

·封面文章·

# 基于斐索干涉的超弱光纤光栅水听器阵列实验研究

徐倩楠<sup>1,2</sup>, 周次明<sup>1\*</sup>, 范典<sup>1</sup>, 庞彦东<sup>1,2</sup>, 赵晨光<sup>1,3</sup>, 陈希<sup>1,2</sup>, 黄俊斌<sup>4</sup>, 顾宏灿<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup> 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070;

<sup>3</sup> 武汉理工大学机电学院, 湖北 武汉 430070;

<sup>4</sup> 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033

**摘要** 研究了一种基于斐索干涉的超弱光纤光栅(uwFBG)水听器阵列系统。通过拉丝塔在线制备光纤光栅技术构建超弱光纤光栅水听器阵列,使用反正切算法解调信号,实现了 2~2000 Hz 宽频带内水声信号的振幅、频率和相位的同时测量。在频率为 2 Hz 时,系统水声信号的相位声压灵敏度可达 -135.81 dB(re rad/ $\mu$ Pa),灵敏度为 2755.49( $\mu$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ),信噪比为 43.785 dB。传感器复用实验结果证实该系统可以同时解调不同位置的水声信息,系统的相位声压灵敏度随着传感器腔长的增加而增加,且具有很好的稳定性,表明系统在高灵敏度水声传感、甚低频声学探测、深海监测等方面具有广阔的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤光栅; 相位声压灵敏度; 振动液柱法; 水听器; 甚低频

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.150602

## Experimental Study on Ultra-Weak Fiber Bragg Grating Hydrophone Arrays Based on Fizeau Interference

Xu Qiannan<sup>1,2</sup>, Zhou Ciming<sup>1\*</sup>, Fan Dian<sup>1</sup>, Pang Yandong<sup>1,2</sup>,  
Zhao Chenguang<sup>1,3</sup>, Chen Xi<sup>1,2</sup>, Huang Junbin<sup>4</sup>, Gu Hongcan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup> School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>3</sup> School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>4</sup> Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

**Abstract** Herein, an ultra-weak fiber Bragg grating hydrophone array system based on Fizeau interference is demonstrated. The ultra-weak fiber Bragg grating hydrophone array is constructed via on-line preparation of a fiber Bragg grating using a drawing tower. The amplitude, frequency, and phase of underwater acoustic signals in a wide frequency range of 2-2000 Hz are simultaneously measured using the signal demodulated by the arc-tangent algorithm. The phase acoustic-pressure sensitivity of the system hydroacoustic signals at 2 Hz reaches -135.81 dB(re rad/ $\mu$ Pa). The sensitivity is 2755.49  $\mu$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , and the signal-to-noise ratio is 43.785 dB. The experimental results of sensor multiplexing prove that the system can demodulate underwater acoustic information at different locations. Furthermore, the phase acoustic-pressure sensitivity of the system increases with the increasing cavity length of the sensor. The system exhibits very good stability, indicating the possibility of extensive applications in high-sensitivity underwater acoustic sensing, very low frequency acoustic detection, deep-sea monitoring, and other fields.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg gratings; phase acoustic-pressure sensitivity; vibration liquid column method; hydrophone; very low frequency

**OCIS codes** 060.3735; 150.4232; 060.2330; 280.4788

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-02-26; 录用日期: 2019-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61775173,61505152)、预研基金(6140243010116QT69001)

\* E-mail: zcm@whut.edu.cn

# 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)水听器作为一种现代高科技水声探测技术,自1985年由Tietjen<sup>[1]</sup>首次提出以来,已经在地震监测、海底探潜、水声成像等领域得到广泛应用<sup>[2-3]</sup>。光纤光栅水听器不仅具备传统光纤水听器探测灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰能力强、易于组网等优势<sup>[4]</sup>,而且体积小、质量轻,在降低光纤水听器结构复杂性的同时确保了系统的可靠性,因此研究光纤光栅水听器具有重要的理论意义和实用价值<sup>[5]</sup>。

按照光路结构,光纤光栅水听器可以分为普通FBG结构、线性腔FBG激光器结构和基于斐索(Fizeau)干涉结构三种类型<sup>[6]</sup>。普通FBG结构光纤光栅水听器是将FBG视为传感单元,当有外界声压作用时,FBG的反射谱会发生偏移,通过解调系统获取其偏移量即可实现水声信号的测量,极大地减小了水听器的结构和阵列体积。但由于可测频率范围较窄,且FBG易受应力与温度的双重影响<sup>[7]</sup>,因此该类型水听器的进一步发展受到限制。线性腔FBG激光水听器以刻写在光纤上的FBG作为激光谐振腔反馈器件,通过检测外界声场作用时激光波长的变化量便可解调出声音信号<sup>[8]</sup>,其优点是结构紧凑、灵敏度高,缺点是对振动比较敏感<sup>[9-11]</sup>,需要进行抗加速度封装。另外,作为传感元件的光纤激光水听器位于系统的湿端,整体性能难以得到保障,水听器阵列复用数目受到限制<sup>[12]</sup>。相比之下,基于Fizeau干涉的光纤光栅水听器利用光纤阵列中任意两个相邻FBG之间的光纤作为传感单元,FBG的作用仅为反射镜<sup>[13]</sup>。当外界声压作用于该类型水听器时,会引起传感光纤长度与折射率的变化<sup>[14]</sup>,继而导致基于Fizeau干涉的光信号相位发生改变,通过相应算法便可检测出水声信号。该结构水听器的湿端为无源器件,熔接点数目大幅减少,极大地简化了水听器阵列结构<sup>[15]</sup>。近年来,随着武汉理工大学使用拉丝塔在线连续动态制备大规模光纤光栅阵列技术的成功,在单根光纤上复用上千个超弱反射光纤光栅(uwFBG)的技术得以实现<sup>[16]</sup>,从而使得大规模复用光纤水听器阵列成为可能。目前,国内已有人采用时分复用技术成功实现超过1000个uwFBG的复用<sup>[17]</sup>。但是,由于该类型水听器传感光纤材料为二氧化硅,其杨氏模量较高,所以水听器的相位声压灵敏度较低<sup>[18]</sup>。Lavrov等<sup>[19]</sup>将有机硅胶RTV655涂覆在传感光纤上,用以

提高水听器的相位声压灵敏度,但是材料昂贵且室温下难以操作,并且增敏后水听器阵列的缆径也会增加,限制了拖曳线阵列在移动平台上的使用。另外,此系统的可测水声信号的频率范围仅为40~495 Hz,不能满足当今深远海水声传感向甚低频段(<10 Hz)发展的需求。

为了能够在不增加水听器阵列缆径的情况下提高其相位声压灵敏度,并实现对甚低频段水声信号的探测,本文提出了一种基于Fizeau干涉的uwFBG水听器阵列实验系统。结果表明,该系统使用反正切解调算法可以同时测量2~2000 Hz频段内不同位置的水声信号,并通过实验验证了增加uwFBG水听器阵列中传感器的腔长不仅可以提高相位声压灵敏度,而且能使阵列缆径降至毫米级别,便于构成大规模传感网络。相比于Lavrov等<sup>[19]</sup>提出的光纤光栅水听器系统,本系统的可测频率范围扩大了9.32倍,相位声压灵敏度提高了7.89 dB,信号频率为10 Hz时的信噪比为43.785 dB。由此可以得出,该系统可以实现对甚低频段水声信号的高灵敏度探测,在震源定位、潜艇应用等领域具有巨大的潜力。

## 2 系统原理

### 2.1 基于Fizeau干涉的uwFBG水听器阵列系统原理

图1为基于Fizeau干涉的uwFBG水听器阵列实验系统原理图。从中心波长为1549.8 nm的窄线宽分布式反馈激光器(DFB Laser)发出的连续光经声光调制器(AOM)调制成脉冲宽度为20 ns、重复频率固定的脉冲光(以保证前一个光脉冲的反射信号不会与下一个输出光脉冲重叠)。增益为22.3 dB的掺铒光纤放大器(EDFA)对AOM输出的脉冲光进行放大,由于EDFA在放大信号的同时也放大了噪声信号,所以在EDFA之后选用中心波长为1549.8 nm的光滤波器滤除噪声信号。接着脉冲光经由环形器1进入到通过拉丝塔在线刻写技术<sup>[20]</sup>制作的任意两个相邻光栅间距固定的uwFBG阵列,其中任一uwFBG的中心波长与光源的中心波长相匹配,为1549.8 nm,3 dB带宽为1.5 nm,反射率范围为-40 dB~-50 dB。相邻uwFBG之间的光纤均为裸纤,直径约为0.8 mm。在该阵列中,任意两个相邻uwFBG及其之间的光纤均构成一个Fizeau干涉uwFBG水听器,任意两个相邻uwFBG之间的光纤长度为该uwFBG水听器传感器的腔长。从uwFBG阵列反射回的脉冲光序列依次通过

环形器 2 进入到由  $3 \times 3$  耦合器和法拉第旋转镜 (FRM) 组成的迈克耳孙干涉仪, 干涉仪两臂的臂长差与 uwFBG 阵列中任意两个相邻光栅之间的间距一致, 以保证进入到干涉仪并被 FRM 反射后的两路光脉冲信号可以在  $3 \times 3$  耦合器处发生干涉。带

宽为 200 MHz 的光电探测器 ( $PD_1 \sim PD_3$ ) 将  $3 \times 3$  耦合器输出的三路干涉信号转换为电信号, 使用最大实时采样率为 250 MSa/s 的高速数据采集卡采集该电信号, 然后上传到计算机并通过 Labview 软件进行数据处理和显示。

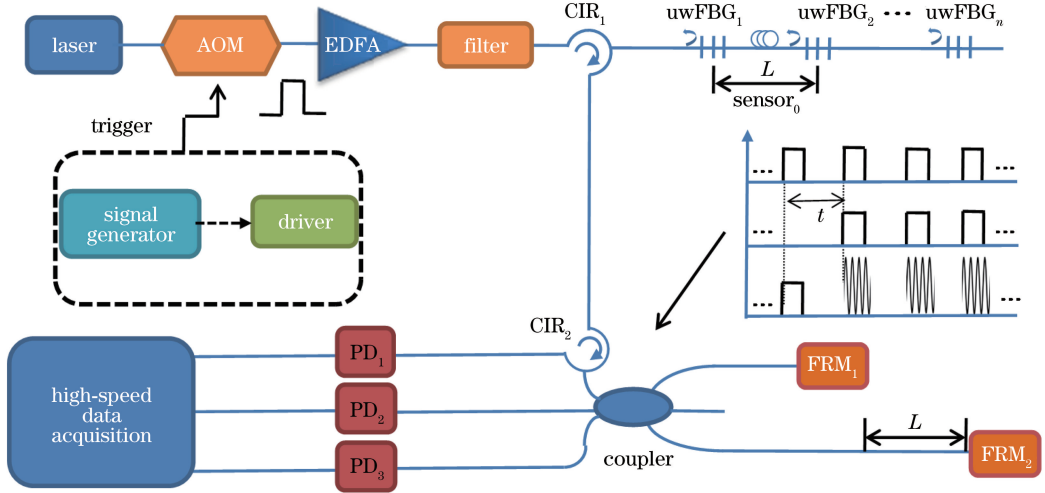


图 1 基于 Fizeau 干涉的 uwFBG 水听器阵列实验系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of uwFBG hydrophone array system based on Fizeau interference

## 2.2 反正切算法解调原理

采用  $3 \times 3$  耦合器解调算法的改进算法, 即反正切解调算法对水声信号进行数据处理。相比于  $3 \times 3$  耦合器解调算法<sup>[21]</sup>, 反正切解调算法不仅能够消除干涉信号中的直流分量, 而且计算过程简单, 同时又能抵消信号中存在的光路噪声和光源噪声, 从而提高系统的信噪比。该算法的上述优点使得其在探测甚低频水声信号时具有独特的优势, 具体原理如下:  $3 \times 3$  耦合器不仅可以视为功率分配器将干涉信号分成三路, 而且在理想的分光比下, 每路输出信号

的相位差均为  $120^\circ$ 。光电转换后三路探测器的输出信号可以表示为<sup>[22]</sup>

$$I_k = D + I \cos[\varphi(t) - (k - 1)\theta], k = 1, 2, 3, \quad (1)$$

式中:  $k$  为光路输出序号;  $D$  为输出信号光强的平均值;  $I$  为输出信号干涉条纹的峰值强度;  $\varphi(t) = \varphi_s(t) + \varphi_n(t) + \varphi_0(t)$ , 其中  $\varphi_s(t)$  表示声压作用导致的相位变化, 即待测水声信号,  $\varphi_n(t)$  表示外界扰动引起的相位差, 即干扰信号,  $\varphi_0(t)$  表示系统的初始相位;  $\theta = 2\pi/3$ 。具体解调过程如图 2 所示。

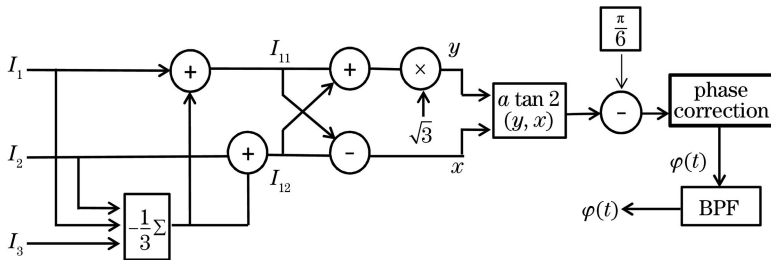


图 2 反正切解调算法原理框图

Fig. 2 Schematic of arc-tangent demodulation algorithm

在图 2 中,  $I_{11} = I \cos[\varphi(t)]$ ,  $I_{12} = I \cos[\varphi(t) - (2\pi/3)]$ ,  $y = \sqrt{3}(I_{11} + I_{12})$ ,  $x = I_{11} - I_{12}$ 。经过解调算法后的输出信号可以表示为

$$V_{out} = \varphi(t) = \varphi_s(t) + \varphi_n(t) + \varphi_0(t). \quad (2)$$

由高通滤波器滤除低频噪声信号  $\varphi_n(t)$  和系统

初始相位  $\varphi_0(t)$  后即可得到待测水声信号  $\varphi_s(t)$ 。

## 2.3 反正切算法相位解调精度仿真分析

$3 \times 3$  耦合器在制造过程中可能存在误差, 导致其三路输出信号的相位差不是  $120^\circ$ 。为了分析该情况对相位解调精度的影响, 通过 LabVIEW 软件

编写反正切解调算法程序,并仿真  $3 \times 3$  耦合器 3 个输出端相位差分别是  $120^\circ$ 、 $119^\circ$ 、 $123^\circ$  情况下的解调结果。设置仿真信号(待解调相位信号  $\varphi(t)$ ) 频率为 100 Hz, 幅度为 1 V, (1) 式中  $D=1$ 、 $I=1$ , 当  $3 \times 3$  耦合器 3 个输出端相位差分别是  $120^\circ$ 、 $119^\circ$ 、 $123^\circ$  时, (1) 式中  $\theta$  依次为  $120\pi/180$ 、 $119\pi/180$ 、 $123\pi/180$ 。图 3 为仿真实验的结果, 从图中可以看出, 当三路信号相位差分别为  $120^\circ$ 、 $119^\circ$ 、 $123^\circ$  时, 待解调相位信号与解调得到的相位信号之差分别为  $0$ 、 $10^{-2}$ 、 $8 \times 10^{-2}$ 。因此在仿真中, 当三路信号相位差为  $119^\circ$  时, 该算法的相位解调精度为 99.9%, 当三路信号相位差为  $123^\circ$  时, 该算法的相位解调精度为 99.2%。另外, 相位解调精度与待解调相位信号幅值有关, 幅值越大, 精度越高。从以上分析可以得出,  $3 \times 3$  耦合器输出端存在的相位偏差确实会影响最终相位解调误差, 但误差较小, 为 0.1% 级别。而且, 可以通过在实际实验中选用制作工艺精良的  $3 \times 3$  耦合器来降低相位解调误差, 从而降低对整个水听器系统造成的解调误差。

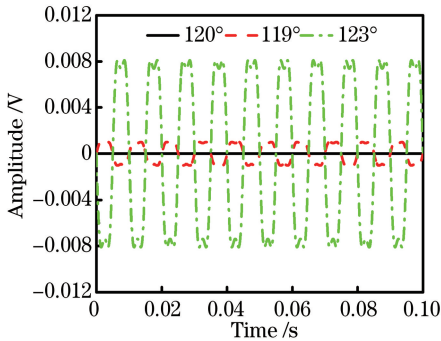


图 3 待解调相位信号与解调得到的相位信号误差曲线

Fig. 3 Error curves of phase signal to be demodulated and demodulated phase signal

## 3 实验及结果分析

### 3.1 实验装置搭建

使用振动液柱法<sup>[23]</sup>对基于 Fizeau 干涉的 uwFBG 水听器阵列进行测试, 实验装置如图 4 所示。液柱容器的高度为 210 mm, 内径为 155 mm, 外径为 170 mm, 液柱容器内水深为 160 mm; 信号发生器产生的正弦信号经功率放大器放大后传输给振动台, 液柱容器固定于振动台中心, 液柱容器内的水会随着振动台的振动而波动。任意选取相邻光栅间距固定的 uwFBG 阵列中的一个 uwFBG 水听器, 以圆环状缠绕并固定在铁架上, 悬空放置于液柱容

器的中心轴上, 其中心距离水面高度为 80 mm, 直径为 60 mm, 满足水听器光纤环直径小于水声信号频率声波波长二分之一的条件<sup>[19]</sup>。uwFBG 水听器的另一端与解调系统相连, 通过解调系统可以得知 uwFBG 水听器对不同频率水声信号的响应情况。另外, 使用示波器读取与振动台相连的加速度计的解调信号幅值, 即可计算得到 uwFBG 水听器的相位声压灵敏度, 具体定义如下<sup>[24]</sup>:

$$M = 20 \lg \frac{U_J \cdot M_a}{U_B \cdot h \cdot \rho \cdot K} - 120, \quad (3)$$

式中:  $U_J$  为 uwFBG 水听器解调所得信号幅值, 单位是 V;  $U_B$  为加速度计解调所得信号幅值, 单位是 V;  $h$  为 uwFBG 水听器距离液柱容器水面的高度;  $\rho$  为水的密度;  $M_a$  为加速度计和功率放大器的合成灵敏度;  $K = \sin(kh)/[kh \cos(kl)]$  为波动修正系数,  $k = 2\pi f/c$ ,  $f$  为待测水声信号频率,  $c$  为声音在水中的传播速度,  $l$  为液柱容器中水的高度。在本实验中,  $h = 0.08$  m,  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>,  $l = 0.16$  m,  $M_a = 0.1$  V · s<sup>2</sup>/m,  $c = 1500$  m/s。

### 3.2 时域与频域信号解调结果

为了验证本系统的时频响应特性, 在相邻光栅间距为 200 m 的 uwFBG 阵列中任取一个 uwFBG 水听器, 使用图 4 所示装置对 2~2000 Hz 范围内的水声信号进行测试, 信号发生器输出幅值为 400 mV, 频率分别为 2, 10, 100, 500, 1000, 2000 Hz 的正弦信号。图 5 和图 6 分别为传感器腔长为 200 m 的 uwFBG 水听器解调所得信号时域和频域图。由于 2~100 Hz 和 100~2000 Hz 频段所用 AOM 脉冲调制频率依次为 2 kHz 和 20 kHz, 所以为便于清晰显示, 图 5 中给出了 2~100 Hz 和 100~2000 Hz 频段在 0.5 s 内和 0.01 s 内的时域解调结果。从图 5 可以看出: 当频率为 10 Hz 时解调得到的时域信号幅值最大, 随着频率的增加, 幅值逐渐降低。这是因为 10 Hz 为本实验所用液柱容器的谐振频率, 所以响应最好, 此时信噪比高达 43.785 dB; 同时, 液柱容器尺寸的限制导致该系统的可测频率范围是 2~2000 Hz, 如果容器尺寸变小或者测试环境变为消声水池, 则本系统可测频率的理论上限能够更高。实验结果表明, 该系统能够正确解调出不同频率的水声信号, 时频响应良好。

### 3.3 uwFBG 水听器的相位声压灵敏度与传感器腔长的关系

为了研究 uwFBG 水听器的传感器腔长和相位声压灵敏度的关系, 使用图 4 所示装置进行如下实

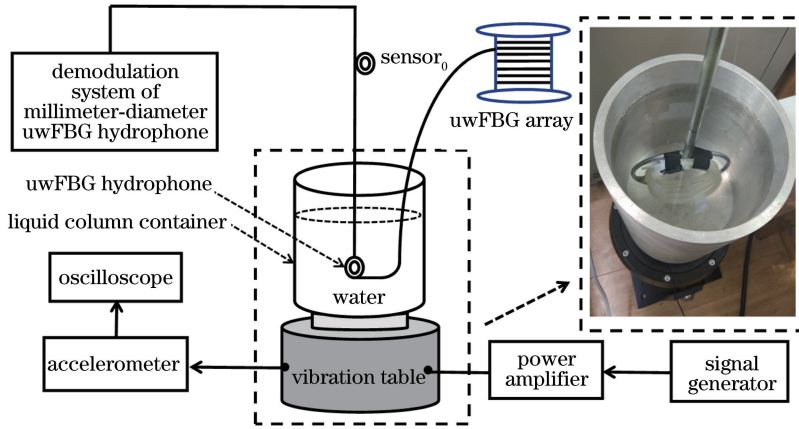


图4 振动液柱法实验装置

Fig. 4 Experimental setup of vibration liquid column method

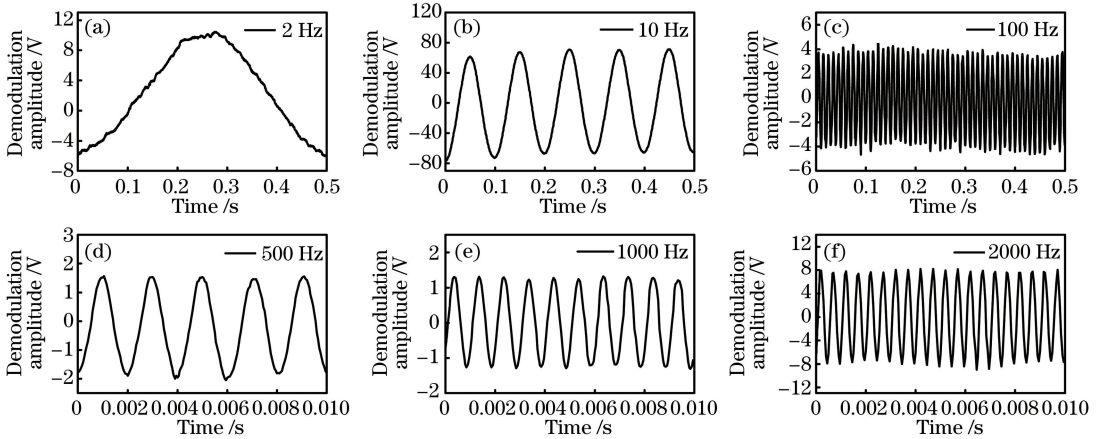


图5 信号发生器频率为 2,10,100,500,1000,2000 Hz 时,传感器腔长为 200 m 的 uwFBG 水听器解调所得水声信号时域图

Fig. 5 Time domain diagrams of underwater acoustic signal demodulated by uwFBG hydrophone with sensor's cavity length of 200 m when frequency of signal generator is 2, 10, 100, 500, 1000, 2000 Hz

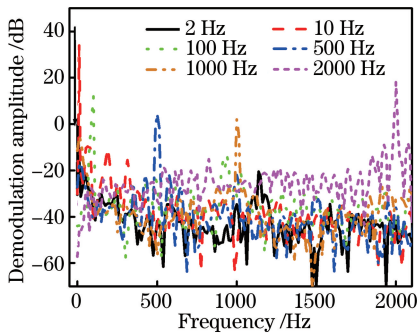


图6 信号发生器频率为 2,10,100,500,1000,2000 Hz 时,传感器腔长为 200 m 的 uwFBG 水听器解调所得水声信号频域图

Fig. 6 Frequency domain diagram of underwater acoustic signal demodulated by the uwFBG hydrophone with sensor's cavity length of 200 m when frequency of signal generator is 2, 10, 100, 500, 1000, 2000 Hz

验:信号发生器输出幅度为 400 mV,频率依次为 2, 10, 50, 100, 500, 1000, 1500, 2000 Hz 的正弦信号,液柱容器内依次放置传感器腔长为 5, 30, 50, 100, 200 m 的单个 uwFBG 水听器。根据(3)式计算得到随着频率的增加不同传感器腔长的 uwFBG 水听器的相位声压灵敏度变化情况,如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当传感器腔长固定时,随着频率的增加,uwFBG 水听器的相位声压灵敏度逐渐降低,这是因为实验所用 uwFBG 水听器是由未经封装的裸纤人工绕制而成的圆环状,具体如图 4 所示。在制作过程中光纤会受到轴向应力和径向应力的影响,导致 uwFBG 水听器对各个频率的响应不同。除此之外,当频率固定时,相位声压灵敏度随着 uwFBG 水听器腔长  $L$  的增加而增加,且满足如下关系:  $20 \times \lg(L_1/L_2) \approx \text{sensitivity}_{L_1} - \text{sensitivity}_{L_2}$  [25],其中 sensitivity 表示相位声压灵敏度。约等于是因为

在实验中需要人工更换不同腔长的 uwFBG 水听器,每次放置的位置可能存在偏差,所以不同腔长的 uwFBG 水听器感受到的水的压强略有不同。以传感器腔长为 100 m 和 200 m 的 uwFBG 水听器为例,当信号频率为 2 Hz 时,两者的相位声压灵敏度分别为  $-142.24, -135.81$  dB (re rad/ $\mu$ Pa),因此可以得出  $20\lg(L_1/L_2) = 20\lg(200/100) = 6.02$ ,  $sensitivity_{200} - sensitivity_{100} = 6.44$ 。另外,无外界信号作用时系统等效噪声压平均值为  $-67$  dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ),而传感器腔长为 200 m 的 uwFBG 水听器在频率为 2 Hz 时的相位声压灵敏度为  $-135.81$  dB (re rad/ $\mu$ Pa),由此可以得知,系统的灵敏度为  $68.81$  dB ( $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ ),即  $2755.49$  ( $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ )。

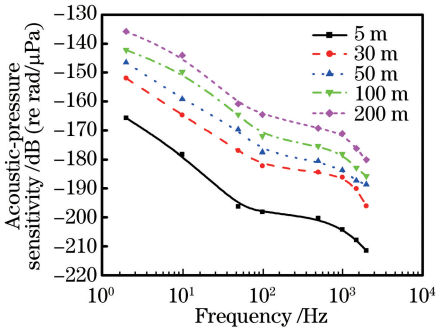


图 7 随着频率的增加,不同传感器腔长的 uwFBG 水听器相位声压灵敏度变化图

Fig. 7 Variation of phase acoustic-pressure sensitivity of uwFBG hydrophone at different sensor cavity lengths with increasing frequency

为了研究相同频率下不同传感器腔长的 uwFBG 水听器的解调稳定性,设置如下实验:信号发生器产生频率为 10 Hz,幅度从 10 mV 依次增加到 500 mV 的正弦信号,图 8 为实验结果。从图中可以看出,当振动信号频率固定时,随着幅度的增加,不同传感器腔长的 uwFBG 水听器解调所得水声信号的相位声压灵敏度基本保持不变。具体数据如下:传感器腔长为 5, 30, 50, 100, 200 m 的单个 uwFBG 水听器在 10 Hz 下解调所得水声信号的相位声压灵敏度稳定在  $-178, -164, -159, -150, -145$  dB (re rad/ $\mu$ Pa) 左右,变化量分别为  $1.98$  dB,  $1.26$  dB,  $1.32$  dB,  $1.88$  dB,  $1.25$  dB,平坦度为  $0.73$  dB,说明实验所用 uwFBG 水听器的稳定性较好。

### 3.4 传感器复用实验

为了验证本系统的复用能力,随机选取相邻光

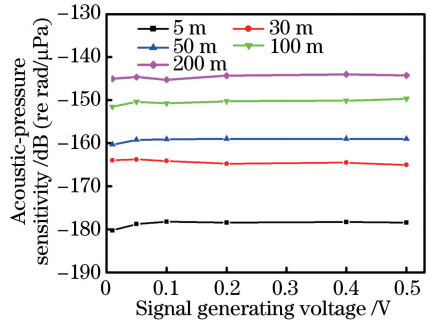


图 8 振动信号频率为 10 Hz,不同幅度(10~500 mV)时,不同传感器腔长的 uwFBG 水听器相位声压灵敏度变化图

Fig. 8 Variation of phase acoustic-pressure sensitivity of uwFBG hydrophone at different sensor cavity lengths when vibration signal frequency is 10 Hz with amplitude of 10-500 mV

栅间距为 50 m、光栅个数为 30 的弱光纤光栅阵列中的 4 个 uwFBG 水听器进行系统复用测试。具体实验设置如下:将 4 个 uwFBG 水听器均以图 4 所示盘绕并编号为 1、2、3、4,按照编号顺序叠放在一起,并固定在液柱容器中,信号发生器产生频率为 10 Hz,幅度为 400 mV 的正弦振动信号,图 9 和图 10 分别为 4 个 uwFBG 水听器检测所得水声信号的时域和频域图。从图中可以看出:4 个 uwFBG 水听器均能很好地检测出 10 Hz 水声信号的时域和频域信息,但编号为 2 和 3 的 uwFBG 水听器由于叠放顺序的原因而位于液柱容器相对中心位置,所受液体压强大致相同,因此解调所得时域信号几乎重叠,幅值分别为  $A_2 = 6.14$  V,  $A_3 = 5.92$  V;而编号为 1 和 4 的 uwFBG 水听器位于液柱容器相对边缘位置,两者所受液体压强几乎相同,且小于 uwFBG 水听器 2 和 3,所以解调所得信号波形相似但幅值小于 uwFBG 水听器 2 和 3,依次为  $A_1 = 4.23$  V,  $A_4 = 4.67$  V。就频谱图而言,可以清晰地看到 4 个 uwFBG 水听器在 10 Hz 处均有主峰值。实验结果表明,本系统能够同时精确解调出多个水声信号的时域和频域信息。

## 4 结 论

基于 Fizeau 干涉,研究了一种可以探测甚低频水声信号的 uwFBG 水听器阵列系统。实验结果表明,该系统通过反正切算法可以实现对 2~2000 Hz 水声信号幅度、频率和相位的同时解调,在信号为 10 Hz 时信噪比为  $43.785$  dB。使用振动液柱法证明了随着 uwFBG 水听器阵列中传感器腔长的增

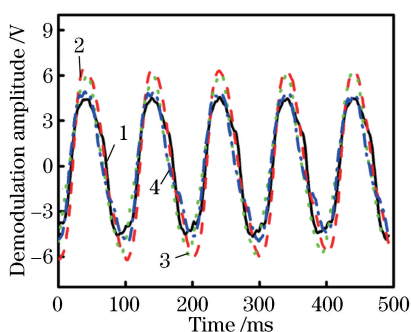


图9 振动信号频率为 10 Hz,幅度为 400 mV 时 4 个 uwFBG 水听器解调所得水声信号时域图

Fig. 9 Time domain diagram of underwater acoustic signal demodulated by four uwFBG hydrophones when vibration signal frequency is 10 Hz with amplitude of 400 mV

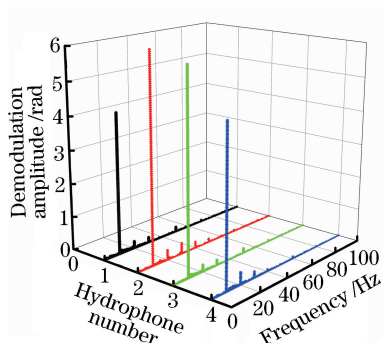


图10 振动信号频率为 10 Hz,幅度为 400 mV 时 4 个 uwFBG 水听器解调所得水声信号频域图

Fig. 10 Frequency domain diagram of underwater acoustic signal demodulated by four uwFBG hydrophones when vibration signal frequency is 10 Hz with amplitude of 400 mV

加,其相位声压灵敏度也会提高且具有很好的稳定性,在甚低频段系统响应良好。当传感器腔长为 200 m 时,频率为 2 Hz 的水声信号的相位声压灵敏度可达  $-135.81$  dB (re rad/ $\mu$ Pa)。采用复用实验验证了基于 uwFBG 的水听器阵列可以同时探测多个位置的水声信息。系统的灵敏度为  $2755.49$  ( $\mu$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ),相比于现有的光纤光栅水听器实验系统<sup>[19]</sup>,本系统的可测频率范围扩大了 9.32 倍,相位声压灵敏度提高了 7.89 dB。由此可以说明本系统能够实现甚低频段、宽频带、高灵敏度水声信号的探测,为水下精准定位和大规模水声传感提供了一种有效的方法。

## 参 考 文 献

[1] Tietjen B W. Bias compensated optical grating

hydrophone[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 77(2): 786.

[2] Huang S Y, Jin X F, Zhang J, *et al.* An optical fiber hydrophone using equivalent phase shift fiber Bragg grating for underwater acoustic measurement [J]. Photonic Sensors, 2011, 1(3): 289-294.

[3] Yang J, Zhao Y, Ni X J. Development of novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1575-1579.

杨剑, 赵勇, 倪行洁. 新型光纤光栅水声传感器的研究 [J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1575-1579.

[4] Tang B, Huang J B, Gu H C. Low acceleration sensitivity DFB fiber laser hydrophone [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0310001.

唐波, 黄俊斌, 顾宏灿. 低加速度灵敏度的分布反馈式光纤激光水听器研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0310001.

[5] Takahashi N, Yoshimura K, Takahashi S, *et al.* Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating [J]. Ultrasonics, 2000, 38: 581-585.

[6] 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: 10-15.

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: 10-15.

[7] Zhang W T, Liu Y L, Li F. Fiber Bragg grating hydrophone with high sensitivity [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(9): 631-633.

[8] 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.

[9] Foster S, Tikhomirov A, van Velzen J. Towards a high performance fiber laser hydrophone [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1335-1342.

[10] Zhang W T, Li F. Recent progresses in fiber laser hydrophone [J]. Journal of Integration Technology, 2015, 4(6): 1-14.

张文涛, 李芳. 光纤激光水听器研究进展 [J]. 集成技术, 2015, 4(6): 1-14.

[11] Zhou C M, Pang Y D, Fan D. 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*, 2018: 1-10.
- [12] Foster S, Tikhomirov A, Englund M, *et al.* A 16 channel fibre laser sensor array [C]//ACOFT/AOS 2006 - Australian Conference on Optical Fibre Technology/Australian Optical Society, July 10-13, 2006, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE, 2006: 40-42.
- [13] Li Y, Qian L, Zhou C M, *et al.* Multiple-octave-spanning vibration sensing based on simultaneous vector demodulation of 499 Fizeau interference signals from identical ultra-weak fiber Bragg gratings over 2.5 km[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 210.
- [14] Tosi D. Review of chirped fiber Bragg grating (CFBG) fiber-optic sensors and their applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2147.
- [15] Campopiano S, Cutolo A, Cusano A, *et al.* Underwater acoustic sensors based on fiber Bragg gratings[J]. *Sensors*, 2009, 9(6): 4446-4454.
- [16] Guo H Y, Qian L, Zhou C M, *et al.* Crosstalk and ghost gratings in a large-scale weak fiber Bragg grating array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 2032-2036.
- [17] Liu S, Han X Y, Xiong Y C, *et al.* Distributed vibration detection system based on weak fiber Bragg grating array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0210001.  
刘胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0210001.
- [18] Hill D J, Cranch G A. Gain in hydrostatic pressure sensitivity of coated fibre Bragg grating [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(15): 1268-1269.
- [19] 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.
- [20] Guo H Y, Tang J G, Li X F, *et al.* On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 030602.
- [21] Mao X, Huang J B, Gu H C. Effect of relaxation oscillation on digital demodulation of  $3 \times 3$  couplers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (10): 1010001.  
毛欣, 黄俊斌, 顾宏灿. 弛豫振荡对  $3 \times 3$  耦合器数字解调的影响 [J]. *中国激光*, 2017, 44 (10): 1010001.
- [22] Wang C, Shang Y, Liu X H, *et al.* Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [23] Gordienko V A, Gordienko E L, Dryndin A V, *et al.* Absolute pressure calibration of acoustic receivers in a vibrating column of liquid [J]. *Acoustical Physics*, 1994, 40(2): 219-222.
- [24] Takahashi S, Kikuchi T, Ohkura K. Measurements of acoustic sensitivity of fibers used for optical fiber hydrophones [J]. *Acta Acustica United With Acustica*, 1986, 60(1): 75-77.
- [25] Wang Y M, Gong J M, Dong B, *et al.* A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(17): 2751-2756.