n 为光纤折射率, k 为传播常数, ΔL 为光纤长度变化量。但是当两个有一定时间差的脉冲经过外加信号的光纤时,会产生多普勒噪声差,原理如图 3(b)所示,其中 φ_1 和 φ_2 为脉冲 1 和脉冲 2 的初始相位, φ_s 为传感信号引起的相位差, ω_s 为外加信号频率。经过研究,

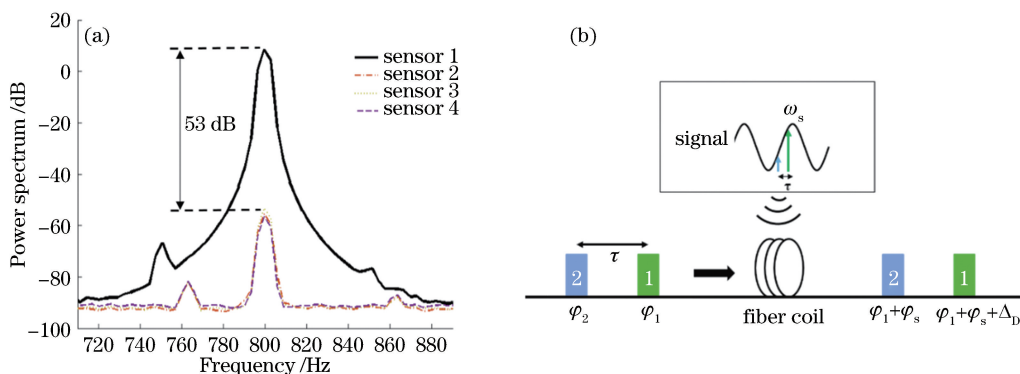


图 3 P-FBG 型水听器阵列中的噪声抑制。(a) 串扰抑制效果图; (b) 多普勒噪声原理图

Fig. 3 Noise suppression in P-FBG hydrophone array. (a) Suppression of crosstalk; (b) schematic of Doppler noise

该测试噪声水平与多普勒噪声水平一致^[12]。多普勒效应引起的额外相位差为

$$\Delta\varphi_D(t) = \Delta L(t + \tau) - \Delta L(t), \quad (2)$$

式中： τ 为两脉冲的时间差。

另外，由于光纤光栅干涉型水听器阵列没有偏振补偿功能，光路中会出现两路干涉信号偏振态正交无法干涉的情况，即偏振衰落现象。本文利用偏振分集接收技术解决偏振衰落^[13]，如图4(a)所示。偏振分集接收技术的原理是使水听器阵列返回的脉冲通过分束器后再分别经过三个互成 $\pi/3$ 夹角的检偏器，然后利用三路光电探测进行信号提取并解调。由于不会因为偏振态的随机变化而出现三个探测器的输出均为偏振衰落的情况，所以通常的做法是从三路信号中选取对比度最高的一路干涉信号进行解调，但三路信号的随机切换会影响信号解调性能。因此，在外差相位信号解调的基础上，设计了偏振分集平方求和的方法，对经过不同检偏器的干涉信号分别进行采样并平方求和，解调端接收信号为

$$\begin{cases} I' = \sum_{k=0}^2 I_k^2 = 2A \{1 + \cos[\omega_0 t + 2\varphi(t)]\} \\ A = \frac{1}{9} E_s^2 E_r^2 \sum_{k=0}^2 \left[\cos\left(\theta_s - \frac{\pi k}{3}\right) \cos\left(\theta_r - \frac{\pi k}{3}\right) \right]^2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中： I' 为三路信号平方和后的信号； I_k 为单路信号($k=0, 1, 2$)； E_s 和 θ_s 分别为传感臂信号的幅值和

偏振方位角； E_r 和 θ_r 分别为参考臂信号的幅值和偏振方位角； A 为待解调信号的幅值，其与水听器返回脉冲的光强和偏振态有关； $\varphi(t)$ 为待测信号； ω_0 为外差信号的载频差。从(3)式中可以看出，利用偏振分集接收得到的信号不会发生偏振衰落现象。实验中在水听器干涉仪中的信号臂上加入绕偏装置模拟随机偏振信号，结果如图4所示，其中图4(b)为图4(a)中 0° 检偏后的解调信号，图4(c)的信号为三路平方求和的解调信号。可以发现在一路信号在4.02 s发生偏振衰落时，利用偏振分集后的信号没有发生衰落。另外在长时间的随机绕偏过程中，偏振分集后的信号均没有发生偏振衰落。

4 32元光纤光栅干涉型水听器阵列

进一步根据实际应用需求，设计了外径为20 mm、32元的光栅水听器阵列，如图4(a)和(b)所示。阵列采用2空分4时分4波分的组阵方式。单个空分(4时分4波分)采用单纤型光路结构，整条32元水听器阵列的光路仅由两条刻有光栅的光纤组成。光栅的中心波长 $\lambda_1 = 1558.17$ nm (ITU-C24)， $\lambda_2 = 1554.94$ nm (ITU-C28)， $\lambda_3 = 1551.72$ nm (ITU-C32)， $\lambda_4 = 1548.52$ nm (ITU-C36)。采用时分-波分复用方式($-\lambda_1-\lambda_3-\lambda_1-\lambda_3$)抑制水听器阵列中的串扰噪声。另外采用先 $\lambda_1-\lambda_3$ 子阵再 $\lambda_2-\lambda_4$ 子阵的方式(如 $-\lambda_1-\lambda_3-\lambda_1-\lambda_3-\lambda_1-\lambda_3-\lambda_1-\lambda_3-\lambda_2-\lambda_4-\lambda_2-\lambda_4-$

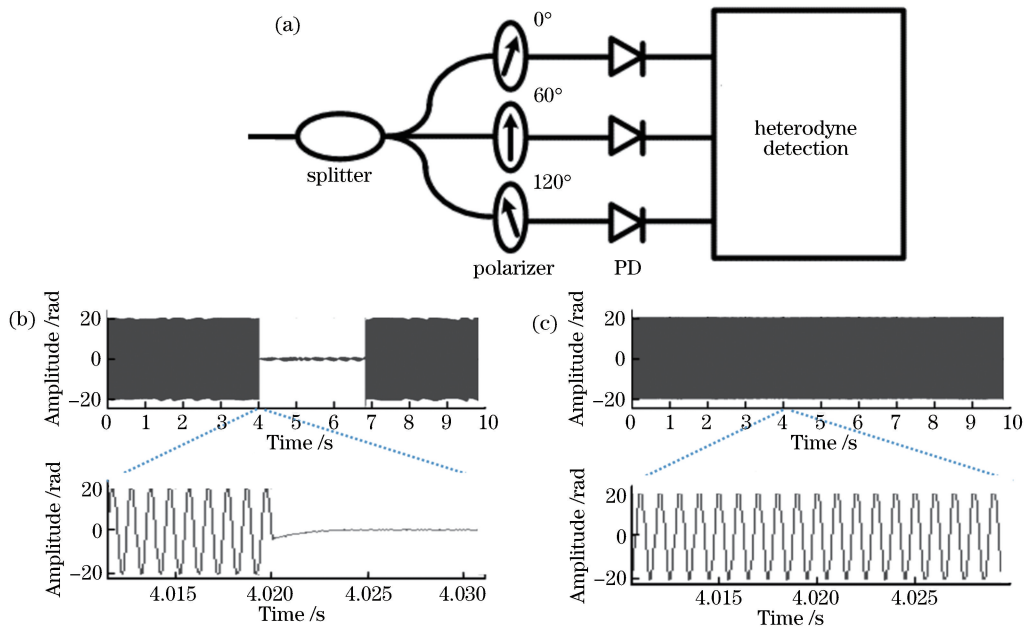


图4 偏振分集接收技术原理及结果图。(a)原理图；(b) 0° 检偏后单路信号的解调信号；(c)偏振分集接收后的解调信号
Fig. 4 Principle and results of polarization diversity receiving. (a) Schematic diagram; (b) demodulated signal of single-channel signal after 0° polarizer; (c) demodulated signal after polarization diversity receiving

$\lambda_2-\lambda_4$),更好地抑制波分噪声,同时也保证了系统的采样率。系统的重复频率为 250 kHz,外差调制频率分别为 $f_1=78$ MHz 和 $f_2=86$ MHz,水听器线圈长度为22.5 m。发送端利用外差调制产生差频为

8 MHz的两个访问脉冲,两脉冲经环形器进入水听器阵列,在水听器单元中两脉冲发生干涉并携带声音信号返回到接收端。然后经过偏振分集接收抑制偏振衰落噪声,最后经外差解调得到声音信号。

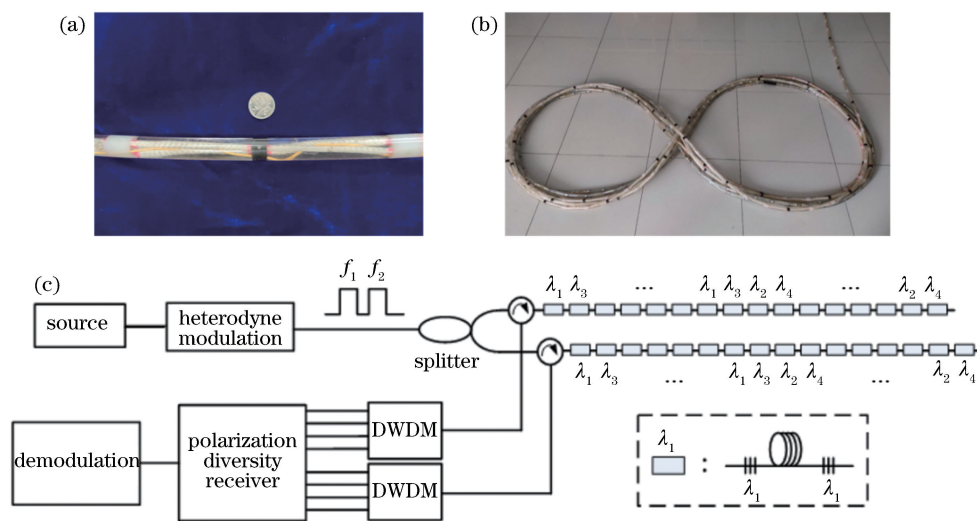


图 5 32 元 P-FBG 型水听器阵列。(a)阵列外径 20 mm 的局部图;(b) 32 元光栅拖曳阵列实物图;
(c) F-PBG 型水听器阵列系统图

Fig. 5 32-element P-FBG hydrophone array. (a) Partial hydrophone array with 20-mm diameter;
(b) 32-element FBG towed hydrophone array; (c) P-FBG hydrophone array system

5 结 论

细径小型化的水听器一方面可以用于大规模阵列的远距离水声信号探测,另外也适用于小规模、中高频探测的水下小型化平台。通过设计多波长多光栅的连续刻写工艺和小型化光纤光栅型水听器单元/阵列工艺,同时解决了单纤型光栅水听器阵列中的串扰和偏振衰落等噪声问题,实现了外径20 mm、32元的单纤型光栅水听器阵列。采用该干涉型光栅水听器可大幅降低阵列成本,提高阵列的可靠性和适装性。该干涉型光栅水听器为水听器阵列在水下小型化平台中的应用提供了新的技术途径。

参 考 文 献

[1] Kirkendall C K, Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(18): R197-R216.
 [2] Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(1): 19-30.
 [3] Hwang A, Seong W, Choi H S, et al. Concurrent mapping and localization applied to SNUUV I[C]//

Oceans'04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04 (IEEE Cat. No. 04CH37600), November 9-12, 2004, Kobe, Japan. New York: IEEE, 2004: 1594-1599.

[4] Babb R J. Navigation of unmanned underwater vehicles for scientific surveys [C]//Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, June 5-6, 1990, Washington, DC, USA. New York: IEEE, 1990: 194-198.
 [5] Hill D J, Nash P J, Jackson D A, et al. Fiber laser hydrophone array [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3860: 55-66.
 [6] Foster S, Tikhomirov A, Harrison J, et al. Field demonstration of an eight-element fiber laser hydrophone array [J]. Proceeding of SPIE, 2014, 9157: 91570H.
 [7] Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Frequency response characteristics of sound pressure sensitivity of distributed feedback fiber laser hydrophone [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0406001.
 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水听器的声压灵敏度频率响应特性[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0406001.
 [8] Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Experimental research on DFB fiber laser hydrophone towed line array [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 0406004.
 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水

- 听器拖曳线列阵实验研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 0406004.
- [9] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, *et al.* Reduction of crosstalk in inline sensor arrays using inverse scattering [J]. Proceeding of SPIE, 2008, 7004: 70044Z.
- [10] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, *et al.* Suppression of cable induced noise in an interferometric sensor system [J]. Proceeding of SPIE, 2009, 7503: 75034Q.
- [11] Guo Z, Gao K, Zhou S L, *et al.* Time domain crosstalk in fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometric hydrophone array system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0706001.
郭振, 高侃, 周少玲, 等. 光栅法布里-珀罗腔干涉型水听器阵列中的时域串扰[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0706001.
- [12] Guo Z, Gao K, Zhang W H, *et al.* Doppler noise in the inline FBG-based interferometric hydrophone array [C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE, 2017: 17466199.
- [13] Zhang W H, Guo Z, Niu J H, *et al.* Study on polarization diversity receiving technology based on heterodyne demodulation [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2017(5): 28-32.
张文华, 郭振, 牛疆航, 等. 基于外差解调的偏振分集接收技术的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017(5): 28-32.