

引用格式: DING Peng, HUANG Junbin, PANG Yandong, et al. A Towed Line Array with Weak Fiber Bragg Grating Hydrophones[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0706004

丁朋, 黄俊斌, 庞彦东, 等. 弱反射光纤光栅水听器拖曳线列阵[J]. 光子学报, 2021, 50(7):0706004

## 弱反射光纤光栅水听器拖曳线列阵

丁朋<sup>1,2</sup>, 黄俊斌<sup>1</sup>, 庞彦东<sup>1,3</sup>, 周次明<sup>3</sup>, 顾宏灿<sup>1</sup>, 唐劲松<sup>2</sup>

(1 海军工程大学 兵器工程学院, 武汉 430033)

(2 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

(3 武汉理工大学 信息工程学院, 武汉 430033)

**摘要:**提出一种细尺寸、大孔径、高增益的弱反射光纤光栅水听器拖曳线列阵。根据匹配干涉方法选用反射率一致、中心波长相同以及 3 dB 带宽较宽的弱反射光纤光栅阵列;根据水声传感原理确定弱反射光纤光栅阵列的栅距以应用于 5~10 Hz 甚低频水声信号探测。采用光纤涂覆机对弱反射光纤光栅阵列二次涂覆,阵列中心波长整体一致漂移,栅距基本不变。采用扎纱机和护套机在二次涂覆弱反射光纤光栅阵列外铺设凯夫拉纤维和聚氨酯保护套形成水听器拖曳线列阵。测试拖曳线列阵水听器单元的声压-相位灵敏度在 1 rad/ $\mu$ Pa 条件下分别为 -136.97 dB@ 5 Hz、-139.64 dB@7.5 Hz、-139.36 dB@ 10 Hz;分析流噪声引起的水听器自噪声功率谱,拖速为 8 m/s、频段为 1~100 Hz 的谱值在 45~95 dB (1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>/Hz) 范围内。实验和分析结果表明,所提出的弱反射光纤光栅水听器拖曳线列阵甚低频段灵敏度高、流噪声低,有望增强无人航行器的甚低频水声信号探测功能。

**关键词:** 光纤布拉格光栅;弱反射;水听器;拖曳线列阵

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215007.0706004

## A Towed Line Array with Weak Fiber Bragg Grating Hydrophones

DING Peng<sup>1,2</sup>, HUANG Junbin<sup>1</sup>, PANG Yandong<sup>1,3</sup>, ZHOU Ciming<sup>3</sup>, GU Hongcan<sup>1</sup>,  
TANG Jinsong<sup>2</sup>

(1 Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

(2 College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

(3 College of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** A thin, large aperture, high gain towed line array with weak fiber Bragg grating hydrophones is proposed. A weak fiber Bragg grating array with the same reflectivities, central wavelengths and wide 3 dB bandwidths is selected according to the principle of matched interference, and the grating spacing of the weak fiber Bragg grating array is determined according to the principle of underwater acoustic sensing for 5~10 Hz very low frequency underwater acoustic signals detection. Central wavelengths of the weak fiber Bragg grating array are uniformly shifted and the grating spacing is basically unchanged when the weak fiber Bragg grating array is coated by an optical fiber coating machine. Kevlar and polyurethane protective sheath are laid outside the weak fiber Bragg grating array by a yarn binding machine and sheath machine to form hydrophone towed array. The sound pressure-phase sensitivities of the towed linear array hydrophone unit are measured as -136.97 dB (1 rad/ $\mu$ Pa) @ 5 Hz, -139.64 dB @ 7.5 Hz, -139.36 dB @ 10 Hz. The self noise power spectrum of the hydrophone caused by flow noise is analyzed, and the spectrum value is in

基金项目: 国家自然科学基金(No.11774432), 湖北省自然科学基金(No.2018CFB788)

第一作者: 丁朋(1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术。Email: happylading@hotmail.com

导师(通讯作者): 黄俊斌(1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术。Email: tsyj98@163.com

收稿日期: 2020-12-12; 录用日期: 2021-02-04

<http://www.photon.ac.cn>

the range of 45~95 dB ( $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ ) in the frequency band of 1~100 Hz under 8 m/s towing speed. The experimental and analytical results show that the proposed towed line array has high sensitivity and low flow noise in very low frequency band, which is expected to increase the detection function of very low frequency underwater acoustic signals for unmanned aerial vehicles.

**Key words:** Fiber Bragg grating; Weak reflection; Hydrophone; Towed line array

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.3735; 100.7410; 120.1880

## 0 引言

光纤水听器具有不受电磁干扰,信号便于远程传输等优势,在水声探测领域占有一席之地。弱反射光纤光栅阵列<sup>[1-2]</sup>,由拉丝塔拉丝、光刻平台刻栅以及紫外固化装置涂覆在线制备而成,在1根光纤上复用了上千个弱反射布拉格光栅(Weak Fiber Bragg Grating, WFBG),其中相邻2个波长相同的WFBG及其之间的光纤构成1个Fabry-Perot(WFBG-FP)水听器。由此单根WFBG阵列复用了超大规模的水听器,从而起到“高增益”效果。WFBG-FP水听器结构比干涉仪型水听器<sup>[3-4]</sup>简单,灵敏度比光纤布拉格光栅型水听器<sup>[5-6]</sup>高,复用能力比分布反馈式光纤激光水听器<sup>[7-8]</sup>强。WFBG-FP水听器拖曳线列阵的制备方法主要为WFBG-FP腔缠绕在基体上构成水听器,水听器串接成拖曳线列阵<sup>[9-11]</sup>。上述WFBG-FP水听器刚性的缠绕基体制约了水听器拖曳线列阵体积,科研人员又把干涉仪型水听器表面涂覆增敏技术<sup>[12-14]</sup>应用到WFBG水听器线阵制备中。该表面涂覆式WFBG水听器中的光纤既起传输光作用又起感知水声信号作用,设置应用于甚低频声信号探测的光纤长度,可以构成“大孔径”水听器拖曳线列阵。2017年,LAVROV V S等<sup>[15]</sup>将3.5 mm的RTV655材料涂覆在7-WFBG阵列(栅距为1.5 m)表面,并在外层包裹增强聚合物纤维和热塑塑料构成6元柔性水听器阵列,直径小于20 mm、总长为60 m,主要探讨了RTV655材料对6元水听器阵列的增敏效果,阵的工作频段、增益效果尚未涉及。2018年,张英东等<sup>[16]</sup>指出了杨氏模量小、泊松比大的二次涂覆材料可以提高WFBG阵列的声压-相位灵敏度,尚处于WFBG阵列增敏仿真研究阶段。2020年,庞彦东<sup>[17]</sup>采用聚醚聚氨酯对WFBG阵列涂覆,制备出长50 m、直径0.9 mm的WFBG水听器,主要探讨了二次涂覆WFBG水听器的制备,尚未涉及拖曳线列阵的设计与制备。2021年,丁朋等<sup>[18]</sup>建立二次涂覆WFBG水听器三层理论模型,制备出0.4 mm直径高密度聚乙烯涂覆WFBG水听器,同样未涉及拖曳线列阵的设计与制备。

综上,WFBG水听器拖曳线列阵尚处于涂覆增敏研究阶段,没有涉及拖曳线列阵的设计与制备。本文在文献[15-18]的基础上,提出一种细尺寸、大孔径、高增益的WFBG水听器拖曳线列阵。依据匹配干涉方法<sup>[19]</sup>、水声传感原理<sup>[20]</sup>设计WFBG阵列的反射率、中心波长、3 dB带宽和栅距。采用光纤涂覆机对WFBG阵列二次涂覆,并确保二次涂覆后的WFBG阵列仍然满足拖曳线列阵制备要求。采用扎纱机和护套机在二次涂覆WFBG阵列外铺设纵向排列的凯夫拉纤维和聚氨酯保护套形成松套管中心束管式二次涂覆WFBG阵列,即WFBG水听器拖曳线列阵。采用振动液柱测试拖曳线列阵水听器单元的声压-相位灵敏度;采用Carpenter流噪声压力起伏模型<sup>[21]</sup>、Lindemann护套传递函数<sup>[22]</sup>分析水听器各处的流噪声声压自功率谱。

## 1 WFBG 阵列参数设计

### 1.1 WFBG 中心波长、反射率、3 dB 带宽选择

图1为窄线宽单频激光脉冲在栅距 $L$ 相同的WFBG阵列中的传输情况。只考虑WFBG单次反射情况,且反射光谱符合高斯函数分布。波长为 $\lambda$ 的光脉冲进入WFBG阵列,依次透射 $i-1$ 个WFBG,经第 $i$ 个

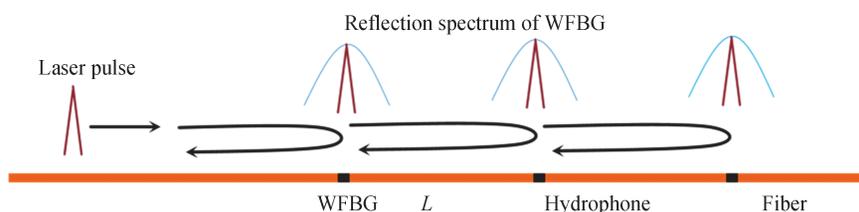


图1 光脉冲在WFBG阵列中的传输示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser pulse transmission in WFBG array

WFBG 反射,反射率  $R_i$  为

$$R_i(\lambda) = R_{0i} \exp \left[ -4 \ln 2 \cdot \left( \frac{\lambda - \lambda_{Bi}}{\Delta \lambda_{Bi}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中,  $\lambda_{Bi}$ 、 $R_{0i}$ 、 $\Delta \lambda_{Bi}$  分别为第  $i$  个 WFBG 的中心波长、反射率、3 dB 带宽。设入射光脉冲的光强为  $I_0$ , 则经第  $i$  个 WFBG 反射进入探测器的光脉冲光强  $I_i$  为

$$I_i = I_0 R_i \left( \prod_{j=2}^i (1 - R_{j-1}) \right)^2 \quad i \geq 2 \quad (2)$$

采用匹配干涉方法<sup>[19]</sup>, 光脉冲被栅距为  $L$  的 WFBG 阵列反射, 进入臂差为  $L$  的 Michelson 干涉仪, 则相邻 WFBG 中经前 WFBG 反射、进入 Michelson 干涉仪长臂往返传输的脉冲光, 与后 WFBG 反射、进入 Michelson 干涉仪短臂往返传输的脉冲光, 重叠干涉。由此第  $i$  个 WFBG 反射的光脉冲多传输  $2L$  光程, 与第  $i+1$  个 WFBG 反射光脉冲共同进入探测器, 场强分别为

$$E'_i = I_i^{0.5} \cos \left[ \omega_{\text{laser}} t + \frac{4\pi n_{\text{eff}} L (i-1)}{\lambda_{\text{laser}}} + \frac{4\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda_{\text{laser}}} \right] \quad (3)$$

$$E_{i+1} = I_{i+1}^{0.5} \cos \left( \omega_{\text{laser}} t + \frac{4\pi n_{\text{eff}} L i}{\lambda_{\text{laser}}} \right) \quad (4)$$

式中,  $\omega_{\text{laser}}$ 、 $\lambda_{\text{laser}}$  分别为光脉冲的角频率、波长,  $n_{\text{eff}}$  为光纤的有效折射率,  $t$  为时间。两束光脉冲发生重叠干涉, WFBG 阵列受声波扰动时, 干涉光强为

$$I = (E'_i + E_{i+1})(E'_i + E_{i+1})^* = I_i + I_{i+1} + 2(I_i I_{i+1})^{0.5} \cos(\Delta \varphi) \quad (5)$$

式中,  $\Delta \varphi$  为光脉冲在光纤中传输受到声波扰动时相位的变化。WFBG 的反射率通常小于 0.01%, 为了便于干涉光强的对比度最大, 令 WFBG 的反射率相同, 由式(1)、(2)、(5)可得对比度为

$$V(\lambda) = \frac{2(I_i I_{i+1})^{0.5}}{I_i + I_{i+1}} \approx \frac{2 \sqrt{\exp \left[ -4 \ln 2 \cdot \left( \frac{\lambda - \lambda_{Bi}}{\Delta \lambda_{Bi}} \right)^2 \right] \exp \left[ -4 \ln 2 \cdot \left( \frac{\lambda - \lambda_{Bi+1}}{\Delta \lambda_{Bi+1}} \right)^2 \right]}}{\exp \left[ -4 \ln 2 \cdot \left( \frac{\lambda - \lambda_{Bi}}{\Delta \lambda_{Bi}} \right)^2 \right] + \exp \left[ -4 \ln 2 \cdot \left( \frac{\lambda - \lambda_{Bi+1}}{\Delta \lambda_{Bi+1}} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

由式(6)可知, 当光脉冲的波长、第  $i$  个和第  $i+1$  个 WFBG 的中心波长相同时,  $V$  最大等于 1。当 WFBG 阵列受到均匀温度、应变影响时, 中心波长整体发生漂移, 为了降低对  $V$  的影响, 选择 3 dB 带宽较宽的 WFBG。为了降低 WFBG 阵列之间的信号串扰, 并增大 WFBG 复用数量, 需要选用反射率较低的 WFBG<sup>[23]</sup>。由此, 光脉冲的波长选择为 1 550.5 nm。WFBG 阵列的中心波长、反射率和 3 dB 带宽分别选择为 1 550.5 nm、0.01%、2 nm。

## 1.2 WFBG 阵列栅距选择

根据 WFBG 水声传感原理<sup>[20]</sup>, 光脉冲在第  $i$  个 WFBG 和第  $i+1$  个 WFBG 之间的第  $i$  段光纤中传输受到声波扰动相位的变化为

$$\Delta \varphi_i = \sum_{m=1}^M \Delta \varphi_{im} \quad (7)$$

式中,

$$\Delta \varphi_{im} = \left[ -\frac{4\pi n_{\text{eff}}(1-2\nu)}{\lambda_{\text{Light}} E} + \frac{2\pi n_{\text{eff}}^3(1-2\nu)(\rho_{11} + 2\rho_{12})}{\lambda_{\text{Light}} E} \right] \times \left\{ dP_0 \cos \left[ \omega_{\text{sound}} t - k_{\text{sound}} z + \varphi_{\text{sound}0} + \frac{2\pi[(m-1)d + (i-1)L] \sin(\theta_0)}{\lambda_{\text{laser}}} \right] \right\} \quad (8)$$

式中, 长为  $L$  的光纤平均分割为  $M$  段 ( $m=1, 2, 3, \dots, M$ ), 每小段长度为  $d$ ;  $\Delta \varphi_{im}$  为光脉冲在每一小段光纤中传输时的相位变化;  $P_0$ 、 $\omega_{\text{sound}}$ 、 $k_{\text{sound}}$ 、 $\varphi_{\text{sound}0}$ 、 $\lambda_{\text{sound}}$  分别为单频正弦声波的振幅、角频率、波数、初始相位、波长;  $\theta_0$  为声波与 WFBG 阵列法线方向的夹角;  $E$ 、 $\nu$ 、 $\rho_{11}$ 、 $\rho_{12}$  分别为光纤的杨氏模量、泊松比、光弹系数;  $t$  为传输时

间,  $z$  为声波到第 1 段第 1 小段光纤的传输距离。

讨论  $L = \lambda_{\text{sound}}/2$  情况下  $\Delta\varphi_1$  随  $\theta_0$  变化的关系。除  $d$  外,  $\Delta\varphi_1$  的余弦项系数看作 1。  $L$  取 50 m, 声波在水中速度取 1 500 m/s, 此时声波频率  $f_{\text{sound}} = 15$  Hz。图 2 显示为第 1 段光纤接收不同方向声波的  $\Delta\varphi_1$  信号, 由图可知声波方向从 WFBG 阵列的法向变化到切向,  $\Delta\varphi_1$  的振幅随之降低, 从 50 rad 降低到 31.8 rad。

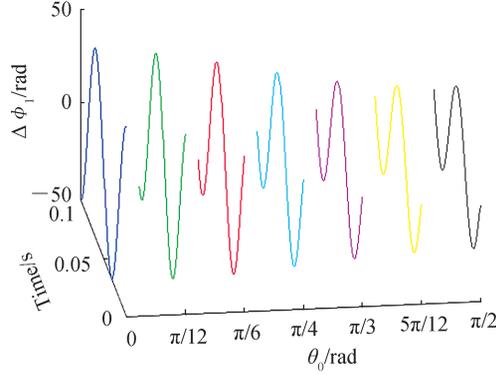


图 2  $L = \lambda_{\text{sound}}/2$  时, 第 1 段光纤接收不同方向声波的  $\Delta\varphi_1$  信号  
Fig.2  $\Delta\varphi_1$  signals received by 1th fiber with sounds waves in different directions under  $L = \lambda_{\text{sound}}/2$

$\theta_0 \neq 0$  时,  $L > \lambda_{\text{sound}}/2$  的情况下, 作用在  $L$  长光纤上的声压变化超过了声波的半周期, 随着  $f_{\text{sound}}$  变大, 甚至有多周期的声波。  $L$  取值 50 m, 随机设定  $\theta_0 = \pi/3$ , 图 3 显示为第 1 段光纤接收高频声波的  $\Delta\varphi_1$  信号, 由图可知  $f_{\text{sound}} = 15$  Hz 时,  $\Delta\varphi_1$  的振幅最大为 35.95 rad。  $f_{\text{sound}}$  增大,  $\Delta\varphi_1$  的振幅变小,  $f_{\text{sound}} = 30$  Hz 时, 振幅降到了 7.51 rad。由此, 当  $L$  固定, 半波长所对应的声波频率为  $f_{\text{sound}, \lambda/2}$ ,  $L$  长光纤构成的水听器有滤除高于  $f_{\text{sound}, \lambda/2}$  频率声波的作用。

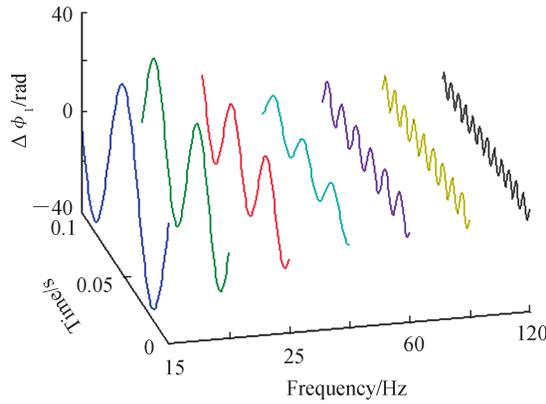


图 3  $\theta_0 = \pi/3, L = 50\text{m}$  时, 第 1 段光纤接收不同高频声波的  $\Delta\varphi_1$  信号  
Fig.3  $\Delta\varphi_1$  signals received by 1th fiber with sounds waves with high frequencies under  $\theta_0 = \pi/3, L = 50\text{m}$

$\theta_0 \neq 0$  时,  $L < \lambda_{\text{sound}}/2$  的情况下, 作用在  $L$  长光纤上的声压变化不足声波的半周期。  $L$  取 50 m, 随机设定  $\theta_0 = \pi/3$ , 图 4 显示为第 1 段光纤接收低频声波的  $\Delta\varphi_1$  信号,  $f_{\text{sound}}$  从 15 Hz 降低到 1 Hz,  $\Delta\varphi_1$  振幅从 35.951 rad 升高到 49.93 rad。由此, 当  $L$  固定,  $L$  长光纤构成的水听器不会滤除低于  $f_{\text{sound}, \lambda/2}$  频率的声波。综上, 栅距为  $L$  的 WFBG 水听器构成了截止频率为  $f_{\text{sound}, \lambda/2}$  的低通滤波器。

观察式 (7)、(8), 第  $i, i+1$  个水听器信号  $\Delta\varphi_i, \Delta\varphi_{i+1}$  的相位相差  $\Delta\varphi_{\text{signal}}$  为

$$\Delta\varphi_{\text{signal}} = \frac{2\pi L \sin(\theta_0)}{\lambda_{\text{sound}}} \quad (9)$$

由于 WFBG 水听器的低通滤波功能  $f_{\text{sound}} < f_{\text{sound}, \lambda/2}$ , 得  $L/\lambda_{\text{sound}} < 1/2$ 。但是, 当  $L$  固定,  $f_{\text{sound}}$  过小时, 造成  $L/\lambda_{\text{sound}}$  趋近于 0, 导致  $\Delta\varphi_{\text{signal}}$  无法分辨出  $\theta_0$ 。解决的方法是, 取间隔为  $aL$  ( $a \in N$ ) 的 2 个水听器信号对比它们的相位差,  $a$  取值为使  $(a+1)L/\lambda_{\text{sound}}$  趋近并小于 1/2 的自然数。具体地, 当 WFBG 水听器拖曳线列阵需要探

测 5~10 Hz 的水声信号时,设计 WFBG 阵列的栅距为 50 m。探测 5 Hz 的水声信号时,拾取间隔为  $2L$  的水听器信号;探测 7.5 Hz 的水声信号时,拾取间隔为  $L$  的水听器信号;探测 10 Hz 的水声信号时,拾取相邻的 2 个水听器信号。

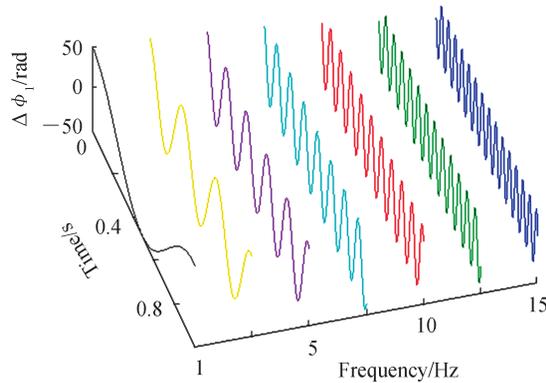


图 4  $\theta_0=\pi/3, L=50\text{m}$  时,第 1 段光纤接收低频声波的  $\Delta\varphi_1$  信号  
 Fig.4  $\Delta\varphi_1$  signals received by 1th fiber with sounds waves with low frequencies under  $\theta_0=\pi/3, L=50\text{m}$

## 2 WFBG 水听器拖曳线列阵制备与测试分析

### 2.1 WFBG 水听器拖曳线列阵制备

WFBG 水听器拖曳线列阵制备分为两个步骤,首先对 WFBG 阵列二次涂覆,而后对二次涂覆 WFBG 阵列扎纱、构建保护套形成松套管中心束管式二次涂覆 WFBG 阵列,即制备出 WFBG 水听器拖曳线列阵,如图 5。图中相邻 2 个 WFBG 之间的光纤接收水声信号即为水听器。由此,  $N$ -WFBG 阵列可以构成  $N-1$  元光纤水听器拖曳线列阵。

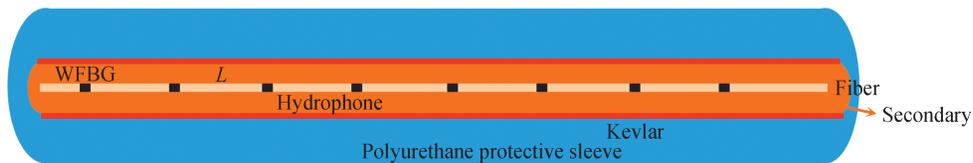
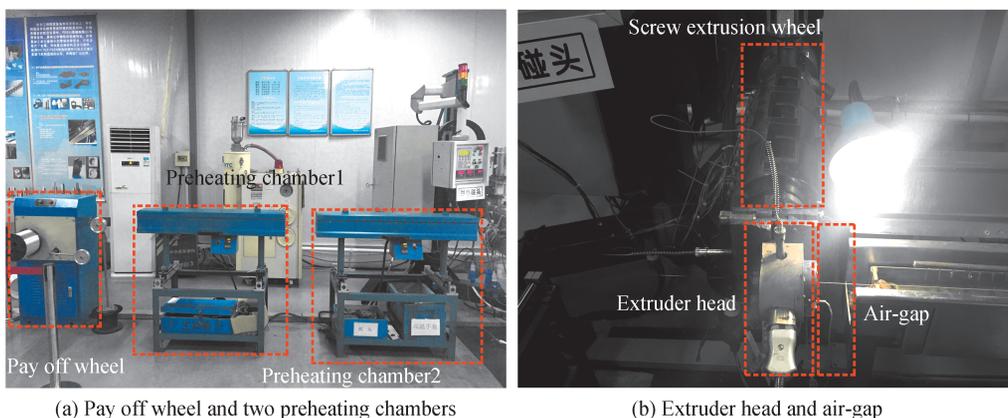
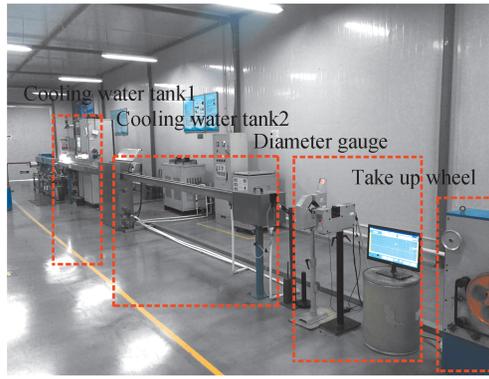


图 5 WFBG 水听器拖曳线列阵示意图  
 Fig.5 Schematic diagram of WFBG hydrophone towed linear array

309-WFBG 阵列的中心波长为 1 550.5 nm, 3 dB 带宽约为 2 nm, 反射率约为 0.01%, 栅距为 5 m。采用光纤涂覆机<sup>[24-25]</sup>对 WFBG 阵列二次涂覆,如图 6 所示。WFBG 阵列首先经过 100℃ 的预热室 1,而后经过 190℃ 的预热室 2。挤出机头的温度为 330℃。挤出机头出来后进入空气中,而后通过 2 个冷却水槽固化。最后通过收线轮收线,速度为 80 m/min。选用液晶树脂作为涂覆材料制备出直径为 0.9 mm 的 309 元二次涂覆 WFBG 阵列,如图 7 所示。





(c) Two cooling water tanks, diameter gauge and take up wheel

图6 WFBG阵列二次涂覆现场照片

Fig.6 Picture of secondary coating worksite of WFBG array



图7 直径0.9 mm的309元液晶树脂二次涂覆WFBG阵列

Fig.7 309-WFBG array coated with liquid crystal resin with 0.9 mm diameter

采用LUNAOBR4600背光反射计分别测量未涂覆WFBG阵列和0.9 mm涂覆WFBG阵列的时域反射光强,如图8所示。由图8(a)可知WFBG反射率较为一致,约为-80 dB。由图8(b)可知每隔约5 m位置都有时域反射峰,说明WFBG全部存活,但反射率整体有所下降,并稍有起伏,约为-85 dB。

选取图8(b)中前11个反射峰,它们之间的距离如表1所示。由表可知,WFBG阵列涂覆后栅距基本没有变化,由此二次涂覆对WFBG阵列匹配干涉解调和WFBG水听器检测声波方向都不会产生影响。

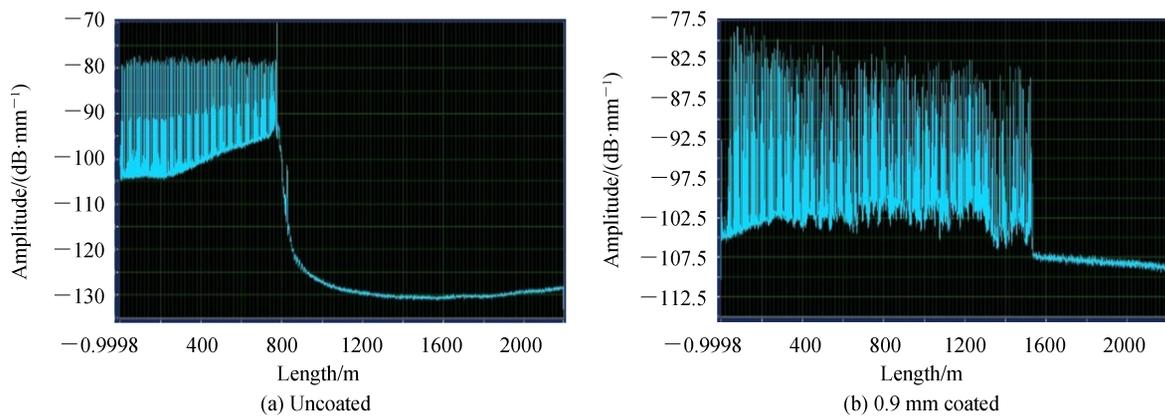


图8 WFBG阵列时域反射光强

Fig.8 Time domain reflected light intensity of WFBG arrays

表 1 未涂覆和涂覆 WFBG 阵列的栅距(单位:m)

Table 1 Spacings with uncoated and coated WFBG arrays(unit: m)

Spacing	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
Uncoated	4.84	4.90	4.90	4.84	4.90	4.85	4.89	4.90	4.85	4.85	4.87
Coated	4.90	4.86	4.89	4.90	4.89	4.90	4.89	4.85	4.90	4.89	4.89

未涂覆和涂覆 WFBG 阵列的反射光谱如图 9 所示,图 9(a)为未涂覆的 WFBG 阵列反射光谱,整体中心波长为 1 550.5 nm。图 9(b)为涂覆的 WFBG 阵列反射光谱,整体中心波长为 1 552.5 nm。图 9(c)为阵列第一个 WFBG 光谱细节图。涂覆后 WFBG 光谱发生了整体漂移,中心波长从 1 550.5 nm 漂移到了 1 552.5 nm,说明 WFBG 阵列涂覆后整体受到了均匀的拉应力。

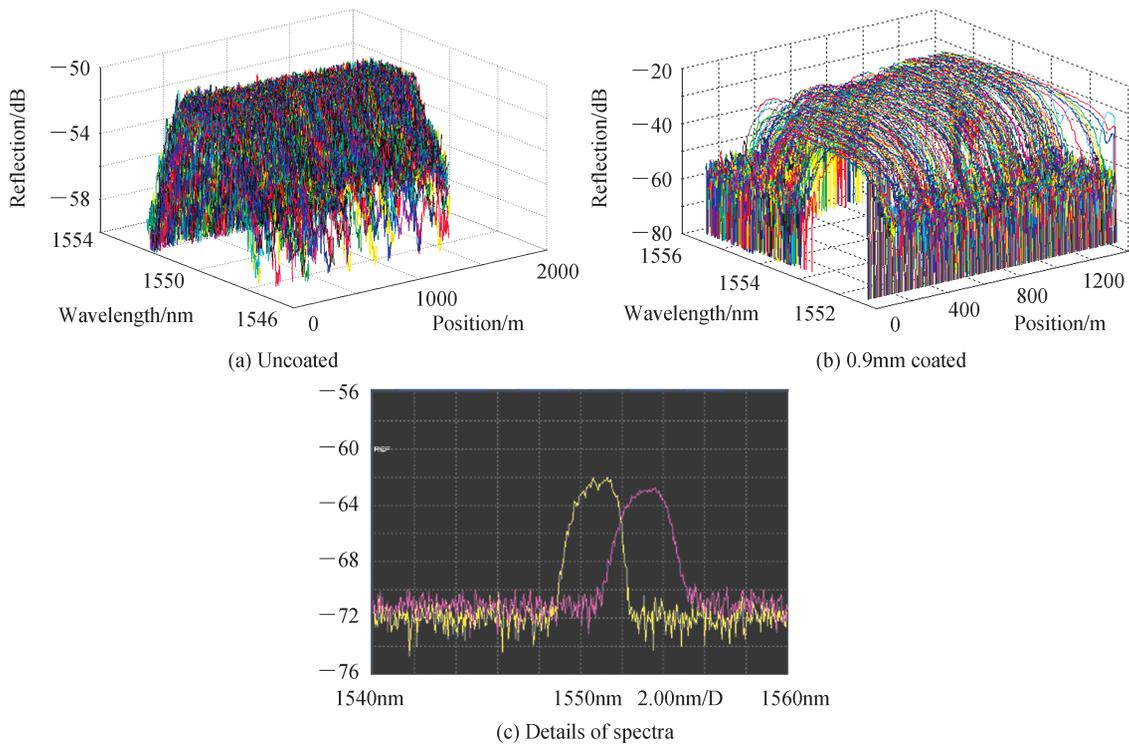


图 9 涂覆前后 WFBG 反射光谱

Fig.9 Reflected spectra of uncoated and coated WFBGs

综上,采用光纤涂覆机对 WFBG 阵列二次涂覆,WFBG 全部存活;栅距基本不变;中心波长整体发生漂移,漂移量一致。二次涂覆对 WFBG 解调系统的影响则是将原 1 550.5 nm 的激光光源换为 1 552.5 nm 的激光光源。

为了增强二次涂覆 WFBG 阵列的机械强度,并减小拖曳动态张力对 WFBG 阵列的影响,在二次涂覆 WFBG 阵列外铺设纵向排列的凯夫拉纤维,在凯夫拉纤维外包裹聚氨酯保护套,形成松套管中心束管式 WFBG 阵列,即 WFBG 水听器拖曳线阵列。为了增强 WFBG 阵列的水声声压-相位灵敏度,二次涂覆材料由液晶树脂更换为高密度聚乙烯<sup>[18]</sup>。由于 WFBG 水听器拖曳线阵列的水听器依靠相邻 WFBG 之间的光纤感知外界水声声压,也受限于 WFBG 阵列的短缺,制备松套管中心束管式高密度聚乙烯二次涂覆光缆,截取 50 m 光缆,在光缆两端熔接 WFBG,模拟栅距为 50 m 的松套管中心束管式高密度聚乙烯二次涂覆 2-WFBG 阵列。图 10 为松套管中心束管式高密度聚乙烯二次涂覆光缆制备现场,采用扎纱机<sup>[26-27]</sup>在高密度聚乙烯二次涂覆光纤外铺设纵向排列的凯夫拉纤维,采用护套机在凯夫拉纤维外包裹聚氨酯保护套。

图 11 为制备出的松套管中心束管式高密度聚乙烯二次涂覆光缆,其中光纤的直径为 0.125 mm,二次涂覆光纤直径为 0.4 mm,光缆直径为 1.7 mm,聚氨酯护套厚度为 0.55 mm。

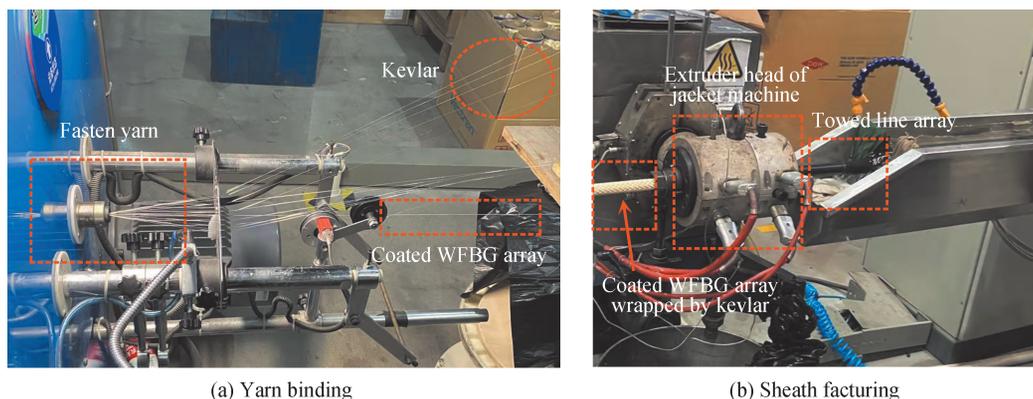


图10 松套管中心束管式二次涂覆光缆制备现场照片

Fig.10 Picture of the worksite with optical cable for loose tube central bundle type with secondary coating of high density polyethylene

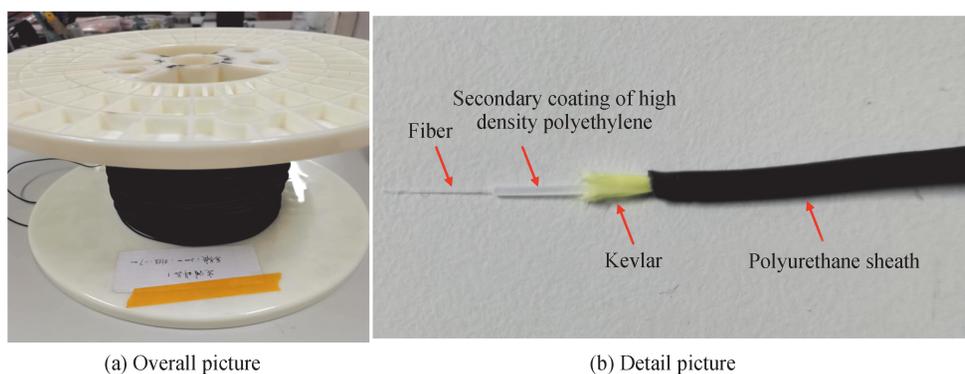


图11 松套管中心束管式高密度聚乙烯二次涂覆光缆

Fig.11 Optical cable for loose tube central bundle type with secondary coating of high density polyethylene

## 2.2 WFBG 水听器拖曳线列阵声压-相位灵敏度测试

采用匹配 Michelson 干涉仪和  $3 \times 3$  零差对称算法解调 WFBG 阵列<sup>[19]</sup>, 实验系统如图 12 所示。图 12(a) 中, 1 550.5 nm 波长的半导体激光器, 线宽为 10 kHz; 设置声光调制器 (Acousto Optic Modulator, AOM) 的驱动脉冲宽度为 300 ns, 周期为 5  $\mu$ s; 采集卡采集频率为 50 MHz。对振动液柱施加单频正弦声波, 测试拖曳线列阵水听器单元的声压-相位灵敏度, 如图 12(b), 参考加速度计粘贴在振动罐体底部, 灵敏度  $M_a$  为 5.71 pC/ms<sup>2</sup>, 通过电荷放大器 (放大倍数  $M_{ak}$  为 1 000) 连接在示波器上, 信号的振幅为  $U_a$ 。在 50 m 长的松套管中心束管式高密度聚乙烯二次涂覆光缆两端熔接 WFBG, 构成拖曳线列阵水听器单元, 并卷成直径为 6 cm 的圆环, 通过夹具固定在支架上放入罐体内。罐体内水深  $l$  为 10 cm, 水面到 WFBG 阵列环中心的距离  $h$  为 5 cm。振动液柱法测试的水听器声压-相位灵敏度可表示为<sup>[28]</sup>

$$M_{\text{signal}} = 20 \log \frac{A_{\Delta\varphi} M_a M_{ak}}{U_a h \rho K} - 120 \quad (10)$$

式中,  $M_{\text{signal}}$  的单位为 dB (在 1 rad/ $\mu$ Pa 条件下);  $A_{\Delta\varphi}$  为系统解调出的水听器干涉相位信号的振幅;  $\rho$  为水的密度;  $K$  为加速度与水的相关系数, 由  $K = \sin(kh) / [kh \cos(kl)]$  得到,  $k$  定义为  $k = 2\pi f/c$ ,  $c$  为水声速度取 1 500 m/s,  $f$  为振动频率, 此处测试 5 Hz、7.5 Hz 和 10 Hz 的正弦声波。

实验过程中, 5 Hz、7.5 Hz 和 10 Hz 激励信号对应的加速度计振幅均为 10.6 V。图 13~15 为拖曳线列阵水听器单元分别测试 5 Hz、7.5 Hz、10 Hz 正弦声波的时域和频域信号。其中, 探测的正弦信号都有高频噪声, 尤其是图 14 出现了较强的杂频信号, 可能原因是驱动振动液柱的功率放大器在 7.5 Hz 处的高频噪声较大, 此外测试的 WFBG 阵列环没有固定的结构, 导致干涉相位信号出现较大的杂频干扰。其中, 探测的正弦函数拟合相位幅度分别为 39.73 rad、34.77 rad、35.28 rad, 由式 (10) 得 1 rad/ $\mu$ Pa 条件下对应的声压-相位灵敏度分别为 -136.97 dB、-139.64 dB、-139.36 dB。本课题组测得栅距 50 m 的裸 WFBG 阵列声压-相位灵

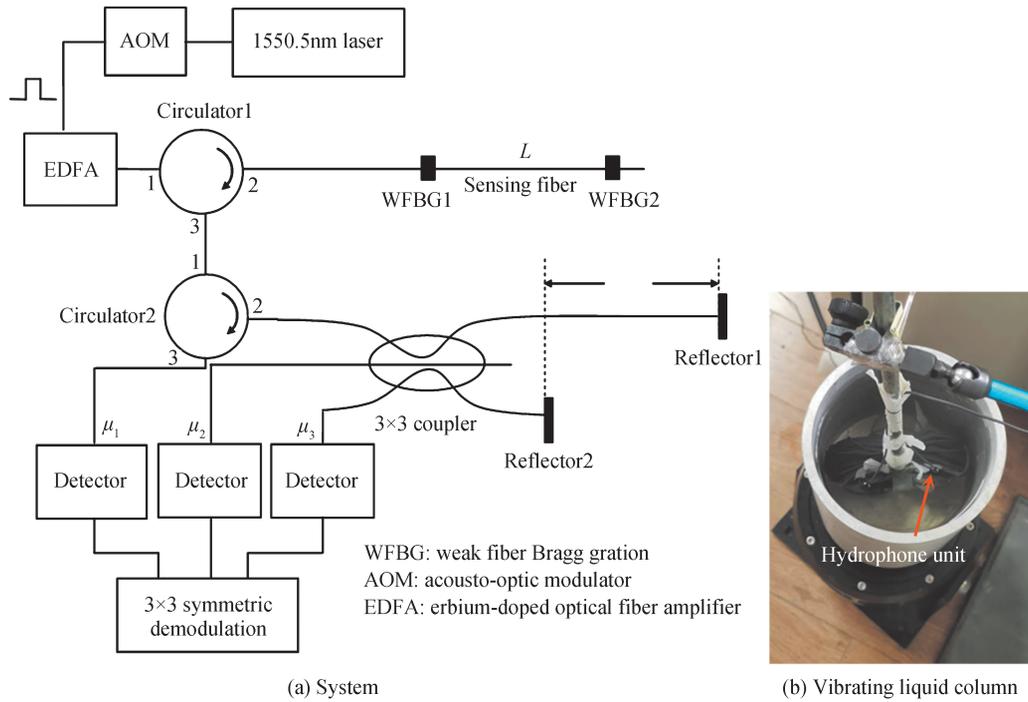


图 12 拖曳线阵列水听器单元声压-相位灵敏度测试系统

Fig.12 Phase-sound pressure sensitivity of hydrophone unit of towed line array testing system

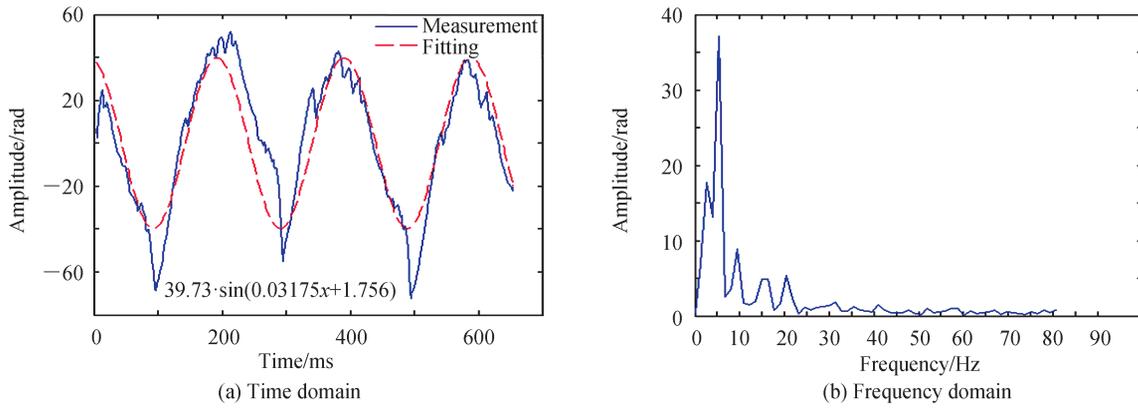


图 13 拖曳线阵列水听器单元 5 Hz 信号

Fig.13 5 Hz signal detected by hydrophone unit of towed line array

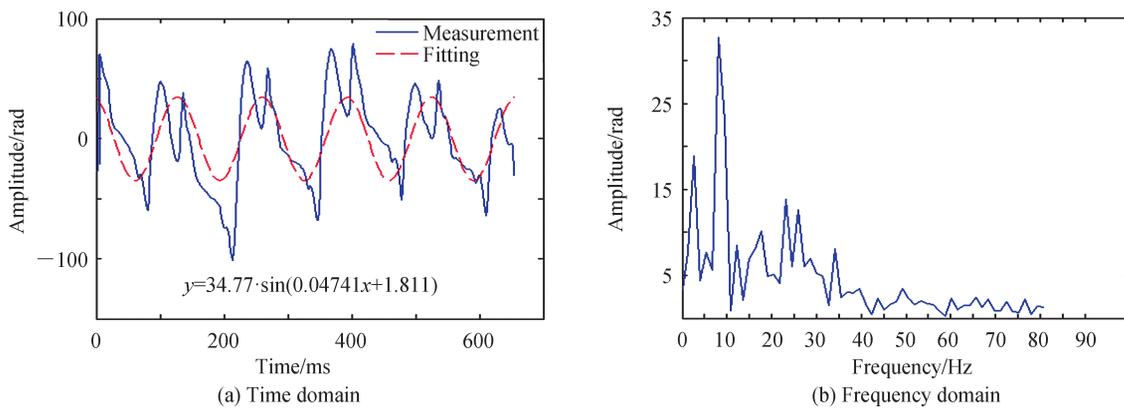


图 14 拖曳线阵列水听器单元 7.5 Hz 信号

Fig.14 7.5 Hz signal detected by hydrophone unit of towed line array

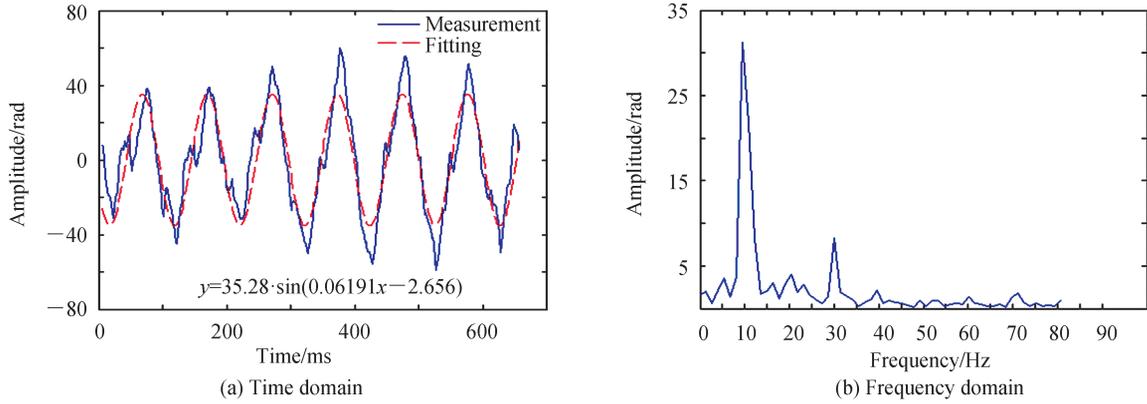


图15 拖曳线列阵水听器单元10 Hz信号

Fig.15 10 Hz signal detected by hydrophone unit of towed line array

灵敏度分别为 $-176.26 \text{ dB @ } 5 \text{ Hz}$ 、 $-170.53 \text{ dB @ } 7.5 \text{ Hz}$ 、 $-160.96 \text{ dB @ } 10 \text{ Hz}$ <sup>[18]</sup>,由此制备的拖曳线列阵水听器单元灵敏度平均增大了30.6 dB。

### 2.3 WFBG水听器拖曳线列阵流噪声分析

拖曳线列阵工作时受到流噪声的影响,主要由阵外表面的湍流边界层(Turbulent Boundary Layer, TBL)压力起伏激励产生。把WFBG水听器拖曳线列阵看作细长圆柱体,采用Carpenter模型<sup>[21]</sup>描述TBL压力起伏波数-频率谱 $\Phi_s(k_z, \omega)$ ,即

$$\Phi_s(k_z, \omega) = \frac{c_*^2 \rho_*^2 v_*^2 R^2 \left[ (k_z R)^2 + 1/12 \right]}{\left[ (\omega R - U_c k_z R)^2 / (h_* v_*)^2 + (k_z R)^2 + 1/b_*^2 \right]^{2.5}} \quad (11)$$

式中, $k_z$ 、 $\omega$ 分别为波数、角频率; $R$ 为拖曳线列阵的半径,为0.85 mm; $\rho_*$ 为拖曳线列阵外部水的密度,为1 000 kg/m<sup>3</sup>; $U$ 为拖曳速度; $U_c$ 为迁移波数, $U_c = 0.75U$ ; $v_*$ 为TBL剪切速度, $v_* = 0.04U$ ; $h_*$ 、 $c_*$ 、 $b_*$ 为常数参量,分别等于3.7、10、0.2。

Carpenter模型的波数-频率谱仿真如图16所示。由图16(a)可知,针对10 Hz噪声,当拖速从2 m/s增大到8 m/s时,谱值增大了约30 dB,迁移峰的位置基本不变。由图16(b)可知,针对8 m/s拖速,当频率从10 Hz增大到100 Hz,谱值稍有增大约2 dB,迁移峰的位置基本不变。

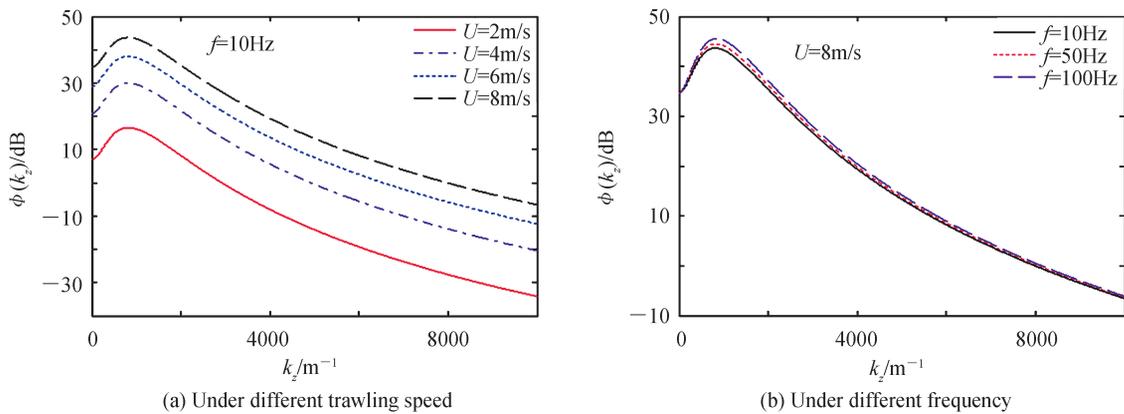


图16 Carpenter模型的波数-频率谱

Fig.16 Wavenumber-frequency spectrum of Carpenter model

流噪声经拖线阵护套影响水听器的工作,采用Lindemann护套传递函数<sup>[22]</sup>,即

$$\left| T(k_z, \omega) \right|^2 = \left| \frac{k_b^2}{k_b^2 - k_z^2} \right| \quad (12)$$

式中,

$$k_b^2 = \frac{2\rho_1\omega^2 R}{E_c t_1} \quad (13)$$

式中, $R$ 取 0.85 mm; $\rho_1$ 为管内流体的密度,忽略 WFBG 水听器拖曳线列阵内的凯夫拉纤维,则流体为空气,取  $1.293 \text{ kg/m}^3$ ; $E_c$ 为护套的复杨氏模量, $E_c = E_0(1 + i \tan\delta)$ ; $E_0$ 为聚氨酯护套的杨氏模量,取  $6.2 \times 10^7$ ;  $i$ 为虚数; $\tan\delta$ 为材料的损耗因子,取 0.3; $t_1$ 为护套的厚度,取 0.55 mm。Lindemann 模型要求“ $t_1/R \ll 1$ ”,此要求对高频噪声计算影响较大,对低频噪声计算影响较小,因此可以用来预测低频噪声情况。图 17 为护套声压传递函数曲线。由图可知,频率从 10 Hz 增大到 100 Hz,传递函数的峰值向高波数方向移动,峰值增加了约 10 dB,由此提出的松套管中心束管式 WFBG 水听器拖曳线列阵的护套无法抑制高频噪声,后期需要解决高频噪声的问题。

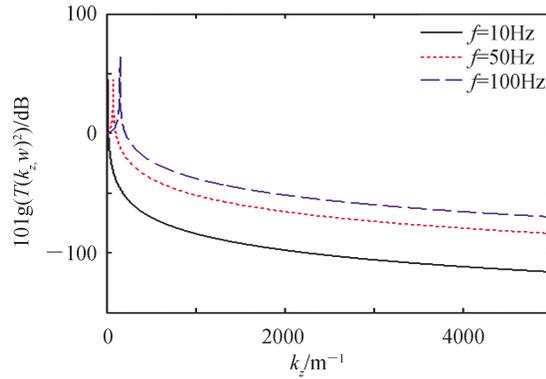


图 17 Lindemann 模型护套声压传递函数曲线

Fig.17 Sound pressure transfer function curve of the sheath based on Lindemann model

流噪声引起的拖曳线列阵水听器的自噪声功率谱为<sup>[29]</sup>

$$\Phi(r, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_s(k_z, \omega) |h(k_z, r, \omega)|^2 dk_z \quad (14)$$

式中,

$$h(k_z, r, \omega) = T(k_z, \omega) \cdot \frac{J_0(k_1 r)}{J_0(k_1 b)} \quad (15)$$

式中, $J_0(*)$ 为零阶贝塞尔函数; $k_1$ 为护套内流体的流噪声径向空间波数,满足  $k_1^2 + k_z^2 = \omega^2/c_0^2$ ; $c_0$ 为流噪声在管内流体中的传播速度,取 340 m/s; $r$ 为水听器的半径,取 0.2 mm; $b$ 为护套内半径,取 0.3 mm。

联合式(11)、(12)和(15),分析水听器的自噪声功率谱如图 18 所示。由图可知拖速 2 m/s 时,1~100 Hz 的谱值在 20~70 dB( $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$  条件下)范围。当拖速逐渐增大到 8 m/s,谱值上升到了 40~95 dB 范围。每种拖速下,谱值随频率的升高而升高,原因是所构建的拖曳线列阵护套无法降低高频噪声,但在 1~100 Hz

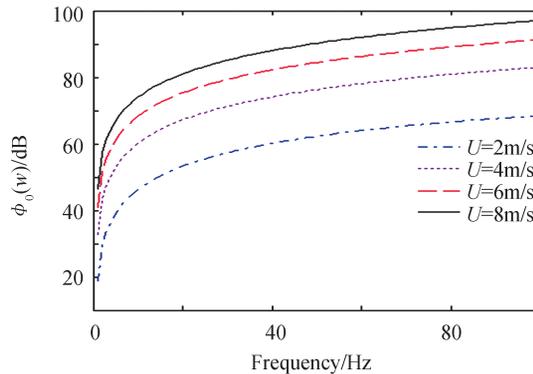


图 18 拖曳线列阵水听器自噪声功率谱

Fig.18 Self noise power spectrum with the hydrophone of towed line array

之间的谱值总体较低。

### 3 结论

提出了一种细尺寸、大孔径、高增益的弱反射光纤光栅水听器拖曳线列阵。依据匹配干涉方法和水声传感原理,针对 WFBG 水听器拖曳线列阵 5~10 Hz 工作频段,选用反射率为 0.01%、中心波长为 1 550.5 nm、3 dB 带宽为 2 nm、栅距为 50 m 的 WFBG 阵列。经光纤涂覆机液晶树脂二次涂覆后的 309-WFBG 阵列中心波长 1 550.5 nm 整体一致漂移到 1 552.5 nm,栅距 5 m 变化不大,仍满足匹配干涉方法和水声传感原理。受限于 WFBG 阵列短缺,经扎纱机和护套机制备松套管中心束管式高密度聚乙烯二次涂覆光缆,在 50 m 光缆两端熔接 WFBG,模拟拖曳线列阵水听器单元,测得声压-相位灵敏度分别为  $-136.97 \text{ dB} @ 5 \text{ Hz}$ 、 $-139.64 \text{ dB} @ 7.5 \text{ Hz}$ 、 $-139.36 \text{ dB} @ 10 \text{ Hz}$ 。采用 Carpenter 流噪声波数-频率模型和 Lindemann 护套传递函数分析拖曳线列阵自噪声功率谱值,8 m/s 拖速、1~100 Hz 频段内的谱值范围为 40~95 dB。下一步将在栅距 50 m、大规模复用的 WFBG 阵列基础上实际制备水听器拖曳线列阵,并在湖上实验中验证拖曳线列阵探测 5~10 Hz 水声信号的可行性。

#### 参考文献

- [1] ROTHHARDT M, BECHKER M, CHOETZKI C, et al. Strain sensor chains beyond 1000 individual fiber Bragg gratings [C]. OSA, 2010:JTHA53.
- [2] YANG M H, BAI W, GUO H Y, et al. Huge capacity fiber-optic sensing network based on ultra-weak draw tower gratings[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(1):26-41.
- [3] CHEN Wei, MENG Zhou, ZHOU Huijuan, et al. Nonlinear phase noise analysis of long-haul interferometric fiber sensing system[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(18):197-203.  
陈伟, 孟洲, 周会娟, 等. 远程干涉型光纤传感系统的非线性相位噪声分析[J]. 物理学报, 2012, 61(18):197-203.
- [4] PLOTNIKOV M Y, LAVROV V S, DMITRASHENKO P Y, et al. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(9):3376-3382.
- [5] TAN Bo, HUANG Junbin, WANG Jianhua, et al. A study on a sensitization configuration of FBG hydrophone unit[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(11):2417-2420.  
谭波, 黄俊斌, 王建华, 等. 一种 FBG 水听器探头增敏结构的研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(11):2417-2420.
- [6] LI Xuebin, ZHANG Xin, JIAN Jiawen. High sensitivity fiber Bragg grating hydrophone with temperature compensation[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(4):26-29.  
李雪宾, 张鑫, 简家文. 带有温度补偿的高灵敏度光纤布喇格光栅水听器[J]. 光通信技术, 2020, 44(4):26-29.
- [7] MAO Xin, HUANG Junbin, GU Hongcan, et al. Overview of distributed feedback fiber laser hydrophone array[J]. Optical Communication Technology, 2017, (8):21-24.  
毛欣, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水听器阵列研究进展[J]. 光通信技术, 2017, (8):21-24.
- [8] ZHANG Haiyan, LI Zhen, ZHAO Chen, et al. Effect of encapsulation on the performance of ultrafine DFB fiber laser hydrophone[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9):20-26.  
张海岩, 李振, 赵晨, 等. 封装对超细型 DFB 光纤激光水听器性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9):20-26.
- [9] KIRKENDALL C, BAROCK T, TVETEN A, et al. Fiber optic towed arrays[J]. NRL Review, 2007: 121-123.
- [10] GUO Zhen, GAO Kan, YANG Hui, et al. A 20mm-diameter optical fiber hydrophone towed array based on fiber Bragg gratings[J], Acta Optica Sinica, 2019, 39(11):1106003.  
郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. 光学学报, 2019, 39(11):1106003.
- [11] LI Hao, SU Qizhen, LIU Tao. Ultra-high sensitive quasi-distributed acoustic sensor based on coherent OTDR and cylindrical transducer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4):929-938.
- [12] BUCARO J A, HICKMAN T R. Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection[J]. Applied Optics, 1979, 18(6):938-940.
- [13] BUDIANSKY B, DRUCKER D C, KINO G S, et al. Pressure sensitivity of a clad optical fiber[J]. Applied Optics, 1979, 18(24):4085-4088.
- [14] ARTEEV V A, KULIKOV A V, MESHKOVSKII I K, et al. Method of increasing the sensitivity of a fiber-optic hydrophone[J]. Journal of Optical Technology, 2011, 78(3):218-220.
- [15] LAVROV V S, PLOTNIKOV M Y, AKSARIN S M, et al. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings[J]. Optical Fiber Technology, 2017, (34):47-51.
- [16] ZHANG Yingdong, HUANG Junbin, GU Hongcan, et al. Research on underwater acoustic detection mechanism of weak reflective fiber Bragg grating hydrophone[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, (12):180-184.  
张英东, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 弱反射光纤光栅水听器水声探测机理研究[J]. 舰船电子工程, 2018, (12):180-184.

- [17] PANG Yandong. Research on key technology for ultrathin fiber-optic hydrophone based on draw tower fiber Bragg grating array[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.  
庞彦东. 基于拉丝塔光栅阵列的超细线光纤水听器关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [18] DING Peng, HUANG Junbin, YAO Gaofei, et al. Weak fiber Bragg grating hydrophone with secondary coating sensitization [J/OL]. Chinese Journal of Lasers; 1-17 [2021-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20210310.1021.002.html>.  
丁朋, 黄俊斌, 姚高飞, 等. 二次涂覆增敏型弱反射光纤光栅水听器[J/OL]. 中国激光; 1-17[2021-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20210310.1021.002.html>.
- [19] WANG Chen, SHANG Ying, LIU Xiaohui, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2015, 23(22):246246.
- [20] DING Peng, WU Jin, KANG De, et al. Detection of acoustic wave direction using weak-reflection fiber Bragg gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5):0506002.  
丁朋, 吴晶, 康德, 等. 采用弱反射光纤布拉格光栅的声波方向检测[J]. 中国激光, 2020, 47(5):0506002.
- [21] CARPENTER A L, KEWLEY D J. Investigation of low wavenumber turbulent boundary layer pressure fluctuations on long flexible cylinders[C]. In eighth Australasian fluid mechanics Conference, 1983: 9A.1-9A.4.
- [22] LINDEMANN O A. Influence of material properties on low wavenumber turbulent boundary layer noise in towed arrays [J]. US Navy Journal of Underwater Acoustic, 1981, 31(2):265-271.
- [23] LIN Huizu. Study on key technologies of the fiber Bragg gating hydrophone array based on path-match interferometry[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.  
林惠祖. 基于匹配干涉的光纤光栅水听器阵列关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- [24] YU Liang, GUO Haolin, LU Guoqing, et al. Production and performance of heat resistant optical fiber[J]. Optical Communication Technology, 2014, 38(6):8-11.  
俞亮, 郭浩林, 陆国庆, 等. 耐高温光纤的性能与生产工艺[J]. 光通信技术, 2014, 38(6):8-11.
- [25] SUN Yixing, WANG Yaoming, XU Jianguo, et al. An optical fiber secondary coating equipment: CN204661554U[P]. 2015-09-23.  
孙义兴, 王耀明, 许建国, 等. 一种光纤二次涂覆设备: CN204661554U[P]. 2015-09-23.
- [26] XIAO Ping, SHU Fusheng. Design and calculation of yarn binding device for cabling[J]. Optical Fiber and Electric Cable, 1997, (3): 43-46.  
肖平, 舒福胜. 光缆成缆扎纱装置的设计与计算[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1997, (3):43-46.
- [27] SHEN Jiaming, YAN Maolin, CHEN Hao, et al. A yarn binding device and method for producing dry structure optical cable: CN 201310528406.2[P]. 2014-01-29.  
沈家明, 阎茂林, 陈浩, 等. 一种用于生产干式结构光缆的扎纱装置及方法: CN 201310528406.2[P]. 2014-01-29.
- [28] ZHOU Ciming, PANG Yandong, LI Qian. Demodulation of a hydroacoustic sensor array of fiber interferometers based on ultra-weak fiber Bragg grating reflectors using a self-referencing signal[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11):2568-2576.
- [29] TANG Weilin, WU Yi. Interior noise field of a viscoelastic cylindrical shell excited by the TBL pressure fluctuations: I. production mechanism of the noise[J]. Acta Acoustica, 1997, 22(1):60-69.  
汤渭霖, 吴一. TBL压力起伏激励下粘弹性圆柱壳内的噪声场:I. 噪声产生机理[J]. 声学学报, 1997, 22(1):60-69.