

采用弱反射光纤布拉格光栅的声波方向检测

丁朋^{1,2}, 吴晶³, 康德⁴, 黄俊斌^{2*}, 刘文², 顾宏灿², 汪云云², 唐劲松¹

¹海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033;

²海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;

³海军工程大学作战运筹与规划系, 湖北 武汉 430033;

⁴海军装备部装备保障大队, 北京 100036

摘要 提出一种用于声波方向检测的弱反射光纤布拉格光栅(WFBG)分布式传感器,并进行了实验验证。将两个相邻 WFBG 间的分布式传感光纤用于检测声波振动信号。两段传感光纤解调的信号相位差对应于声波到达的时间差,再由时间差计算得到声波方向。一段长 50 m 的传感光纤环放置于振动液柱内,测得其平均声压灵敏度为 -155.10 dB(re rad/ μ Pa);两段 50 m 的传感光纤分布放置在木地板上用于接收正弦声波,探测方向的均方根误差为 1.35° 。理论推导和实验结果表明,这种分布式传感器能够实现对声波方向的检测,与传统基底缠绕光纤结构相比尺寸超细,有望搭载在水下无人航行器上,实现对水下发声目标的探测。

关键词 光通信; 光纤; 光纤布拉格光栅; 分布式传感器; 弱反射; 方向检测

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0506002

Detection of Acoustic Wave Direction Using Weak-Reflection Fiber Bragg Gratings

Ding Peng^{1,2}, Wu Jing³, Kang De⁴, Huang Junbin^{2*}, Liu Wen²,
Gu Hongcan², Wang Yunyun², Tang Jinsong¹

¹College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

²Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

³Department of Operational Research and Programming, Naval University of Engineering,
Wuhan, Hubei 430033, China;

⁴Equipment Support Branch of Naval Equipment Department, Beijing 100036, China

Abstract In this study, we propose and demonstrate a distributed sensor based on weak-reflection fiber Bragg grating (WFBG) to detect the acoustic wave direction. Further, we utilize a distributed sensing fiber between two adjacent WFBGs to detect the sound vibration signals. The phase difference of the demodulation signals of two sensing fibers corresponds to the difference between the reaching times of the acoustic wave, and the sound direction can be calculated based on the time difference. A 50-m sensing fiber coil is placed in vibration liquid column, and the average sound pressure sensitivity is estimated to be -155.10 dB (re rad/ μ Pa). Two 50-m sensing fibers are distributed on the wooden floor. Sinusoidal sound signals are received, and the root mean square error of the detection direction is 1.35° . The principle deduction and experimental results prove that the acoustic wave direction can be detected using the proposed sensor. It is expected to be carried on an unmanned underwater vehicle to detect the underwater vocal target because of the smaller size of the proposed structure when compared with that of the traditional structure of the fiber twined on substrate.

Key words optical communications; optical fiber; fiber Bragg grating; distributed sensor; weak reflection; direction detection

OCIS codes 060.3735; 280.4788; 060.4230; 120.1880

收稿日期: 2019-11-09; 修回日期: 2019-12-16; 录用日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(11774432)、湖北省自然科学基金(2018CFB788)

* E-mail: tsyj98@163.com

1 引 言

弱反射光纤布拉格光栅(WFBG)由拉丝塔在线制备而成^[1-4],反射率通常低于0.1%。由于WFBG反射率低,且其与光纤之间没有熔接点,与普通光纤布拉格光栅(FBG)比较,其复用能力得到极大增强;由于其反射光强大于瑞利散射光强,与分布式光纤传感比较,其在信号解调速度方面也有较大优势。WFBG传感研究越来越热门,比如传感系统中激光器的使用^[5]、光纤涂覆增敏^[6]、信号串音干扰^[7]、阵列的制备^[8]、信号解调^[9-10],使用WFBG的目的在于探测更为微弱的振动信号,增强传感器复用能力。

在声波方向检测应用中,WFBG之间的传感光纤通常有两种设置方式:一种是将光纤缠绕在基底上,比如美国的“TB-33”^[11]、挪威的“Optoplan”^[12]、国内的“4基元水听器”^[13]。这种缠绕结构较复杂,尺寸较大。第二种方式则是将光纤直接分布放置,例如:俄罗斯的“6基元水听器”^[14],其中着重探讨了“RTV66”材料涂覆的增敏效果,未涉及声波方向探测的探讨;国内“栅距5 m大规模WFBG阵列”,直接将光纤粘贴在地铁隧道和轨道表面,用以探测非法开挖位置^[15],这种WFBG阵列基于接收信号的方均根值的变化来判断声场的远近,其定位灵敏度依赖于高度密集的WFBG。

根据波束形成理论^[16],本文提出采用基于

WFBG的分布式传感器检测声波方向,其中分布式传感光纤长度设计为声波波长的一半。理论计算中,将一段传感光纤分为若干细小等份,每个等份视为均匀地接收声波振动,光经过每个等份时相位发生变化。将所有等份相位变化的和作为这段光纤产生的相位变化。相邻两段光纤的相位变化差值则反映了声波的时间差,通过时间差推算出声波的方向。实验中,将一段50 m的光纤环放置于振动液柱内测试传感灵敏度,测得平均声压灵敏度为-155.10 dB(re rad/ μ Pa)。两段50 m的传感光纤被分别折叠成25等份放置在木地板上,声源从5个方向分别发出325 Hz的正弦波声音,对比5个声源的理论计算方向,传感器探测到的方向均方根误差为1.35°。

2 传感机理

远场条件下,将正弦波声源发出的声波视为平面波,传输到分布式传感光纤上时,其作用在光纤上的压力可表示为

$$P = P_0 \cos(\omega_0 t - kz + \varphi_0), \quad (1)$$

式中: t 和 z 分别为声波传输时间和传输距离; P_0 为声波初始振幅; ω_0 为角频率; k 为波数; φ_0 为声波初始相位。采用WFBG的分布式传感器的系统光路如图1所示,图中 θ_0 为平面波与传感器法线的夹角。系统的光路原理和解调方法参考文献[9]。

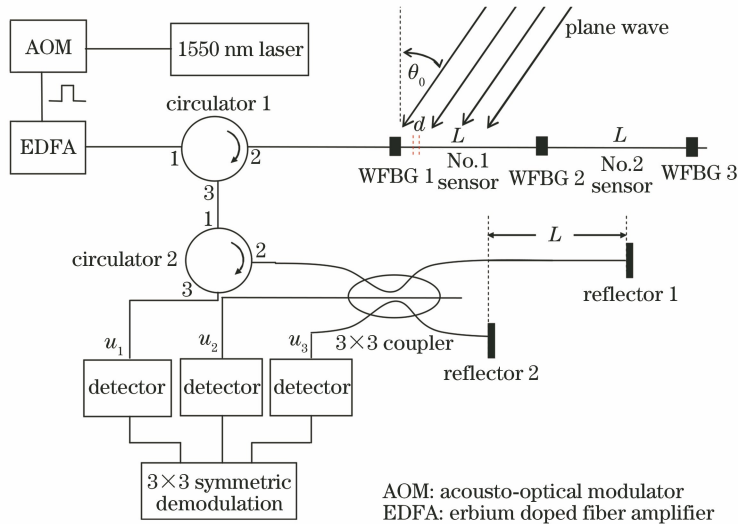


图1 基于WFBG的分布式传感器的系统原理图

Fig. 1 Schematic of distributed sensor system based on WFBG

$\theta_0 = 0$ 时,两段传感光纤均匀地接收平面波。激光往返经过长为 L 的传感光纤后,其相位为

$$\varphi = \frac{4\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda_{\text{Light}}}, \quad (2)$$

式中: n_{eff} 为光纤的有效折射率; λ_{Light} 为激光波长。对(2)式进行微分操作,可得相位变化量为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda_{\text{Light}}} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} \right). \quad (3)$$

其中光纤有效折射率变化量 Δn_{eff} 与应变之间的关系可表示为

$$\Delta n_{\text{eff}} = -\frac{1}{2}n_{\text{eff}}^3(p_{11}\epsilon_r + p_{12}\epsilon_\theta + p_{12}\epsilon_z), \quad (4)$$

式中: p_{11} 和 p_{12} 分别为光纤的光弹系数; ϵ_r 、 ϵ_θ 、 ϵ_z 分别为径向、周向和轴向应变。传感光纤可视为均匀的圆柱体, 根据广义胡克定律, 应变 ϵ 和应力 δ 的关系为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_\theta \\ \delta_z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: E 为光纤的杨氏模量; ν 为光纤的泊松比; δ_r 、 δ_θ 、 δ_z 分别为径向、周向和轴向应力。光纤均匀地受声波振动影响, 即三种应力相等, 设它们均等于 $-P$, 则有

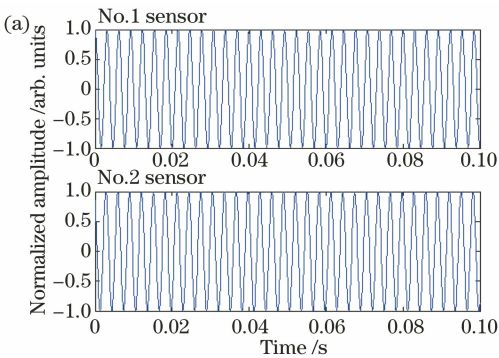
$$\begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_\theta \\ \delta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P \\ -P \\ -P \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(1)式、(3)~(6)式可得

$$\Delta\varphi = LP \times$$

$$\left[-\frac{4\pi n_{\text{eff}}(1-2\nu)}{\lambda_{\text{Light}}} + \frac{2\pi n_{\text{eff}}^3(1-2\nu)(p_{11}+2p_{12})}{\lambda_{\text{Light}}E} \right]. \quad (7)$$

$\theta_0 \neq 0$ 时, 传感光纤各个部分接收到的声压是非均匀的。借鉴 FBG 传输矩阵分段的思想, 将 L 长的传感光纤平均分割为 M 段, 每段长度为 d 。每段光纤视为均匀地接收声波, 使光的相位发生变化。将所有光纤分段产生的相位变化量叠加作为整段光纤产生的相位变化。以第一段光纤的第一分段作为



基准点, 则由(1)至(7)式可得到第 n 段光纤的第 i 分段产生的相位变化为

$$\Delta\varphi_{ni} = \left[-\frac{4\pi n_{\text{eff}}(1-2\nu)}{\lambda_{\text{Light}}} + \frac{2\pi n_{\text{eff}}^3(1-2\nu)(p_{11}+2p_{12})}{\lambda_{\text{Light}}E} \right] \times dP_0 \cos\left\{ \omega t - kz + \varphi_0 + \frac{2\pi \sin \theta_0 [(i-1)d + (n-1)L]}{\lambda_{\text{sound}}} \right\}, \quad (8)$$

式中: λ_{sound} 为声波波长。则第 n 段光纤产生的激光总相位变化为

$$\Delta\varphi_n = \sum_{i=1}^M \Delta\varphi_{ni}. \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可知, 第 n 段和第 $n+1$ 段光纤产生的相位变化为正弦波信号。两个正弦波的频率即为声波的频率, 并且两个正弦波的相位差恒定为

$$\Delta\varphi_{\text{signal}} = \frac{2\pi L \sin \theta_0}{\lambda_{\text{sound}}}. \quad (10)$$

由图 1 中的光纤传感系统解调出正弦波信号, 并得到 $\Delta\varphi_{\text{signal}}$, 通过(10)式即可计算出 θ_0 。对(8)~(10)式进行仿真, 取 $\theta_0 = 10^\circ$, 声波传播距离 z 和初始相位 φ_0 设置为 0, 频率 f 和速度 c 分别设置为 325 Hz、1500 m/s, L 设置为声波波长的一半, $M=100$ 。光纤相关参数会影响正弦波信号的幅度, 此处将其幅度设置为 1(只需探讨其频率和相位信息)。图 2 所示为两段传感光纤的仿真信号。从频域上看, 信号的频率与声波的频率一致, 即 325 Hz; 从时域上看, 两个信号相位相差 $\pi \sin(\pi/18)$, 由(10)式即可求得 θ_0 为 $\pi/18$, 与 θ_0 的初始设置值一致。

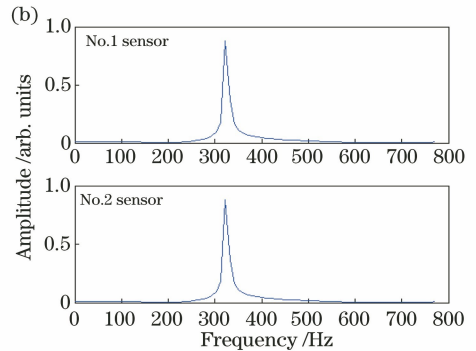


图 2 两段传感光纤仿真信号。(a)时域信号;(b)幅频曲线

Fig. 2 Simulation signals of two sensing fibers. (a) Time domain signals; (b) amplitude-frequency curves

3 实验与分析

3.1 传感光纤灵敏度测试

在一段长 50 m、直径 6 cm 的光纤环两端熔接 2

根 WFBG, 并将其作为传感阵元放入振动液柱内(图 3)测试传感光纤的灵敏度。光纤环均匀地感知罐体内水的振动。罐体内水深 l 为 10 cm; 水面到光纤环中心的距离 h 为 5 cm。实验设备包含:

1550 nm的半导体激光器,其线宽为 10 kHz;声光调制器(AOM),调制脉宽设置为 300 ns;光电探测器,其 1550 nm 波长的响应度为 0.85 A/W,带宽为 200 MHz;参考加速度计,粘贴在振动缸体的底部,灵敏度 M_a 为 5.71 pc/ms^{-2} ,通过电荷放大器(放大倍数 M_{ak} 为 100)连接在示波器上(振幅 U_a 为 55 mV)。对振动液柱施加 325 Hz 的正弦信号激励,保持激励信号的幅度不变,多次测量,解调光纤环的相位信号,以获得传感光纤的灵敏度。

图 4 所示为光纤传感系统解调出的信号。在图 4(a)中,对于一个周期的声光调制器驱动信号,第 1

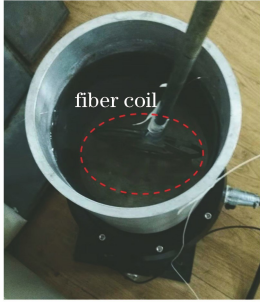


图 3 传感光纤灵敏度测试

Fig. 3 Sensitivity test of sensing optical fiber

个峰和第 3 个峰均为 WFBG 反射峰,为无用信号,第 2 个峰为有用干涉峰。图 4(b)所示为连续多个声光调制器周期下提取得到的干涉信号,使用对称解调零差算法即可求解出传感光纤的正弦波信号 $\Delta\varphi_{\text{signal}}$ 。图 4(c)所示为在同一激励声源下,7 次测量的 $\Delta\varphi_{\text{signal}}$ 信号,对解调信号进行正弦波拟合,拟合结果如表 1 所示。从表 1 中可得出,解调信号的频率在 294.18~331.97 Hz 之间波动,均方根误差为 11.37 Hz;解调信号的幅度在 0.36~1.36 rad 之间波动,平均幅度为 0.84 rad。由(11)式声压灵敏度换算公式^[17],可得到传感光纤的灵敏度为 $-155.10 \text{ dB(re rad}/\mu\text{Pa)}$ 。拟合的正弦波频率和幅度存在波动的原因可能是传感光纤环没有固定的结构(传统方法中光纤环有结构,如文献[13]光纤缠绕在基底上)。传感光纤的灵敏度较低,可以通过对光纤进行二次涂覆来提高灵敏度。声压灵敏度的表达式为

$$M_{\text{signal}} = 20 \lg \frac{\Delta\varphi_{\text{signal}} M_a M_{ak}}{U_a h \rho K} - 120, \quad (11)$$

式中: ρ 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 $k = 2\pi f / c$ 。

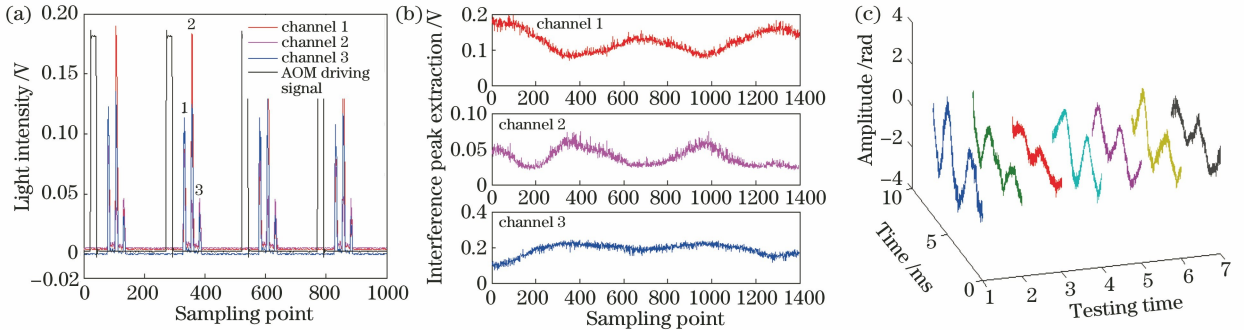


图 4 传感光纤灵敏度测试结果。(a)采集卡采集的数据;(b)提取的干涉峰值信号;(c)多次测量解调的相位信号

Fig. 4 Sensitivity test results of the sensing optical fiber. (a) Data collected by acquisition card;

(b) extracted interference peak signals; (c) demodulated phase signals under multiple measurements

表 1 解调信号的正弦波拟合结果

Table 1 Sine wave fitting results of the demodulated signals

Testing time	Fitting function	R-square	Frequency /Hz	Amplitude /rad
1	$1.36\sin(2.01x + 1.3040)$	0.75512	320	1.36
2	$0.72\sin(2.03x + 2.5830)$	0.72716	323	0.72
3	$0.36\sin(2.08x + 0.8935)$	0.70194	331	0.36
4	$1.06\sin(1.85x + 1.4890)$	0.84306	294	1.06
5	$0.84\sin(2.03x + 2.8740)$	0.85573	323	0.84
6	$0.92\sin(1.93x + 2.8485)$	0.74807	307	0.92
7	$0.61\sin(1.98x + 0.79)$	0.77599	315	0.61

3.2 声源方向的理论计算

图 5 所示为分布式传感光纤和声源的布置方

式示意图,以地板振动模拟水声振动来测试分布式 WFBG 线阵的方向指向性。两段 50 m 长的传

感光纤由 3 个 WFBG 串联构成传感阵列,将每段光纤分别折叠成 25 等份放置在木地板上,即传感器的分布长度为 2 m。声波速度由两个标准压电

加速度计测得,为 1333 m/s。将声波的频率设置为 325 Hz,则声波波长为 4.1 m,约为传感器分布长度的 2 倍。

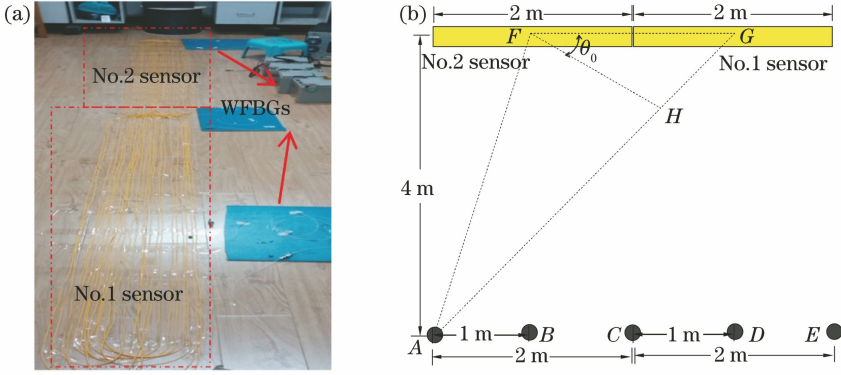


图 5 分布式传感光纤和声源布置方式。(a)传感器;(b)声源

Fig. 5 Setting of distributed sensing fibers and acoustic source. (a) Sensors; (b) acoustic sources

图 5(b)中,扬声器依次放置在 A 至 E 点上。这 5 个点在同一直线上,平均间隔 1 m,与传感器的距离为 4 m。点 F、G 为两段分布式传感光纤的几何中心,根据声学原理,它们可分别视为分布式传感器的等效声中心。AF 和 AG 为 A 点声源到达两段光纤的声程, HG 为它们的声程差。FH 和 FG 的夹角 θ_0 即为图 1 中的 θ_0 。当扬声器在 A 点时,根据几何关系,可计算得 $\theta_0 = 25.453^\circ$ 。同样地,扬声器在 B 至 E 点时, θ_0 的计算值如表 2 所示。

6(a)中,对于一个周期的声光调制器驱动信号,第 2 和第 3 个峰为有用干涉峰,分别对应两个传感器。图 6(b)所示为第 1 个传感器的 3 路峰值提取信号,它们振幅基本一致,相位差为 120° ,使用对称解调零差算法即可求解出第 1 个传感器的正弦波信号 $\Delta\varphi_1$ 。

表 2 扬声器在不同位置时, θ_0 的计算值

Table 2 Calculation values of θ_0 for loudspeakers at different locations

Position	A	B	C	D	E
$\theta_0 / (^\circ)$	25.453	13.282	0	-13.282	-25.453

3.3 声源探测实验

图 6 所示为光纤传感系统解调出的信号。在图

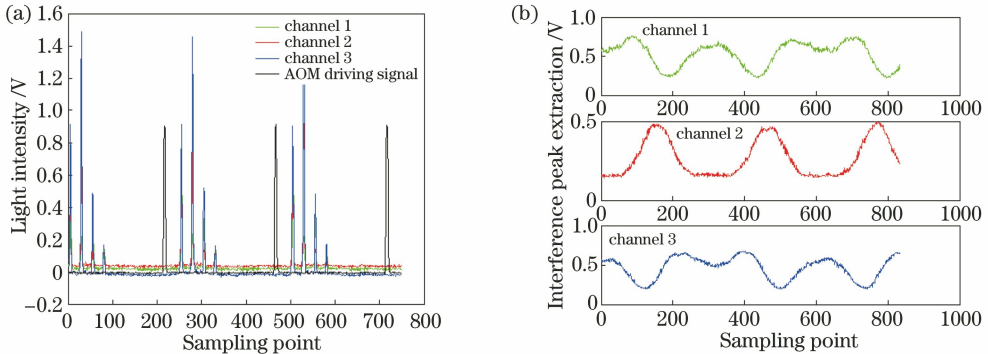


图 6 光纤传感系统解调出的信号。(a)采集卡输出信号;(b)从第 1 个传感器提取的信号峰值

Fig. 6 Signals demodulated by optical fiber sensing system. (a) Output signals of acquisition card; (b) signal peaks extracted from No.1 sensor

图 7 所示为扬声器分别在 5 个位置时,两个传感器解调出的信号 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 。由图 7 可知,当扬声器在 A、B 点(D、E 点)时,传感器 2 早于(晚于)传感器 1 接收到声波信号,因此 $\Delta\varphi_1$ 也早于(晚于) $\Delta\varphi_2$ 。扬声器在 C 点时,刚好处于两个传感器中间,因此 $\Delta\varphi_1$ 与 $\Delta\varphi_2$ 基本一致。对信号进行正弦函数

拟合,得到信号的频率和相位如表 3 所示,10 条曲线的拟合度在 0.8172~0.9961 之间。与声波频率 325 Hz 相比,10 个信号的频率均方根误差为 18.05 Hz。对比同一声源下的两条正弦曲线可得到相位差 $\Delta\varphi_{\text{signal}}$,并由(10)式计算出每个声源的方向 θ_0 。与表 2 中理论计算的声波方向相比,探测得到

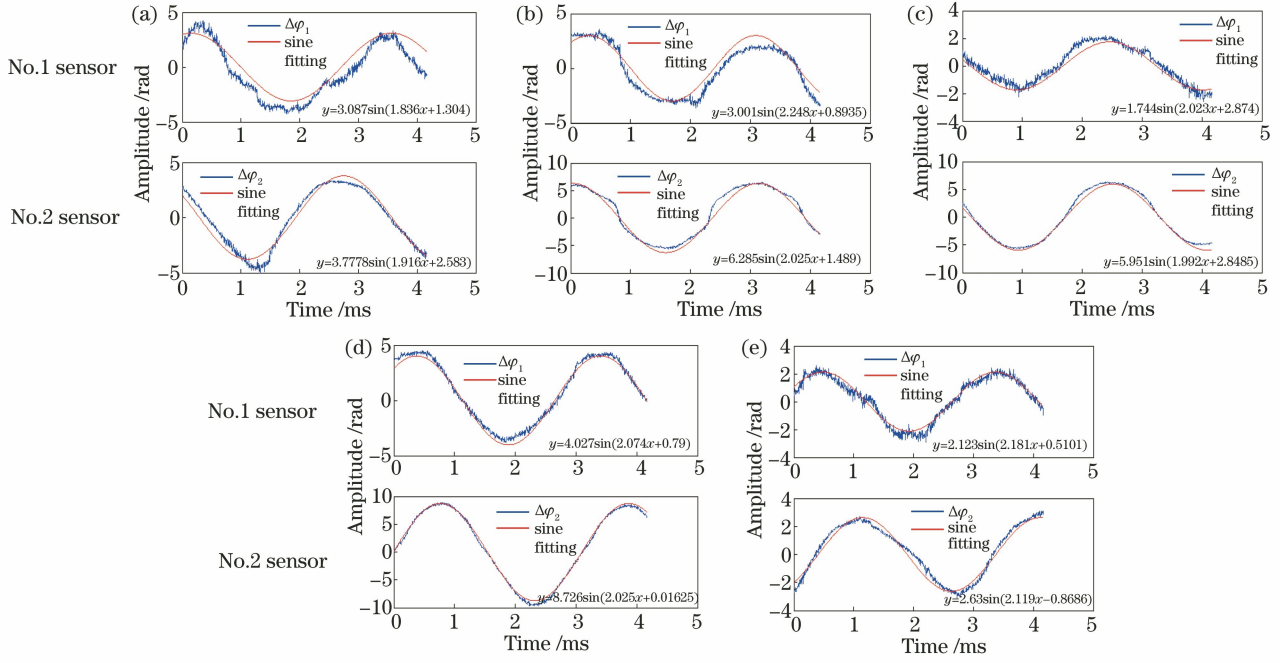


图 7 扬声器在不同位置时,两个传感器的解调信号。(a) A 点;(b) B 点;(c) C 点;(d) D 点;(e) E 点

Fig. 7 Signals demodulated by the two sensors with loudspeakers at different positions.

(a) Point A; (b) point B; (c) point C; (d) point D; (e) point E

表 3 解调信号的正弦函数拟合结果

Table 3 Sine wave fitting results of the demodulation signals

Point	Sensor	Fitting function	R-square	Frequency /Hz	$\Delta\varphi_{\text{signal}}/\text{rad}$	$\theta_0/(^{\circ})$
A	No.1	$3.087\sin(1.836x+1.3040)$	0.8172	292	1.2790	24.04
	No.2	$3.7778\sin(1.916x+2.5830)$	0.8943	305		
B	No.1	$3.001\sin(2.248x+0.8935)$	0.8919	357	0.5955	10.93
	No.2	$6.285\sin(2.025x+1.4890)$	0.9684	322		
C	No.1	$1.744\sin(2.023x+2.8740)$	0.9021	322	-0.0255	-0.47
	No.2	$5.951\sin(1.992x+2.8485)$	0.9837	317		
D	No.1	$4.027\sin(2.074x+0.79)$	0.9817	330	-0.7738	-14.27
	No.2	$8.726\sin(2.025x+0.01625)$	0.9961	322		
E	No.1	$2.123\sin(2.181x+0.5101)$	0.9540	347	-1.3787	-26.04
	No.2	$2.63\sin(2.119x-0.8686)$	0.9645	337		

的方向均方根误差为 1.35° 。由此可判断,通过该分布式传感器探测的声波方向基本与理论计算方向一致。

4 结 论

区别于以往 WFBG 之间的传感光纤缠绕在基底的点式传感器结构,本文提出直接将 WFBG 之间的传感光纤分布式放置用来探测声波。理论推导了分布式 WFBG 传感器的声波方向检测机理;通过振动液柱法,测试得一段 50 m 长的传感光纤的平均声压灵敏度为 $-155.10 \text{ dB}(\text{re rad}/\mu\text{Pa})$;两段 50 m

长的光纤串接 3 个 WFBG 成阵,分别测试 5 个位置的声源,测试得声波方向的均方根误差为 1.35° 。理论和实验结果均显示这种无基底缠绕结构的分布式传感器能够检测声波方向,其优势在于超细的尺寸,未来可搭载于水下小型机动平台,对水下发声目标进行探测。

此外,本文重点提出了分布式 WFBG 线阵应用于声波方向检测的原理和可行性实验分析。但目前实验中单段分布式传感光纤的声压灵敏度较低,下一步将要进行二次涂覆增敏;且声波方向检测仅在地板上进行了实验,后续需要使用高功率低频声源

发射装置在广阔的水域展开,以更为真实地验证该分布式 WFBG 传感器的方向检测性能。

参 考 文 献

- [1] Askins C G, Putnam M A, Williams G M, et al. Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(2): 147-149.
- [2] Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 82(1/2/3): 40-61.
- [3] Zhang M L, Sun Q Z, Wang Z, et al. Investigation on distributed optical fiber sensor based on identical-low-reflective fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 080604.
张满亮, 孙琪真, 王梓, 等. 基于全同弱反射光栅光纤的分布式传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 080604.
- [4] Rothhardt M W, Chojetzki C, Mueller H R. High mechanical strength single-pulse draw tower gratings [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5579: 127-135.
- [5] Liu Q, Wang Y M, Li Z Y, et al. High-speed interrogation system of multi-encoding weak FBGs based on FDML wavelength swept laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 107: 54-58.
- [6] Bai W, Yang M H, Hu C Y, et al. Ultra-weak fiber Bragg grating sensing network coated with sensitive material for multi-parameter measurements [J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1509.
- [7] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, et al. Reduction of crosstalk in inline sensor arrays using inverse scattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7004: 70044Z.
- [8] Yu H H, Zheng Y, Guo H Y, et al. Research progress in online preparation techniques of fiber Bragg gratings on optical fiber drawing tower [J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45 (12): 12001-12005.
余海湖, 郑羽, 郭会勇, 等. 光纤光栅在线制备技术研究进展[J]. *功能材料*, 2014, 45 (12): 12001-12005.
- [9] Li W, Zhang J. Distributed weak fiber Bragg grating vibration sensing system based on 3×3 fiber coupler [J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(2): 146-156.
- [10] Li W, Zhang Y J. Enhanced phase sensitive optical time-domain reflectometer vibration sensing system based on weak grating array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0810001.
黎威, 张永佳. 基于弱光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪振动传感系统[J]. *中国激光*, 2018, 45 (8): 0810001.
- [11] Kirkendall C, Barock T, Tveten A, et al. Fiber optic towed arrays[J]. *NRL review*, 2007: 121-123.
- [12] Nakstad H, Kringlebotn J T. Realisation of a full-scale fibre optic ocean bottom seismic system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7004: 700436.
- [13] Lin H Z. Study on key technologies of the fiber Bragg grating 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: 国防科学技术大学, 2013.
- [14] 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.
- [15] Gan W B, Li S, Li Z Y, et al. Identification of ground intrusion in underground structures based on distributed structural vibration detected by ultra-weak FBG sensing technology[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2160.
- [16] van Trees H L. Optimum array processing: part IV of detection, estimation, and modulation theory[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002: 12-28.
- [17] Zhou C M, Pang Y D, Qian L, et al. 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.